

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA AGRÍCOLA

**USO DA IRRIGAÇÃO SUBSUPERFICIAL COM EFLUENTE
DE ESGOTO DOMÉSTICO EM ÁREA CULTIVADA COM
CANA-DE-AÇÚCAR**

ALLAN CHARLLES MENDES DE SOUSA

CAMPINAS
FEVEREIRO DE 2012

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA AGRÍCOLA

**USO DA IRRIGAÇÃO SUBSUPERFICIAL COM EFLUENTE
DE ESGOTO DOMÉSTICO EM ÁREA CULTIVADA COM
CANA-DE-AÇÚCAR**

Dissertação de Mestrado submetida à
banca examinadora para a obtenção do
título de Mestre em Engenharia Agrícola,
na área de concentração de Água e Solo.

ALLAN CHARLLES MENDES DE SOUSA

Orientador: Prof. Dr. Edson Eiji Matsura

CAMPINAS

FEVEREIRO DE 2012

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA E ARQUITETURA - BAE - UNICAMP

Sousa, Allan Charlles Mendes de

So85u Uso da irrigação subsuperficial com efluente de esgoto doméstico em
área cultivada com cana-de-açúcar / Allan Charlles Mendes de Sousa. --
Campinas, SP: [s.n.], 2012.

Orientador: Edson Eiji Matsura.

Dissertação de Mestrado - Universidade Estadual de Campinas,
Faculdade de Engenharia Agrícola.

1. Águas residuais. 2. Irrigação. 3. Solos - Fertilidade. 4. Cana-de-
açúcar. 5. Águas - Residuais de irrigação. I. Matsura, Edson Eiji. II.
Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Agrícola.
III. Título.

Título em Inglês: Use of subsurface irrigation with domestic
sewage effluent in area cultivated with sugar cane

Palavras-chave em Inglês: Wastewater, Irrigation, Soils - Fertilidade, Cane sugar,
Water - Wastewater irrigation

Área de concentração: Água e solo

Titulação: Mestre em Engenharia Agrícola

Banca examinadora: Zigomar Menezes de Souza, Délvio Sandri

Data da defesa: 29-02-2012

Programa de Pós Graduação: Engenharia Agrícola

Este exemplar corresponde à redação final da **Dissertação de Mestrado** defendida por **Allan Charles Mendes de Sousa**, aprovado pela Comissão Julgadora em 29 de fevereiro de 2012, na Faculdade de Engenharia Agrícola da Universidade Estadual de Campinas.

FEAGRI



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



Prof. Dr. Delvio Sandri - Membro Titular
UnB



Prof. Dr. Zigomar Menezes de Souza – Membro Titular
Feagri/Unicamp

Faculdade de Engenharia Agrícola
Unicamp

DEDICATÓRIA

Os esforços que vocês fazem com tanta compreensão, amor e bondade me enchem de gratidão.

Carlos Alberto de Sousa (Pai)

Maria Silene Mendes de Sousa (Mãe)

Maria Aparecida Mendes de Sousa (Irmã)

A vocês, dedico.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Sr. Carlos Alberto de Sousa e D. Maria Silene Mendes de Sousa, pelo amor, carinho, sustento, educação e exemplos de dignidade que me são dados.

À minha irmã, Maria Aparecida Mendes de Sousa, pelo amor fraterno que sempre esteve a minha disposição.

A orientação acadêmica e pessoal do Dr. Edson Eiji Matsura.

Aos técnicos laboratoristas Célia (FEAGRI/UNICAMP), Júnior (FEAGRI/UNICAMP) e Gustavo (CENA/USP).

Ao grupo estudos “Uso de efluentes de esgotos tratados por processos biológicos em solos agrícolas” representado pelos professores Dr. Adolpho José Melfi (ESALQ/USP) e Dr. Célia Regina Montes (CENA/USP).

Aos amigos Daniel, Denize, Fernando, Fran, Eduardo, Eveline, Glenda, Guilherme, Gustavo, Ivo, Laércio, Léo, Luiz, Magnus, Marcelo, Natália, Ronny, Tamara e Thomaz pelas contribuições dadas ao trabalho.

Aos professores e funcionários do curso de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola da Universidade Estadual de Campinas.

Aos irmãos da Igreja Presbiteriana de Barão Geraldo - IPBG.

Aos amigos de república.

A todos aqueles que de alguma forma contribuíram para a concretização do presente trabalho.

Obrigado!

“Todas as graças da mente e do coração se escapam quando o propósito não é firme”.

William Shakespeare (1564 - 1616)

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	x
LISTA DE TABELAS	xii
RESUMO	xiv
ABSTRACT	xv
1. INTRODUÇÃO.....	1
2. OBJETIVOS.....	3
2.1 Geral.....	3
2.2 Específicos	3
3. REVISÃO DE LITERATURA	4
3.1 A importância cultura da cana-de-açúcar	4
3.2 Sistema radicular da cana-de-açúcar.....	5
3.3 Sistema Integrado para Análise de Raízes e Cobertura do Solo - SIARCS 3.0.....	8
3.4 Uso de efluente de esgoto doméstico na irrigação agrícola.....	10
3.5 Influência da irrigação com efluente de esgoto doméstico nos atributos químicos do solo	11
3.6 Influência da irrigação com efluente de esgoto doméstico nos atributos físicos do solo	13
3.7 Cana-de-açúcar irrigada com efluente de esgoto doméstico.....	15
4. MATERIAL E MÉTODOS.....	17
4.1 Localização do experimento	17
4.2 Captação do efluente de esgoto (Estação de Tratamento de Esgoto - ETE).....	18
4.3 Delineamento experimental e tratamentos.....	20
4.4 Variedade da cana-de-açúcar utilizada, adubação e irrigação realizada.....	21
4.5 Avaliação do sistema radicular da cultura	23
4.6 Determinação da produtividade da cultura	26
4.7 Avaliações químicas e físicas do solo.....	26
4.7.1 Coleta de solo para análises químicas e físicas	26
4.7.2 Caracterização física da área experimental	27
4.7.3 Caracterização química da área experimental	28

4.8 Análise estatística dos dados.....	28
4.9 Confecção dos mapas das variáveis do solo	28
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	29
5.1 Influência da irrigação com efluente de esgoto doméstico (EED) no desenvolvimento do sistema radicular da cana-de-açúcar	29
5.1.1 Área de raiz	29
5.1.2 Diâmetro de raiz.....	33
5.1.3 Comprimento de raiz	35
5.1.4 Profundidade efetiva do sistema radicular com base na distribuição acumulada do comprimento de raiz	38
5.1.5 Volume de raiz.....	40
5.2 Influência da irrigação com efluente de esgoto doméstico (EED) nos atributos químicos do solo.....	43
5.2.1 Acidez ativa (pH).....	43
5.2.2 Acidez trocável (Al^{3+}) e acidez potencial ($Al^{3+}+H^{+}$).....	46
5.2.3 Cálcio	51
5.2.4 Magnésio.....	54
5.2.5 Nitrogênio Total (NT).....	57
5.2.6 Fósforo	60
5.2.7 Potássio	63
5.2.8 Sódio	66
5.2.9 Carbono Orgânico Total (COT).....	69
5.2.10 Saturação por bases (V %).....	72
5.2.11 CTC.....	74
5.3 Influência da irrigação com efluente de esgoto doméstico (EED) nos atributos físicos do solo.....	76
5.3.1 Porcentagem de argila dispersa em água (ADA).....	76
5.3.2 Densidade do solo	79
5.3.3 Macroporosidade e Microporosidade do solo.....	82
5.3.4 Diâmetro médio ponderado (DMP) e porcentagem de agregados maior do que 2 mm (AGRE%).....	86
5.4 Resistência do solo à penetração	91

5.5 Produtividade	94
6. CONCLUSÕES	97
7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	98

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Estágio de desenvolvimento Inicial de brotação e perfilhamento da cana de açúcar. .6	
Figura 2. Área experimental e estação de tratamento de esgoto do bairro CECAP em Piracicaba-SP.....17	17
Figura 3. Esquema de constituição da parcela adotada no experimento.21	21
Figura 4. Distribuição pluviométrica registrada durante os quatros ciclos da cultura em comparação com a série histórica do município de Piracicaba-SP.22	22
Figura 5. Fotografia da trincheira (a) e sub-fotografias (b) utilizadas para a avaliação do sistema radicular.24	24
Figura 6. Etapas do procedimento de avaliação das imagens no software 20/20 2.2 (Etapa 1) e no software 3.0 (Etapas 2, 3 e 4).25	25
Figura 7. Vista frontal do perfil da trincheira e localização dos pontos de amostragem deformada e indeformada de solo.....26	26
Figura 8. Distribuição da área de raiz (cm ²) no perfil do solo, influenciada pela irrigação com efluente de esgoto doméstico nos diferentes tratamentos.....32	32
Figura 9. Distribuição do diâmetro de raiz (cm) no perfil do solo, influenciada pela irrigação com efluente de esgoto doméstico nos diferentes tratamentos.....34	34
Figura 10. Distribuição do comprimento de raiz (cm) no perfil do solo, influenciada pela irrigação com efluente de esgoto doméstico nos diferentes tratamentos.....37	37
Figura 11. Percentual acumulado do comprimento de raízes de cana-de-açúcar influenciada pela irrigação com efluente de esgoto doméstico nos diferentes tratamentos.....39	39
Figura 12. Distribuição do volume de raiz (cm ³) no perfil do solo, influenciada pela irrigação com efluente de esgoto doméstico nos diferentes tratamentos.....42	42
Figura 13. Distribuição dos valores de pH no perfil do solo influenciada pela irrigação com efluente de esgoto doméstico nos diferentes tratamentos.....45	45
Figura 14. Distribuição dos teores de Al ³⁺ no perfil do solo, influenciada pela irrigação com efluente de esgoto doméstico nos diferentes tratamentos.....49	49
Figura 15. Distribuição dos teores de Al ³⁺ + H ⁺ no perfil do solo influenciada pela irrigação com efluente de esgoto doméstico nos diferentes tratamentos.....50	50
Figura 16. Distribuição dos teores de Ca ²⁺ no perfil do solo influenciado pela irrigação com efluente de esgoto doméstico nos diferentes tratamentos.....53	53
Figura 17. Distribuição dos teores de Mg ²⁺ no perfil do solo influenciado pela irrigação com efluente de esgoto doméstico nos diferentes tratamentos.....56	56
Figura 18. Distribuição dos teores de N no perfil do solo influenciados pela irrigação com efluente de esgoto doméstico nos diferentes tratamentos.....59	59
Figura 19. Distribuição dos teores de P no perfil do solo influenciada pela irrigação com efluente de esgoto doméstico nos diferentes tratamentos.....62	62
Figura 20. Distribuição dos teores de K ⁺ no perfil do solo influenciado pela irrigação com efluente de esgoto doméstico nos diferentes tratamentos.....65	65

Figura 21. Distribuição dos teores de Na ⁺ no perfil do solo influenciado pela irrigação com efluente de esgoto doméstico nos diferentes tratamentos.....	68
Figura 22. Distribuição dos teores de COT no perfil do solo influenciada pela irrigação com efluente de esgoto doméstico nos diferentes tratamentos.....	71
Figura 23. Distribuição da saturação por bases (V%) no perfil do solo, influenciada pela irrigação com efluente de esgoto doméstico nos diferentes tratamentos.....	73
Figura 24. Distribuição da CTC no perfil do solo influenciada pela irrigação com efluente de esgoto doméstico nos diferentes tratamentos.	75
Figura 25. Porcentagem de argila no perfil do solo de todos os tratamentos estudados.....	77
Figura 26. Argila dispersa em água influenciada pela irrigação da cana-de-açúcar com efluente de esgoto doméstico nos diferentes tratamentos.....	78
Figura 27. Distribuição da densidade no perfil do solo influenciada pela irrigação com efluente de esgoto doméstico nos diferentes tratamentos.....	81
Figura 28. Distribuição da macroporosidade (cm ³ cm ⁻³) no perfil do solo influenciada pela irrigação com efluente de esgoto doméstico nos diferentes tratamentos.....	84
Figura 29. Distribuição da microporosidade (cm ³ cm ⁻³) no perfil do solo influenciada pela irrigação com efluente de esgoto doméstico nos diferentes tratamentos.....	85
Figura 30. Distribuição do diâmetro médio ponderado de agregados (mm) no perfil do solo, influenciado pela irrigação com efluente de esgoto doméstico nos diferentes tratamentos.	89
Figura 31. Distribuição da porcentagem de agregados maior que 2 mm no perfil do solo, influenciada pela irrigação com efluente de esgoto doméstico nos diferentes tratamentos.	90
Figura 32. Resistência do solo a penetração vertical do solo influenciada pela irrigação com efluente de esgoto doméstico nos diferentes tratamentos.....	93
Figura 33. Produtividade da cultura ocorrida nas safras 2006-2007, 2007-2008 e 2008-2009. Médias seguidas pelas mesmas letras não diferem estatisticamente pelo teste Tukey (P<0,05).	96

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Caracterização química do solo antes da implantação do experimento.	18
Tabela 2. Caracterização química do efluente de esgoto doméstico in natura-(EEDI) e do efluente de esgoto doméstico tratado com hipoclorito de sódio (EEDT) (GOMES et al., 2009).	19
Tabela 3. Tratamentos estudados no experimento.....	20
Tabela 4. Valores das lâminas de irrigação aplicadas na 1º, 2º e 3º soca da cana-de-açúcar...23	
Tabela 5. Área de raiz (cm ²) de cana-de-açúcar, por quadricula de 0,056 m ² , influenciada pela irrigação com efluente de esgoto doméstico.....	29
Tabela 6. Diâmetro de raiz (cm) de cana-de-açúcar, por quadricula de 0,056 m ² , influenciado pela irrigação com efluente de esgoto doméstico.	33
Tabela 7. Comprimento de raiz (cm) de cana-de-açúcar, por quadricula de 0,056 m ² , influenciado pela irrigação com efluente de esgoto doméstico.....	35
Tabela 8. Volume de raiz (m ³) de cana-de-açúcar, por quadricula de 0,056 m ² , influenciado pela irrigação com efluente de esgoto doméstico.....	40
Tabela 9. pH solo influenciado pela irrigação com efluente de esgoto doméstico	43
Tabela 10. Teor de Al ³⁺ (mmol _c kg ⁻¹) do solo influenciado pela irrigação com efluente de esgoto doméstico.	46
Tabela 11. Al ³⁺ +H ⁺ (mmol _c kg ⁻¹) do solo influenciada pela irrigação com efluente de esgoto doméstico.....	47
Tabela 12. Teor de cálcio do solo (mmol _c kg ⁻¹) influenciado pela irrigação com efluente de esgoto doméstico.	51
Tabela 13. Teor de magnésio do solo (mmol _c kg ⁻¹) influenciado pela irrigação com efluente de esgoto doméstico	54
Tabela 14. Teor de Nitrogênio total do solo (g Kg ⁻¹) influenciado pela irrigação com efluente de esgoto doméstico.	57
Tabela 15. Teor de fósforo do solo (mg kg ⁻¹) influenciado pela irrigação com efluente de esgoto doméstico.	60
Tabela 16. Teor de potássio do solo (mmol _c kg ⁻¹) nfluenciado pela irrigação com efluente de esgoto doméstico.	63
Tabela 17. Teor de sódio do solo (mmol _c kg ⁻¹) influenciado pela irrigação com efluente de esgoto doméstico.	66
Tabela 18. Carbono orgânico total do solo (g kg ⁻¹) influenciado pela irrigação com efluente de esgoto doméstico.	69
Tabela 19. Saturação por bases (%) do solo influenciada pela irrigação com efluente de esgoto doméstico.....	72
Tabela 20. CTC do solo (mmol _c kg ⁻¹) influenciada pela irrigação com efluente de esgoto doméstico.....	74

Tabela 21. Densidade do solo (g cm^{-3}) influenciada pela irrigação com efluente de esgoto doméstico.....	79
Tabela 22. Macroporosidade ($\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$) e Microporosidade ($\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$) do solo influenciadas pela irrigação com efluente de esgoto doméstico.....	82
Tabela 23. Diâmetro Médio Ponderado – DMP (mm) e Porcentagem de Agregados maior do que 2 mm – AGRE (%) influenciados pela irrigação com efluente de esgoto doméstico.	87
Tabela 24. Teor de água do solo (Kg Kg^{-1}) de todos os tratamentos estudados.....	91
Tabela 25. Resistência a penetração do solo nas diversas profundidades estudadas.	92

RESUMO

Uso da irrigação subsuperficial com efluente de esgoto doméstico em área cultivada com cana-de-açúcar

O uso de efluente de esgoto doméstico (EED) apresenta-se como uma alternativa na irrigação de culturas economicamente exploradas servindo como fonte extra de água e de nutrientes essenciais ao desenvolvimento das plantas. O presente trabalho teve como objetivo avaliar as alterações físicas e químicas do solo, o desenvolvimento radicular e a produtividade da cana-de-açúcar irrigada com EED, tratado por lagoa de estabilização e aplicado por gotejamento subsuperficial. O experimento foi realizado na cidade de Piracicaba-SP (22° 46' 24" S, 47° 36' 32" W) numa área cultivada com cana-de-açúcar, situada ao lado da estação de tratamento de esgoto do bairro CECAP. O delineamento experimental adotado foi o de blocos dispostos no esquema de faixas, com três repetições e seis tratamentos; TSQ (cana-de-açúcar cultivada em sequeiro), T50% (cana-de-açúcar irrigada com EED atendendo 50% da avapotranspiração – ETP), T100% (cana-de-açúcar irrigada com EED atendendo 100% da ETP), T200% (cana-de-açúcar irrigada com EED atendendo 200% da ETP), T100Herb (cana-de-açúcar irrigada com EED acrescido de herbicida atendendo 100% da ETP) e T100Cl (cana-de-açúcar irrigada com EED acrescido de hipoclorito de sódio atendendo 100% da ETP). A irrigação com EED proporcionou um menor desenvolvimento de raízes, tanto lateral como em profundidade, quando comparado ao TSQ. A irrigação promoveu um incremento de nutrientes no solo, principalmente no tratamento que aplicou a maior lâmina (T200%). Nesse tratamento, observou-se um maior aporte de Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ e N, reduções significativas nos teores de Al^{3+} e H^+ e alto potencial para o fornecimento de P ao solo. Além disso, não foram observados problemas relacionados à qualidade física do solo devido ao fornecimento de Na^+ pelo EED. O uso de EED proporcionou incrementos significativos na produtividade da cultura.

Palavras-Chaves: Esgoto doméstico; água residuária; irrigação subsuperficial; fertilidade do solo; física do solo; cana-de-açúcar; raízes.

ABSTRACT

Use of subsurface irrigation with domestic sewage effluent in area cultivated with sugar cane

The use of domestic sewage effluent (DSE) is presented as an alternative for irrigation of economically exploited crops, functioning as an extra source of water, and essential nutrients for plant development. The present work aimed to evaluate the physical and chemical changes of soil, root development, and productivity of sugar cane irrigated with DSE, that was treated using stabilization, and was applied by a subsurface drip irrigation system. The experiment was done in Piracicaba-SP (22 ° 46 '24 "S, 47 ° 36' 32" W) on an area of sugar cane situated next to the sewage treatment station in the district of CECAP. The experimental model was arranged in block of tracks with three repetitions and six treatments; TSQ (cane sugar grown on rainfed), T50% (sugar cane irrigated with DSE serving 50% the evaporation and transpiration - ETP), T100% (sugar cane irrigated with DSE serving 100% of the ETP), T200% (sugar cane irrigated with DSE serving 200% of the ETP), T100Herb (sugar cane irrigated with DSE and in addition herbicide serving 100% of ETP) and T100Cl (sugar cane irrigated with DSE plus sodium hypochlorite serving 100% of the ETP). Irrigation with DSE afforded a lower root development, both laterally and in depth, as compared to TSQ. Irrigation promoted an increase of nutrients in the soil, especially in the treatment that applied to the highest water depth (T200%). In this treatment, it was observed a larger contribution of Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ and N, significant reductions in the levels of Al^{3+} and H^+ and high efficiency on the supply of P to the soil. In addition, no problems were observed related to the physical quality of the ground due to the provision of Na^+ by DSE. The use of DSE provided significant increases in crop productivity.

Keywords: Sewage; Wastewater; Subsurface irrigation; soil fertility; soil physics; sugarcane; roots.

1. INTRODUÇÃO

Tem-se intensificado o uso de solos irrigados na agricultura brasileira com o objetivo de aumentar a produtividade das áreas cultivadas, além de contribuir com a constante produção e fornecimento de alimentos, principalmente em regiões onde há a ocorrência de longos períodos com escassez de chuva.

No agronegócio canavieiro, a prática supracitada cresceu nos últimos anos, em especial, por conta dos interesses mundiais pela produção de etanol, o que permitiu que essa cultura passasse a ser vista como um novo “combustível”, isso, por conta do seu alto potencial energético. Tal situação incentiva tanto os produtores como os órgãos de pesquisas a buscarem alternativas agrícolas com menores custos de serviços e que contribuam para obtenção satisfatória dos produtos finais como o álcool e açúcar.

No cenário mundial, o Brasil ocupa a primeira posição do ranking entre os principais produtores de cana-de-açúcar. Segundo o levantamento estatístico realizado pelo MAPA (2010), a produção nacional registrada na safra 2009/2010 foi da ordem de 603.056.960 toneladas, sendo o estado de São Paulo o maior produtor brasileiro, responsável por 60,13% da cana colhida.

Além das condições climáticas favoráveis ao cultivo de cana-de-açúcar no Brasil, essa realidade só foi possível de ser alcançada por conta de programas de incentivos governamentais oferecidos aos produtores como, por exemplo, os extintos, Proálcool (Programa Nacional do Álcool) e Planalsulcar (Programa Nacional de Melhoramento da Cana-de-açúcar), além do uso de tecnologias e práticas agrônômicas aplicáveis ao setor canavieiro, como: o uso de adubos, o melhoramento genético e irrigação.

Uma alternativa que surge de forma bastante promissora, não só em cultivo de cana-de-açúcar, mas também, de outras culturas exploradas economicamente, é o uso de efluente de esgoto doméstico (EED) oriundo de lagoa de estabilização para ser utilizado na irrigação agrícola, pois além de funcionar como fonte extra de água, funciona ainda, como fonte de nutrientes essenciais ao desenvolvimento das culturas, e, em determinadas situações pode substituir parcial ou totalmente a necessidade de adubação química comercial.

A lagoa de estabilização do Bairro CECAP, situado na Cidade de Piracicaba-SP, é responsável por atender uma população de 7000 habitantes e tratar $10,6 \text{ L s}^{-1}$ de esgoto

doméstico (GOMES et al., 2009). Sua localização, ao lado de uma área de cultivo de cana-de-açúcar, pertencente ao grupo COSAN, favorece o uso do efluente na irrigação dessa cultura e diminui os riscos de contaminação dos cursos de água a céu aberto, uma vez que o uso de efluente na irrigação agrícola reduz o volume de esgoto lançado nos rios e lagos.

Ressalta-se que o mau gerenciamento do uso de EED na irrigação pode fornecer elevadas concentrações de Na^+ ao solo, oriundo dos resíduos de sabões, desinfetantes, detergentes e derivados de uso bastante comum nas atividades domésticas. Tal fornecimento pode causar a redução da afinidade entre as partículas do solo e ocasionar a dispersão entre os minerais, o que poderá acarretar no translocamento de argila no perfil do solo e sua acomodação nos espaços porosos livres resultando no aumento da densidade, na redução da infiltração de água no solo e do índice de estabilidade de agregados (RAIJ, 1991; RENGASAMY e OLSSON, 1991).

Esse problema pode influenciar diretamente no desenvolvimento de raízes, principalmente no que diz respeito ao crescimento e sua arquitetura, visto que o aumento da resistência do solo impede e, ou dificulta o desenvolvimento do sistema radicular, que muitas vezes não é avaliado por conta da complexidade requerida em seus estudos, que vão desde as coletas, armazenamento e análises das amostras. Desta forma, a avaliação do sistema radicular pode funcionar como indicador de qualidade do manejo adotado.

A hipótese acreditada nessa pesquisa é de que o EED tratado por lagoa de estabilização do tipo australiano e aplicado por sistema de irrigação localizada subsuperficial na cultura da cana-de-açúcar, promove a melhoria dos atributos químicos do solo, a redução da qualidade física e um aumento na produtividade da cultura, quando comparado ao sistema de cultivo em sequeiro. Além disso, reduz o desenvolvimento do sistema radicular em profundidades maiores.

2. OBJETIVOS

2.1 Geral

Avaliar a qualidade química e física do solo, o comportamento do sistema radicular e a produtividade da cana-de-açúcar irrigada com efluente de esgoto doméstico aplicado por sistema de irrigação localizada do tipo gotejamento subsuperficial.

2.2 Específicos

Estudar os atributos químicos e físicos do solo influenciados pela irrigação com efluente de esgoto doméstico em cultivo de cana-de-açúcar.

Determinar o comprimento, o diâmetro, a área, o volume e a profundidade efetiva do sistema radicular da cana-de-açúcar cultivada em sequeiro e fertirrigada com efluente de esgoto doméstico aplicado por gotejamento subsuperficial por diferentes lâminas de irrigação.

3. REVISÃO DE LITERATURA

3.1 A importância cultural da cana-de-açúcar

A cana-de-açúcar é originária da Nova-Guiné e foi introduzida pelos Árabes, primeiramente, na Ásia e no continente Europeu, na época das invasões. Porém, foi na América que essa cultura encontrou as melhores condições para o seu desenvolvimento e mais tarde deu a esse continente o título de maior produtor de cana-de-açúcar do mundo (MOZAMBANI et al., 2006). No Brasil, a cultura foi introduzida pelos portugueses, no período colonial, no século XVI, logo após a descoberta.

Até pouco tempo, a classificação taxonômica da cana-de-açúcar a colocava como um membro pertencente à família das gramíneas, no entanto, com a realização de novos estudos botânicos tal classificação mudou, e, essa cultura passou a pertencer à família *Poaceae* (SCARPARI e BEUCLAIR, 2008).

Como a maioria das Poáceas, o primeiro composto orgânico formado pela cana-de-açúcar apresenta quatro carbonos na sua constituição, o que lhe atribui à classificação de planta C4. Tal cultura é bastante adaptada às condições tropicais de alta intensidade luminosa, temperaturas elevadas e relativos períodos de estresse hídrico, sendo que, apenas 30% do seu peso constitui-se de matéria seca e 70% é representado por água (SEGATO et al., 2006).

A atividade canavieira apresenta grande importância para a economia, considerando-se as inúmeras oportunidades de empregos diretos e indiretos que são ofertados ao longo do processo produtivo da cultura e as diversas atividades relacionadas ao agronegócio sucroalcooleiro, que vão desde o planejamento até a comercialização de seus derivados (CUENCA e NAZARIO, 2005).

No mercado internacional, a representatividade do produto brasileiro aumentou de forma expressiva, principalmente após o ano safra 1995/1996, onde o país tornou-se o principal produtor e exportador de açúcar (ALVES e BACCHI, 2004). Atualmente o Brasil é o maior produtor mundial de cana-de-açúcar com uma área cultivada de 7,9 milhões de hectares e uma produção de 603 milhões de toneladas, sendo o estado de São Paulo o maior produtor brasileiro com 63,3% da área total colhida (MAPA, 2010).

A preocupação com a qualidade do meio ambiente também contribuiu para o aumento da produção da cultura no Brasil, pois a pressão exercida para a redução do uso de

combustíveis fósseis, os quais são os grandes responsáveis pela emissão de gases poluentes, estimulou o país a desenvolver tecnologias que se utilizam de fontes de energias renováveis (MAULE et al., 2001).

Os produtos derivados de cana-de-açúcar representam 11% de toda a importação brasileira (FUMBIO, 2010). Estimativas recentes indicam que os mercados potenciais (externo e interno) para o etanol e o açúcar brasileiro usarão, em 2012, cerca de 685 milhões de toneladas de cana, sendo que, para isso, no centro-sul serão utilizadas 77 novas unidades de produção e investimentos na ordem de US\$ 14,6 bilhões. Em 2013 cerca de 60% da cana será destinada ao mercado interno, no total além do açúcar serão produzidos 35,7 milhões de metros cúbicos de etanol (CARVALHO, 2006).

A crescente demanda pelos produtos derivados da cana-de-açúcar pressiona os produtores a um aumento da produção em um curto prazo. Porém, a expansão de áreas cultivadas não se apresenta como a melhor das alternativas, tendo em vista algumas regiões já saturadas por essa cultura (DALRI e CRUZ, 2002), havendo, para isso, a necessidade de se aumentar a produção vertical (ton ha^{-1}).

Segundo Macedo (2007) e Farias et al. (2008) o meio mais adequado para que o aumento da produtividade da cana-de-açúcar seja alcançado, consiste na adoção de tecnologias que apresentem alta viabilidade econômica e que garantam o aumento satisfatório da produtividade, podendo ser citadas: (i) agricultura de precisão, (ii) irrigação, (iii) nutrição de plantas, (iv) otimização da indústria e o (v) melhor gerenciamento das lavouras. Isso poderá ocorrer por meio de mecanismos adequados de transferências de tecnologia, hoje representados pelos próprios fabricantes de equipamentos agrícolas e instituições de pesquisa.

3.2 Sistema radicular da cana-de-açúcar

As primeiras raízes da planta, denominadas raízes de fixação, surgem logo após o plantio dos toletes e são formadas a partir do polo radicular dos colmos plantados que são os responsáveis por fornecer as reservas que irão alimentar e promover o crescimento celular. Durante o período de 30 dias após o plantio, correspondente ao tempo de brotação, a planta se utiliza somente das reservas contidas nos toletes. Passado esse período, dá-se início ao desenvolvimento das raízes dos perfilhos primários, em seguidas dos secundários e assim por diante. Ao passo em que o sistema radicular se desenvolve, as raízes de fixação perdem sua

funcionabilidade e a planta torna-se dependente somente das raízes dos perfilhos (Figura 1) (CASAGRANDE, 1991). Cada perfilho possui um sistema radicular próprio e por isso comporta-se como uma planta independente. Dessa forma, na medida em que ocorre o aumento do número de perfilhos, aumenta também o volume de raízes no perfil do solo (BEAUCLAIR e SCARPARI, 2007).

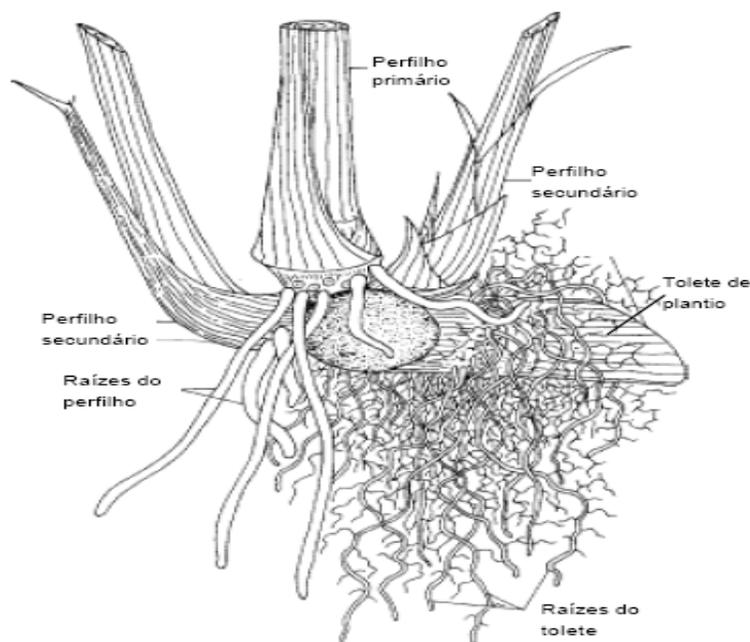


Figura 1. Estágio de desenvolvimento Inicial de brotação e perfilhamento da cana de açúcar. (Fonte: VAN DILLEWIJN, 1952).

No período de estabelecimento da cultura ou em socas, surgem também as raízes do tipo cordão, que são emitidas pelas bases dos perfilhos e dos rizomas, principalmente, após os períodos de estresse hídrico, uma vez que, a retomada de épocas chuvosas e o aumento de temperatura do solo proporcionam condições para o crescimento rápido e vigoroso dessas raízes. Após o estabelecimento do sistema radicular e sua distribuição em profundidade, as raízes são constantemente renovadas, e, ao contrário do que muitos acreditam, essas

renovações não acontecem em função do corte da parte aérea da planta, e sim, pelas oscilações de secagem e umedecimento ocorridas no solo (VASCONCELOS e CASAGRANDE, 2008).

Estudos sobre o sistema radicular muitas vezes são abdicados por conta das altas influências das variáveis químicas, físicas e biológicas do solo, que podem induzir a resultados não condizentes com a realidade do crescimento das raízes (VASCONCELOS et al., 2003).

Por muito tempo, as raízes foram consideradas como a parte oculta dos vegetais, em especial, pelas dificuldades metodológicas encontradas pelos pesquisadores e a grande variabilidade temporal e espacial que apresentam. Além disso, a complexidade tridimensional das raízes dificulta a visualização do seu real comportamento no perfil do solo (ZONTA et al., 2006).

O sucesso de um cultivo pode ser determinado pela realização de estudos do sistema radicular, pois este é o responsável pela absorção de água, nutrientes e gases, elementos estes, essenciais ao desenvolvimento das plantas. Além disso, o conhecimento de como se dá o crescimento do sistema radicular no perfil do solo, também é importante para manejar de forma correta, algumas práticas agronômicas, como por exemplo, a irrigação (SANTOS, 2010).

No Brasil, Inforzato e Alvarez (1957) foram uns dos primeiros pesquisadores a realizarem estudos sobre o hábito de crescimento do sistema radicular da cana-de-açúcar e afirmam que antes de serem dadas soluções aos problemas de: (i) preparo de solo, (ii) aplicação de adubo, (iii) lâmina d'água e (iv) tipo de cultivo, é de grande importância obter o máximo conhecimento de como as raízes se relacionam com o solo e qual real posição que elas ocupam em diferentes estágios de desenvolvimento da planta.

O crescimento radicular em maiores profundidades relaciona-se, em especial, com a disponibilidade de água no solo, por isso, o aumento do teor de água, em superfície, não estimula o desenvolvimento de raízes em camadas mais profundas (ALVAREZ et al., 2000).

Ao ser irrigada a cultura da cana-de-açúcar emite o sistema radicular mais rápido, de tal forma que, nas camadas superiores, por serem mais úmidas, encontram-se o maior volume de raízes quando comparada ao sistema de sequeiro, que favorece o crescimento das raízes em profundidade (FARIAS et al., 2008).

Algumas características das plantas como, por exemplo, a tolerância aos déficits hídricos, absorção de nutrientes, a resistência ao ataque de pragas e o potencial germinativo

são influenciadas diretamente pelo desenvolvimento das raízes e, em conjunto, determinam a produtividade da cultura. Porém, não é quantidade de raízes que condiciona o comportamento dessas variáveis e sim a arquitetura de distribuição das mesmas ao longo do tempo no perfil do solo (VASCONCELOS e GARCIA, 2005). As plantas com distribuição desuniforme do sistema radicular são mais suscetíveis à redução da produção de colmos, principalmente, nas épocas com baixa precipitação, o que compromete o potencial produtivo de açúcar, com resultados abaixo do esperado (COSTA et al., 2007).

O sistema radicular da cana-de-açúcar apresenta alta capacidade de adaptação em solos com baixa retenção de água e pouca disponibilidade de nutrientes, o que torna a planta mais tolerante aos efeitos do déficit hídrico e favorece a rebrota da soca com menores diferenças de produtividade entre os ciclos. Por isso, maior importância deve ser dada aos estudos de raízes, uma vez que, em se tratando de uma cultura semi-perene, o sucesso de sua rebrota dependerá das reservas contidas no sistema radicular (OTTO, 2007).

3.3 Sistema Integrado para Análise de Raízes e Cobertura do Solo - SIARCS 3.0

Para melhor compreensão dos processos ocorridos na parte aérea das plantas é importante deter o conhecimento simultâneo do que acontece abaixo da superfície do solo, em especial, no que diz respeito ao crescimento e à distribuição de raízes no perfil. Por isso, é de grande importância a determinação de estudos capazes de amostrarem as raízes com o mínimo de custo, tempo, trabalho e o máximo de exatidão (VASCONCELOS e GARCIA, 2005).

Os métodos atuais de avaliação de raízes sofreram uma série de mudanças ao longo dos anos. As metodologias existentes tinham caráter subjetivo de avaliação, tais como, a contagem visual e o decalque. Atualmente, com a criação de novas metodologias e o emprego de equipamentos como, por exemplo, máquinas digitais, scanners, e, programas gráficos, as determinações tornaram-se mais precisas e ganharam, portanto, caráter mais científico (BUSO, 2006).

Alguns critérios devem ser levados em consideração durante a escolha do método para se avaliar o comportamento do sistema radicular como, por exemplo, a cultura em estudo, as condições edáficas existentes, a possibilidade ou não de amostragem não destrutiva, a oferta da mão-de-obra e, principalmente, os objetivos que o estudo deseja alcançar (OTTO, 2007).

As metodologias de avaliação de raízes que fazem o uso da contagem visual são bastante complexas e apresentam riscos de perdas ao serem manuseadas, além disso, necessitam de um maior número de pessoas qualificadas e um acondicionamento correto para o transporte das amostras. Diante disso, o método da análise de imagens facilita a compreensão do desenvolvimento do sistema radicular ao longo do perfil, uma vez que descarta todos os problemas mencionados anteriormente (JORGE e CRESTANA, 1996).

Elaborado pela Embrapa Instrumentação Agropecuária – CNPDIA, o sistema integrado para análise de raízes e cobertura do solo (SIARCS 3.0) é um software executável em sistema operacional Windows, que processa e analisa imagens digitais referentes aos trabalhos da área de solos e fornece informações sobre a área, o comprimento e o diâmetro de raízes de forma ágil, fácil e com baixo custo de aquisição (AMARAL, 1998; BIONI et al., 2008).

O uso do SIARCS é considerado um avanço nas técnicas de estudo do sistema radicular, uma vez que permite avaliar de maneira qualitativa e quantitativa a distribuição das raízes diretamente no perfil do solo ou por meio de imagens escaneadas de raízes lavadas. No entanto, a obtenção das imagens necessita de cuidados que vão desde a abertura das trincheiras, o nivelamento do perfil até a pintura das raízes (JORGE, 2006).

Vale ressaltar que, mesmo diante das inúmeras vantagens proporcionadas pelo SIARCS, a inexistência de uma metodologia padrão, para o processo das análises, limita a utilização do programa pelos usuários. Visando minimizar esse problema Lima et al. (2006) estabeleceram que a câmera digital utilizada para capturar as imagens deva possuir uma resolução mínima de 1,3 mega pixels e que após a captura, as imagens sejam salvas no formato JPEG com 16,7 milhões de cores (24 bits). Os autores também afirmam que em todos os tratamentos a altura da câmera e o zoom devam apresentar o mesmo posicionamento diante dos perfis, para que, dessa forma, não ocorram alterações de áreas estimadas.

Ao ser comparado com outras metodologias, o SIARCS apresentou bastante eficiência na avaliação de raízes. Vasconcelos et al. (2003) constataram que a avaliação de raízes de cana-de-açúcar pelo método do perfil apresenta menores coeficientes de variação quando comparada com os métodos tradicionais (monólito e trado).

3.4 Uso de efluente de esgoto doméstico na irrigação agrícola

O fornecimento de água para a realização de atividades agrícolas não poderá ser mantido sem o uso de tecnologias que promovam a conservação dos recursos hídricos. Tal situação baseia-se no fato de que o aumento da produção de alimentos não será atingido somente pela expansão de terras agrícolas, mas também, pelo uso de solos irrigados (HESPANHOL, 2003).

Estudos realizados pela Organização Mundial de Saúde (OMS) estimam que a população máxima que o suprimento de água na terra poderá suportar será de 8.9 bilhões de habitantes, com perspectiva de alcance para o ano de 2025. Diante disso, algumas medidas preventivas como, por exemplo, o reúso de água, deve ser adotada no intuito de mitigar os problemas relacionados à escassez desse recurso, tão essencial a sobrevivência humana (TONON et al., 2009).

O uso sustentável dos recursos associado à redução da disponibilidade e da qualidade da água, em algumas regiões, tem incentivado o desenvolvimento de estudos que buscam alternativas para o uso de águas residuárias. Com isso, o uso de EED na atividade agrícola tornou-se um importante objeto de pesquisa, porém, observa-se, ainda, grande necessidade de conscientização sócio-política quanto à importância do aproveitamento de águas residuárias (FIRME, 2007), visto que no Brasil inexistia uma lei que regulamenta o uso dessa técnica na agricultura.

O EED constitui-se num material líquido com características particulares que o torna diferente da água de abastecimento. Essas diferenças estão relacionadas basicamente com a presença de matéria orgânica, expressa pela DBO (Demanda Bioquímica de Oxigênio) e DQO (Demanda Química de Oxigênio), macro e micronutrientes, possível presença de metais pesados e alguns patógenos (MANCUSO e SANTOS, 2003).

O uso de EED na agricultura passa por grandes avanços na área das pesquisas, principalmente, pelos interesses nos benefícios ambientais, sociais e econômicos que são oferecidos, tais como; (i) redução do volume de esgoto lançado em cursos de água a céu aberto, (ii) a maior disponibilidade de água potável para o uso humano e (iii) o fornecimento de nutrientes para as culturas (SEGARRA et al., 1996; PAULA et al., 2009). Vale ressaltar que os riscos de contaminações dos recursos ambientais envolvidos na agricultura irrigada variam em função do manejo oferecido aos diversos elementos da cadeia produtiva, por isso

maiores atenções devem ser dadas, por exemplo, à escolha da cultura explorada, ao sistema de irrigação utilizado, ao tratamento de água escolhido e as condições de solo existentes (MATTOS, 2003; SOUZA et al., 2010 b).

O uso de EED na agricultura apresenta características agronômicas favoráveis, em especial, ao fornecimento de alguns nutrientes aos vegetais cultivados e, em determinadas épocas do ano, assim como a água de irrigação limpa, pode funcionar como a única fonte para o suprimento hídrico das plantas (SANTOS, 2004). Esses benefícios poderão contribuir para o fortalecimento da agricultura em regiões áridas e semi-áridas, principalmente, naquelas que possuem pouca disponibilidade de água para irrigação e alto potencial para produção de esgoto doméstico (LUBELLO et al., 2004).

Os EUA, a Austrália, o México e Israel apresentam-se como os principais países que utilizam a água de esgoto nas práticas agrícolas e confirmam o potencial dessa tecnologia ao garantir a qualidade dos recursos ambientais envolvidos, além de maiores rendimentos na produção das culturas exploradas (MARQUES et al., 2003). O Brasil segue rumo à regularização dessa atividade, por meio de uma legislação que estabeleça condições mínimas para sua execução, que até os dias atuais, tem sido desenvolvida somente em nível de pesquisa.

O incentivo do uso de EED na agricultura é fundamental para o crescimento do setor agrícola, em especial, pela redução dos custos de produção que essa tecnologia oferece, como, na redução do uso de adubos químicos. Assim, o uso dessa técnica associado a outras metodologias que aumentem a produtividade das culturas e promovam menores impactos ao meio ambiente, constituem um excelente caminho para o desenvolvimento sustentável da agricultura irrigada.

3.5 Influência da irrigação com efluente de esgoto doméstico nos atributos químicos do solo

O uso de EED na irrigação agrícola, além de reduzir os riscos de contaminação dos cursos de água superficiais e suprir hidricamente as culturas, apresenta um alto potencial para o fornecimento de alguns nutrientes essenciais ao desenvolvimento das plantas, em especial, N, P e K (SANDRI et al., 2009).

As alterações ocorridas nos atributos químicos do solo, influenciadas pela adoção de tal técnica, são proporcionais à qualidade do EED utilizado e ao tempo de irrigação. Por isso, curtos prazos de aplicação nem sempre são suficientes para surtirem efeitos significativos na qualidade química do solo, sendo necessário, para isso, alguns anos de adoção (KOURAA et al., 2002; BAUMGARTNER et al., 2007).

Pesquisa realizada para avaliar o efeito da irrigação com EED sobre os atributos químicos de um solo cultivado com pepino, verificou o aumento dos teores de N total, N amoniacal, nitrato, K, Ca, Mg, Zn e S do solo irrigado com EED em comparação a um outro solo irrigado com água de abastecimento (AZEVEDO e OLIVEIRA, 2005).

Na Grécia, o uso de EED na irrigação proporcionou incrementos significativos nos teores de P, Zn e nos valores de pH do solo (KALAVROUSZIOTIS et al., 2009). No México, Fuentes et al. (2002) observaram que o uso de EED eleva os teores de C e N do solo e que o aumento das concentrações de Mg, Hg, Mo, Ca, Cu e Cr é proporcional ao tempo de aplicação do efluente. No Irã, o uso EED como água de irrigação foi eficiente somente para o fornecimento de K (HEIDAPOUR, 2007).

No estudo de Pereira (2009) foi investigada a influência do EED sobre os atributos químicos de um Argissolo Vermelho-Amarelo cultivado com laranjeiras, onde atendeu-se, 100%, 125%, 150% e 200% da necessidade hídrica da cultura, além disso, foi avaliada uma área de sequeiro utilizada como tratamento controle. Nesse trabalho, o autor observou que o aumento da lâmina de irrigação, além de elevar os teores de S, B, Cu e Na no solo, reduziu a acidez ativa (H^+), a acidez potencial ($Al^{3+}+H^+$) e a saturação por alumínio (M%) corroborando com os resultados encontrados por Da Fonseca (2001).

No entanto, é importante esclarecer que mesmo havendo a redução da acidez do solo pelo uso de EED, nem sempre há o fornecimento concomitante de alguns elementos, podendo ser citados o Ca e Mg, que são disponibilizados quando a correção do pH é realizada por meio da aplicação de calcário. Além disso, a alta concentração de Na^+ presente no EED pode promover um desequilíbrio na disponibilidade de outros nutrientes como, por exemplo, o K que do ponto de vista agrícola, deve ser corrigido via aplicação de adubo químico (LEAL, 2007).

Em pesquisa, Paula et al. (2009) avaliaram a influência da irrigação com EED sobre o aporte de C e N em um Argissolo Vermelho, com tratamentos baseados na irrigação do capim

Tifton 85 com EED tratado e aplicado com lâminas excedentes (0, 25, 50 e 100 % a mais da necessidade da cultura). Os autores afirmaram que o aumento do teor de C foi proporcionado pelo incremento do material orgânico fornecido pela irrigação, que variou de 784 Kg ha⁻¹ para a lâmina de 25% até 1441 Kg ha⁻¹ para a lâmina excedente de 100%. A forma mineral de N encontrada no EED (NH₄⁺, NO₂⁻, NO₃⁻) apresentou um valor de 337 kg ha⁻¹ para a lâmina de controle (0%) e 618 kg ha⁻¹ para a lâmina que ofereceu 100% de excesso.

No que se refere à qualidade ambiental, a disposição de águas residuárias no solo funciona como alternativa para o uso dessas águas e pode contribuir para o aumento da produção de alimentos (MEDEIROS et al., 2005). No entanto, torna-se necessário o conhecimento do potencial que essas águas possuem para o fornecimento de nutrientes, bem como a dinâmica de disponibilidade desses elementos às plantas, para que dessa forma seja possível estabelecer estratégias que melhorem o aproveitamento desse resíduo na agricultura.

3.6 Influência da irrigação com efluente de esgoto doméstico nos atributos físicos do solo

A irrigação de áreas cultivadas com águas residuárias mostra-se como alternativa viável na destinação de efluentes, em especial, nas regiões onde há escassez de chuvas por longos períodos. Porém, quando mal manejada essa atividade pode promover riscos à produção das culturas, ocasionados, principalmente, pela degradação dos atributos físicos do solo (MANDAL et al., 2008).

Tal problema refere-se aos efeitos negativos proporcionados pelo íon Na⁺, uma vez que esse elemento pode apresentar-se em altas concentrações no EED, por conta dos resíduos de sabões, detergentes, desinfetantes e seus derivados de uso tão rotineiro nas atividades domésticas (ARCHELA, 2003).

Um solo que apresenta adequados índices de agregação possui também, boas condições de porosidade, densidade, fornecimento de nutrientes, armazenamento de água, menor resistência à penetração e melhor desenvolvimento de raízes, fatores, esses, necessários à manutenção da capacidade produtiva do solo e ao aumento da produtividade das culturas economicamente exploradas (AGUIAR, 2008; BAYER e MIELNICZUK, 2008).

As altas concentrações de Na⁺ nos sítios livres das argilas são responsáveis por reduzirem a afinidade entre as partículas do solo e ocasionar a dispersão entre os minerais. Esse processo pode promover o translocamento de argilas no perfil do solo e sua acomodação

nos espaços porosos livres ocasionando problemas relacionados ao aumento da densidade, a redução da infiltração de água no solo e a menor estabilidade de agregados (RAIJ, 1991).

No estudo de Santos (2004) foi avaliado o efeito do EED rico em sódio nos atributos físicos de um Argissolo, em que constatou-se um aumento da dispersão de argila em praticamente todas as camadas estudadas, principalmente, na superfície. Segundo o autor, isso foi influenciado pelos aumentos ocorridos no Potencial de Sódio Trocável (PST) e na Razão de Adsorção de Sódio (RAS). Além disso, verificou-se que o efluente de esgoto utilizado promoveu a dispersão de argilas mesmo nos valores de PST abaixo dos considerados pela literatura como causadores de deterioração.

A qualidade física do solo exerce importante função nos estudos de indicadores de sustentabilidade, pois apresenta influência direta nas reações químicas e biológicas ocorridas entre o sistema solo-planta e, ainda, manifesta-se em processos de retenção de água, resistência do solo a degradação, crescimento de raízes, liberação de calor e trocas gasosas com o meio (STRECK et al., 2008).

De acordo Koupai et al. (2006), quando se utiliza água residuária na irrigação agrícola, o conteúdo de sais e os sólidos em suspensão presentes no efluente são os principais agentes que afetam os atributos físicos do solo. Esses autores verificaram uma diminuição na condutividade hidráulica saturada do solo após a irrigação com EED e atribuíram tal fato a possíveis entupimentos dos poros por sólidos em suspensão, inclusive por matéria orgânica.

Ao avaliarem as alterações ocorridas no solo irrigado com EED, Coppola et al. (2004) também observaram uma redução na condutividade hidráulica do solo. Esses autores destacam que tal alteração pode influenciar na redução do transporte de alguns elementos no solo, o que pode contribuir para o acúmulo de solutos no perfil, mesmo daqueles que apresentam-se como sendo de alta mobilidade, por exemplo, o Boro.

Diante dos possíveis problemas ocasionados pelo uso de EED nos atributos físicos do solo é necessário que, antes de utilizá-lo como água de irrigação, seja observada a qualidade do efluente e dos atributos químicos e físicos do solo, para que dessa forma, se torne possível o estabelecimento de um manejo correto para a irrigação e, com isso, sejam evitadas alterações indesejáveis na qualidade do solo (LADO e BEN-HUR, 2009).

3.7 Cana-de-açúcar irrigada com efluente de esgoto doméstico.

Os estudos que reportam sobre o emprego de EED na irrigação da cana-de-açúcar têm revelado um alto potencial para promover o aumento da produtividade, uma vez que contribui com o fornecimento de alguns nutrientes essenciais ao seu desenvolvimento e garante o suprimento total da necessidade hídrica requerida pela cultura (GOMES et al., 2009).

Pesquisa realizada por Gomes et al. (2009) avaliou a influencia do uso de EED não desinfetado e EED desinfetado com hipoclorito de sódio sobre o aporte de nutrientes e o estado nutricional da cultura da cana-de-açúcar. Os autores atenderam 100% da necessidade hídrica da planta e utilizaram uma área de cultivo em sequeiro como sendo um tratamento de controle. Nesse trabalho observou-se, por meio de análises foliares, que os tratamentos irrigados com EED garantiram à cultura o suprimento total da necessidade de P, S e promoveram incrementos de Ca^{2+} , Mg^{2+} e Zn.

No trabalho de Leal (2007), a produtividade de cana-de-açúcar foi avaliada sob aplicação de várias lâminas de EED (100, 125, 150 e 200% da demanda hídrica) com fornecimento de 50% da necessidade de N, via adubação química, em comparação ao sistema de cultivo em sequeiro e sem adubação nitrogenada. O autor observou que todos os tratamentos apresentaram concentrações iguais de nutrientes nos colmos, porém, os tratamentos irrigados obtiveram uma produtividade média maior. Tal fato foi atribuído ao atendimento hídrico satisfatório proporcionado à cultura pelo uso do efluente. Utilizando-se do mesmo experimento, Firme (2007), avaliou os parâmetros tecnológicos da cultura e não observou riscos relacionados à qualidade dos colmos industrializáveis, além disso, verificou que os altos níveis de K^+ e N, contidos no EED, não promoveram atraso no período de maturação fisiológica da cana-de-açúcar.

Na pesquisa de Deon (2010) foi estudada a reciclagem de água e nutrientes promovida pela irrigação da cana-de-açúcar com EED de lagoa de estabilização do tipo Australiano. Foi observado que nos tratamento irrigados com efluente houve um aumento no desempenho vegetativo da cultura e um ganho de produtividade estimado em $19,84 \text{ Mg ha}^{-1}$ e $40,41 \text{ Mg ha}^{-1}$, para a primeira e segunda soca, respectivamente, e, não foram observadas alterações que compromettesse, de maneira significativa, o potencial industrial da cultura pela irrigação com efluente.

Nas ilhas Havaianas de Oahu, Maui e Kauai onde a escassez de água doce para irrigação apresenta-se como fator limitante à exploração dessa atividade, é bastante comum o uso de EED na irrigação da cana-de-açúcar. Em estudo realizado nessa região comprovou-se que o EED pode ser utilizado como água suplementar na irrigação dessa cultura, uma vez que garante bons índices de produtividade e não compromete a qualidade industrial do produto (LAU, 1979).

Com base nas informações apresentadas, a utilização de EED para irrigação da cana-de-açúcar é de grande importância para a exploração da cultura no Brasil, porém, para atingir níveis desejáveis de produtividade, essa técnica necessita, ainda, de melhores detalhamentos como, por exemplo, do balanço nutricional entre os elementos aportados pela irrigação e a real necessidade de cada nutriente exigida pela cultura (LEAL et al., 2009).

4. MATERIAL E MÉTODOS

4.1 Localização do experimento

O experimento foi instalado no ano de 2006, em Piracicaba-SP (22° 46' 24" S, 47° 36' 32" W), na Fazenda Santa Helena, numa área de cultivo de cana-de-açúcar pertencente ao grupo COSAN, localizada ao lado da Estação de Tratamento de Esgoto (ETE) do bairro CECAP gerenciada pelo Serviço Municipal de Água e Esgoto – SEMAE (Figura 2). A presente pesquisa foi realizada em junho de 2010, ano que correspondeu à terceira soca da cultura e ao quarto ano de experimento.



Figura 2. Área experimental e estação de tratamento de esgoto do bairro CECAP em Piracicaba-SP.

De acordo com a classificação de Köppen, o clima da região é o subtropical úmido do tipo Cwa, com temperaturas do mês mais quente superiores a 22°C e do mês mais frio inferiores a 18°C. O índice pluviométrico anual da região é de 1.328 mm e o solo predominante é classificado como Argissolo Vermelho-Amarelo, eutrófico, típico com características químicas, anteriores a instalação do experimento, descritas na Tabela 1.

Tabela 1. Caracterização química do solo antes da implantação do experimento.

Prof.	M.O.	pH	P	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	Al ³⁺	Al ³⁺ +H ⁺	CTC	V%
	g.Kg ⁻¹	-	mg.Kg ⁻¹	-----mmolc.Kg ⁻¹ -----							
0,00 - 0,20	25,00	6,07	8,57	1,90	31,87	17,12	0,31	<1	21,87	73,07	73,06
0,20 - 0,40	22,20	5,60	6,37	0,75	22,50	11,25	0,37	<1	24,50	59,37	58,73
0,40 - 0,60	17,75	5,30	4,02	0,45	19,25	8,25	0,40	1,5	25,00	53,35	53,13
0,60 - 0,80	17,00	4,95	4,00	0,37	14,75	7,25	0,42	2,0	25,50	38,29	47,19

*Prof = Profundidade; M.O. = Matéria orgânica.

4.2 Captação do efluente de esgoto (Estação de Tratamento de Esgoto - ETE)

A captação do efluente de esgoto doméstico era realizada numa lagoa facultativa secundária da estação de tratamento de esgoto (ETE) do bairro CECAP, que em seguida, alimentava um sistema de filtros de areia pressurizado para remoção de sólidos em suspensão. A ETE era constituída por lagoas de estabilização do tipo Australiano, com uma lagoa receptiva anaeróbica e, duas lagoas facultativas, sendo uma primária e outra secundária, atendendo 7000 pessoas com vazão média de 10,16 L s⁻¹ de água (GOMES et al., 2009).

Para o tratamento que se utilizou de efluente de esgoto desinfetado foi construído um tanque de contato de cloro para o fornecimento de uma dosagem de 6 mg L⁻¹ para cada litro de efluente. Essa dosagem foi adotada por apresentar maior eficiência no controle de coliformes fecais e menor concentração de cloro residual no efluente.

No tratamento T100Herb utilizou-se 0,125 g do produto comercial trifluralina milenium para cada gotejador, sendo essa dosagem dividida em duas aplicações durante o ciclo da cultura.

Na Tabela 2 encontram-se os resultados da caracterização química do efluente de esgoto doméstico in natura (EEDI) e do efluente de esgoto doméstico tratado com hipoclorito de sódio (EEDT).

Tabela 2. Caracterização química do efluente de esgoto doméstico in natura (EEDI) e do efluente de esgoto doméstico tratado com hipoclorito de sódio (EEDT) (GOMES et al., 2009).

Constituintes	In natura (mg L ⁻¹)		Tratado (mg L ⁻¹)	
	EEDI ^{DP}	DP	EEDT ^{DP}	DP
CID	234,50	103,42	218,94	64,83
COD	23,52	12,87	23,99	5,59
P-PO ₄ ⁻	2,53	1,94	4,82	1,38
S	36,78	21,90	24,49	13,24
N-NH ₄ ⁺	26,33	4,29	24,86	4,94
N-NO ₂ ⁻	0,02	0,01	0,07	0,06
N-NO ₃ ⁻	0,07	0,03	0,16	0,11
NTP	2,51	1,01	1,97	0,93
N – Total	28,94	3,90	27,06	4,71
CT	13,69	5,34	11,38	5,71
C/N	5,49	0,23	5,74	0,21
Cl	75,01	48,56	79,65	43,71
Ca	14,15	8,87	15,72	9,86
Mg	4,97	1,81	5,20	1,43
Na	66,90	26,50	67,43	19,92
K	25,73	9,89	26,61	10,53
Al	< LD	-	<LD	-
B	0,08	0,04	0,074	0,004
Cd	< LD	-	< LD	-
Cr	0,007	0,01	0,007	0,01
Cu	0,013	0,02	0,012	0,01
Fe	0,043	0,04	0,024	0,01
Mn	0,031	0,04	0,036	0,02
Ni	< LD	-	< LD	-
Pb	< LD	-	< LD	-
Zn	< LD	-	< LD	-
RAS ¹	3,82	1,22	3,86	1,42
Ph	7,47	0,24	7,64	0,11
CE ²	821,00	118,04	892,83	114,21

DP=Desvio Padrão; CID=Carbono Inorgânico Dissolvido; COT=Carbono Orgânico Dissolvido; NTP=Nitrogênio Total no Material Particulado; NTP=Nitrogênio Total presente no EEDI; ¹RAS=Razão de Adsorção de Sódio (mmol L⁻¹)^{1/2}; ²CE=Condutividade Elétrica (µS cm⁻¹); LD=Limite de Detecção.

4.3 Delineamento experimental e tratamentos

O experimento constituiu-se de um delineamento de blocos casualizados com três repetições e seis tratamentos, totalizando 18 unidades experimentais, sendo estas divididas em quatro subparcelas com os tratamentos dispostos no esquema de faixas. Os tratamentos foram baseados no emprego de efluente de esgoto doméstico tratado e aplicados com diferentes lâminas de irrigação (Tabela 3) e, as subparcelas corresponderam a quatro diferentes profundidades do solo (0-0,20 m; 0,20-0,40 m; 0,40-0,60 m e 0,60-0,80 m).

Tabela 3. Tratamentos estudados no experimento.

Tratamentos	Descrição
SQ	Sistema de cultivo em sequeiro
T50%	Irrigação com EED in natura atendendo 50% da ETP
T100%	Irrigação com EED in natura atendendo 100% da ETP
T200%	Irrigação com EED in natura atendendo 200% da ETP
T100Herb	Irrigação com EED e aplicação de herbicida atendendo 100% da ETP
T100Cl	Irrigação com EED desinfetado com hipoclorito de sódio atendendo 100% da ETP

*EED = Efluente de esgoto doméstico e ETP= Evapotranspiração.

As parcelas possuíam dimensões de 10 m x 30 m, o que conferiu uma área de 300 m², com seis linhas de plantio espaçadas a cada 1,4 m. Dentre as linhas de plantio cultivadas, apenas a primeira não foi irrigada e, portanto, foi considerada “linha cega” (Figura 3).

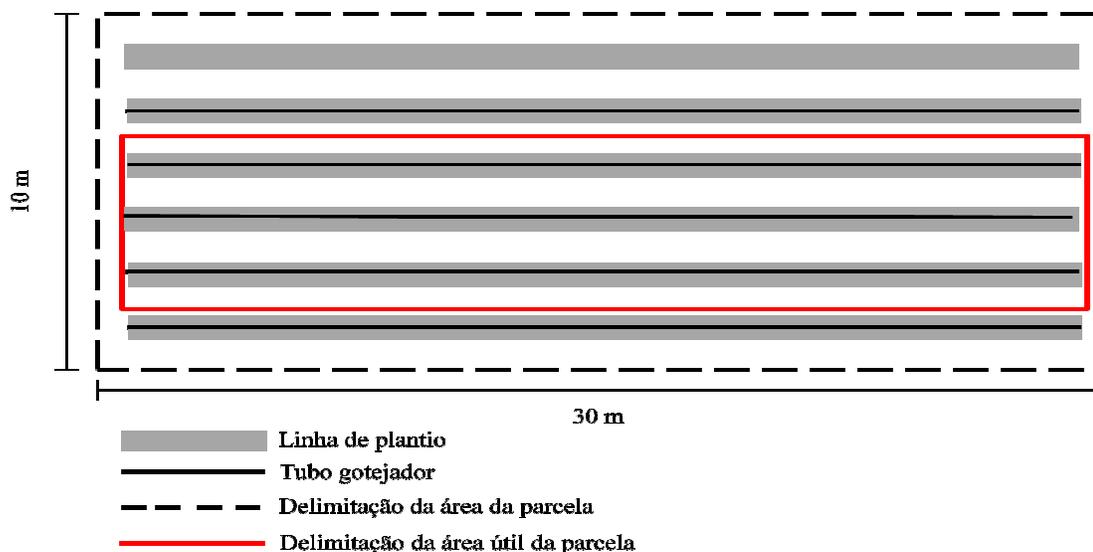


Figura 3. Esquema de constituição da parcela adotada no experimento.

4.4 Variedade da cana-de-açúcar utilizada, adubação e irrigação realizada

A variedade de cana-de-açúcar utilizada no experimento foi a SP-903414, que se caracteriza pelo porte ereto, alta produtividade, por não apresentar florescimento e pouca isoporização. A adubação foi realizada de acordo com a recomendação das análises químicas de solo (120 Kg ha⁻¹ de N, 30 Kg ha⁻¹ de P₂O₅ e 120 Kg ha⁻¹ de K₂O) segundo a recomendação de Raij et al. (1996).

A aplicação de água foi realizada por um sistema de irrigação localizada do tipo gotejamento subsuperficial a 0,16 m de profundidade da superfície do solo. Os gotejadores utilizados eram da marca Netafim, modelo Super Typhoon, espaçados a cada 0,5 m, com vazão de 1,75 L h⁻¹ e espessura de parede de 0,38 cm.

As irrigações eram realizadas três vezes por semana (segunda, quarta e sexta-feira), com base nas leituras da evaporação ocorrida entre os turnos de rega no tanque “classe A”, instalado próximo ao local do experimento e corrigida pelo coeficiente da cultura (Kc). Para o monitoramento do teor de água no solo, foram instalados tensiômetros no centro das parcelas do tratamento T100% ao lado da linha da soqueira, nas profundidades 0,0-0,20; 0,20-0,40; e 0,40-0,60 m. As leituras nos tensiômetros eram realizadas semanalmente por meio de um tensiômetro digital e depois convertidas em umidade pela interpretação da curva característica de retenção de água no solo. Os dados de precipitação foram registrados por um pluviômetro

instalado na área do experimento, em seguida os valores eram descontados na lâmina aplicada. Nos quarenta dias que antecedia a colheita, a irrigação era suspensa visando à maturação da cultura.

Os dados de distribuição pluviométrica registradas durante os quatros ciclos da cultura em comparação e a série histórica do município de Piracicaba-SP totalizaram 1.463; 1.521; 1.088; 1.459,76 e 1.230 mm para a cana-planta (set/2006 a Ago/2007), 1º soca (set/2007 a jul/2008), 2º soca (Jul/2008 a Set/2009), 3º soca (Set/2009 a Jul/2010) e normal climatológica, respectivamente, (Figura 4). Dentre as precipitações observadas nos quatro anos de experimento, a registrada na 3º soca, mostrou-se bem acima da média histórica, o que reduziu o uso de efluente aplicado pela irrigação durante esse período.

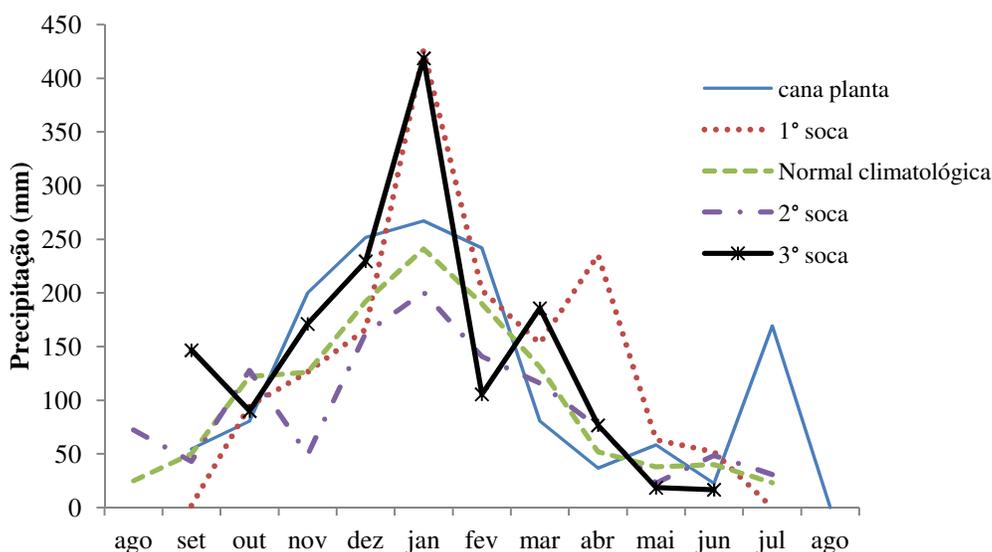


Figura 4. Distribuição pluviométrica registrada durante os quatros ciclos da cultura em comparação com a série histórica do município de Piracicaba-SP.

Na Tabela 4 são apresentadas as lâminas de irrigação com EED aplicadas na cultura da cana-de-açúcar na 1º, 2º e 3º soca de todos os tratamentos irrigados. A cana planta não foi irrigada.

Tabela 4. Valores das lâminas de irrigação aplicadas na 1º, 2º e 3º soca da cana-de-açúcar.

Tratamentos	Lâmina de EED (mm)		
	1º Soca	2º Soca	3º Soca
T50%	348,30	302,63	205,86
T100%	573,28	413,28	407,25
T200%	1057,57	1054,72	818,23
T100Herb	591,12	577,28	403,62
T100Cl	694,43	665,22	421,07

T50% = Irrigação com efluente de esgoto doméstico (EED) in natura atendendo 50% da evapotranspiração; T100%= Irrigação com EED in natura atendendo 100% da evapotranspiração; T200% = Irrigação com EED in natura atendendo 200% da evapotranspiração; T100Herb = Irrigação com EED mais herbicida atendendo 100% da evapotranspiração; T100Cl = Irrigação com EED desinfetado com Hipoclorito de sódio atendendo 100% da evapotranspiração.

4.5 Avaliação do sistema radicular da cultura

Em cada parcela foi selecionada uma linha de plantio, para isso, algumas características morfológicas como, por exemplo, altura de planta, diâmetro de caule, perfilhamento e possíveis falhas na linha de plantio, determinaram se a linha seria ou não recomendada para o estudo.

No sentido transversal da linha de plantio escolhida, realizou-se a abertura de uma trincheira com dimensões de 1,4 m de largura e 1,0 m de profundidade, tendo como centro de referência o sulco de plantio, dessa forma, foi possível observar o sistema radicular até a profundidade de interesse, que era de 0,8 m.

Em seguida, o perfil da trincheira foi nivelado com uma pá de corte reto e depois escarificado com auxílio de um rolo escarificador em espiral. Esse processo se fez necessário para melhorar a exposição do sistema radicular da cana-de-açúcar e favorecer a pintura das raízes, que foi realizada com tinta spray de cor branca e, ou amarela. Após isso, por meio do uso de um pulverizador costal, o perfil foi lavado com água e somente as raízes da cultura permaneceram pintadas (JORGE e CRESTANA, 1996).

Concluído o processo de lavagem, iniciou-se à coleta das imagens do sistema radicular, que foi realizada pelo uso de uma máquina fotográfica da marca Sony com resolução de 3 mega pixels. Em todas as trincheiras o equipamento foi posicionado com a mesma altura (0,40 m) e distância (1,20 m) em relação à parede do perfil, além disso, foram oferecidas as mesmas condições de resolução e de zoom para todos os tratamentos.

A fotografia de cada trincheira foi dividida em 20 “sub-fotografias”, dispostas em quatro linhas e cinco colunas, sendo que, cada “sub-fotografia representou” $0,056 \text{ m}^2$ da área real da trincheira (Figura 5).

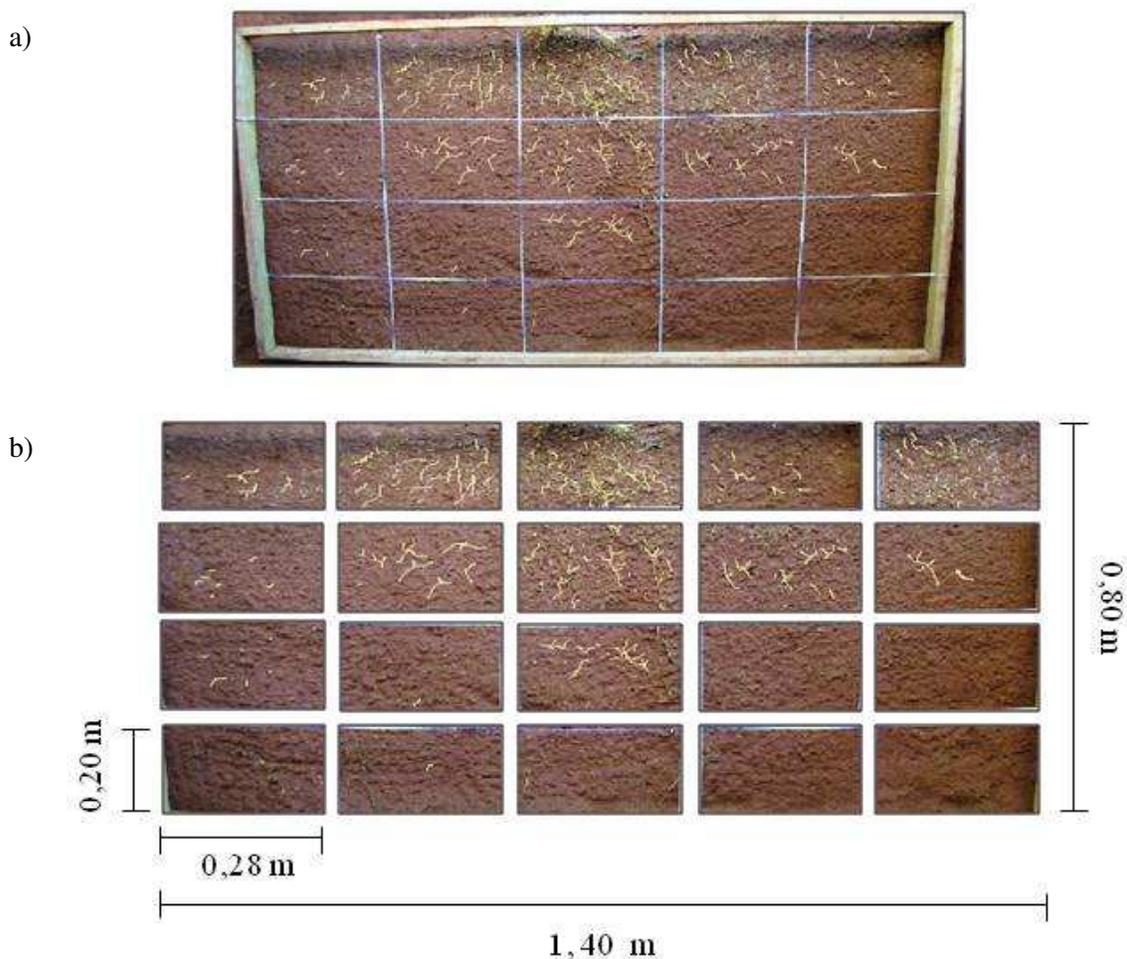
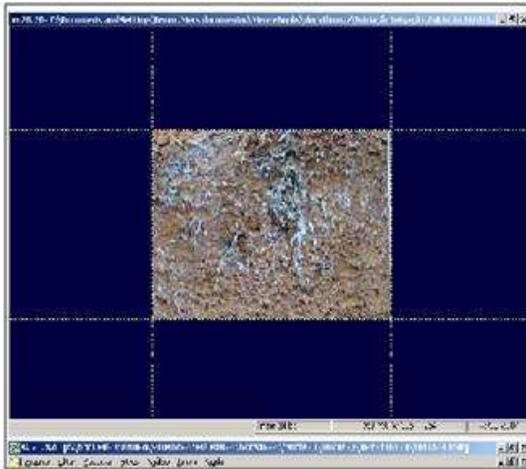


Figura 5. (a) Fotografia da trincheira e (b) sub-fotografias utilizadas para a avaliação do sistema radicular.

Na sequência, a qualidade das imagens foi melhorada no software 20/20 versão 2.2, sendo, e depois convertida à JPEG para serem salvas em BMP, formato aceito pelo software SIARCS 3.0 (Figura 6). Após esse procedimento, foi possível a realização de estudos sobre a área, o comprimento e o diâmetro de raiz da cultura em estudo (LIMA et al., 2006). A

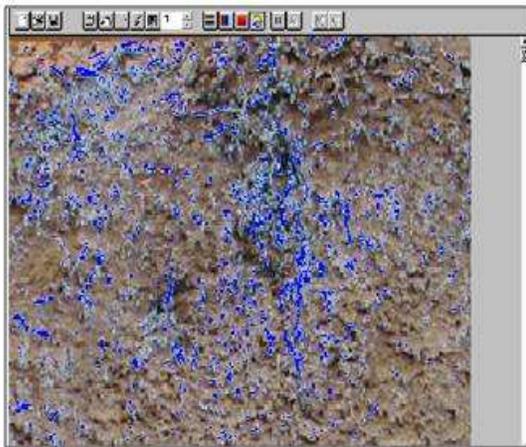
profundidade efetiva foi calculada com base nos dados de comprimento de raiz acumulados nas quatro profundidades estudadas, e, para o cálculo do volume de raiz utilizou-se os resultados de comprimento e diâmetro.



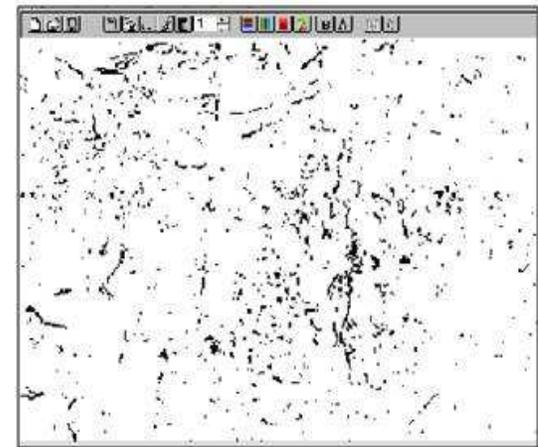
Etapa 1. Seleção da imagem no software 20/20 v2.2



Etapa 2. Visualização da imagem selecionada no software SIARCS 3.0



Etapa 3. Seleção das imagens de raízes no software SIARCS 3.0



Etapa 4. Binarização das imagens de raízes selecionadas no software SIARCS 3.0

Figura 6. Etapas do procedimento de avaliação das imagens no software 20/20 2.2 (Etapa 1) e no software 3.0 (Etapas 2, 3 e 4).

4.6 Determinação da produtividade da cultura

Das cinco linhas de plantio irrigadas, apenas as três linhas centrais de cada repetição foram utilizadas para analisar essa variável, não sendo consideradas, portanto, as linhas da bordadura. Após determinar a produção de cada parcela, foi calculado o valor médio da produtividade de cada tratamento, com posterior conversão dos valores para toneladas por hectare.

4.7 Avaliações químicas e físicas do solo

4.7.1 Coleta de solo para análises químicas e físicas

Nas mesmas trincheiras utilizadas para captar as imagens das raízes, foram coletadas amostras simples de solo (deformadas e indeformadas), 5 amostras por profundidades, no sentido paralelo a superfície, nas profundidades de 0-0,20 m; 0,20-0,40 m; 0,40-0,60 m e 0,60-0,80 m. A amostragem física e química do solo foi realizada na parte central de cada quadrícula que compunha o perfil da trincheira (Figura 7).

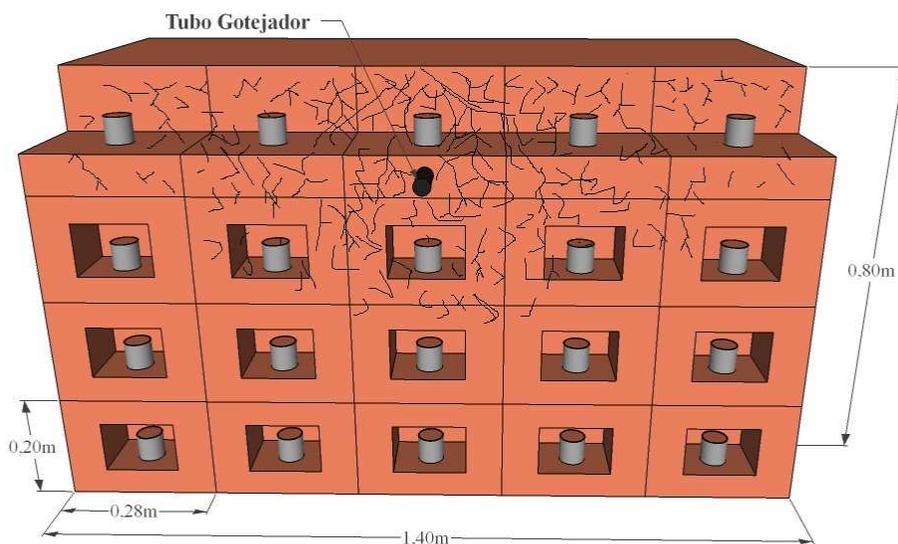


Figura 7. Vista frontal do perfil da trincheira e localização dos pontos de amostragem deformada e indeformada de solo.

As amostras de solo utilizadas para as análises físicas foram coletadas por meio de um anel volumétrico de aço inox com massa e volume conhecidos. Em seguida, ao lado do ponto onde foi realizada a amostragem para análises físicas, foram coletadas amostras de solo deformadas para a realização de análises químicas, que posteriormente foram secas ao ar e peneiradas em malha de 2,00 mm (TFSA) conforme Embrapa (1997).

4.7.2 Caracterização física da área experimental

As análises físicas de solo foram realizadas no Laboratório de Física do Solo da Faculdade de Engenharia Agrícola da Universidade Estadual de Campinas (FEAGRI/UNICAMP).

Foram determinados os seguintes atributos: densidade do solo, porosidade total, macroporosidade, microporosidade, estabilidade de agregados, argila dispersa em água e resistência do solo à penetração.

A análise de densidade do solo foi realizada pela relação existente entre a massa de solo seca à 105° C e o volume que ela ocupou no anel volumétrico utilizado na coleta. Para a determinação da macroporosidade e da microporosidade do solo, as amostras indeformadas foram saturadas e colocadas em mesa de tensão a 6 kPa. A diferença de peso da amostra saturada e da amostra submetida à tensão após 48 horas determinou a macroporosidade do solo e, a diferença de peso da amostra submetida à tensão e da amostra de solo seca a 105 ° C determinou a microporosidade do solo. O somatório da macro e da microporosidade resultou na porosidade total do solo (EMBRAPA, 1997).

A resistência do solo à penetração foi realizada até a profundidade de 0,60 m, utilizando para isso, um penetrômetro de impacto de Stolf. As medições foram realizadas no mesmo dia para todos os tratamentos de uma mesma repetição, buscando-se, dessa forma, eliminar o efeito da variação do teor de água no solo. Foram realizados cinco pontos de amostragem por trincheira, sendo, dois a 0,28m de distância da linha de plantio (um do lado esquerdo e outro do lado direito), dois à 0,56m de distância da linha de plantio (um do lado esquerdo e outro do lado direito) e um na linha de plantio.

A estabilidade de agregado do solo foi determinada por tamisamento a úmido conforme o método estabelecido por Yoder (1936). Por meio dessa análise foram avaliados as

variáveis; Diâmetro Médio Ponderado de agregados (DMP) e a porcentagem de agregados > 2,00 mm (EMBRAPA, 1997).

4.7.3 Caracterização química da área experimental

As análises químicas de solo foram realizadas no Laboratório de Análise Ambiental e Geoprocessamento do Centro de Estudos Nucleares na Agricultura da Universidade de São Paulo, Piracicaba-SP (CENA/USP).

O pH foi determinado por meio da atividade hidrogeniônica da solução solo-água, por potenciometria, e, a acidez trocável (Al^{+3}) extraída com cloreto de potássio (KCl) 1 mol L⁻¹ e quantificada por titulometria com hidróxido de sódio (NaOH) a 0,025 mol L⁻¹ (EMBRAPA, 1997). O fósforo (P) e o potássio (K⁺) foram extraídos com solução de Melich e determinados por colorimetria e fotometria de chama, respectivamente e, com o mesmo extrato e aparelho de leitura, utilizados na determinação do potássio, foi realizada a leitura da concentração de sódio (Na⁺). Os íons, cálcio (Ca^{2+}) e magnésio (Mg^{2+}), foram extraídos com KCl a 1 mol L⁻¹ e quantificados por espectrometria de emissão por plasma (ICP-OES). Determinou-se o carbono orgânico total (COT) por oxidação do carbono orgânico à CO₂, por íons de dicromato, empregando, para isso, solução de dicromato de potássio (K₂Cr₂O₇) a 0,167 mol L⁻¹ em meio fortemente ácido e com fonte externa de calor (YEOMANS e BREMNER, 1988). O nitrogênio total (NT) foi determinado pelo método de Kjeldahl adaptado por Bremner e Mulvaney (1982).

4.8 Análise estatística dos dados

Os dados foram submetidos a análise de variância, sendo as medias comparadas pelo teste de Tukey em nível de 5% de probabilidade utilizando do sistema computacional Sisvar, versão 5.1 Build 72.

4.9 Confeção dos mapas das variáveis do solo

As variáveis estudadas nesse trabalho foram representadas no perfil de cada trincheira por meio de mapas gráficos de distribuição, com objetivo de representar o comportamento de cada uma delas em função dos tratamentos impostos. Para a confecção dos mapas utilizou-se do sistema computacional Surf versão 9.0.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Influência da irrigação com efluente de esgoto doméstico (EED) no desenvolvimento do sistema radicular da cana-de-açúcar

5.1.1 Área de raiz

O sistema radicular das plantas submetidas ao tratamento TSQ apresentou as maiores áreas em todas as profundidades estudadas, e apenas nas profundidades 0,40–0,60 m e 0,60–0,80 m o T50% apresentou médias iguais às observadas no tratamento sem irrigação (Tabla 5). Na profundidade de 0,00-0,20 m o tratamento T200% apresentou uma menor área de raiz quando comparado ao tratamento T100%, no entanto, não foram observadas diferenças significativas entre esses dois tratamentos nas demais profundidades. Os tratamentos T100%, T100Herb e T100Cl não apresentaram diferenças significativas entre si nas três últimas profundidades.

Tabela 5. Área de raiz (cm²) de cana-de-açúcar, por quadricula de 0,056 m², influenciada pela irrigação com efluente de esgoto doméstico.

Profundidade (m)	TSQ	T50%	T100%	T200%	T100Herb	T100Cl	CV%
0,00 - 0,20	21,91 a	9,98 cd	16,49 b	13,53 bc	7,51 d	10,09 cd	13,25
0,20 - 0,40	12,00 a	4,44 b	5,24 b	6,61 b	4,22 b	4,92 b	22,95
0,40 - 0,60	3,51 a	4,66 a	2,06 b	3,02 b	2,01 b	2,91 b	23,33
0,60 - 0,80	2,99 a	3,66 a	0,79 b	0,97 b	1,23 b	0,51 b	40,90

Médias seguidas pelas mesmas letras na linha não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey (P<0,05). TSQ = Sistema de cultivo em sequeiro; T50% = Irrigação com efluente de esgoto doméstico (EED) in natura atendendo 50% da evapotranspiração (ETP); T100%= Irrigação com EED in natura atendendo 100% da ETP; T200% = Irrigação com EED in natura atendendo 200% da ETP; T100Herb = Irrigação com EED mais herbicida atendendo 100% da ETP; T100Cl = Irrigação com EED desinfetado com hipoclorito de sódio atendendo 100% da ETP.

Nos tratamentos T100%, T200%, T100Herb e T100Cl os valores médios de área de raízes, nas profundidades de 0,40 -0,60 e 0,60-0,80 m foram menores quando comparados ao TSQ e ao T50%, uma vez que o sistema de irrigação encontrava-se instalado a 0,16 m de profundidade com as irrigações sendo realizadas três vezes por semana. Esse procedimento permitiu uma manutenção da umidade do solo nas primeiras profundidades, não estimulando o aprofundamento do sistema radicular em profundidades maiores.

Os maiores valores de área de raiz encontrados no tratamento TSQ podem ser explicados pela maior necessidade da planta em desenvolver raízes, em profundidade, quando submetida a uma condição de estresse hídrico. De acordo com Taiz e Zeiger (2004) e Vasconcelos e Garcia (2005) o processo de secagem do solo, de cima pra baixo, torna as profundidades superficiais mais resistentes ao crescimento das raízes e induz o desenvolvimento do sistema radicular em maiores profundidades.

Essa discussão é reforçada por Farias et al. (2008), ao afirmar que quando irrigada a planta de cana-de-açúcar emite mais rapidamente o sistema radicular, porém, não há um aprofundamento tão pronunciado das raízes como observado em condições de sequeiro, pois o sistema radicular tende a concentrar-se nas regiões mais úmida do solo.

De acordo com Otto et al. (2009), o aprofundamento do sistema radicular também se dá quando a planta necessita absorver nutrientes essenciais ao seu desenvolvimento. Na presente pesquisa o uso de efluente de esgoto doméstico na irrigação, além de suprir a necessidade hídrica da cultura também aportou alguns nutrientes requeridos pela planta, fazendo com que esta não tivesse gastos energéticos, em excesso, para a produção de raízes em maiores profundidades com o objetivo de absorver esses nutrientes.

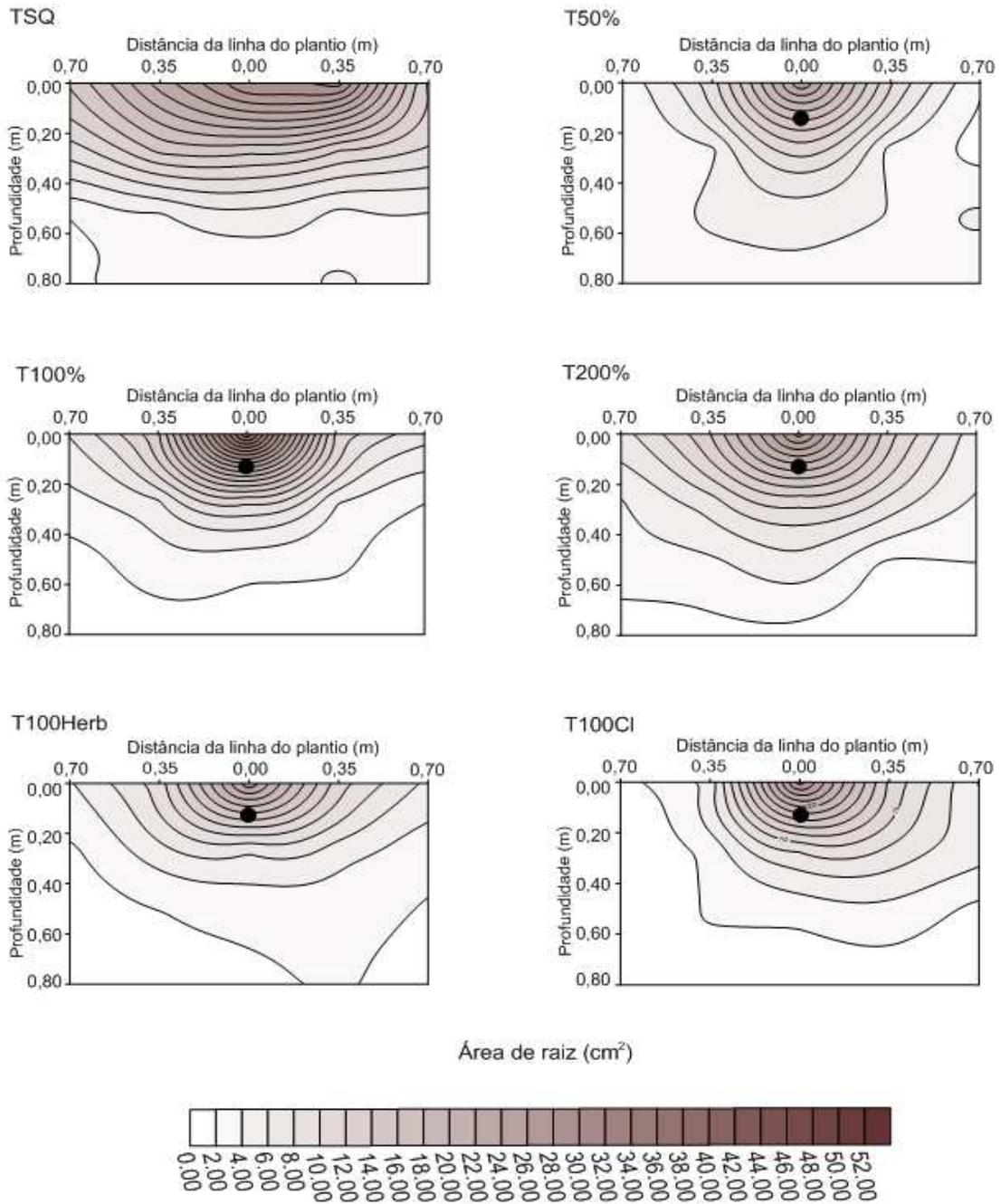
Com relação ao tratamento T100Herb observou-se uma redução da área de raiz na primeira profundidade, sendo esta onde encontrava-se localizado o tubo gotejador e, portanto, a mais influenciada pela ação do herbicida. Porém, nas três últimas profundidades esse tratamento não se diferenciou dos demais tratamentos cuja lâmina de irrigação também foi de 100%.

Observa-se na Figura 8, que em todos os tratamentos as maiores áreas de raiz foram encontradas na primeira profundidade e de forma mais concentrada no eixo da touceira. No tratamento TSQ o sistema radicular desenvolveu-se tanto lateralmente como em profundidade, devido à maior necessidade da planta em produzir raízes com intuito de aumentar sua

eficiência na absorção de água. Apesar do déficit hídrico proporcionado pelo tratamento T50%, não foi observado um desenvolvimento lateral tão acentuado como o verificado no tratamento TSQ, porém o efeito do déficit foi evidenciado pelo aprofundamento do sistema radicular, pois neste tratamento verificou-se raízes tão desenvolvidas, em profundidade, como as observadas no tratamento TSQ.

Ainda na Figura 8, observou-se que nos tratamentos cuja lâmina aplicada foi de 100% ocorreu um menor desenvolvimento radicular, em profundidade, quando comparados ao tratamento TSQ, que se justifica pela menor necessidade da planta em desenvolver raízes para absorver água e nutrientes em profundidades maiores, uma vez que a necessidade hídrica das plantas submetidas a esses tratamentos foi atendida totalmente.

O tratamento T200% apresentou uma expansão lateral e em profundidade, maior do que as observadas nos tratamentos com lâmina de 100% que pode ser explicado pelo fato do tratamento T200% ter proporcionado a formação de um bulbo molhado com uma maior área de atuação, fazendo com que o crescimento radicular das plantas tenha ocorrido, em maior parte, dentro dessa área molhada. Porém, nas três últimas profundidades, a expansão do sistema radicular, do tratamento T200%, não foi suficiente para promover uma diferença estatística com os tratamentos de lâmina de 100%, o que implica dizer que essa expansão tenha se dado por raízes com áreas menores.



TSQ - Sistema de cultivo em sequeiro
T50% - Irrigação com efluente de esgoto doméstico (EED) in natura atendendo 50% da evapotranspiração (ETP)
T100% - Irrigação com EED in natura atendendo 100% da ETP
T200% - Irrigação com EED in natura atendendo 200% da ETP
T100Herb - Irrigação com EED mais herbicida atendendo 100% da ETP
T100CI - Irrigação com EED desinfetado com Hipoclorito de sódio atendendo 100% da ETP

● Tubo gotejador enterrado a 0,16 m de profundidade na linha de plantio

Figura 8. Distribuição da área de raiz (cm²) no perfil do solo, influenciada pela irrigação com efluente de esgoto doméstico nos diferentes tratamentos.

5.1.2 Diâmetro de raiz

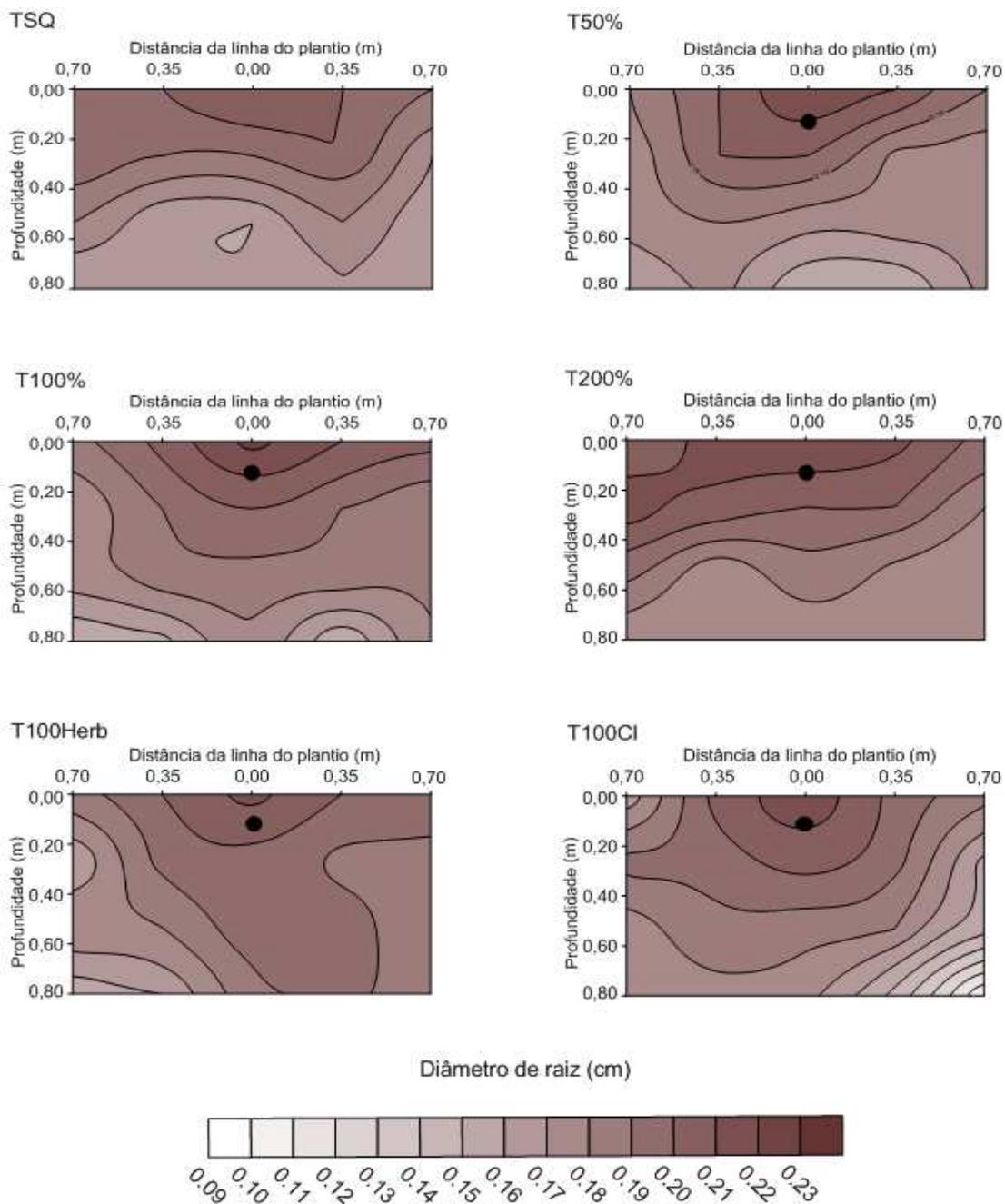
Não houve diferença significativa do diâmetro de raiz entre os tratamentos em todas as profundidades estudadas, onde as médias oscilaram entre 0,15 e 0,20 cm. O uso de imagens para avaliar essa variável pode ter sido o responsável pela não diferença estatística entre os tratamentos, uma vez que, quanto menor o tamanho da imagem a ser marcada na tela do monitor, menor é a quantidade de pixels a serem selecionados e, conseqüentemente, maiores serão os erros na marcação (Tabela 6).

Tabela 6. Diâmetro de raiz (cm) de cana-de-açúcar, por quadricula de 0,056 m², influenciado pela irrigação com efluente de esgoto doméstico.

Profundidade (m)	TSQ	T50%	T100%	T200%	T100Herb	T100Cl	CV%
0,00 - 0,20	0,20 a	0,18 a	0,20 a	0,20 a	0,20 a	0,19 a	12,59
0,20 - 0,40	0,18 a	0,18 a	0,18 a	0,20 a	0,18 a	0,18 a	17,97
0,40 - 0,60	0,18 a	0,17 a	0,18 a	0,18 a	0,18 a	0,17 a	11,41
0,60 - 0,80	0,17 a	0,17 a	0,16 a	0,17 a	0,17 a	0,15 a	16,32

Médias seguidas pelas mesmas letras na linha não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey (P<0,05). TSQ = Sistema de cultivo em sequeiro; T50% = Irrigação com efluente de esgoto doméstico (EED) in natura atendendo 50% da evapotranspiração (ETP); T100%= Irrigação com EED in natura atendendo 100% da ETP; T200% = Irrigação com EED in natura atendendo 200% da ETP; T100Herb = Irrigação com EED mais herbicida atendendo 100% da ETP; T100Cl = Irrigação com EED desinfetado com hipoclorito de sódio atendendo 100% da ETP.

No entanto, em todos os tratamentos houve uma redução no tamanho do diâmetro de raiz à medida que o sistema radicular se distanciou do eixo da soqueira verticalmente, que pode ser justificado pelo maior gasto energético requerido pela cultura para produzir raízes em maiores profundidades (Figura 9).



TSQ - Sistema de cultivo em sequeiro
T50% - Irrigação com efluente de esgoto doméstico (EED) in natura atendendo 50% da evapotranspiração (ETP)
T100% - Irrigação com EED in natura atendendo 100% da ETP
T200% - Irrigação com EED in natura atendendo 200% da ETP
T100Herb - Irrigação com EED mais herbicida atendendo 100% da ETP
T100CI - Irrigação com EED desinfetado com Hipoclorito de sódio atendendo 100% da ETP

● Tubo gotejador enterrado a 0,16 m de profundidade na linha de plantio

Figura 9. Distribuição do diâmetro de raiz (cm) no perfil do solo, influenciada pela irrigação com efluente de esgoto doméstico nos diferentes tratamentos.

5.1.3 Comprimento de raiz

O tratamento TSQ apresentou os maiores valores de comprimento radicular em todas as profundidades estudadas e apenas nas profundidades 0,40-0,60 e 0,60-0,80 m o tratamento T50% obteve média igual ao tratamento sem irrigação. Dentre os tratamentos irrigados, o T100Herb apresentou média inferior aos demais na profundidade de 0,00-0,20 m, e, nas profundidades de 0,40-0,60 m e 0,60-0,80 m os tratamentos T100%, T200%, T100Herb e T100Cl não se diferenciaram estatisticamente (Tabela 7).

Tabela 7. Comprimento de raiz (cm) de cana-de-açúcar, por quadricula de 0,056 m², influenciado pela irrigação com efluente de esgoto doméstico.

Profundidade (m)	TSQ	T50%	T100%	T200%	T100Herb	T100Cl	CV%
0,00 - 0,20	179,60 a	124,67 b	135,32 b	123,45 b	81,55 c	137,08 b	28,56
0,20 - 0,40	94,39 a	49,70 b	45,95 bc	60,61 b	31,99 c	33,66 c	36,54
0,40 - 0,60	32,45 a	33,55 a	21,66 b	21,66 b	22,61 b	23,06 b	35,66
0,60 - 0,80	27,64 a	20,21 ab	7,14 c	5,45 c	9,24 c	3,75 c	32,71

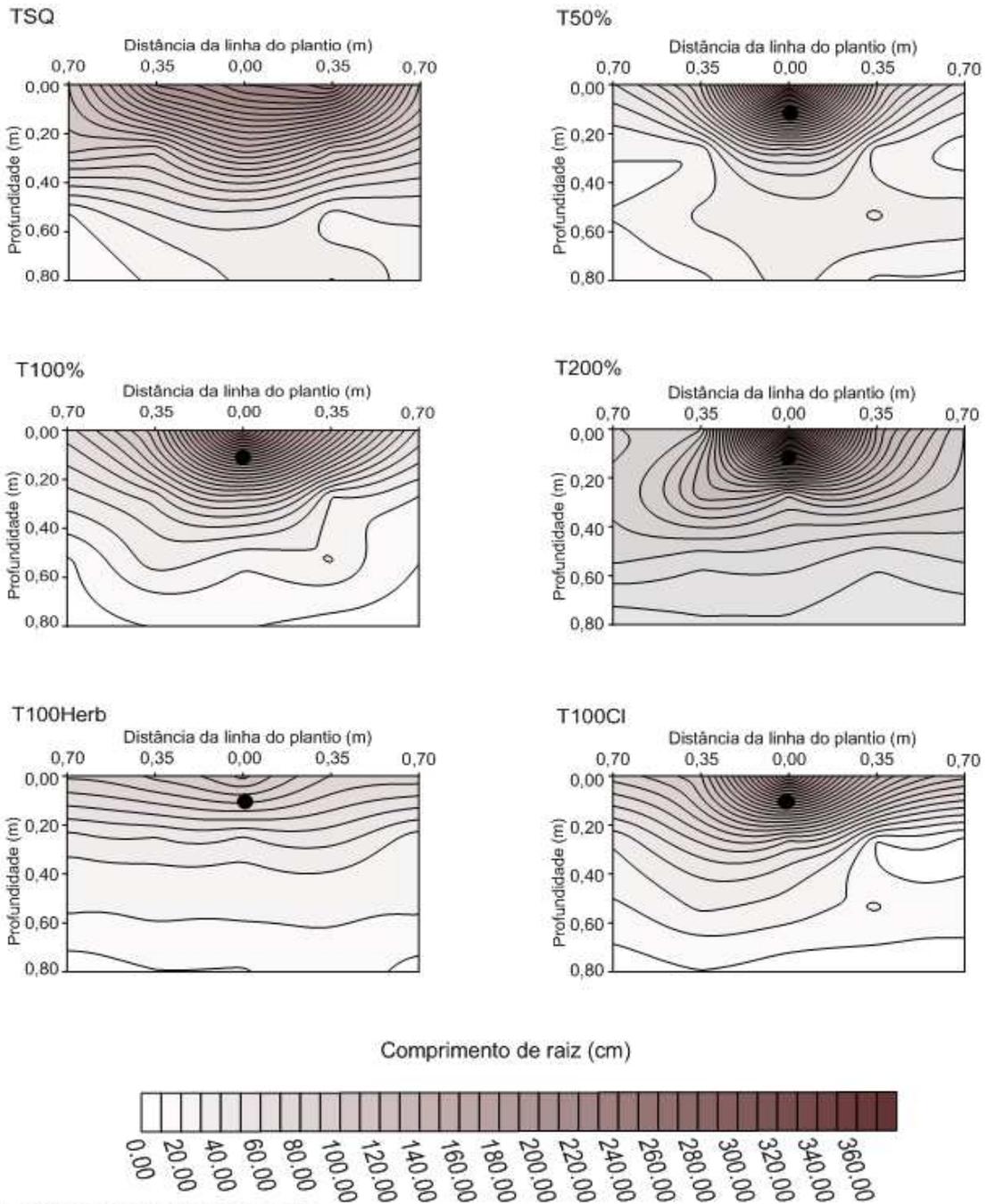
Médias seguidas pelas mesmas letras na linha não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey (P<0,05). TSQ = Sistema de cultivo em sequeiro; T50% = Irrigação com efluente de esgoto doméstico (EED) in natura atendendo 50% da evapotranspiração (ETP); T100%= Irrigação com EED in natura atendendo 100% da ETP; T200% = Irrigação com EED in natura atendendo 200% da ETP; T100Herb = Irrigação com EED mais herbicida atendendo 100% da ETP; T100Cl = Irrigação com EED desinfetado com hipoclorito de sódio atendendo 100% da ETP.

A irrigação com EED reduziu o comprimento de raiz no perfil do solo, pois a disponibilidade de água e nutrientes fornecida pelo efluente, pouco estimulou o desenvolvimento do sistema radicular nas últimas profundidades. Isso pode ser confirmado, observando-se as maiores médias de comprimento registradas nos tratamentos TSQ e T50% nas profundidades 0,40-0,60 e 0,60-0,80 m, sendo esses tratamentos as únicas condições de estresse hídrico avaliadas nesse experimento.

Na profundidade de 0,00-0,40 m a menor média de comprimento de raiz foi observada no tratamento T100Herb, que pode estar relacionado ao efeito deletério do herbicida sobre o sistema radicular da cultura.

Santos (2010) ao estudar o comprimento radicular de duas variedades de cana-de-açúcar em condições irrigada e de sequeiro por dois ciclos, verificou diferença estatística apenas na profundidade de 0,60-0,80 m no primeiro ciclo de uma das variedades. No seu trabalho, o manejo irrigado proporcionou uma distribuição mais homogênea de raízes no perfil, diferente do sistema de cultivo em sequeiro que houve uma predominância de raízes na primeira profundidade.

Com base na Figura 10 observou-se um decréscimo dos valores de comprimento de raiz, em todos os perfis, à medida que aumentou-se a profundidade de estudo no solo. Os valores de comprimento de raiz observados no tratamento TSQ apresentaram-se mais dispersos no perfil da trincheira em função da maior necessidade das raízes expandirem-se para aumentar sua eficiência na absorção de água. Esse comportamento não foi observado nos tratamentos irrigados devido ao fornecimento hídrico e nutricional proporcionado pelo EED. Os tratamentos irrigados; T50%, T100%, T200% e T100Cl apresentaram os maiores comprimentos de raiz na região próxima do tubo gotejador. Esse resultado não foi observado no tratamento T100Herb possivelmente devido à ação do herbicida adicionado no EED.



TSQ - Sistema de cultivo em sequeiro
 T50% - Irrigação com efluente de esgoto doméstico (EED) in natura atendendo 50% da evapotranspiração (ETP)
 T100% - Irrigação com EED in natura atendendo 100% da ETP
 T200% - Irrigação com EED in natura atendendo 200% da ETP
 T100Herb - Irrigação com EED mais herbicida atendendo 100% da ETP
 T100CI - Irrigação com EED desinfetado com Hipoclorito de sódio atendendo 100% da ETP

● Tubo gotejador enterrado a 0,16 m de profundidade na linha de plantio

Figura 10. Distribuição do comprimento de raiz (cm) no perfil do solo, influenciada pela irrigação com efluente de esgoto doméstico nos diferentes tratamentos.

5.1.4 Profundidade efetiva do sistema radicular com base na distribuição acumulada do comprimento de raiz

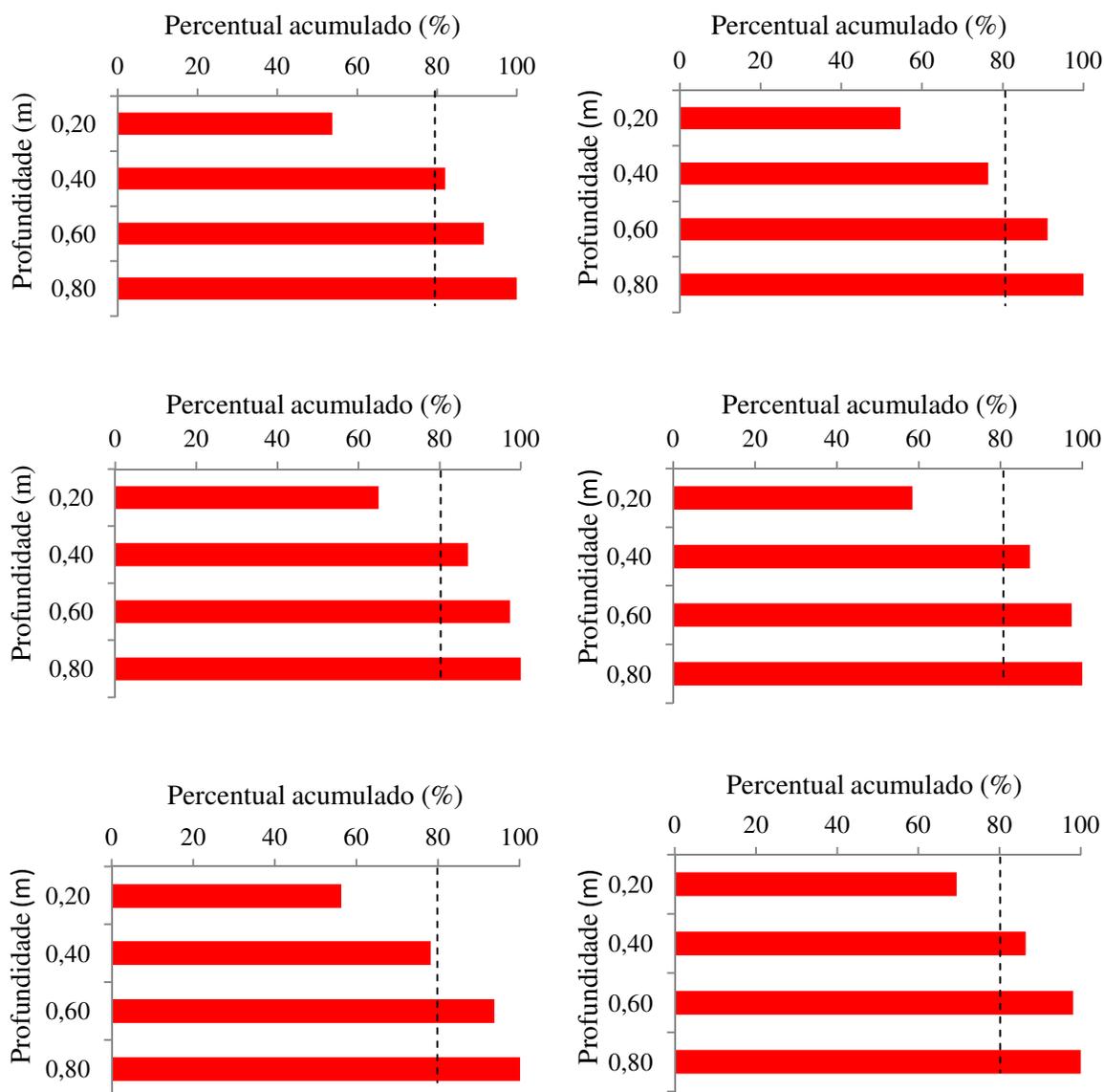
Com base na distribuição acumulada de raízes foi possível determinar a profundidade efetiva do sistema radicular da cana-de-açúcar, sendo esta definida por Bernardo et al. (2005), como sendo a profundidade, a partir da superfície, onde se encontram acumulados 80% do sistema radicular.

Os tratamentos TSQ, T100%, T200% e T100Cl apresentaram a profundidade efetiva do sistema radicular atuando nos primeiros 0,40 m a partir da superfície do solo. Nessa mesma profundidade, os tratamentos T50% e T100Herb apresentaram uma concentração de 76,43% e 78,09% do sistema radicular, respectivamente. O aprofundamento do sistema radicular proporcionado pelo estresse hídrico do T50% reduziu a quantidade de raízes na superfície e não permitiu o acúmulo dos 80% do sistema radicular nos primeiros 0,40m de profundidade. A redução de raízes ocorrida pela ação do herbicida nas primeiras profundidades do tratamento T100Herb justifica o fato dos 80% do sistema radicular desse tratamento não terem sido encontrados na profundidade de 0,00-0,40 m (Figura 11).

Embora o tratamento TSQ também tenha proporcionado um estresse hídrico e apresentado o maior aprofundamento de raízes, é importante ressaltar que este tratamento também proporcionou um maior desenvolvimento lateral do sistema radicular na superfície, o que garantiu que a profundidade efetiva ficasse concentrada na profundidade de 0,00-0,40 m.

Esses dados estão de acordo com Farias et al. (2008) ao afirmarem que, de modo geral, até 75% das raízes se encontram nos primeiros 45 cm de profundidade do solo. Esses autores após 280 dias de realização de experimento avaliaram o desenvolvimento do sistema radicular da cana-de-açúcar irrigada e cultivada em sequeiro, e, observaram que quando cultivada sem irrigação, 80% da fitomassa de raízes se encontravam nos primeiros 0,60 m de profundidade do solo e quando irrigada esse número aumentou para 90%.

Alvarez et al. (2000) ao avaliarem o desenvolvimento do sistema radicular de cana crua e queimada afirmaram que em cana crua 75% do sistema radicular encontra-se nos primeiros 0,40 m do solo e em cana queimada esse valor reduz para 72%. Para Inforzato e Alvarez (1957), 59% das raízes concentram-se nos 0,30m superficiais. Ball-Coelho et al. (1992) observaram que 62,70% da quantidade de raízes estão situadas na profundidade de 0,00-0,50 m.



TSQ - Sistema de cultivo em sequeiro

T50% - Irrigação com efluente de esgoto doméstico (EED) in natura atendendo 50% da evapotranspiração (ETP)

T100% - Irrigação com EED in natura atendendo 100% da ETP

T200% - Irrigação com EED in natura atendendo 200% da ETP

T100Herb - Irrigação com EED mais herbicida atendendo 100% da ETP

T100Cl - Irrigação com EED desinfetado com Hipoclorito de sódio atendendo 100% da ETP

Figura 11. Percentual acumulado do comprimento de raízes de cana-de-açúcar influenciada pela irrigação com efluente de esgoto doméstico nos diferentes tratamentos.

5.1.5 Volume de raiz

O cálculo dessa variável foi realizado com base nos dados de diâmetro e comprimento de raiz, e, correspondem ao volume médio de raiz encontrado numa área de 0,056 m².

O tratamento TSQ apresentou os maiores volumes de raiz nas profundidades de 0,00-0,20 m, 0,20-0,40 e 0,60-0,80 m. Na profundidade de 0,00-0,20 m os tratamentos irrigados mostraram-se estatisticamente iguais e apresentaram os menores valores de volume de raiz. Na profundidade de 0,20-0,40 m os tratamentos T100Herb e T100Cl não diferenciaram-se e foram os menores valores observados. Na profundidade 0,60-0,80 m as menores médias foram registradas nos tratamentos T100%, T200%, T100Herb e T100Cl, que também apresentaram-se estatisticamente iguais (Tabela 8).

Tabela 8. Volume de raiz (m³) de cana-de-açúcar, por quadricula de 0,056 m², influenciado pela irrigação com efluente de esgoto doméstico.

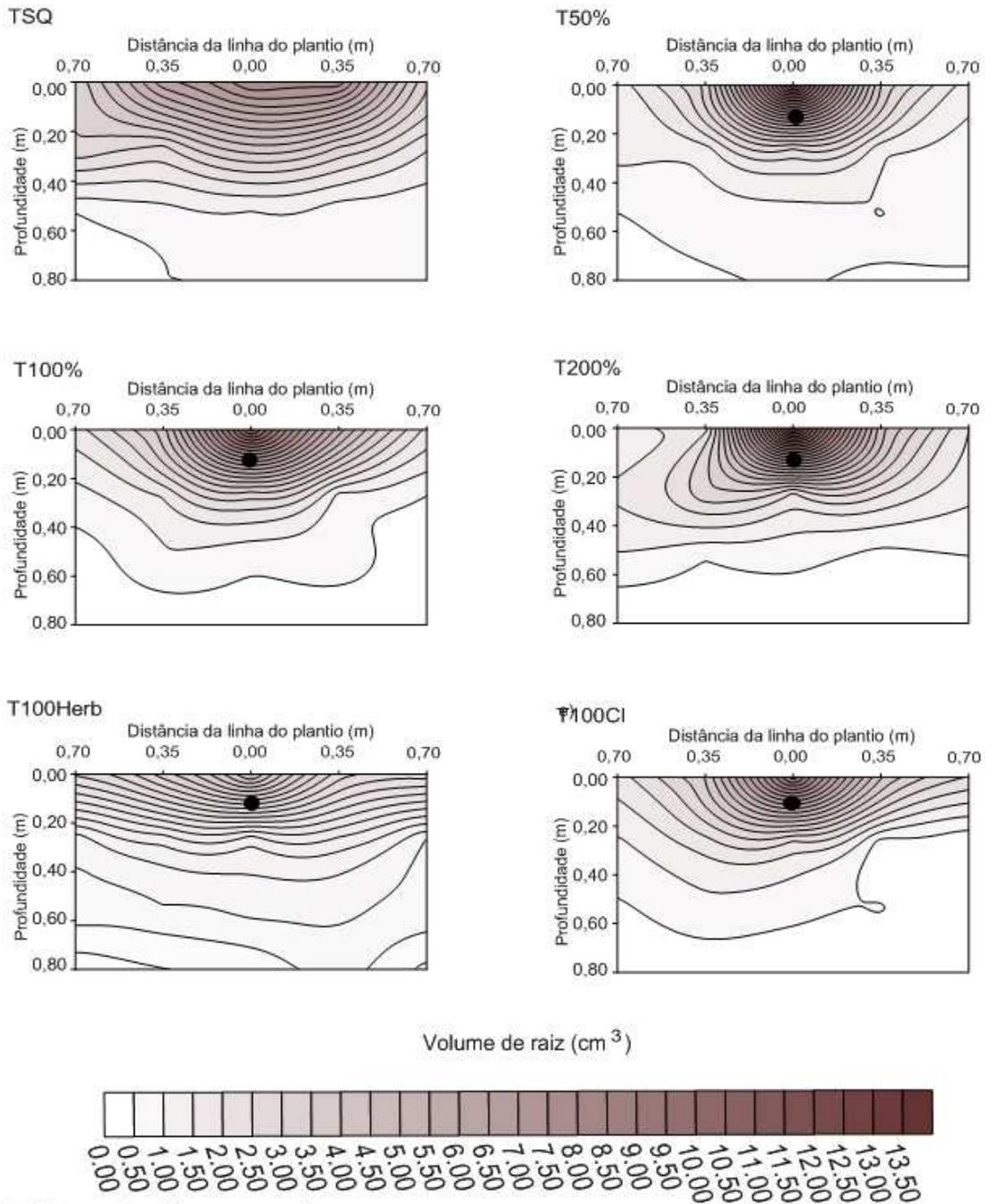
Profundidade (m)	TSQ	T50%	T100%	T200%	T100Herb	T100Cl	CV (%)
0,00 - 0,20	5,64 a	3,17 b	4,25 ab	3,88 b	2,56 b	3,88 b	26,47
0,20 - 0,40	2,40 a	1,26 b	1,17 b	1,90 ab	0,81 c	0,86 c	8,67
0,40 - 0,60	0,83 a	0,76 a	0,55 a	0,55 a	0,58 a	0,52 a	6,05
0,60 - 0,80	0,63 a	0,46 b	0,11 c	0,12 c	0,21 bc	0,07 c	9,83

Médias seguidas pelas mesmas letras na linha não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey (P<0,05). TSQ = Sistema de cultivo em sequeiro; T50% = Irrigação com efluente de esgoto doméstico (EED) in natura atendendo 50% da evapotranspiração (ETP); T100%= Irrigação com EED in natura atendendo 100% da ETP; T200% = Irrigação com EED in natura atendendo 200% da ETP; T100Herb = Irrigação com EED mais herbicida atendendo 100% da ETP; T100Cl = Irrigação com EED desinfetado com hipoclorito de sódio atendendo 100% da ETP.

Os maiores volumes de raiz registrados no tratamento TSQ também justificam-se pelo maior desenvolvimento do sistema radicular da planta quando submetida a uma condição de estresse hídrico, e ou menor disponibilidade de nutrientes. Essas limitações são reduzidas nos tratamentos irrigados devido ao suprimento hídrico proporcionado pela irrigação e pela presença de alguns nutrientes na composição do EED.

Santos (2010), ao avaliar o desenvolvimento de raiz de duas variedades de cana-de-açúcar sob condição irrigada e de sequeiro observou diferença entre os tratamentos apenas na profundidade de 0,60-0,80 m, onde o tratamento sem irrigação também apresentou um maior volume de raiz.

Observou-se em todos os mapas que os valores de volume de raiz decresceram à medida que aumentou-se a profundidade de estudo, estando estes resultados coerentes com os dados de comprimento e diâmetro de raízes (Figura 12). Buso (2006) ao avaliar o volume de raiz da cana-de-açúcar plantada em gema e em tolete, também observou coerência entre o aumento do volume de raiz com o comprimento radicular, afirmando que somente uma dessas variáveis é suficiente para a realização de estudos sobre raízes.



TSQ - Sistema de cultivo em sequeiro
T50% - Irrigação com efluente de esgoto doméstico (EED) in natura atendendo 50% da evapotranspiração (ETP)
T100% - Irrigação com EED in natura atendendo 100% da ETP
T200% - Irrigação com EED in natura atendendo 200% da ETP
T100Herb - Irrigação com EED mais herbicida atendendo 100% da ETP
T100Cl - Irrigação com EED desinfetado com Hipoclorito de sódio atendendo 100% da ETP

● Tubo gotejador enterrado a 0,16 m de profundidade na linha de plantio

Figura 12. Distribuição do volume de raiz (cm³) no perfil do solo, influenciada pela irrigação com efluente de esgoto doméstico nos diferentes tratamentos.

5.2 Influência da irrigação com efluente de esgoto doméstico (EED) nos atributos químicos do solo

5.2.1 Acidez ativa (pH)

Houve diferença significativa entre os tratamentos apenas na profundidade de 0,20-0,40 m. Nesta, os tratamentos TSQ e T200% apresentaram os menores e maiores valores de pH, respectivamente (Tabela 9).

Tabela 9. pH solo influenciado pela irrigação com efluente de esgoto doméstico

Profundidade (m)	TSQ	T50%	T100%	T200%	T100Herb	T100Cl	CV (%)
0,00 - 0,20	5,28 a	5,52 a	5,48 a	5,73 a	5,66 a	5,69 a	4,55
0,20 - 0,40	4,95 b	5,83 ab	5,78 ab	6,16 a	5,52 ab	5,98 a	5,54
0,40 - 0,60	5,19 a	5,70 a	5,95 a	5,96 a	5,95 a	5,98 a	7,07
0,60 - 0,80	5,06 a	5,37 a	5,59 a	5,66 a	5,66 a	5,96 a	7,55

Médias seguidas pelas mesmas letras na linha não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey ($P < 0,05$). TSQ = Sistema de cultivo em sequeiro; T50% = Irrigação com efluente de esgoto doméstico (EED) in natura atendendo 50% da evapotranspiração (ETP); T100%= Irrigação com EED in natura atendendo 100% da ETP; T200% = Irrigação com EED in natura atendendo 200% da ETP; T100Herb = Irrigação com EED mais herbicida atendendo 100% da ETP; T100Cl = Irrigação com EED desinfetado com hipoclorito de sódio atendendo 100% da ETP.

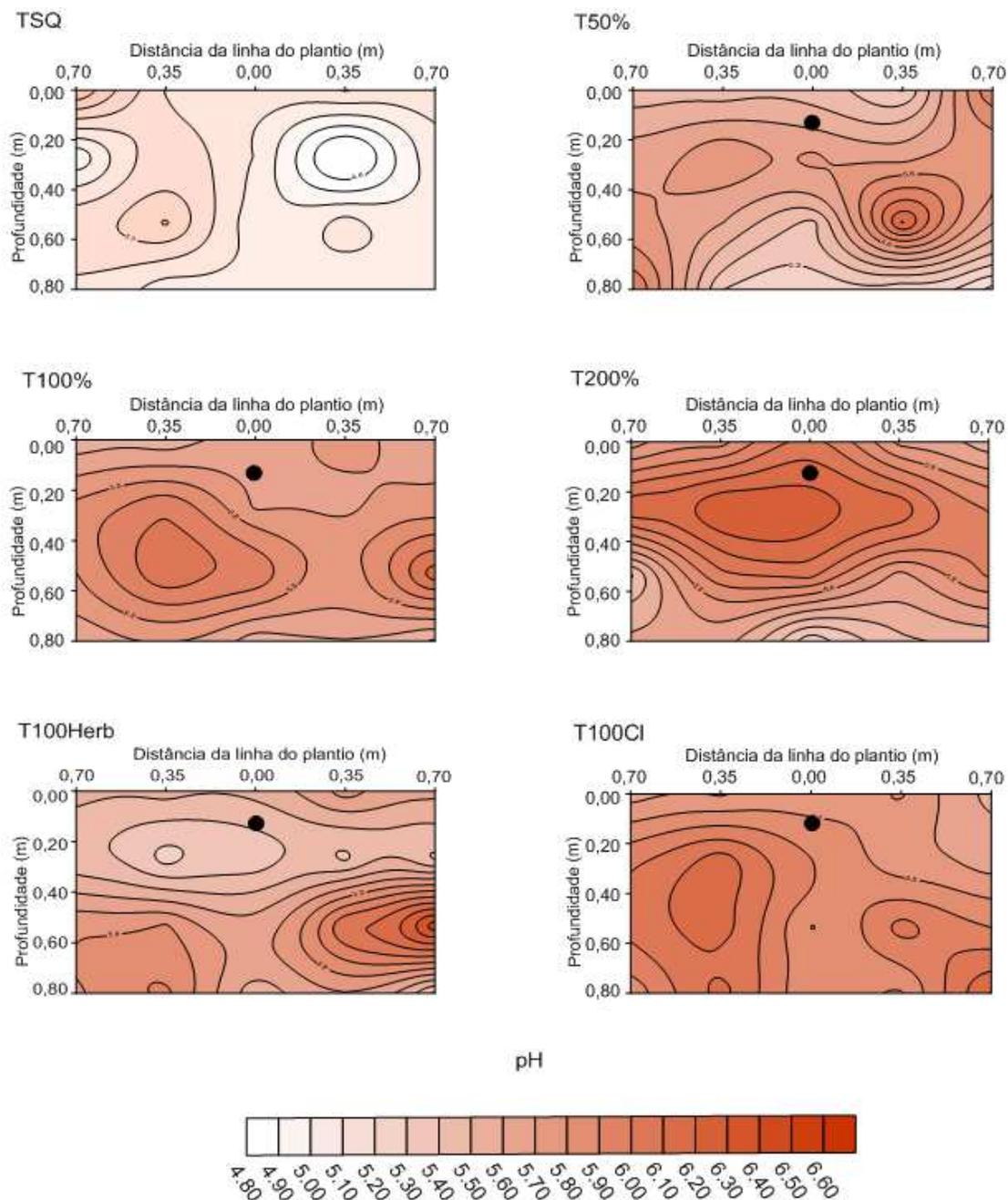
De acordo com Lucchesi (2001), a cultura da cana-de-açúcar apresenta um melhor desenvolvimento em solos com pH que variam entre 6,0 e 6,5. Com exceção do T200%, na profundidade de 0,20-0,40 m, todos os tratamentos apresentaram valores de pH abaixo do requerido pela cultura, porém, os tratamentos irrigados com EED apresentaram uma tendência na redução da acidez do solo quando comparados com o tratamento TSQ.

De acordo com Da Fonseca (2005) e Medeiros et al. (2005), a adição de bases (Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ e Na^+) e o fornecimento de material orgânico proporcionados pelo uso do EED são fatores que contribuem para a redução da acidez do solo.

Leal (2007) ao estudar a influência do uso de EED nos atributos químicos do solo sob cultivo de cana-de-açúcar, encontrou variações significativas de pH somente nas

profundidades de 0,40-0,60 e 0,80-1,00 m. Em sua pesquisa o tratamento de maior lâmina (200%) proporcionou maiores valores de pH quando comparado ao sistema de cultivo em sequeiro ressaltando que os resultados encontrados não refletem benefícios agronômicos quanto à disponibilidade de nutrientes para o solo e, portanto, a calagem continua sendo a melhor forma para combater a acidez de solos com baixa fertilidade.

Ao ser comparado com os tratamentos irrigados, o TSQ apresentou menores valores de pH em todo o perfil, além disso, o aumento da lâmina de irrigação proporcionou uma redução da acidez do solo, principalmente, na região próxima ao tubo gotejador. Entre os tratamentos cuja lâmina de aplicação foi 100%, observou-se pouca variação dos valores de pH. Nesses tratamentos as médias oscilaram entre os valores máximos e mínimos de 5,98 e 5,48, respectivamente. No tratamento T200% verificou-se uma redução da acidez do solo na região próxima do tubo gotejador e um aumento da mesma à medida que ocorreu o afastamento do ponto de emissão. O efeito alcalino do EED associado à lâmina excedente de irrigação foram os principais responsáveis pelos maiores valores de pH encontrados nesse tratamento na profundidade de 0,20-0,40m (Figura 13).



TSQ - Sistema de cultivo em sequeiro
T50% - Irrigação com efluente de esgoto doméstico (EED) in natura atendendo 50% da evapotranspiração (ETP)
T100% - Irrigação com EED in natura atendendo 100% da ETP
T200% - Irrigação com EED in natura atendendo 200% da ETP
T100Herb - Irrigação com EED mais herbicida atendendo 100% da ETP
T100CI - Irrigação com EED desinfetado com Hipoclorito de sódio atendendo 100% da ETP

● Tubo gotejador enterrado a 0,16 m de profundidade na linha de plantio

Figura 13. Distribuição dos valores de pH no perfil do solo influenciada pela irrigação com efluente de esgoto doméstico nos diferentes tratamentos.

5.2.2 Acidez trocável (Al^{3+}) e acidez potencial ($Al^{3+}+H^+$)

O tratamento TSQ apresentou os maiores valores de acidez trocável em todas as profundidades estudadas, apenas na profundidade de 0,00-0,20m os valores observados entre os tratamentos TSQ, T50% e T100Cl foram estatisticamente iguais. Nas demais profundidades o aumento da lâmina de irrigação promoveu a redução dos teores de Al^{3+} (Tabela 10).

Tabela 10. Teor de Al^{3+} ($mmol_c kg^{-1}$) do solo influenciado pela irrigação com efluente de esgoto doméstico.

Profundidade (m)	TSQ	T50%	T100%	T200%	T100Herb	T100Cl	CV (%)
0,00 - 0,20	1,95 a	1,50 a	0,54 ab	0,36 b	1,31 ab	1,54 a	24,87
0,20 - 0,40	6,26 a	1,87 b	0,37 b	0,29 b	1,76 b	1,15 b	39,30
0,40 - 0,60	11,56 a	4,31 b	0,63 cd	1,22 cd	4,39 b	3,54 bc	29,86
0,60 - 0,80	13,54 a	7,26 b	1,28 c	1,87 c	7,30 b	5,95 c	21,96

Médias seguidas pelas mesmas letras na linha não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey ($P<0,05$). TSQ = Sistema de cultivo em sequeiro; T50% = Irrigação com efluente de esgoto doméstico (EED) in natura atendendo 50% da evapotranspiração (ETP); T100%= Irrigação com EED in natura atendendo 100% da ETP; T200% = Irrigação com EED in natura atendendo 200% da ETP; T100Herb = Irrigação com EED mais herbicida atendendo 100% da ETP; T100Cl = Irrigação com EED desinfetado com hipoclorito de sódio atendendo 100% da ETP.

Não houve diferença significativa entre os valores de $Al^{3+}+H^+$ observados na profundidade de 0,00-0,20 m. O tratamento TSQ apresentou uma maior acidez potencial nas profundidades de 0,20-0,40 m, 0,40-0,60 m e 0,60-0,80 m (Tabela 11).

Tabela 11. $Al^{3+}+H^+$ ($mmol_c kg^{-1}$) do solo influenciada pela irrigação com efluente de esgoto doméstico.

Profundidade (m)	TSQ	T50%	T100%	T200%	T100Herb	T100Cl	CV (%)
0,00 - 0,20	22,55 a	23,81 a	22,11 a	25,05 a	17,61 a	23,18 a	19,63
0,20 - 0,40	34,05 a	25,05 ab	22,85 ab	21,41 ab	19,65 b	20,78 ab	20,42
0,40 - 0,60	41,45 a	25,85 b	24,15 b	17,95 b	19,28 b	24,35 b	19,59
0,60 - 0,80	31,54 a	26,02 b	14,55 b	20,72 b	23,65 b	27,18 b	29,10

Médias seguidas pelas mesmas letras na linha não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey ($P < 0,05$). TSQ = Sistema de cultivo em sequeiro; T50% = Irrigação com efluente de esgoto doméstico (EED) in natura atendendo 50% da evapotranspiração (ETP); T100%= Irrigação com EED in natura atendendo 100% da ETP; T200% = Irrigação com EED in natura atendendo 200% da ETP; T100Herb = Irrigação com EED mais herbicida atendendo 100% da ETP; T100Cl = Irrigação com EED desinfetado com hipoclorito de sódio atendendo 100% da ETP.

Com base no equilíbrio químico dos elementos, a atividade do Al^{3+} e das diversas formas minerais de sua hidrólise, depende basicamente do tipo mineral da fase sólida e da faixa de pH do solo. Em intervalos de pH entre 5,5 e 6,0, a solubilidade do Al^{3+} é menor, sendo essa uma das causas para que a aplicação de calcário no solo atinja, no mínimo, um pH igual a 5,5. A elevação dos teores de Al^{3+} é utilizada como indicadora de acidez devido à liberação de íons de H^+ ocorrida após o processo de hidrólise desse elemento, que dependendo da sua concentração, poderá dificultar o enraizamento em profundidades maiores (SOUSA et al., 2007; ALCANTARA e CARDOSO, 2006).

Embora não tenha sido verificada diferença significativa entre os valores de pH, exceto na profundidade de 0,20-0,40 m (Tabela 9), os teores de $Al^{3+}+H^+$ são coerentes com os valores de pH obtidos nessa pesquisa. Os tratamentos que apresentaram uma tendência de aumento dos valores de pH (Tabela 9), também apresentaram os menores teores de Al^{3+} encontrados (T100%, T200%, T100Cl e T100Herb).

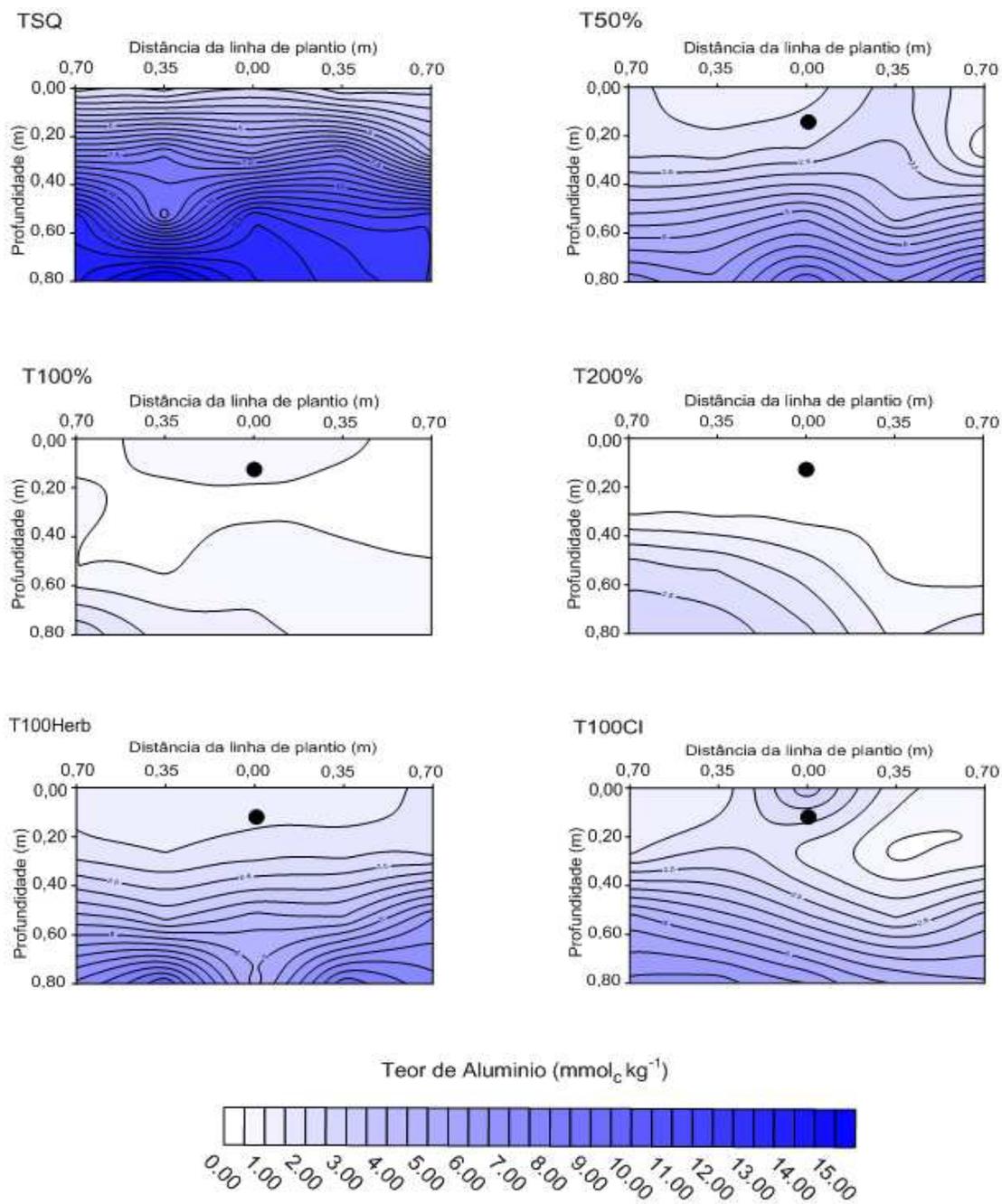
Da Fonseca (2005) verificou a influência do uso de EED na redução da acidez ativa (H^+) e da acidez potencial do solo ($Al^{3+}+H^+$). Azevedo e Oliveira (2005), não observaram eficiência no uso de EED para a redução da acidez potencial, porém é importante ressaltar que o experimento realizado por esses autores teve apenas seis meses de duração, podendo esse período ter sido insuficiente para surtir efeitos permanentes e significativos no solo. Leal et al.

(2009) também observaram menores valores de acidez potencial no solo após a irrigação com EED.

Observou-se em todos os tratamentos que os teores de Al^{3+} aumentaram juntamente com a profundidade, o que pode estar relacionado com o maior efeito residual do calcário utilizado para a correção da acidez do solo nas primeiras profundidades, sendo este o responsável pela neutralização da acidez ativa e pela redução da solubilidade do Al^{3+} . Os tratamentos cuja lâmina aplicada foi de 100% e o T200% promoveram uma redução nos teores de Al^{3+} quando comparados ao TSQ. Apenas o tratamento T50% apresentou um comportamento de distribuição da acidez trocável muito semelhante ao tratamento sem irrigação, com elevados teores em praticamente todo o perfil. O T200% apresentou os menores valores de acidez trocável e promoveu uma distribuição mais uniforme na trincheira, que pode ser justificado pela maior abrangência do bulbo molhado, proporcionado por esse tratamento (Figura 14).

Os mapas revelaram que o uso de EED, além de reduzir os valores de acidez potencial, promoveu uma distribuição mais heterogênea dessa variável quando comparado ao tratamento TSQ, que por sua vez apresentou os maiores valores registrados. (Figura 15).

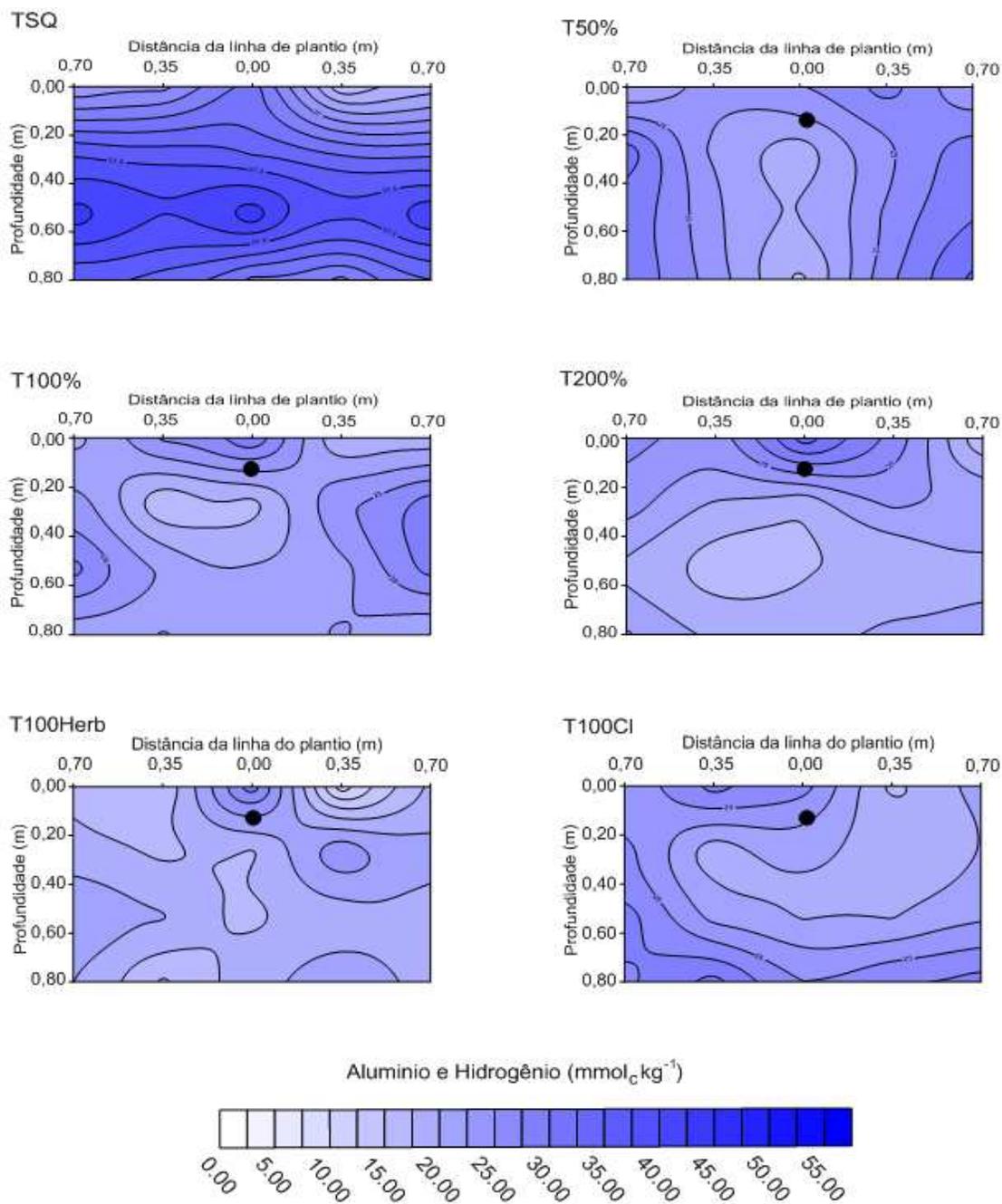
Ao observar os mapas dos perfis irrigados, verificou-se uma redução nos valores da acidez potencial na região central do perfil. Nesses tratamentos, independente da lâmina aplicada, os maiores teores de $Al^{3+} + H^+$ foram encontrados nos pontos laterais da trincheira, sendo esses os locais que sofreram uma menor influência do bulbo molhado. Ao comparar o tratamento TSQ com os tratamentos irrigados, observou-se que a acidez potencial se distribuiu de forma mais homogênea e paralela à superfície do solo no tratamento que não beneficiou-se com a irrigação. Tal comportamento não foi observado nos tratamentos irrigados, provavelmente, por estes apresentarem áreas, dentro da trincheira, que o bulbo molhado não consegue alcançar, o que torna o perfil mais heterogêneo, inclusive dentro de uma mesma profundidade (Figura 15).



TSQ - Sistema de cultivo em sequeiro
T50% - Irrigação com efluente de esgoto doméstico (EED) in natura atendendo 50% da evapotranspiração (ETP)
T100% - Irrigação com EED in natura atendendo 100% da ETP
T200% - Irrigação com EED in natura atendendo 200% da ETP
T100Herb - Irrigação com EED mais herbicida atendendo 100% da ETP
T100CI - Irrigação com EED desinfetado com Hipoclorito de sódio atendendo 100% da ETP

● Tubo gotejador enterrado a 0,16 m de profundidade na linha de plantio

Figura 14. Distribuição dos teores de Al³⁺ no perfil do solo, influenciada pela irrigação com efluente de esgoto doméstico nos diferentes tratamentos.



TSQ - Sistema de cultivo em sequeiro
T50% - Irrigação com efluente de esgoto doméstico (EED) in natura atendendo 50% da evapotranspiração (ETP)
T100% - Irrigação com EED in natura atendendo 100% da ETP
T200% - Irrigação com EED in natura atendendo 200% da ETP
T100Herb - Irrigação com EED mais herbicida atendendo 100% da ETP
T100Cl - Irrigação com EED desinfetado com Hipoclorito de sódio atendendo 100% da ETP

● Tubo gotejador enterrado a 0,16 m de profundidade na linha de plantio

Figura 15. Distribuição dos teores de $\text{Al}^{3+} + \text{H}^+$ no perfil do solo influenciada pela irrigação com efluente de esgoto doméstico nos diferentes tratamentos.

5.2.3 Cálcio

Os tratamentos de TSQ e T200% apresentaram os menores e maiores valores, respectivamente, em todas as profundidades estudadas, exceto para a profundidade de 0,20-0,40 m, que não foi registrada diferença significativa entre os tratamentos. Dentre os tratamentos irrigados, o tratamento T50% foi o único que apresentou teores de Ca^{2+} semelhante aos encontrados no TSQ em todas as profundidades. Nas profundidades de 0,40-0,60 e 0,60-0,80 m os tratamentos que atenderam 100% da necessidade hídrica da cultura apresentaram valores intermediários entre os tratamentos TSQ e T200% (Tabela 12).

Tabela 12. Teor de cálcio do solo ($\text{mmol}_c \text{kg}^{-1}$) influenciado pela irrigação com efluente de esgoto doméstico.

Profundidade (m)	TSQ	T50%	T100%	T200%	T100Herb	T100Cl	CV (%)
0,00 - 0,20	31,12 b	30,65 b	39,29 ab	45,97 a	30,31 b	40,15 ab	12,52
0,20 - 0,40	25,52 a	21,60 a	28,92 a	26,60 a	26,68 a	26,55 a	21,63
0,40 - 0,60	16,17 b	13,78 b	30,69 ab	38,39 a	30,54 ab	24,23 ab	26,76
0,60 - 0,80	9,60 d	8,01d	24,93 bc	33,25 a	28,12 ab	19,74 c	13,69

Médias seguidas pelas mesmas letras na linha não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey ($P < 0,05$). TSQ = Sistema de cultivo em sequeiro; T50% = Irrigação com efluente de esgoto doméstico (EED) in natura atendendo 50% da evapotranspiração (ETP); T100%= Irrigação com EED in natura atendendo 100% da ETP; T200% = Irrigação com EED in natura atendendo 200% da ETP; T100Herb = Irrigação com EED mais herbicida atendendo 100% da ETP; T100Cl = Irrigação com EED desinfetado com hipoclorito de sódio atendendo 100% da ETP.

De acordo com Da Fonseca (2001) os maiores teores de Ca^{2+} registrados no tratamento T200% são explicados pelo maior aporte de Ca^{2+} proporcionado pelo aumento da lâmina de irrigação com EED. O autor afirma que a menor exportação de nutrientes pela cultura também pode influenciar no acúmulo de determinados nutrientes no solo.

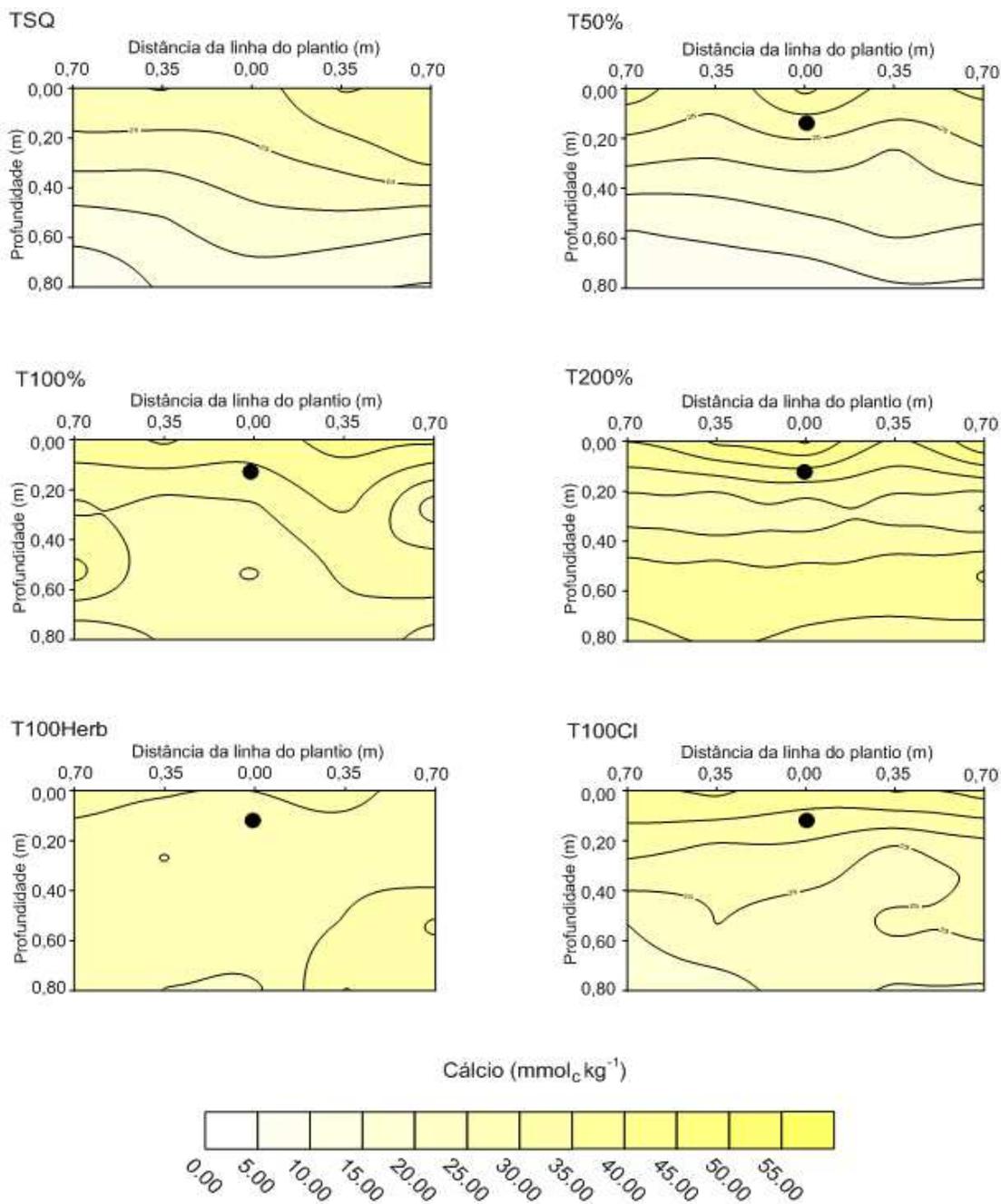
Sendo assim, o desenvolvimento do sistema radicular é um dos fatores que influencia na taxa de absorção de nutrientes pela planta, e em se tratando de sistema de cultivo em sequeiro, as raízes apresentam-se mais distribuídas, tanto lateralmente como em profundidade, o que as tornam mais eficientes na absorção de nutrientes. Esse fato pode ser um dos possíveis responsáveis pela redução dos teores de Ca^{2+} nas últimas profundidades do tratamento TSQ.

Na pesquisa de Heidarpour et al. (2007) realizada no Irã, estudou-se a influência da irrigação com EED e com água subterrânea nos atributos químicos do solo nas profundidades de 0,00-0,15 m; 0,15-0,30 m e 0,30-0,60 m, onde os teores de Ca^{2+} encontrados na primeira e na última profundidade foram iguais para os dois tratamentos e, na segunda profundidade, o tratamento que utilizou-se de água subterrânea, apresentou maiores teores de Ca^{2+} . Porém, ressalta-se que a concentração de Ca^{2+} presente na água subterrânea, apresentou cerca de 20 mg L^{-1} de Ca^{2+} a mais do que a concentração presente na água residuária.

Observou-se uma grande similaridade na distribuição de Ca^{2+} entre os tratamentos TSQ e T50%, em que os teores apresentaram-se em maiores concentrações nas primeiras profundidades com uma redução gradativa à medida que aumentou a profundidade de estudo no solo. Ressalta-se que no tratamento TSQ as fontes de Ca^{2+} restringiram-se somente a aplicação de calcário no início de experimento e as condições naturais do solo, por isso, as maiores concentrações desse elemento foram encontradas nas primeiras profundidades. O tratamento T50% apresentou um comportamento de distribuição bastante semelhante ao TSQ (Figura 16).

Nos tratamentos cuja lâmina aplicada foi de 100%, também observou-se uma redução nos teores de Ca^{2+} , em função do aumento da profundidade do solo, porém, essa redução não foi tão acentuada como as observadas nos tratamentos TSQ e T50% (Figura 16). Isso pode ser explicado pelo fato da lâmina de 100% ter promovido um maior aporte de Ca^{2+} ao solo, além disso, o posicionamento do tubo gotejador, enterrado a uma profundidade de 0,16 m, favoreceu a uma distribuição mais homogênea de Ca^{2+} nas duas primeiras profundidades.

Com relação ao tratamento T200%, observou-se um maior aporte de Ca^{2+} em todas as profundidades estudadas (Figura 16). Na profundidade de 0,20-0,40 m, assim como nos demais tratamentos, também verificou-se as maiores concentrações deste cátion, no entanto, as diferenças observadas entre as profundidades inferiores foram menores, justificando-se pelo fato da lâmina excedente ter proporcionado a formação de um bulbo molhado com uma maior área de atuação, além disso, o excesso de EED aplicado na irrigação não estimulou o aprofundamento do sistema radicular da cultura, o que reduziu a absorção desse nutriente pelas plantas nas últimas profundidades.



TSQ - Sistema de cultivo em sequeiro
T50% - Irrigação com efluente de esgoto doméstico (EED) in natura atendendo 50% da evapotranspiração (ETP)
T100% - Irrigação com EED in natura atendendo 100% da ETP
T200% - Irrigação com EED in natura atendendo 200% da ETP
T100Herb - Irrigação com EED mais herbicida atendendo 100% da ETP
T100Cl - Irrigação com EED desinfetado com Hipoclorito de sódio atendendo 100% da ETP

● Tubo gotejador enterrado a 0,16 m de profundidade na linha de plantio

Figura 16. Distribuição dos teores de Ca^{2+} no perfil do solo influenciado pela irrigação com efluente de esgoto doméstico nos diferentes tratamentos.

5.2.4 Magnésio

Os valores de Mg^{2+} apresentados na Tabela 13 indicam o tratamento TSQ e o T200% como sendo o menor e o maior fornecedor desse nutriente ao solo, respectivamente. E de comportamento semelhante ao Ca^{2+} , também não foram observadas diferenças significativas entre os teores de Mg^{2+} entre os tratamentos TSQ e T50%.

Tabela 13. Teor de magnésio do solo ($mmol_c\ kg^{-1}$) influenciado pela irrigação com efluente de esgoto doméstico

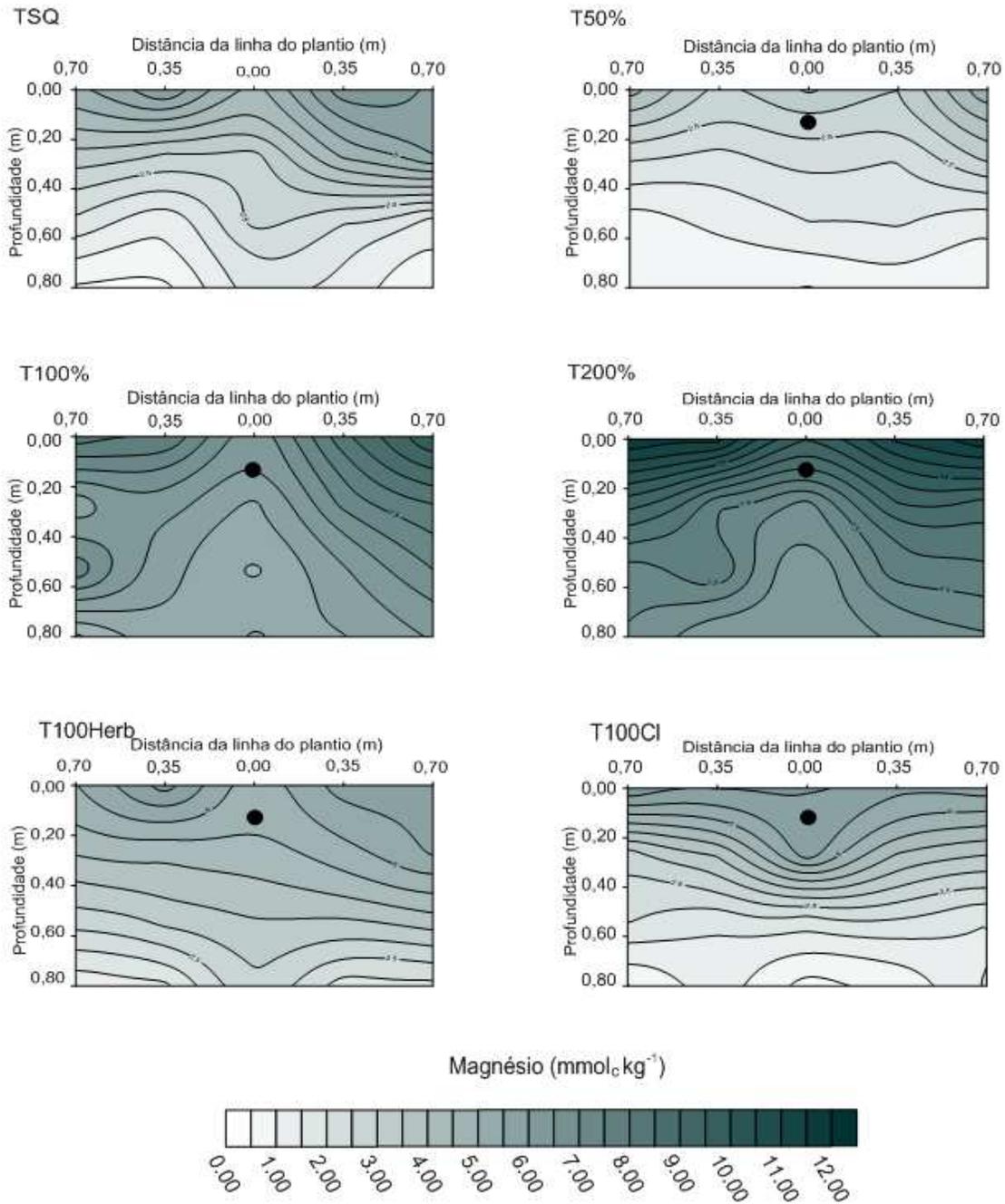
Profundidade (m)	TSQ	T50%	T100%	T200%	T100Herb	T100Cl	CV (%)
0,00 - 0,20	5,40 c	3,38 c	8,79 ab	11,21 a	5,61 cb	4,74 c	17,70
0,20 - 0,40	3,56 bc	2,29 c	6,51 a	8,24 a	4,57 b	3,79 ab	13,02
0,40 - 0,60	1,66 b	1,22 b	6,18 a	8,37 a	1,71 b	7,92 a	19,70
0,60 - 0,80	0,82 d	0,62 d	5,34 b	6,85 a	2,63 c	5,97 ab	13,97

Médias seguidas pelas mesmas letras na linha não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey ($P < 0,05$). TSQ = Sistema de cultivo em sequeiro; T50% = Irrigação com efluente de esgoto doméstico (EED) in natura atendendo 50% da evapotranspiração (ETP); T100% = Irrigação com EED in natura atendendo 100% da ETP; T200% = Irrigação com EED in natura atendendo 200% da ETP; T100Herb = Irrigação com EED mais herbicida atendendo 100% da ETP; T100Cl = Irrigação com EED desinfetado com hipoclorito de sódio atendendo 100% da ETP.

Os maiores teores de Mg^{2+} verificados no tratamento T200% não estão de acordo com os obtidos por Da Fonseca (2001), que não verificou diferença entre os valores de Mg^{2+} no solo em função da aplicação de diferentes lâminas de EED. No entanto, corroboram com Falkyner e Smith (1997) ao observarem o aumento dos teores de Mg^{2+} em função do aumento da disposição de EED no solo.

O tratamento T50% não forneceu um aporte de Mg^{2+} suficiente para que houvesse diferença significativa com o tratamento TSQ (Figura 17). Nesses dois tratamentos os teores de Mg^{2+} decresceram à medida que a profundidade de coleta aumentou. Com relação aos tratamentos que atenderam 100% da evapotranspiração, observou-se um maior aporte de Mg^{2+} quando comparados aos tratamentos TSQ e ao T50%. Porém, a distribuição dos teores desse elemento no perfil do solo ocorreu de forma semelhante entre todos os tratamentos citados, sendo as maiores concentrações registradas nas profundidades de 0,00-0,20 e 0,20-0,40 m.

A distribuição dos teores de Mg^{2+} observadas no perfil do T200% ocorreu de forma mais homogênea quando comparada aos demais tratamentos (Figura 17). Essa menor variabilidade justifica-se pela maior área de atuação do bulbo molhado formado por esse tratamento, uma vez que, foi na região do bulbo onde se concentraram os maiores teores dos elementos aportados pelo EED.



TSQ - Sistema de cultivo em sequeiro
T50% - Irrigação com efluente de esgoto doméstico (EED) in natura atendendo 50% da evapotranspiração (ETP)
T100% - Irrigação com EED in natura atendendo 100% da ETP
T200% - Irrigação com EED in natura atendendo 200% da ETP
T100Herb - Irrigação com EED mais herbicida atendendo 100% da ETP
T100Cl - Irrigação com EED desinfetado com Hipoclorito de sódio atendendo 100% da ETP

● Tubo gotejador enterrado a 0,16 m de profundidade na linha de plantio

Figura 17. Distribuição dos teores de Mg^{2+} no perfil do solo influenciado pela irrigação com efluente de esgoto doméstico nos diferentes tratamentos.

5.2.5 Nitrogênio Total (NT)

Os maiores teores de NT foram registrados nos tratamentos irrigados, com exceção do tratamento T50%, cujos valores observados foram iguais aos do tratamento TSQ em todas as profundidades (Tabela 14). Os teores de NT nos tratamentos que atenderam 100% da evapotranspiração apresentaram valores intermediários entre os tratamentos T50% e T200% na profundidade de 0,60-0,80 m, e apenas na profundidade de 0,40–0,60 m o tratamento T100Cl apresentou média estatisticamente igual ao tratamento T200% (Tabela 14).

Tabela 14. Teor de nitrogênio total do solo (g Kg^{-1}) influenciado pela irrigação com efluente de esgoto doméstico.

Profundidade (m)	TSQ	T50%	T100%	T200%	T100Herb	T100Cl	CV (%)
0,00 - 0,20	0,59 b	0,52 b	0,65 ab	0,94 a	0,69 ab	0,71 ab	16,47
0,20 - 0,40	0,46 c	0,36 c	0,46 c	0,74 a	0,68 ab	0,61 b	6,57
0,40 - 0,60	0,31 cd	0,31 d	0,41 bc	0,59 a	0,41 b	0,58 a	8,05
0,60 - 0,80	0,31 d	0,30 d	0,40 bc	0,51 a	0,37 c	0,47 ab	5,83

Médias seguidas pelas mesmas letras na linha não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey ($P < 0,05$). TSQ = Sistema de cultivo em sequeiro; T50% = Irrigação com efluente de esgoto doméstico (EED) in natura atendendo 50% da evapotranspiração (ETP); T100% = Irrigação com EED in natura atendendo 100% da ETP; T200% = Irrigação com EED in natura atendendo 200% da ETP; T100Herb = Irrigação com EED mais herbicida atendendo 100% da ETP; T100Cl = Irrigação com EED desinfetado com hipoclorito de sódio atendendo 100% da ETP.

De acordo com Nogueira (2008) o fornecimento de água pela irrigação associado à baixa relação C/N do EED e a elevada relação C/N dos restos culturais; são fatores que contribuem para o aumento do metabolismo microbiano do solo, e juntos resultam na rápida mineralização do nitrogênio.

De acordo com Deon (2010), o N aplicado pelo EED induz a decomposição da matéria orgânica do solo e, em decorrência, ocorre uma maior liberação de CO_2 seguida da liberação do N da matéria orgânica oxidada. Essa afirmação é coerente com os resultados encontrados por Meli et al. (2002), ao observarem maiores valores de respirometria microbiológica, N microbiano e N solúvel em solo irrigado com EED por 15 anos.

Deon et al. (2010) realizando estudo na mesma área da presente pesquisa foi desenvolvida, verificaram que a irrigação com EED reduziu a necessidade da aplicação de adubos nitrogenados. Esses autores observaram um aporte de 320 Kg ha⁻¹ de N pelo tratamento T200%, sendo essa quantidade muito superior a necessidade requerida pela cultura da cana-de-açúcar no estado de São Paulo, que é de 120 Kg ha⁻¹.

O aumento nos teores de N pelo uso de EED também foram observados por Fuentes et al. (2002), Andrade et al. (2005 b) e Azevedo e Oliveira. (2005). Já Medeiros et al. (2005) não observaram diferenças significativas entre os valores de NT encontrados num solo irrigado com EED em comparação a um solo irrigado com água de abastecimento, o que implica dizer que: O EED pode substituir o uso da água de abastecimento na irrigação sem causar reduções nos teores de NT presentes no solo.

Observou-se em todos os tratamentos que as concentrações de NT decresceram à medida que aumentou-se a profundidade de estudo no perfil (Figura 18). No tratamento TSQ isso ocorreu devido ao maior acúmulo, na primeira profundidade, dos resíduos de adubos nitrogenados utilizados para corrigir a deficiência de N durante os ciclos da cultura, além disso, a mineralização dos restos culturais sobre a superfície do solo também contribuiu para o fornecimento desse nutriente às primeiras profundidades.

Os teores de NT observados nos tratamentos T100%, T100Herb e T100Cl também foram maiores nas primeiras profundidades e mais elevados do que os observados no tratamento TSQ (Figura 18). Esses tratamentos apresentaram uma distribuição mais irregular no perfil do solo quando comparados ao tratamento T200%. O tratamento T200% também apresentou um decréscimo das concentrações de NT à medida que se aumentou a profundidade de estudo no solo, porém, essa redução foi menos acentuada do que as observadas nos demais tratamentos irrigados. Isso pode explicado pelo maior aporte de NT promovido pela lâmina excedente e pela maior área de atuação do bulbo molhado formada por esse tratamento, o que permitiu uma distribuição, tanto lateral como vertical, mais homogênea dos teores de NT.

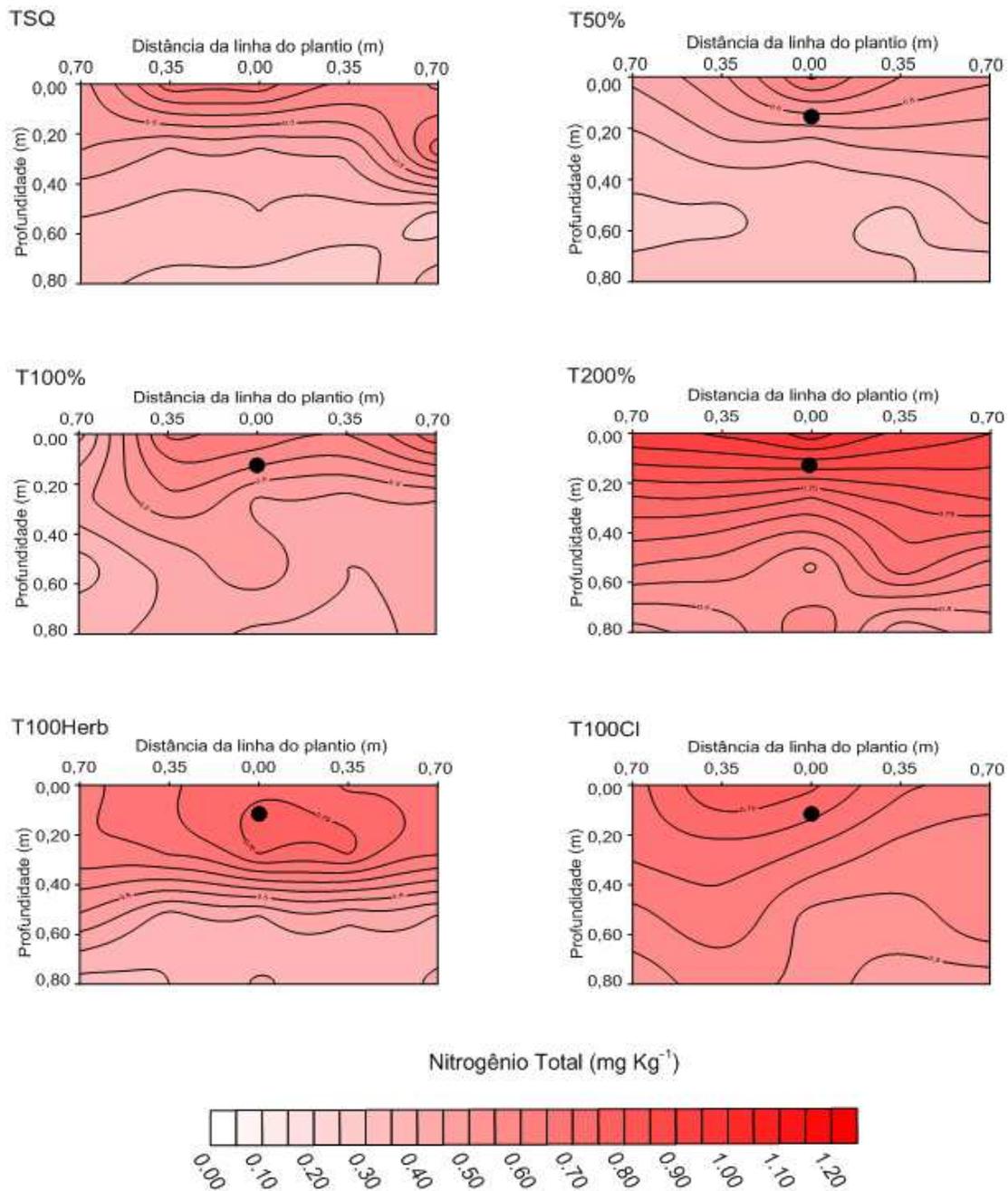


Figura 18. Distribuição dos teores de N no perfil do solo influenciados pela irrigação com efluente de esgoto doméstico nos diferentes tratamentos.

5.2.6 Fósforo

Houve diferença estatística significativa para os teores de fósforo obtidos em todas as profundidades estudadas (Tabela 15). Nas profundidades de 0,00-0,20 m, 0,20-0,40 m os maiores teores foram encontrados no tratamento TSQ e não houve diferença entre os tratamentos T50% e T100Herb. Nas três primeiras profundidades os tratamentos T100% e T100Cl apresentaram as menores médias registradas.

Tabela 15. Teor de fósforo do solo (mg kg^{-1}) influenciado pela irrigação com efluente de esgoto doméstico.

Profundidade (m)	TSQ	T50%	T100%	T200%	T100Herb	T100Cl	CV (%)
0,00 - 0,20	60,22 a	47,53 ab	37,84 bc	38,04 bc	40,68 ab	19,96 c	17,78
0,20 - 0,40	17,86 a	12,00 ab	9,48 c	10,64 bc	16,65 ab	7,89 c	20,35
0,40 - 0,60	13,04 ab	9,26 bcd	7,70 cd	9,70 bc	14,46 a	5,09 d	16,82
0,60 - 0,80	7,86 abc	7,34 bc	11,21 a	9,46 ab	10,85 ab	5,64 c	14,85

Médias seguidas pelas mesmas letras na linha não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey ($P < 0,05$). TSQ = Sistema de cultivo em sequeiro; T50% = Irrigação com efluente de esgoto doméstico (EED) in natura atendendo 50% da evapotranspiração (ETP); T100% = Irrigação com EED in natura atendendo 100% da ETP; T200% = Irrigação com EED in natura atendendo 200% da ETP; T100Herb = Irrigação com EED mais herbicida atendendo 100% da ETP; T100Cl = Irrigação com EED desinfetado com hipoclorito de sódio atendendo 100% da ETP.

De acordo com o Deon (2010), o maior desenvolvimento vegetal proporcionado pela irrigação favorece a uma maior extração de fósforo pelas plantas, o que justifica os menores teores encontrados nos tratamentos irrigados. O autor também afirma que o aporte desse elemento, promovido pelo uso de EED, é pequeno quando comprado à adubação fosfatada, com o passar dos anos, pode ocorrer um incremento de fósforo nas áreas de sequeiro, onde há uma menor extração desse nutriente pela cultura.

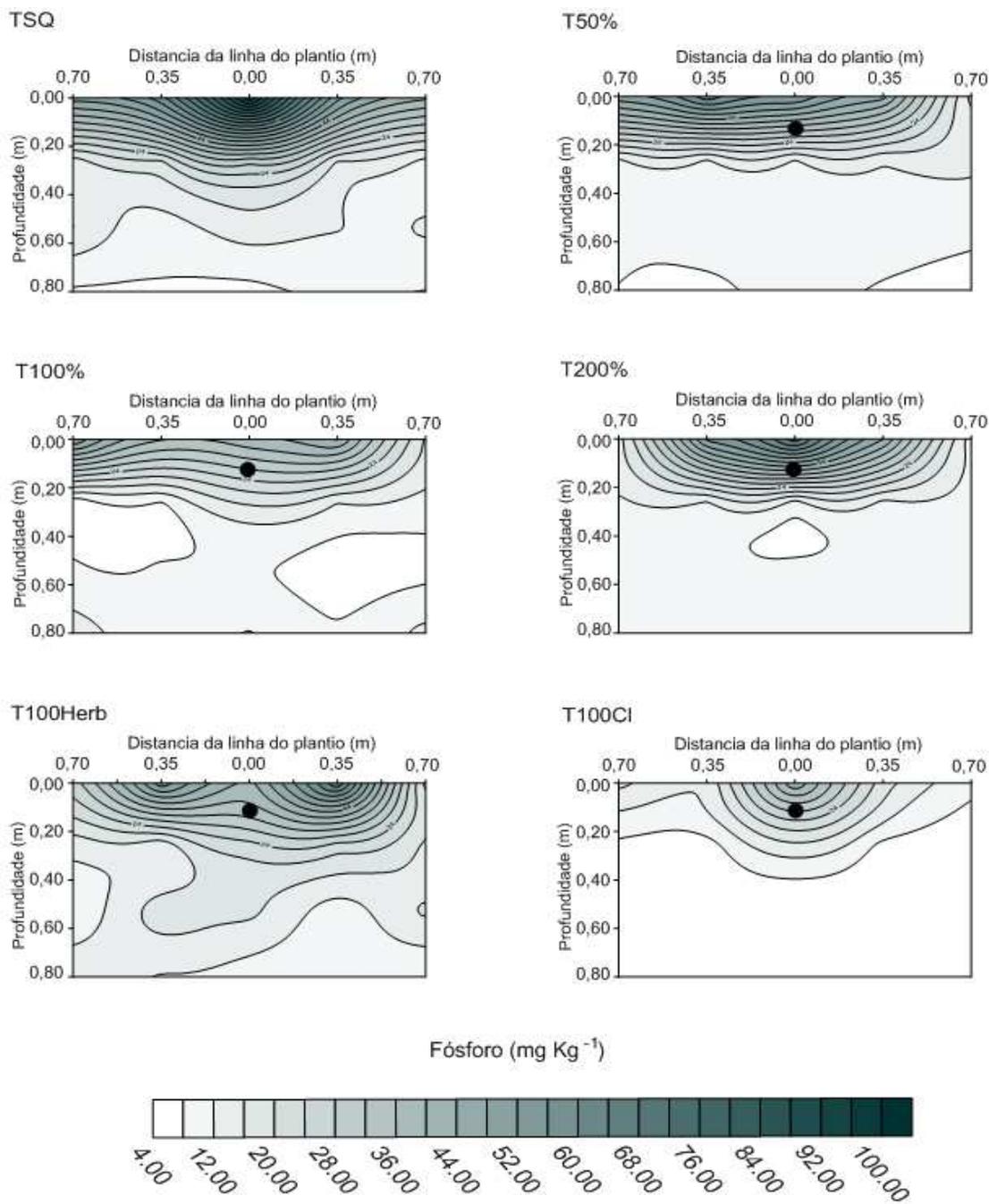
Essas afirmações são reforçadas por Gomes et al. (2009) ao avaliarem o teor de fósforo presente no tecido foliar da cana-de-açúcar na mesma área onde foi realizada a presente pesquisa. Os autores verificaram uma maior concentração desse elemento nas plantas das parcelas irrigadas com EED, o que confirma uma maior extração desse nutriente pelos tratamentos irrigados. Esses autores relatam que mesmo diante da pequena quantidade de fósforo fornecida frente à recomendação, o EED mostra-se como uma fonte potencial para o

fornecimento desse íon, visto que apresenta formas assimiláveis pelas plantas ($P-PO_4^-$) já disponíveis numa solução com um pH próximo a 7,0.

Azevedo e Oliveira. (2005), Medeiros et al. (2005) e Galavi et al. (2010), observaram a eficiência do uso EED para o fornecimento de fósforo ao solo, enquanto que Sandri et al. (2009) e Duarte et al. (2008) não detectaram alterações significativas para os teores de P após a irrigação com EED.

Verificou-se, em todos os tratamentos, que à medida em que aumento-se a profundidade de estudo no perfil do solo ocorreu uma redução dos teores de fósforo, que justifica-se pela pouca mobilidade desse elemento quando comparado aos demais macronutrientes (Figura 19).

Dentro de cada perfil as maiores concentrações ficaram restritas à região próxima da linha da soqueira, sendo esse o local onde foi aplicado o adubo fosfatado em todos os tratamentos. Já os maiores teores observados nas últimas profundidades do tratamento T100Cl podem ser explicados pela maior absorção de fósforo pelas plantas deste tratamento, uma vez que o uso de hipoclorito de sódio no EED aumentou o fornecimento de $P-PO_4^-$ para o solo (Tabela 2), sendo essa uma das principais formas de fósforo assimiladas pelas plantas.



TSQ - Sistema de cultivo em sequeiro
T50% - Irrigação com efluente de esgoto doméstico (EED) in natura atendendo 50% da evapotranspiração (ETP)
T100% - Irrigação com EED in natura atendendo 100% da ETP
T200% - Irrigação com EED in natura atendendo 200% da ETP
T100Herb - Irrigação com EED mais herbicida atendendo 100% da ETP
T100CI - Irrigação com EED desinfetado com Hipoclorito de sódio atendendo 100% da ETP

● Tubo gotejador enterrado a 0,16 m de profundidade na linha de plantio

Figura 19. Distribuição dos teores de P no perfil do solo influenciada pela irrigação com efluente de esgoto doméstico nos diferentes tratamentos.

5.2.7 Potássio

Observou-se diferença entre os valores de K^+ somente na profundidade de 0,00-0,20 m, onde o tratamento TSQ apresentou as maiores concentrações (Tabela 16).

Tabela 16. Teor de potássio do solo ($\text{mmol}_c \text{ kg}^{-1}$) nfluenciado pela irrigação com efluente de esgoto doméstico.

Profundidade (m)	TSQ	T50%	T100%	T200%	T100Herb	T100Cl	CV (%)
0,00 - 0,20	2,24 a	1,54 b	1,72 b	1,32 b	1,20 b	1,57 b	32,45
0,20 - 0,40	0,54 a	0,43 a	0,66 a	0,90 a	0,77 a	0,87 a	30,35
0,40 - 0,60	0,35 a	0,39 a	1,25 a	0,70 a	0,36 a	1,39 a	33,37
0,60 - 0,80	0,22 a	0,26 a	0,79 a	0,50 a	0,29 a	0,22 a	29,54

Médias seguidas pelas mesmas letras na linha não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey ($P < 0,05$). TSQ = Sistema de cultivo em sequeiro; T50% = Irrigação com efluente de esgoto doméstico (EED) in natura atendendo 50% da evapotranspiração (ETP); T100%= Irrigação com EED in natura atendendo 100% da ETP; T200% = Irrigação com EED in natura atendendo 200% da ETP; T100Herb = Irrigação com EED mais herbicida atendendo 100% da ETP; T100Cl = Irrigação com EED desinfetado com hipoclorito de sódio atendendo 100% da ETP.

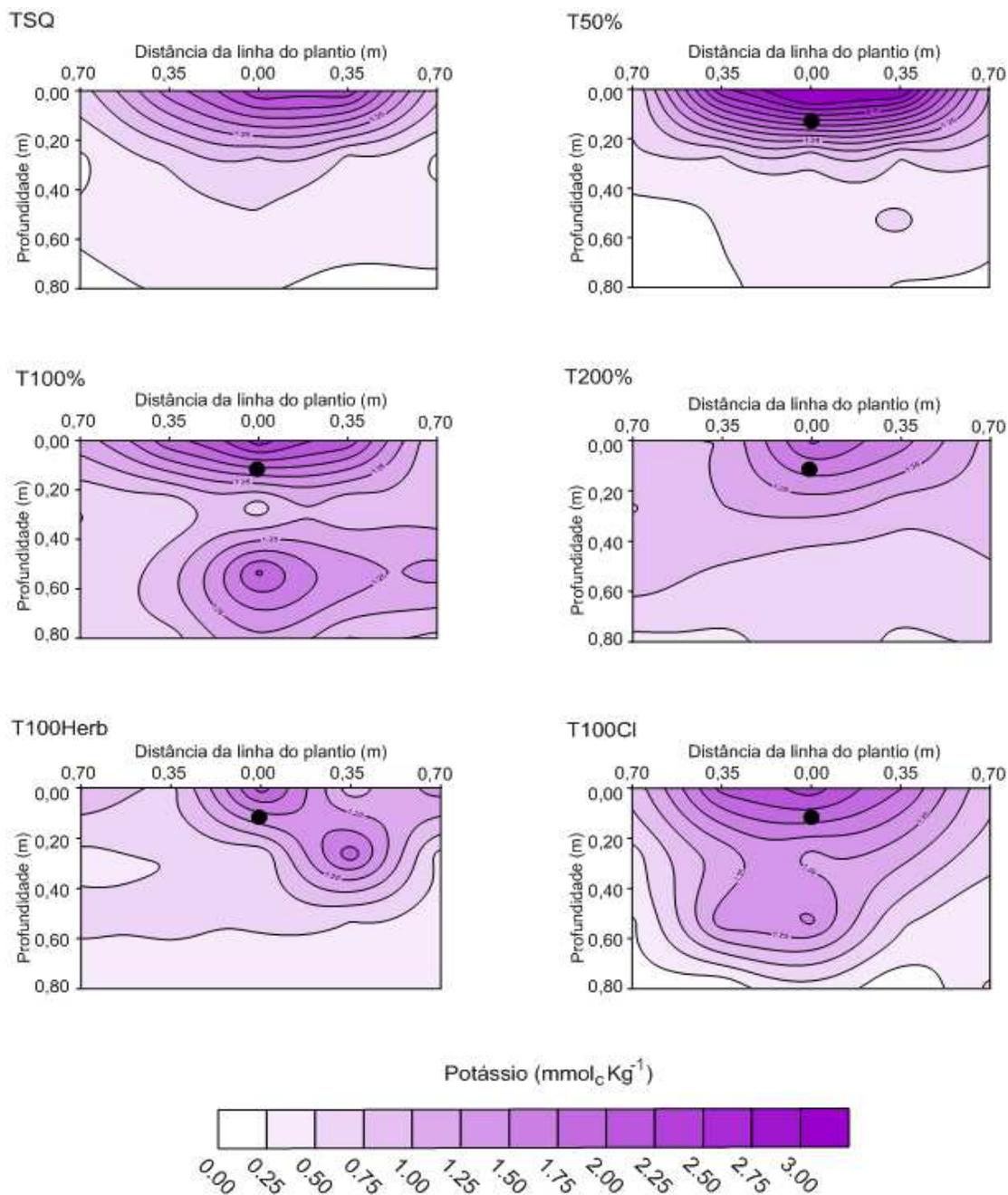
De acordo com Leal et al. (2009) o uso de EED promove a elevação da saturação de Na^+ no solo, o que influencia no deslocamento de K^+ do complexo de troca catiônico. Para manter o equilíbrio no solo entre ambos os elementos e garantir satisfatoriamente a nutrição e a produtividade da cultura, Leal (2007) recomenda a adubação mineral como sendo a solução para tal problema.

Os menores teores de K^+ encontrados nos tratamentos irrigados do presente trabalho contrastam com os obtidos por Adekalu e Okunade (2002), ao observarem uma elevação nos teores de K^+ no solo devido ao emprego de EED na irrigação. Os autores citados não fizeram uma comparação dos tratamentos irrigados com uma área sem irrigação, porém observaram que o aumento da lâmina aplicada promoveu um aumento significativo nos teores de K^+ .

Sandri et al. (2009) observaram uma redução nos teores de K^+ no solo após o emprego de EED para a irrigação da cultura da alface. Esses autores atribuíram como causa, à lixiviação ocasionada tanto pela alta intensidade das chuvas ocorridas durante a realização do seu experimento, como pela própria lixiviação provocada pela água utilizada na irrigação.

Os maiores teores desse elemento foram registrados na profundidade de 0,00-0,20 m, em todos os tratamentos, que pode se justificar pelo fato de que nessa profundidade se encontram as maiores quantidades de resíduos das adubações potássicas (Figura 20). Além disso, a decomposição dos restos culturais sobre a superfície do solo também contribuiu para elevar os teores de K^+ nessa profundidade, visto que, a palhada da cana-de-açúcar apresenta um alto teor desse elemento tão necessário ao transporte de açúcares.

O deslocamento do K^+ no solo, proporcionado pela lixiviação e, ou pelo aumento da saturação de Na^+ no solo é melhor compreendido ao visualizar a distribuição desse elemento nos mapas dos perfis (Figura 20), pois nos tratamentos irrigados T100%, T200%, T100Herb e T100Cl ocorreu um aumento, embora não significativo, dos teores de K^+ encontrados nas últimas profundidades do solo, quando comparados ao tratamento TSQ.



TSQ - Sistema de cultivo em sequeiro
T50% - Irrigação com efluente de esgoto doméstico (EED) in natura atendendo 50% da evapotranspiração (ETP)
T100% - Irrigação com EED in natura atendendo 100% da ETP
T200% - Irrigação com EED in natura atendendo 200% da ETP
T100Herb - Irrigação com EED mais herbicida atendendo 100% da ETP
T100Cl - Irrigação com EED desinfetado com Hipoclorito de sódio atendendo 100% da ETP

● Tubo gotejador enterrado a 0,16 m de profundidade na linha de plantio

Figura 20. Distribuição dos teores de K^+ no perfil do solo influenciado pela irrigação com efluente de esgoto doméstico nos diferentes tratamentos.

5.2.8 Sódio

O tratamento TSQ apresentou as menores médias em todas as profundidades avaliadas, com exceção da profundidade de 0,20-0,40 m, que não houve diferença estatística entre os tratamentos estudados (Tabela 17). Apenas na profundidade de 0,60-0,80 m, o tratamento TSQ apresentou média igual às observadas nos tratamentos T50% e T100%. Os tratamentos T50%, T100%, T100Herb e T100Cl apresentaram médias intermediárias entre os tratamentos TSQ e T200% nas profundidades de 0,00-0,20 m e 0,40-0,60 m. O tratamento T200% proporcionou um maior aporte de Na⁺ em todas as profundidades estudadas (Tabela 17).

Tabela 17. Teor de sódio do solo (mmol_c kg⁻¹) influenciado pela irrigação com efluente de esgoto doméstico.

Profundidade (m)	TSQ	T50%	T100%	T200%	T100Herb	T100Cl	CV (%)
0,00 - 0,20	0,39 b	2,26 ab	2,08 ab	2,56 a	2,21ab	2,27 ab	33,79
0,20 - 0,40	1,37	2,24	2,17	3,93	2,34	3,65	42,99
0,40 - 0,60	1,10 b	1,89 ab	2,05 ab	4,21 a	2,10 ab	3,77 ab	38,84
0,60 - 0,80	0,83 c	1,28 c	0,83 c	3,75 a	1,91 bc	3,45 ab	28,90

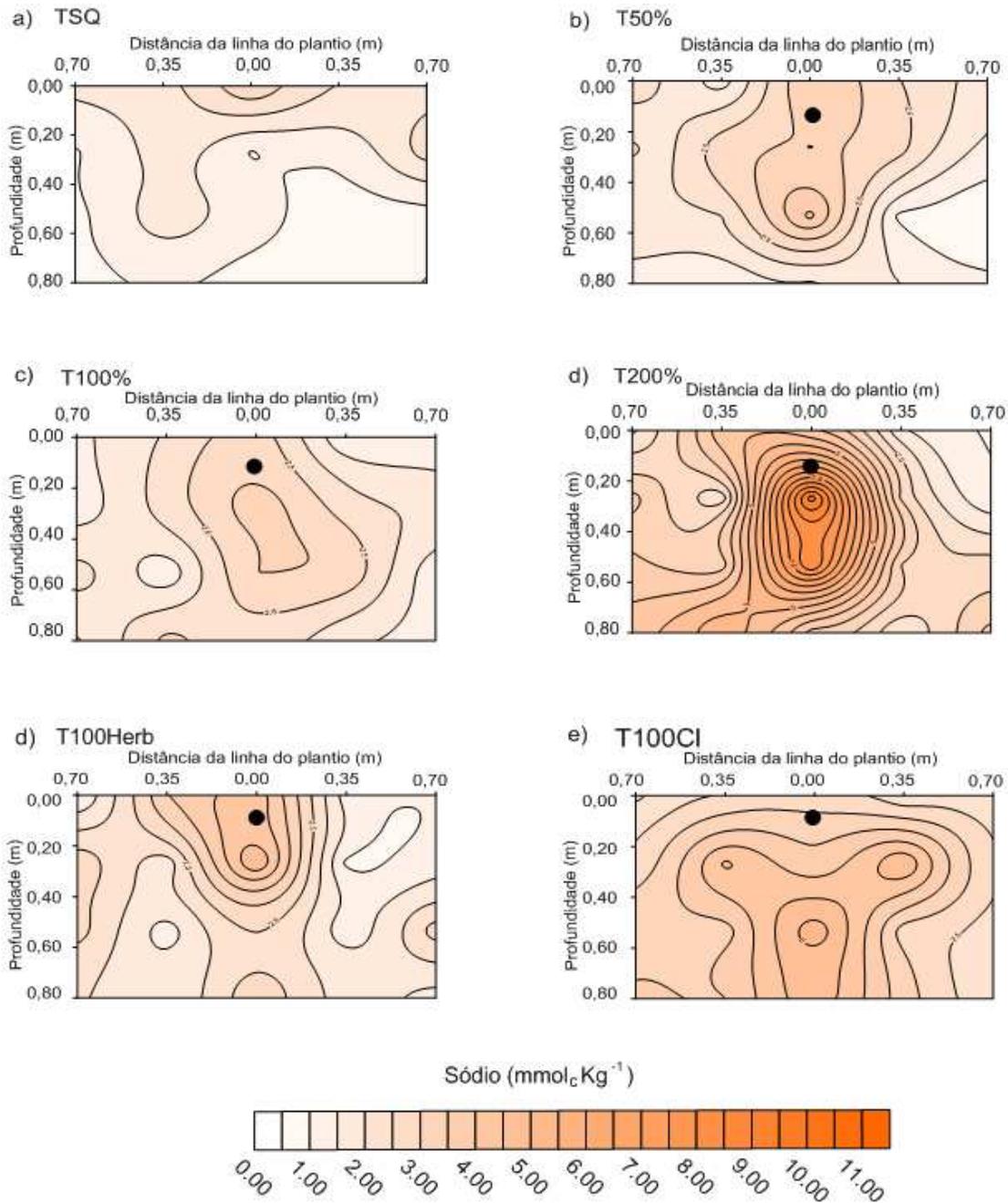
Médias seguidas pelas mesmas letras na linha não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey (P<0,05). TSQ = Sistema de cultivo em sequeiro; T50% = Irrigação com efluente de esgoto doméstico (EED) in natura atendendo 50% da evapotranspiração (ETP); T100%= Irrigação com EED in natura atendendo 100% da ETP; T200% = Irrigação com EED in natura atendendo 200% da ETP; T100Herb = Irrigação com EED mais herbicida atendendo 100% da ETP; T100Cl = Irrigação com EED desinfetado com hipoclorito de sódio atendendo 100% da ETP.

Tais resultados revelam o alto potencial do EED no fornecimento de sódio ao solo por conta dos resíduos de sabões, detergentes, shampoos e outros produtos de uso frequente nas atividades domésticas, sendo este aporte, uma das principais limitações do uso de águas residuárias domésticas na irrigação agrícola. O Na⁺ funciona como um agente dispersante de partículas de argila no solo, o que contribui para a redução da estabilidade de agregados, além disso, esse elemento compete pelos mesmos sítios ativos que outros cátions tidos como essenciais ao desenvolvimento das plantas, podendo ser citados, potássio, cálcio e magnésio.

Apenas na profundidade 0,60-0,80 m o uso de hipoclorito de sódio, utilizado para reduzir a concentração de coliformes fecais no tratamento T100Cl, foi suficiente para tornar os teores de Na⁺ maiores do que os observados nos outros tratamentos que aplicou-se a mesma lâmina (100%), que pode ser explicado pelo efeito residual do Na⁺ presente hipoclorito de sódio adicionado ao EED. A lâmina excessiva do tratamento T200% foi à principal responsável pelo aumento dos teores de Na⁺ registrados no experimento.

Os maiores teores de Na⁺ encontrados nos tratamentos irrigados na presente pesquisa corroboram com Leal et al. (2009), Pereira (2009), Sandri et al. (2009) e Galavi et al. (2010) ao verificarem um aumento nos teores desse elemento após a irrigação com EED.

No tratamento TSQ os maiores teores de Na⁺ foram registrados na primeira profundidade, enquanto que nos tratamentos irrigados observou-se uma distribuição na região central da trincheira, próximo ao ponto de emissão do tubo gotejador (Figura 21). O tratamento T200% apresentou uma concentração mais acentuada dos teores de Na⁺ na região central da trincheira, quando comparado aos demais tratamento irrigados, que pode ser justificado pelo maior aporte desse nutriente proporcionado pela aplicação da lâmina excedente de irrigação.



TSQ - Sistema de cultivo em sequeiro

T50% - Irrigação com efluente de esgoto doméstico (EED) in natura atendendo 50% da evapotranspiração (ETP)

T100% - Irrigação com EED in natura atendendo 100% da ETP

T200% - Irrigação com EED in natura atendendo 200% da ETP

T100Herb - Irrigação com EED mais herbicida atendendo 100% da ETP

T100Cl - Irrigação com EED desinfetado com Hipoclorito de sódio atendendo 100% da ETP

● Tubo gotejador enterrado a 0,16 m de profundidade na linha de plantio

Figura 21. Distribuição dos teores de Na^+ no perfil do solo influenciado pela irrigação com efluente de esgoto doméstico nos diferentes tratamentos.

5.2.9 Carbono Orgânico Total (COT)

Os maiores valores de COT foram obtidos no tratamento TSQ em todas as profundidades estudadas (Tabela 18). Apenas na profundidade de 0,00-0,20 m o tratamento T50% apresentou média estatisticamente igual ao tratamento TSQ. Os tratamentos T100Herb e T100Cl apresentaram teores de COT intermediários entre os valores observados nos tratamentos TSQ e T200% na profundidade de 0,40-0,60. O tratamento T200% apresentou os menores teores de COT em todas as profundidades estudadas.

Tabela 18. Carbono orgânico total do solo (g kg^{-1}) influenciado pela irrigação com efluente de esgoto doméstico.

Profundidade (m)	TSQ	T50%	T100%	T200%	T100Herb	T100Cl	CV (%)
0,00 - 0,20	1,25 a	1,39 a	1,13 ab	0,70 b	1,13 ab	0,99 ab	14,22
0,20 - 0,40	0,94 a	0,92 ab	0,68 c	0,57 c	0,70 bc	0,77 abc	10,24
0,40 - 0,60	0,77 a	0,69 ab	0,44 ab	0,40 b	0,52 ab	0,63 ab	22,31
0,60 - 0,80	0,80 a	0,60 ab	0,54 ab	0,37 b	0,39 b	0,52 ab	23,92

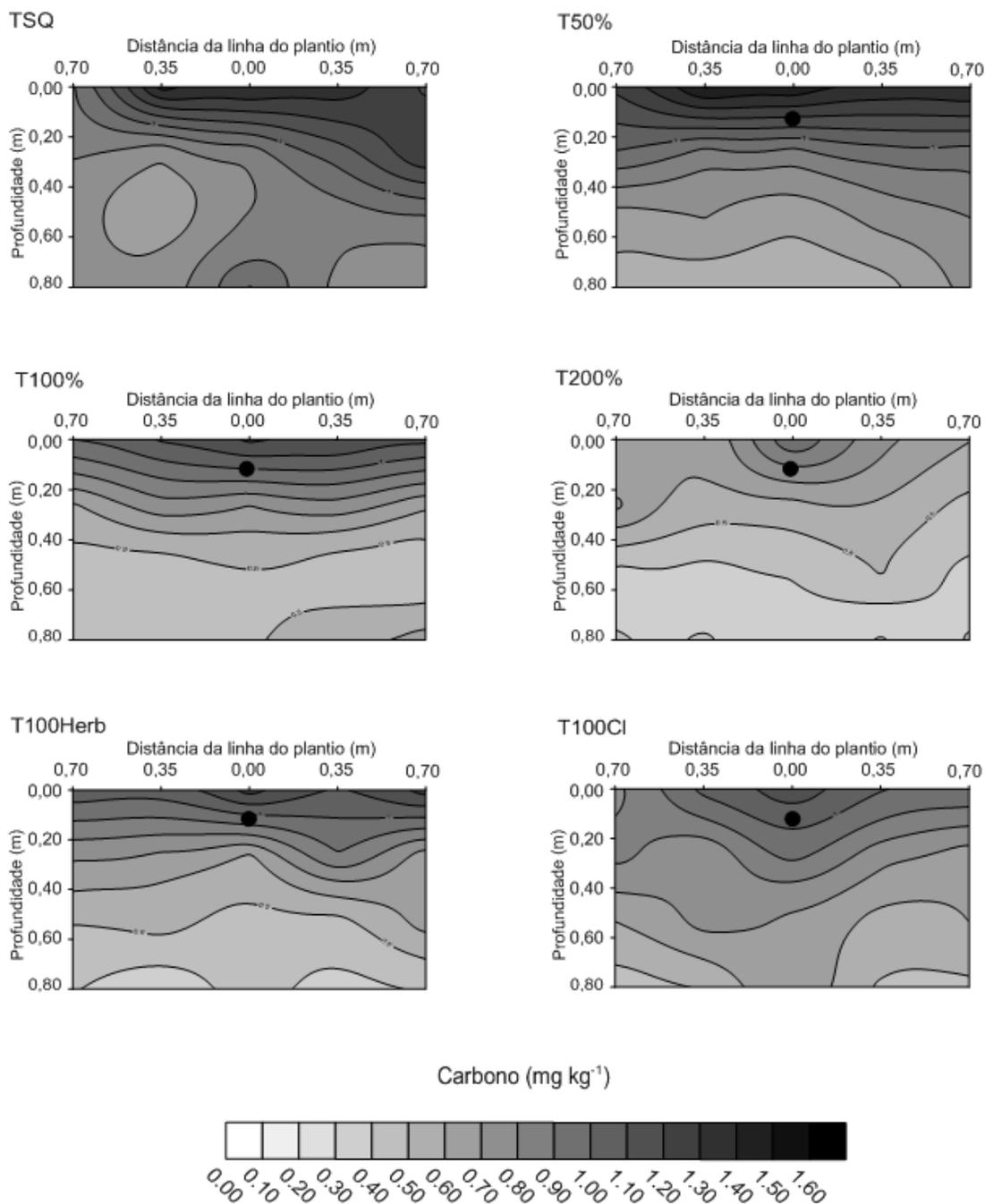
Médias seguidas pelas mesmas letras na linha não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey ($P < 0,05$). TSQ = Sistema de cultivo em sequeiro; T50% = Irrigação com efluente de esgoto doméstico (EED) in natura atendendo 50% da evapotranspiração (ETP); T100%= Irrigação com EED in natura atendendo 100% da ETP; T200% = Irrigação com EED in natura atendendo 200% da ETP; T100Herb = Irrigação com EED mais herbicida atendendo 100% da ETP; T100Cl = Irrigação com EED desinfetado com hipoclorito de sódio atendendo 100% da ETP.

Os menores valores de COT verificados nos tratamentos irrigados corroboram com Duarte et al. (2008) ao afirmarem que o nitrogênio e o carbono contidos no EED favorecem à rápida mineralização e, em decorrência, ocorre uma diminuição dos teores de matéria orgânica no solo. Porém, não concordam com Fuentes et al. (2002) que verificaram o aumento dos teores de COT num solo irrigado com EED por vários anos no México. Da Fonseca et al. (2007) ao estudarem a influência do uso de EED na irrigação do milho não encontraram diferenças significativas nos teores de COT ao serem comparados com um tratamento sem irrigação.

As maiores médias de COT observadas no tratamento TSQ também se justifica pelo maior aporte de matéria orgânica proporcionado pelo sistema radicular da cana-de-açúcar cultivada em regime de sequeiro, pois na ausência de irrigação a planta apresenta-se com um sistema radicular mais desenvolvido e conseqüentemente oferta maiores resíduos de matéria orgânica ao solo. Já em condições de solo irrigado, o sistema radicular das plantas apresenta um menor desenvolvimento em profundidades maiores, e isso pode ter contribuído para os tratamentos irrigados terem apresentados as menores médias de COT nas duas últimas profundidades.

Em todos os perfis observou-se um decréscimo dos teores de COT à medida que aumentou-se a profundidade de estudo no solo (Figura 22). Pouca variação, em profundidade, ocorreu na distribuição dos teores de COT entre os tratamentos TSQ e T50%, sendo esses os que mais estimularam o desenvolvimento do sistema radicular das plantas, em função do déficit hídrico proporcionado à cultura. Entre os tratamentos cuja lâmina aplicada atendeu 100% da evapotranspiração, os teores de COT apresentaram um comportamento de distribuição bastante semelhante entre si, com poucas variações laterais e decréscimo desses teores a medida que aumentou-se a profundidade de estudo (Figura 22).

O tratamento T200% apresentou uma maior variação entre os teores de COT encontrados na primeira profundidade, sendo os maiores valores registrados na região central e próxima a linha da soqueira (Figura 22). Isso pode ser explicado pela menor contribuição do sistema radicular no fornecimento de matéria orgânica ao solo, uma vez que a aplicação da lâmina excedente pouco estimulou o desenvolvimento lateral e em profundidade das raízes.



TSQ - Sistema de cultivo em sequeiro
T50% - Irrigação com efluente de esgoto doméstico (EED) in natura atendendo 50% da evapotranspiração (ETP)
T100% - Irrigação com EED in natura atendendo 100% da ETP
T200% - Irrigação com EED in natura atendendo 200% da ETP
T100Herb - Irrigação com EED mais herbicida atendendo 100% da ETP
T100CI - Irrigação com EED desinfetado com Hipoclorito de sódio atendendo 100% da ETP

● Tubo gotejador enterrado a 0,16 m de profundidade na linha de plantio

Figura 22. Distribuição dos teores de COT no perfil do solo influenciada pela irrigação com efluente de esgoto doméstico nos diferentes tratamentos.

5.2.10 Saturação por bases (V %)

Não houve diferença estatística entre as médias obtidas nas duas primeiras profundidades. Já na terceira profundidade, os tratamentos TSQ e T200% apresentaram a menor e a maior média de V%, respectivamente. Na quarta profundidade os tratamentos que atenderam a necessidade de 100% e 200% da evapotranspiração não diferenciaram-se estatisticamente e apresentaram os maiores valores de V% (Tabela 19).

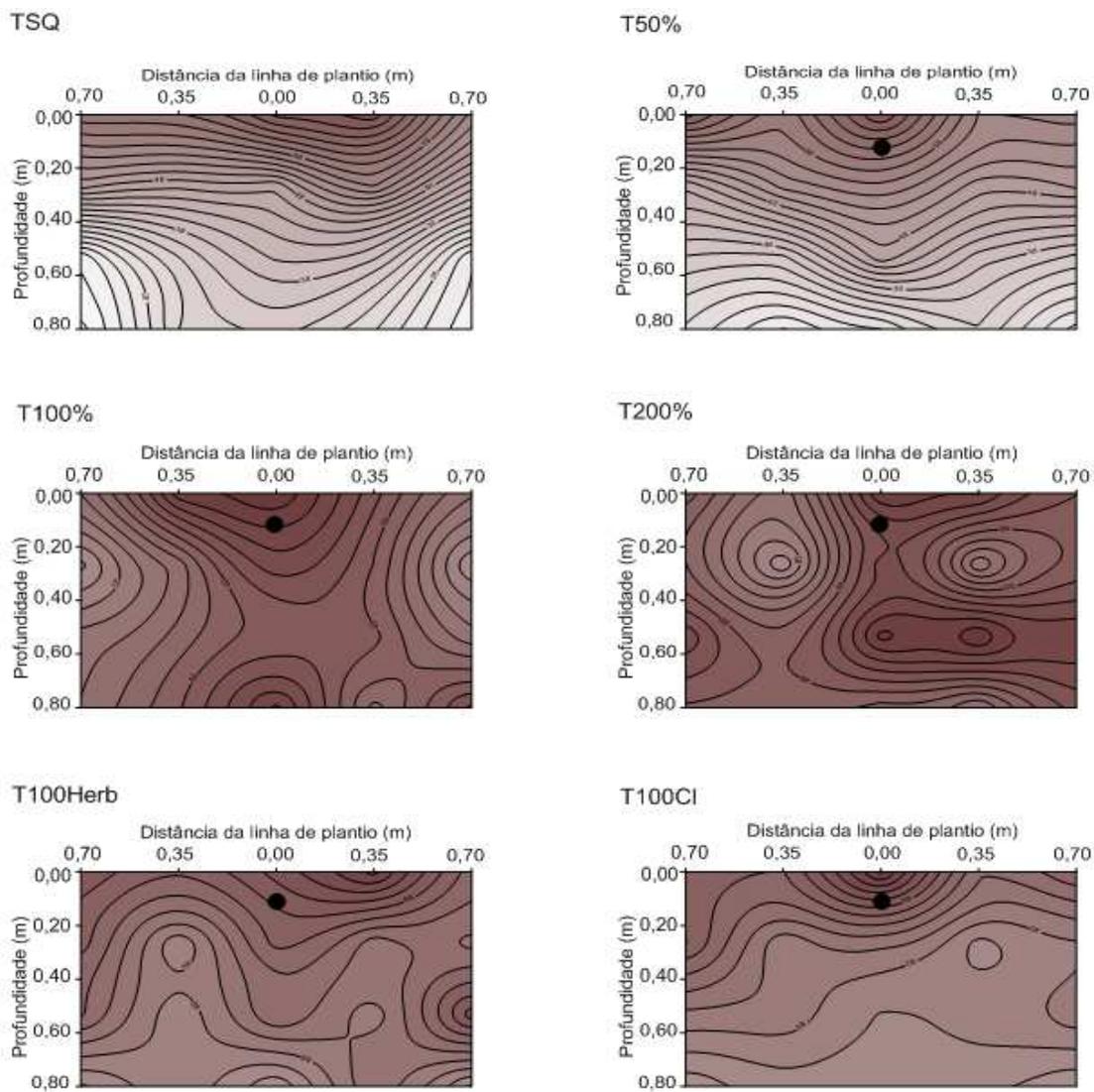
Tabela 19. Saturação por bases (%) do solo influenciada pela irrigação com efluente de esgoto doméstico.

Profundidade (m)	TSQ	T50%	T100%	T200%	T100Herb	T100Cl	CV(%)
0,00 - 0,20	63,53 a	61,10 a	70,38 a	70,99 a	69,83 a	67,93 a	9,69
0,20 - 0,40	48,26 a	50,83 a	64,92 a	64,92 a	63,71 a	62,42 a	14,47
0,40 - 0,60	31,98 c	39,60 bc	74,13 ab	74,13 a	63,94 ab	58,65 abc	18,22
0,60 - 0,80	27,24 b	28,55 b	68,18 a	68,18 a	58,20 a	53,52 a	11,54

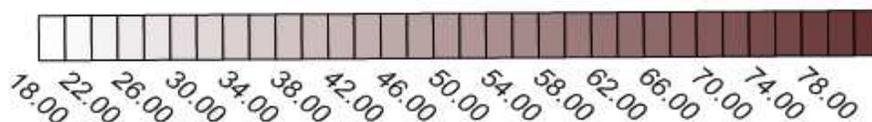
Médias seguidas pelas mesmas letras na linha não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey ($P < 0,05$). TSQ = Sistema de cultivo em sequeiro; T50% = Irrigação com efluente de esgoto doméstico (EED) in natura atendendo 50% da evapotranspiração (ETP); T100%= Irrigação com EED in natura atendendo 100% da ETP; T200% = Irrigação com EED in natura atendendo 200% da ETP; T100Herb = Irrigação com EED mais herbicida atendendo 100% da ETP; T100Cl = Irrigação com EED desinfetado com hipoclorito de sódio atendendo 100% da ETP.

O fornecimento de Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ e Na^+ juntamente com a redução dos teores de $\text{Al}^{3+} + \text{H}^+$ proporcionada pela aplicação de EED no solo, justificam o aumento da saturação por bases nas duas primeiras profundidades estudadas.

Na Figura 23 são apresentados os mapas de distribuição dos valores de V% encontrados no perfil do solo de todos os tratamentos estudados. Nos tratamentos irrigados com lâminas de 100% e 200% verificou-se uma distribuição mais homogênea dos valores de V%, quando comparados aos tratamentos TSQ e T50%. Nestes, observou-se um redução gradativa dos valores de V% do solo à medida que aumentou-se a profundidade de estudo. Tal fato é justificado pelo maior aporte de bases trocáveis proporcionado pelas lâminas de 100% e 200% e pela localização do tubo gotejado, na região central da trincheira, que proporcionou uma distribuição mais uniforme dos valores no perfil desses tratamentos.



Saturação por bases (V%)



- TSQ - Sistema de cultivo em sequeiro
- T50% - Irrigação com efluente de esgoto doméstico (EED) in natura atendendo 50% da evapotranspiração (ETP)
- T100% - Irrigação com EED in natura atendendo 100% da ETP
- T200% - Irrigação com EED in natura atendendo 200% da ETP
- T100Herb - Irrigação com EED mais herbicida atendendo 100% da ETP
- T100Cl - Irrigação com EED desinfetado com Hipoclorito de sódio atendendo 100% da ETP

● Tubo gotejador enterrado a 0,16 m de profundidade na linha de plantio

Figura 23. Distribuição da saturação por bases (V%) no perfil do solo, influenciada pela irrigação com efluente de esgoto doméstico nos diferentes tratamentos.

5.2.11 CTC

Na profundidade de 0,00-0,20 m o tratamento T200% apresentou o maior valor de CTC e não houve diferença significativa entre as médias observadas nos tratamentos TSQ, T50% e T100Herb, que foram os menores (Tabela 20). Na profundidade de 0,20-0,40 m o tratamento TSQ apresentou a maior média e não verificou-se diferença significativa entre os tratamentos T100%, T200%, T100Herb e T100Cl. Nas profundidades de 0,40-0,60 m e 0,60 - 0,80 mo tratamento T50% apresentou os menores valores de CTC (Tabela 20).

Tabela 20. CTC do solo ($\text{mmol}_c \text{ kg}^{-1}$) influenciada pela irrigação com efluente de esgoto doméstico.

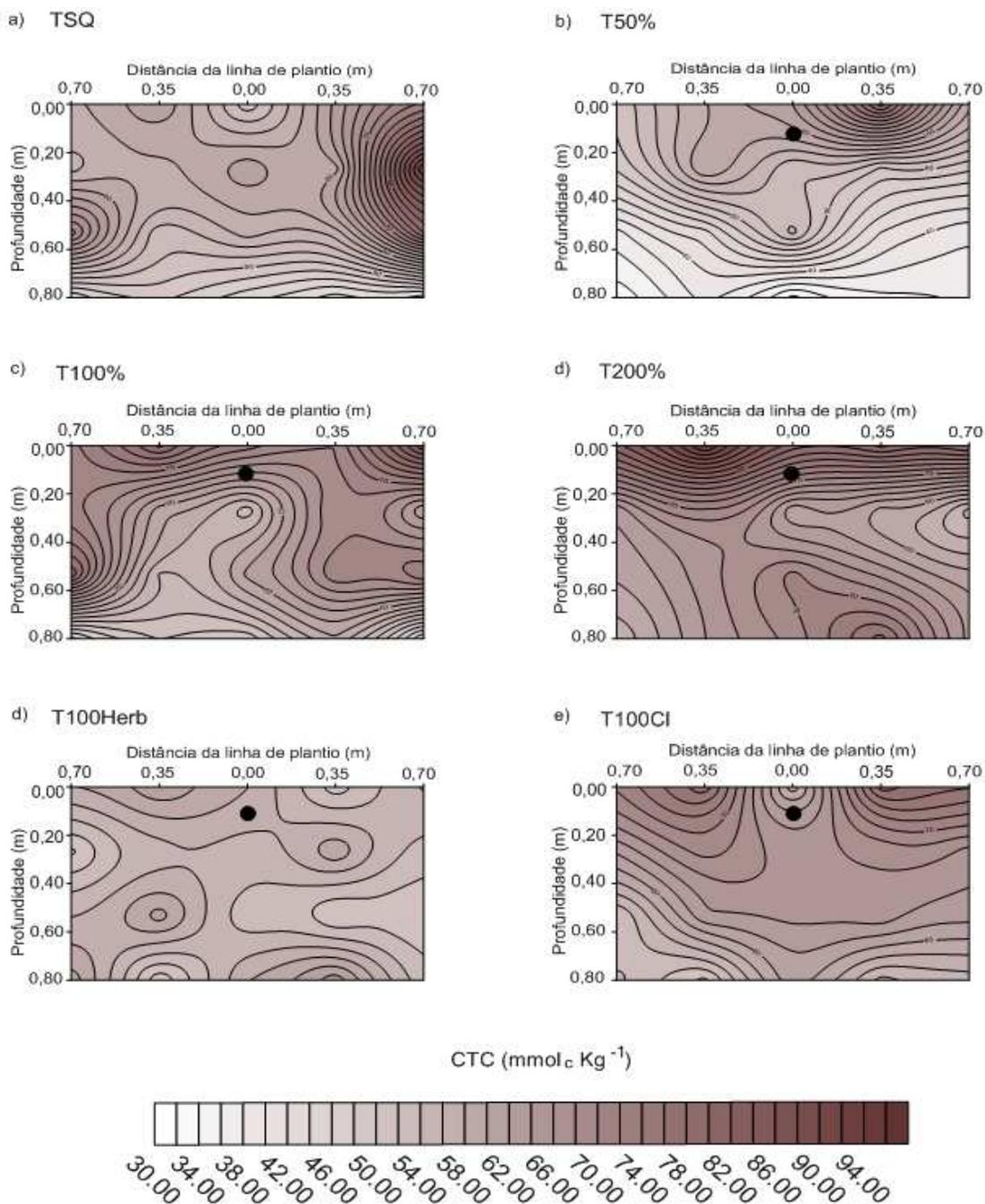
Profundidade (m)	TSQ	T50%	T100%	T200%	T100Herb	T100Cl	CV (%)
0,00 - 0,20	61,71b	61,66 b	74,65 ab	86,14 a	56,97 b	71,91ab	10,43
0,20 - 0,40	65,04 a	51,62 b	61,12 ab	61,10 ab	54,02 ab	55,64 ab	7,86
0,40 - 0,60	60,74 ab	43,14 c	66,34 ab	69,64 a	54,01 bc	61,28 ab	9,50
0,60 - 0,80	43,39 c	36,46 c	46,51 bc	65,04 a	56,81 ab	56,96 ab	9,55

Médias seguidas pelas mesmas letras na linha não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey ($P < 0,05$). TSQ = Sistema de cultivo em sequeiro; T50% = Irrigação com efluente de esgoto doméstico (EED) in natura atendendo 50% da evapotranspiração (ETP); T100%= Irrigação com EED in natura atendendo 100% da ETP; T200% = Irrigação com EED in natura atendendo 200% da ETP; T100Herb = Irrigação com EED mais herbicida atendendo 100% da ETP; T100Cl = Irrigação com EED desinfetado com hipoclorito de sódio atendendo 100% da ETP.

O aporte de Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ e Na^+ pelo EED favoreceu o aumento da CTC do solo nos tratamentos irrigados. As maiores médias registradas no TSQ, na segunda e na terceira profundidade, justificam-se pelo aumento dos teores de $\text{Al}^{3+} + \text{H}^+$ registrados nesse tratamento.

Os maiores valores de CTC verificados nos tratamentos irrigados com lâminas de 100% e 200% corroboram com os resultados encontrados por Da Fonseca (2001) ao observar o aumento da CTC do solo em função do aumento da quantidade de EED aplicado.

Os maiores valores de CTC encontrados nos tratamentos T50%, T100%, T200%, T100Herb e T100Cl foram registrados na primeira profundidade, a mesma onde encontrava-se instalado o tubo gotejador, sendo portanto, a mais beneficiada pelo fornecimento dos cátions presentes no EED. Todos os tratamentos apresentaram uma redução gradativa dos valores de CTC à medida que aumentou-se a profundidade de estudo no solo (Figura 24).



TSQ - Sistema de cultivo em sequeiro
T50% - Irrigação com efluente de esgoto doméstico (EED) in natura atendendo 50% da evapotranspiração (ETP)
T100% - Irrigação com EED in natura atendendo 100% da ETP
T200% - Irrigação com EED in natura atendendo 200% da ETP
T100Herb - Irrigação com EED mais herbicida atendendo 100% da ETP
T100Cl - Irrigação com EED desinfetado com Hipoclorito de sódio atendendo 100% da ETP

● Tubo gotejador enterrado a 0,16 m de profundidade na linha de plantio

Figura 24. Distribuição da CTC no perfil do solo influenciada pela irrigação com efluente de esgoto doméstico nos diferentes tratamentos.

5.3 Influência da irrigação com efluente de esgoto doméstico (EED) nos atributos físicos do solo

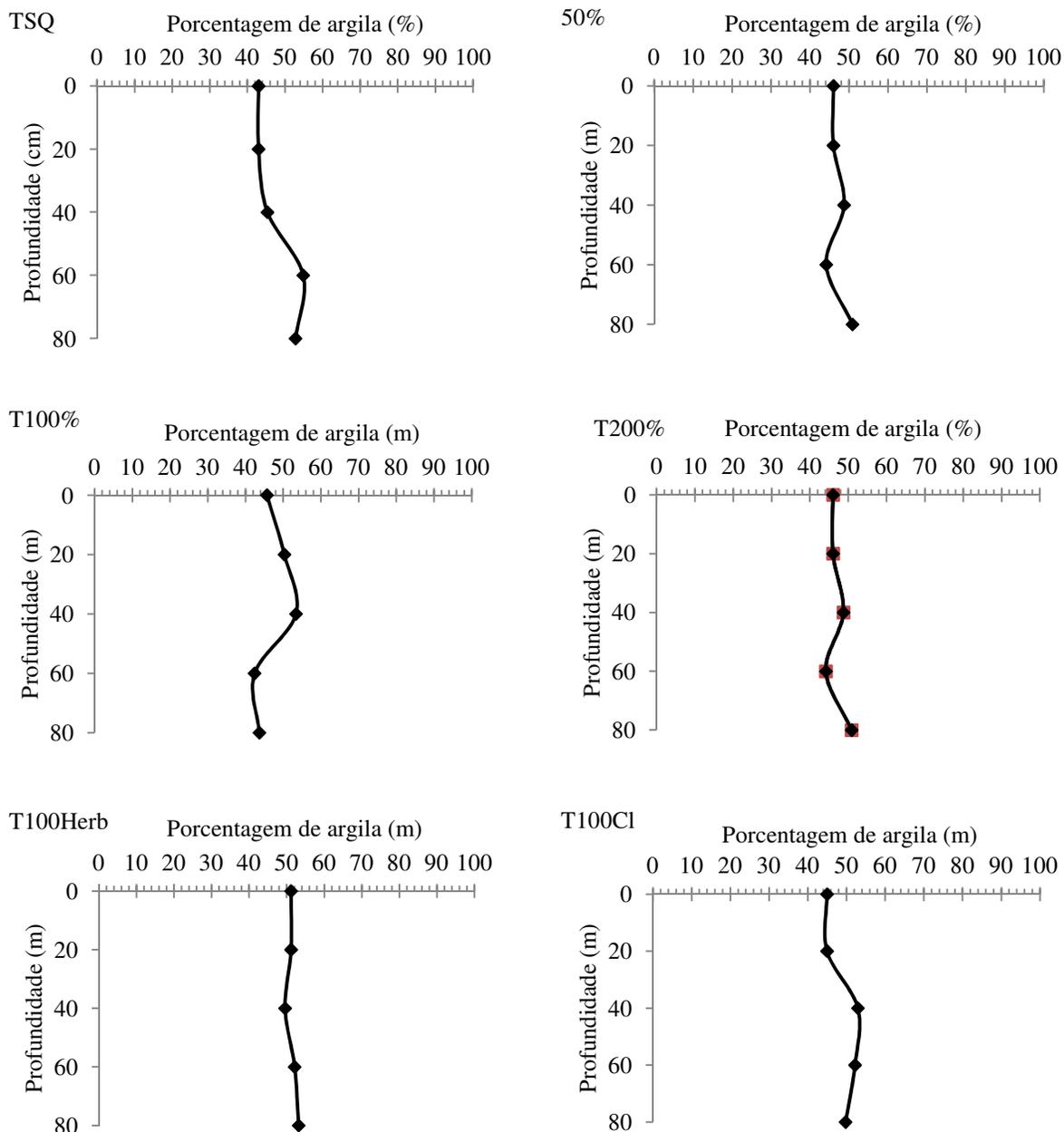
5.3.1 Porcentagem de argila dispersa em água (ADA)

Uma das principais preocupações relacionadas ao uso de EED na irrigação agrícola, diz respeito à dispersão da argila provocada pelo íon sódio presente no efluente. A eluviação é uma das principais responsáveis pelas alterações ocorridas nos atributos físicos do solo, podendo ser citadas, a redução da estabilidade de agregados, a redução da macroporosidade, o aumento da microporosidade e da densidade do solo.

De acordo com Gomes (2008), o aumento da dispersão da argila favorece o processo de entupimento dos poros devido ao carreamento e a deposição das partículas, sendo a irrigação uma das principais responsáveis por esse problema.

Os tratamentos não apresentaram diferença estatística entre os valores de argila total e de ADA em nenhuma das profundidades estudadas (Figuras 25 e 26 respectivamente), que pode ser justificado pelos baixos valores de RAS apresentados pelo EED utilizado (Tabela 2), sendo este um dos principais responsáveis pela dispersão da argila no perfil do solo (ALMEIDA NETO et al., 2009).

Easa e Hanamura (2009) e Lado e Bem-Hur (2009) observaram um aumento de ADA num solo irrigado com EED, com valor de RAS igual a $4,90 \text{ mmol}_c \text{ L}^{-1}$. Na pesquisa de Gloaguen (2005) também verificou-se uma maior dispersão da argila nos solos irrigados com EED e com água de abastecimento cuja RAS apresentou valores médios de $10,4 \text{ mmol}_c \text{ L}^{-1}$ e $19,60 \text{ mmol}_c \text{ L}^{-1}$, respectivamente, quando comparados a uma área sem irrigação.



TSQ - Sistema de cultivo em sequeiro

T50% - Irrigação com efluente de esgoto doméstico (EED) in natura atendendo 50% da evapotranspiração (ETP)

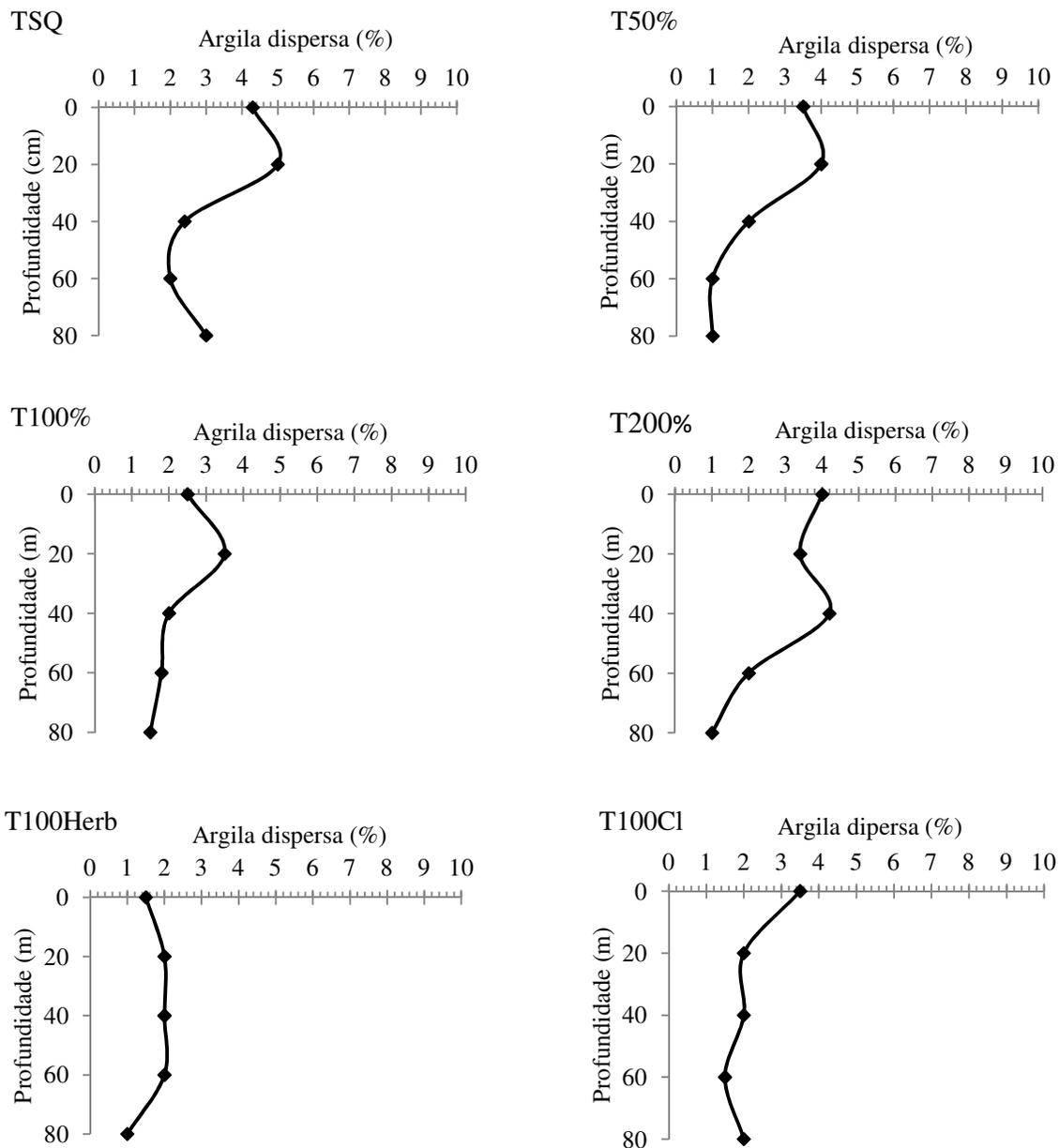
T100% - Irrigação com EED in natura atendendo 100% da ETP

T200% - Irrigação com EED in natura atendendo 200% da ETP

T100Herb - Irrigação com EED mais herbicida atendendo 100% da ETP

T100Cl - Irrigação com EED desinfetado com Hipoclorito de sódio atendendo 100% da ETP

Figura 25. Porcentagem de argila no perfil do solo de todos os tratamentos estudados.



TSQ - Sistema de cultivo em sequeiro

T50% - Irrigação com efluente de esgoto doméstico (EED) in natura atendendo 50% da evapotranspiração (ETP)

T100% - Irrigação com EED in natura atendendo 100% da ETP

T200% - Irrigação com EED in natura atendendo 200% da ETP

T100Herb - Irrigação com EED mais herbicida atendendo 100% da ETP

T100Cl - Irrigação com EED desinfetado com Hipoclorito de sódio atendendo 100% da ETP

Figura 26. Argila dispersa em água influenciada pela irrigação da cana-de-açúcar com efluente de esgoto doméstico nos diferentes tratamentos.

5.3.2 Densidade do solo

Nas profundidades de 0,00-0,20 m, 0,40-0,60 m e 0,60-0,80 m o tratamento TSQ apresentou as menores médias de densidade do solo e não foram registradas diferença significativa entre os tratamentos T50%, T100% e T100Herb. O tratamento T100Cl apresentou a maior densidade na profundidade de 0,00-0,20 m, e, na profundidade de 0,20-0,40 m não foram observadas diferenças significativas entre os tratamentos. O tratamento T200% promoveu o maior valor de densidade do solo nas profundidades de 0,40-0,60 m e 0,60-0,80 m, sendo que nesta, também apresentou média estatisticamente igual ao tratamento T100Cl (Tabela 21).

Tabela 21. Densidade do solo (g cm^{-3}) influenciada pela irrigação com efluente de esgoto doméstico.

Profundidade (m)	TSQ	T50%	T100%	T200%	T100Herb	T100Cl	CV (%)
0,00 - 0,20	1,36 b	1,40 ab	1,45 ab	1,49 ab	1,44 ab	1,61 a	6,27
0,20 - 0,40	1,23 a	1,31 a	1,46 a	1,36 a	1,38 a	1,45 a	6,61
0,40 - 0,60	1,11 b	1,20 ab	1,29 ab	1,54 a	1,19 ab	1,42 ab	10,61
0,60 - 0,80	1,10 b	1,16 ab	1,25 ab	1,38 a	1,18 ab	1,39 a	6,95

Médias seguidas pelas mesmas letras na linha não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey ($P < 0,05$). TSQ = Sistema de cultivo em sequeiro; T50% = Irrigação com efluente de esgoto doméstico (EED) in natura atendendo 50% da evapotranspiração (ETP); T100% = Irrigação com EED in natura atendendo 100% da ETP; T200% = Irrigação com EED in natura atendendo 200% da ETP; T100Herb = Irrigação com EED mais herbicida atendendo 100% da ETP; T100Cl = Irrigação com EED desinfetado com hipoclorito de sódio atendendo 100% da ETP.

Dentre os diversos atributos físicos do solo que interferem no manejo da irrigação e no crescimento das plantas, a densidade do solo pode ser considerada como sendo a principal (ANDRADE et al., 2005 a), visto que apresenta relações inversamente proporcionais com a estrutura e com a porosidade do solo e correlaciona-se positivamente com a compactação.

Souza et al. (2010 a), observaram um aumento significativo na densidade de um Cambissolo irrigado com água de abastecimento e com EED em comparação ao solo de uma área sem irrigação. Os autores atribuíram tal fato ao aumento da dispersão da argila proporcionado pelos tratamentos irrigados, corroborando com Santos e Ribeiro (2000) ao

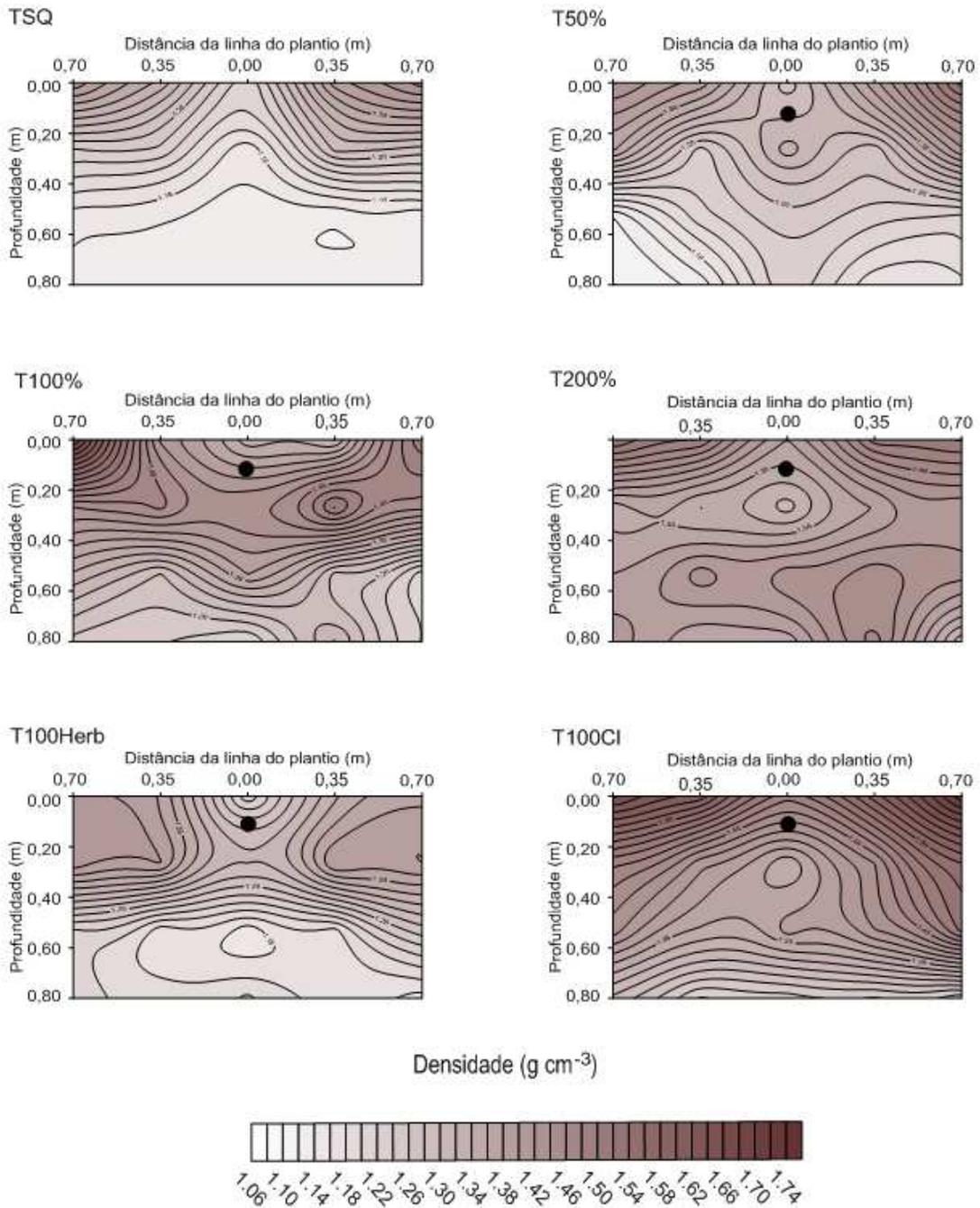
verificarem os mesmos resultados em dois diferentes tipos de solos irrigados com água de abastecimento por vários anos.

No presente trabalho foi descartada a influência do EED sobre o aumento da dispersão de argila, pois não foram observadas diferenças significativas entre o percentual de argila dispersa encontrado nos tratamentos irrigados em comparação ao tratamento TSQ. Diante disso, acredita-se que o maior desenvolvimento de raízes observado no TSQ, tenha contribuído para o registro de menores valores de densidade do solo nesse tratamento, pois o aumento do sistema radicular, proporcionado pelo estresse hídrico, contribuiu para o aumento da porosidade e, em consequência, ocorreu uma redução dos valores de densidade do solo.

Outro fator que contribui para o aumento da densidade do solo diz respeito à movimentação de máquinas e implementos agrícolas em áreas irrigadas. De acordo com Klein e Libardi (2002) a influência do tráfego de máquinas sobre o aumento da densidade do solo se intensifica em áreas com elevados teores de água no solo. Na presente pesquisa o uso de máquinas se fez necessário para realizar a adubação de cobertura nas soqueiras e para o transporte da cana-de-açúcar após a colheita, esta última realizada de forma manual.

Observou-se em todos os mapas, que os maiores valores de densidade do solo foram registrados na primeira profundidade, principalmente, nos pontos mais distantes da linha da soqueira, correspondentes a região das entrelinhas (Figura 27). Nesses, acredita-se que a influência do tráfego de máquinas tenha sido a responsável pelo aumento dos valores da densidade do solo.

Na linha da soqueira de todos os tratamentos, foi observada uma redução da densidade do solo, sendo os menores valores observados no tratamento TSQ. Com exceção do T200%, os demais tratamentos apresentaram uma redução da densidade do solo à medida que aumentou-se a profundidade de estudo.



TSQ - Sistema de cultivo em sequeiro
 T50% - Irrigação com efluente de esgoto doméstico (EED) in natura atendendo 50% da evapotranspiração (ETP)
 T100% - Irrigação com EED in natura atendendo 100% da ETP
 T200% - Irrigação com EED in natura atendendo 200% da ETP
 T100Herb - Irrigação com EED mais herbicida atendendo 100% da ETP
 T100Cl - Irrigação com EED desinfetado com Hipoclorito de sódio atendendo 100% da ETP

● Tubo gotejador enterrado a 0,16 m de profundidade na linha de plantio

Figura 27. Distribuição da densidade no perfil do solo influenciada pela irrigação com efluente de esgoto doméstico nos diferentes tratamentos.

5.3.3 Macroporosidade e Microporosidade do solo

Os tratamentos TSQ e T200% apresentaram as maiores e menores médias de macroporosidade, respectivamente, em todas as profundidades (Tabela 22). Nas profundidades de 0,20-0,40 m e 0,60-0,80 m não houve diferença significativa entre os tratamentos cuja lâmina de aplicação atendeu 100% da ETP. Não foram observadas diferenças significativas de microporosidade do solo entre os tratamentos em nenhuma das profundidades.

Tabela 22. Macroporosidade ($\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$) e Microporosidade ($\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$) do solo influenciadas pela irrigação com efluente de esgoto doméstico.

Profundidade (m)	Macroporosidade						CV%
	TSQ	T50%	T100%	T200%	T100Herb	T100Cl	
0,00 - 0,20	0,185 a	0,101 bcd	0,149 ab	0,069 d	0,146 abc	0,094 cd	15,36
0,20 - 0,40	0,177 a	0,149 b	0,127 c	0,087 d	0,125 c	0,112 c	4,98
0,40 - 0,60	0,201 a	0,184 ab	0,161 c	0,078 c	0,177 ab	0,160 c	7,93
0,60 - 0,80	0,208a	0,189 ab	0,147 bc	0,098 d	0,170 bc	0,147 bc	11,60
	Microporosidade						
0,00 - 0,20	0,396 a	0,433 a	0,378 a	0,420 a	0,398 a	0,428 a	5,06
0,20 - 0,40	0,418 a	0,438 a	0,392 a	0,386 a	0,266 a	0,429 a	23,21
0,40 - 0,60	0,445 a	0,394 a	0,455 a	0,406 a	0,401 a	0,389 a	8,24
0,60 - 0,80	0,402 a	0,392 a	0,409 a	0,405 a	0,400 a	0,385 a	4,14

Médias seguidas pelas mesmas letras na linha não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey ($P < 0,05$). TSQ = Sistema de cultivo em sequeiro; T50% = Irrigação com efluente de esgoto doméstico (EED) in natura atendendo 50% da evapotranspiração (ETP); T100% = Irrigação com EED in natura atendendo 100% da ETP; T200% = Irrigação com EED in natura atendendo 200% da ETP; T100Herb = Irrigação com EED mais herbicida atendendo 100% da ETP; T100Cl = Irrigação com EED desinfetado com hipoclorito de sódio atendendo 100% da ETP.

Os valores de macroporosidade encontrados na presente pesquisa corroboram com Souza et al. (2010 a) ao estudarem as alterações ocorridas nos atributos físicos do solo pelo uso de EED na irrigação do café. Esses autores observaram uma redução na macroporosidade do solo das parcelas irrigadas com EED em comparação ao solo de outra área cultivada e sem irrigação, corroborando com Gonçalves et al. (2007). Tais autores relatam ainda que a redução da macroporosidade do solo nos tratamentos submetidos à irrigação com EED tenha se dado em função do efeito dispersante do íon Na^+ presente no efluente, o que promoveu a

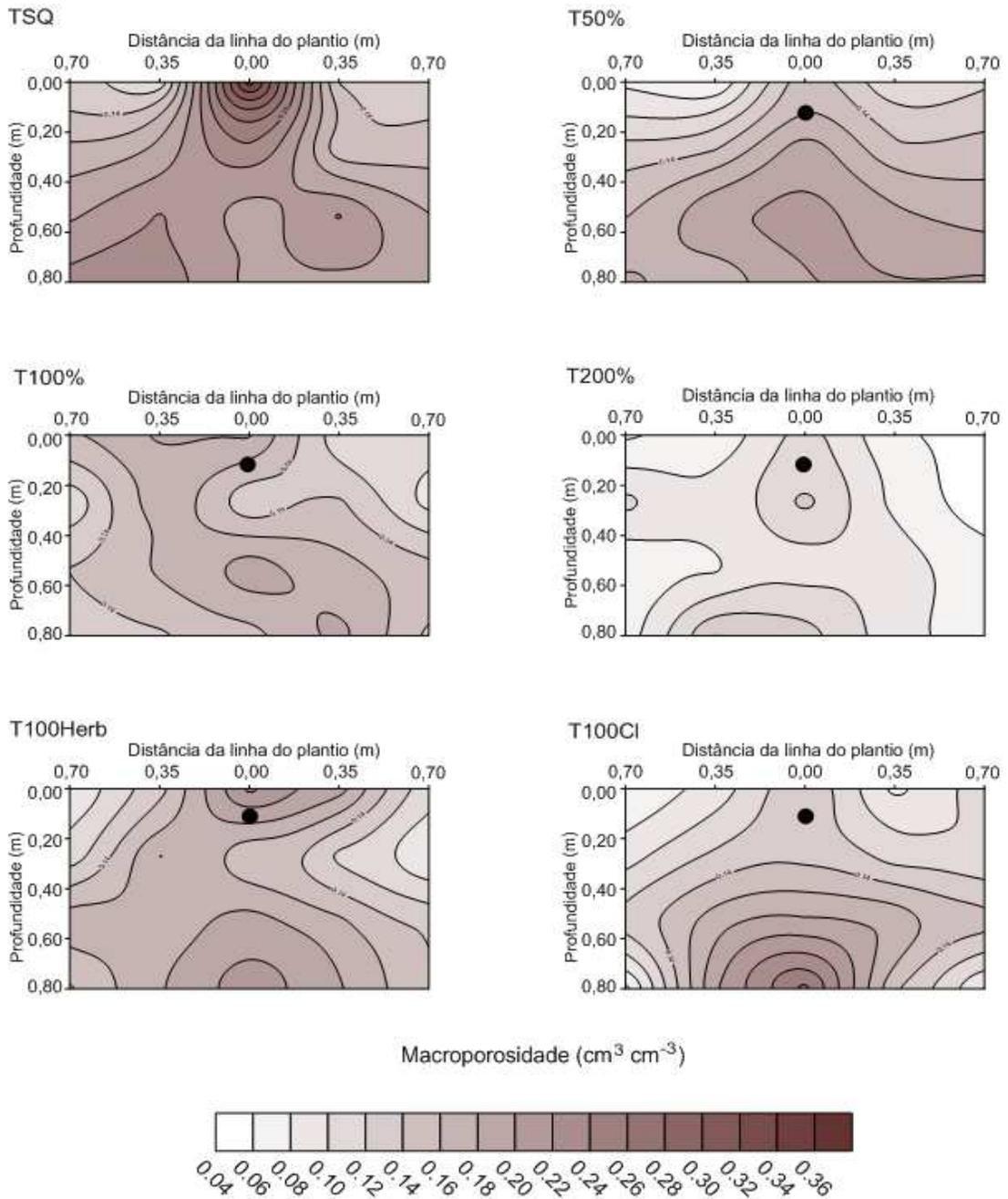
acomodação das partículas de argila em espaços porosos maiores, porém, no presente trabalho não foram observadas diferenças no percentual de ADA entre os diversos tratamentos.

Desta forma, acredita-se, que os maiores valores de macroporosidade verificados no tratamento TSQ tenham sido resultantes do maior desenvolvimento do sistema radicular observado nesse tratamento, pois os canais formados no solo após o processo decomposição das raízes contribuem para o aumento da macroporosidade. Koupai et al. (2006) afirma que entupimento dos macroporos por sólidos em suspensão e, ou pelo material orgânico presente(s) no efluente também contribuem para a redução da macroporosidade.

Com relação à microporosidade do solo, não foi observada diferença estatística entre os tratamentos estudados, provavelmente, por também, não ter havido diferença significativa entre o percentual de argila dispersa apresentado pelos tratamentos no final do experimento. Esses resultados não concordam com os observados por Lado e Bem-Hur (2009), Gloaguen et al. (2010) e Souza et al. (2010 a) ao verificarem um aumento da microporosidade do solo em áreas irrigadas com EED. Esses autores também atribuem à dispersão da argila como sendo a responsável pelo aumento da microporosidade do solo.

Nos tratamentos TSQ e T50% observou-se uma redução da macroporosidade do solo à medida que ocorreu o afastamento da linha da soqueira (Figura 28). Nos demais tratamentos irrigados, os maiores valores de macroporosidade tenderam a concentrar-se na região central do perfil, sendo esse, o local de maior concentração do sistema radicular. O tratamento T200% apresentou uma menor variação entre os valores de macroporosidade, e o seu menor desenvolvimento radicular, em comparação aos demais tratamentos irrigados, proporcionou uma menor macroporosidade ao solo.

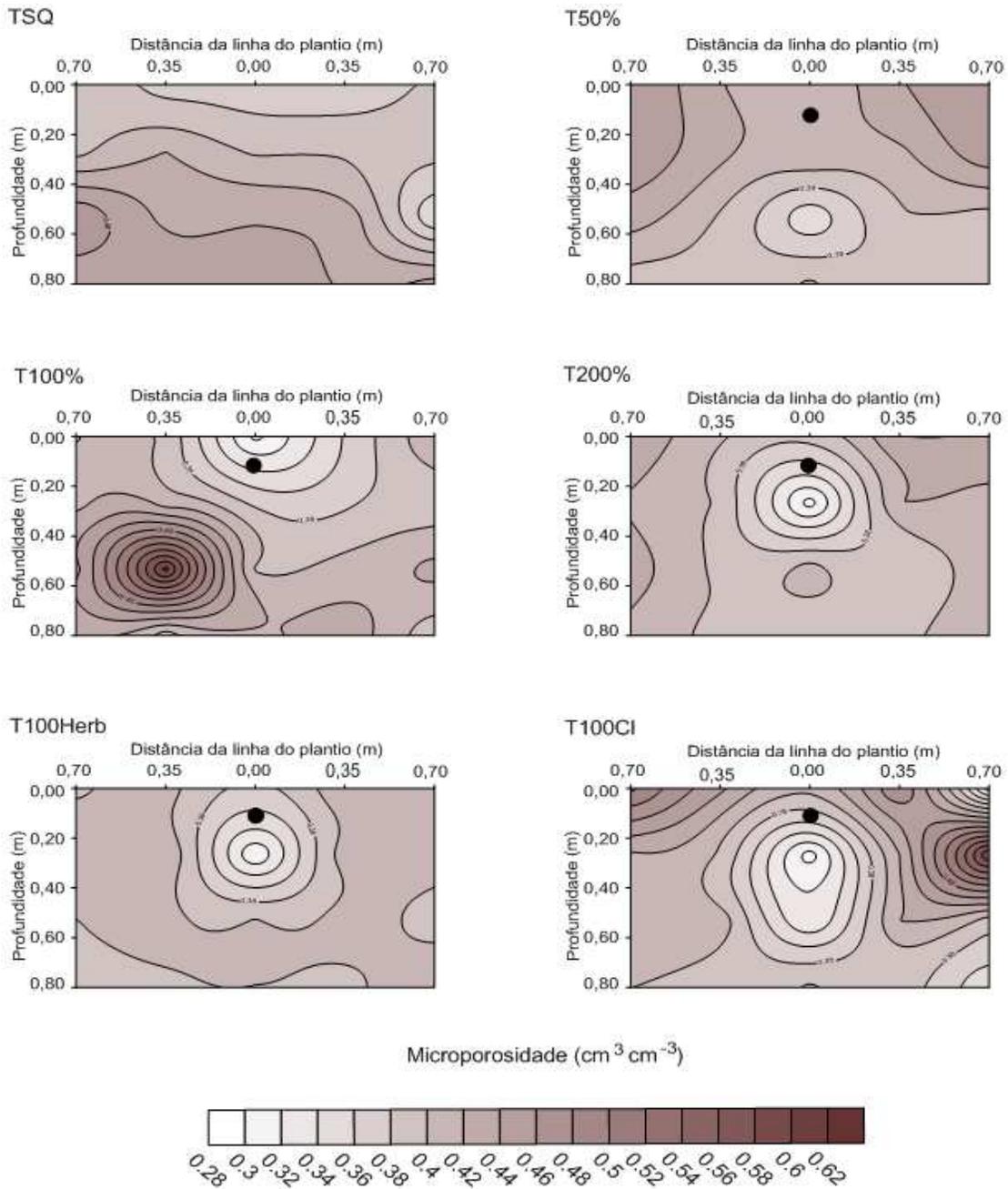
Observou-se um aumento da microporosidade do solo à medida que houve um afastamento da linha da soqueira em todos os tratamentos (Figura 29). Na região central das trincheiras dos tratamentos irrigados verificou-se menores valores de microporosidade do solo, que podem ser explicados pelo aumento da macroporosidade nessa mesma região. Além disso, o tráfego de máquinas, ocorrido durante as etapas da colheita e adubação, também pode ter contribuído para o aumento da microporosidade do solo nos pontos situados a 0,70 m de distância da linha da soqueira, uma vez que a pressão exercida no solo pelo rodado do trator pode promover o adensamento das partículas e, conseqüentemente, a redução do tamanho dos poros.



TSQ - Sistema de cultivo em sequeiro
T50% - Irrigação com efluente de esgoto doméstico (EED) in natura atendendo 50% da evapotranspiração (ETP)
T100% - Irrigação com EED in natura atendendo 100% da ETP
T200% - Irrigação com EED in natura atendendo 200% da ETP
T100Herb - Irrigação com EED mais herbicida atendendo 100% da ETP
T100Cl - Irrigação com EED desinfetado com Hipoclorito de sódio atendendo 100% da ETP

● Tubo gotejador enterrado a 0,16 m de profundidade na linha de plantio

Figura 28. Distribuição da macroporosidade ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$) no perfil do solo influenciada pela irrigação com efluente de esgoto doméstico nos diferentes tratamentos.



TSQ - Sistema de cultivo em sequeiro
T50% - Irrigação com efluente de esgoto doméstico (EED) in natura atendendo 50% da evapotranspiração (ETP)
T100% - Irrigação com EED in natura atendendo 100% da ETP
T200% - Irrigação com EED in natura atendendo 200% da ETP
T100Herb - Irrigação com EED mais herbicida atendendo 100% da ETP
T100CI - Irrigação com EED desinfetado com Hipoclorito de sódio atendendo 100% da ETP

● Tubo gotejador enterrado a 0,16 m de profundidade na linha de plantio

Figura 29. Distribuição da microporosidade ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$) no perfil do solo influenciada pela irrigação com efluente de esgoto doméstico nos diferentes tratamentos.

5.3.4 Diâmetro médio ponderado (DMP) e porcentagem de agregados maior do que 2 mm (AGRE%)

Houve diferença estatística para os valores de DMP e AGRE% encontrados em todas as profundidades estudadas (Tabela 23). O tratamento TSQ apresentou as maiores médias de DMP nas profundidades de 0,0-0,20 m, 0,20-0,40 m e 0,40-0,60 m. O tratamento T50% apresentou as menores médias observadas nas profundidades de 0,00-0,20m e 0,20-0,40 m, sendo que nesta última, também apresentou-se estatisticamente igual aos tratamentos T100%, T100Herb e T100Cl. Os tratamentos T100%, T200% e T100Cl não apresentaram diferença estatística entre si nas profundidades de 0,00-0,20 m e 0,60-0,80 m. O tratamento T100Herb apresentou as menores médias observadas nas profundidades de 0,40-0,60 m e 0,60-0,80 m.

Com relação à AGRE%, os tratamentos T50% e T100Cl apresentaram as maiores médias na profundidade de 0,00-0,20 m e não diferenciaram-se estatisticamente (Tabela 23). Na profundidade de 0,20-0,40 m todos os tratamentos irrigados apresentaram as menores médias e não houve diferença estatística entre si. Na profundidade de 0,40-0,60 m os tratamentos cuja lâmina aplicada atendeu 100% da evapotranspiração obtiveram as menores médias e não verificou-se diferença estatística entre os mesmos. Na profundidade de 0,60-0,80 m os tratamentos TSQ e T100% apresentaram a maior e a menor média, respectivamente.

Tabela 23. Diâmetro Médio Ponderado – DMP (mm) e Porcentagem de Agregados maior do que 2 mm – AGRE (%) influenciados pela irrigação com efluente de esgoto doméstico.

Profundidade (m)	DMP (mm)						CV%
	TSQ	T50%	T100%	T200%	T100Herb	T100Cl	
0,00 - 0,20	1,35 a	0,68 b	0,74 ab	0,97 ab	0,74 ab	1,03 ab	25,53
0,20 - 0,40	1,20 a	0,72 b	0,69 b	0,89 ab	0,57 b	0,70 b	21,41
0,40 - 0,60	1,65 a	0,99 ab	0,75 ab	0,95 ab	0,49 b	0,69 ab	45,08
0,60 - 0,80	0,86 ab	0,82 ab	0,84 ab	0,96 ab	0,46 b	0,71 ab	41,37
AGRE (%)							
0,00 - 0,20	10,29 ab	8,97 a	6,17 b	8,9 ab	10,87 ab	11,45 a	17,78
0,20 - 0,40	10,82 a	4,17 b	3,63 b	4,67 b	4,00 b	12,74 b	16,45
0,40 - 0,60	11,41 a	5,30 ab	3,61 b	9,08 ab	3,52 b	4,08 b	36,43
0,60 - 0,80	10,76 a	3,79 bc	3,21 c	9,71 ab	3,32 bc	6,60 abc	35,12

Médias seguidas pelas mesmas letras na linha não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey ($P < 0,05$). TSQ = Sistema de cultivo em sequeiro; T50% = Irrigação com efluente de esgoto doméstico (EED) in natura atendendo 50% da evapotranspiração (ETP); T100%= Irrigação com EED in natura atendendo 100% da ETP; T200% = Irrigação com EED in natura atendendo 200% da ETP; T100Herb = Irrigação com EED mais herbicida atendendo 100% da ETP; T100Cl = Irrigação com EED desinfetado com hipoclorito de sódio atendendo 100% da ETP.

A suscetibilidade das forças desagregantes do solo é dada em função das suas características químicas, físicas e mineralógicas, porém a dispersão da fração coloidal é um fenômeno que também pode ser influenciado por ações antrópicas (ALMEIDA NETO et al., 2009) como, por exemplo, a irrigação e a qualidade da água utilizada.

De acordo com Azevedo e Bonumá (2004) o resultado da desagregação é a dispersão, que corresponde à fração de argila que se dispersa espontaneamente em água, sendo, assim, a que apresenta maior mobilidade. No entanto, ressalta-se, que na presente pesquisa o uso de EED na irrigação não proporcionou aumento na dispersão da argila, pois todas as médias de ADA encontradas igualaram-se estaticamente às observadas no tratamento TSQ.

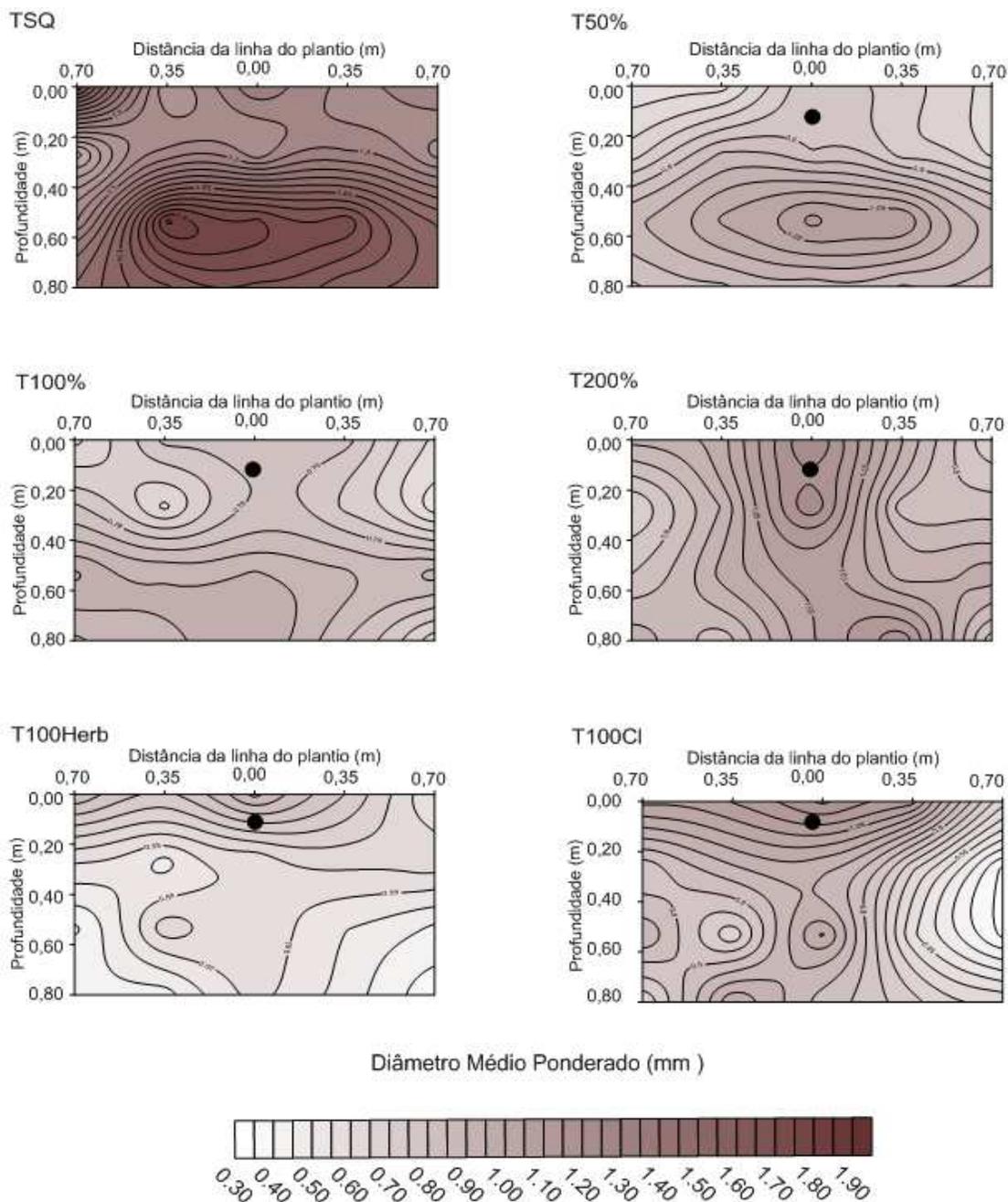
De acordo com Wendling et al. (2005) os teores de COT encontrados no solo apresentam boa correlação com os índices de agregação, dada a influência que este elemento exerce no aumento da coesão entre as partículas do solo. Diante disso, acredita-se que os

maiores valores de DMP e AGRE% observados nas três primeiras e nas três últimas profundidades, respectivamente, no tratamento TSQ, tenham sido proporcionados pelos maiores teores de COT registrados nesse tratamento (Tabela 18).

Relacionando os resultados dos índices de agregados com os dados de raízes encontrados na presente pesquisa, é possível afirmar que o maior desenvolvimento do sistema radicular observado no tratamento TSQ, tenha contribuído para a ocorrência dos maiores valores de DMP e AGRE% verificados nesse tratamento, pois de acordo com Coutinho et al. (2010), a rizo-deposição seguida da posterior morte das raízes proporcionam uma maior agregação às partículas do solo, devido ao fornecimento de carbono.

Os tratamentos T100%, T200%, T100Herb e T100Cl apresentaram os maiores valores de DMP na região próxima a linha da soqueira. Os demais tratamentos apresentaram as maiores médias abaixo da profundidade de 0,40 m e de forma mais concentradas na região central da trincheira (Figura 30). Acredita-se que isso tenha ocorrido por conta do maior e menor aprofundamento do sistema radicular observado nos tratamentos com e sem estresse hídrico, respectivamente. O desenvolvimento de raízes, em maiores profundidades, proporcionado pelos tratamentos TSQ e T50% contribuiu para o aumento dos valores de DMP abaixo da profundidade de 0,40 m.

Observou-se nos tratamentos irrigados que os maiores valores de AGRE% foram registrados na profundidade de 0,00-0,20 m e de forma mais concentrada na região próxima da linha da soqueira. O tratamento TSQ apresentou uma distribuição mais homogênea em todo o perfil, porém, observou-se que na região central da trincheira encontraram-se os maiores valores (Figura 31).



TSQ - Sistema de cultivo em sequeiro

T50% - Irrigação com efluente de esgoto doméstico (EED) in natura atendendo 50% da evapotranspiração (ETP)

T100% - Irrigação com EED in natura atendendo 100% da ETP

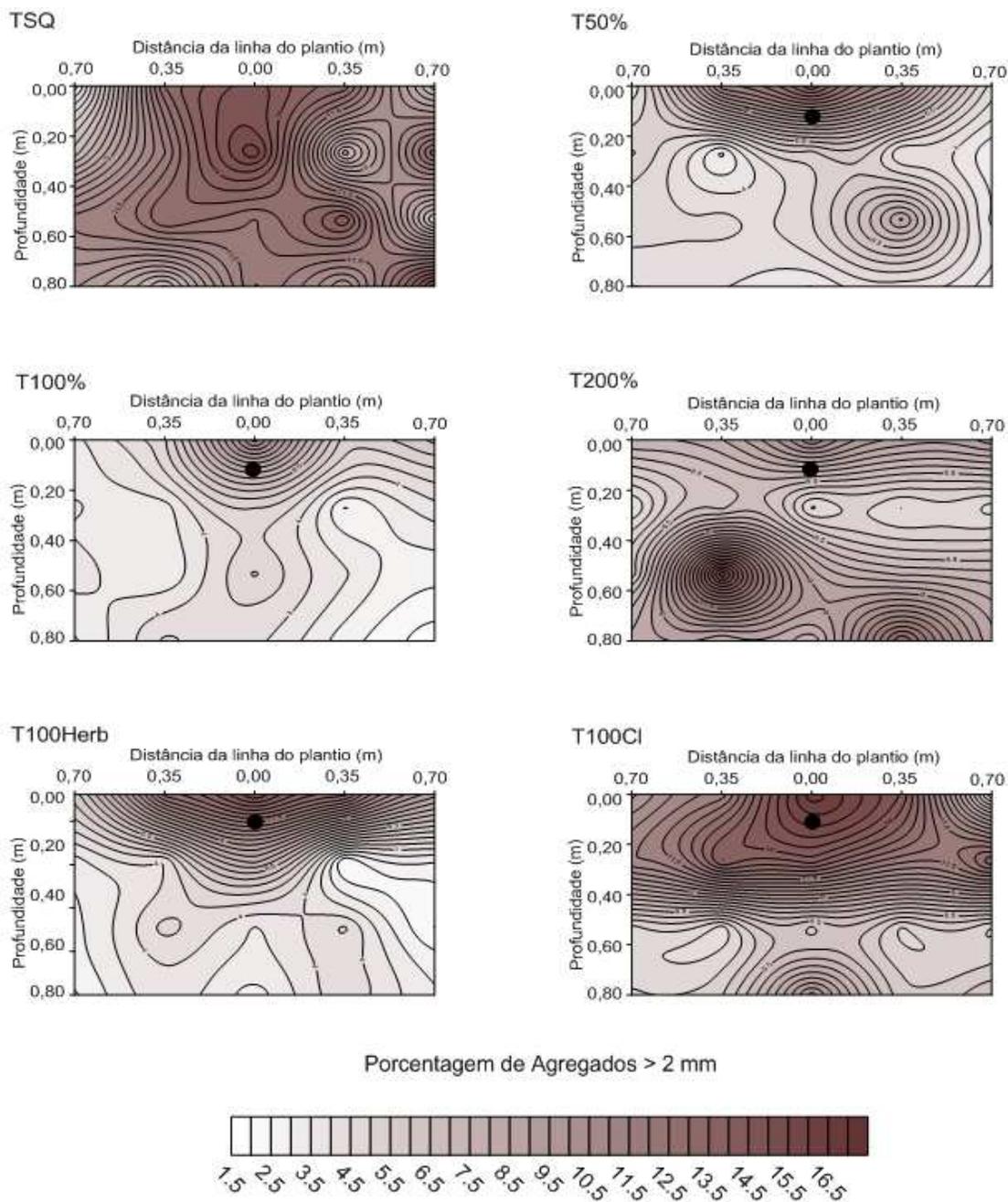
T200% - Irrigação com EED in natura atendendo 200% da ETP

T100Herb - Irrigação com EED mais herbicida atendendo 100% da ETP

T100Cl - Irrigação com EED desinfetado com Hipoclorito de sódio atendendo 100% da ETP

● Tubo gotejador enterrado a 0,16 m de profundidade na linha de plantio

Figura 30. Distribuição do diâmetro médio ponderado de agregados (mm) no perfil do solo, influenciado pela irrigação com efluente de esgoto doméstico nos diferentes tratamentos.



TSQ - Sistema de cultivo em sequeiro
 T50% - Irrigação com efluente de esgoto doméstico (EED) in natura atendendo 50% da evapotranspiração (ETP)
 T100% - Irrigação com EED in natura atendendo 100% da ETP
 T200% - Irrigação com EED in natura atendendo 200% da ETP
 T100Herb - Irrigação com EED mais herbicida atendendo 100% da ETP
 T100Cl - Irrigação com EED desinfetado com Hipoclorito de sódio atendendo 100% da ETP

● Tubo gotejador enterrado a 0,16 m de profundidade na linha de plantio

Figura 31. Distribuição da porcentagem de agregados maior que 2 mm no perfil do solo, influenciada pela irrigação com efluente de esgoto doméstico nos diferentes tratamentos.

5.4 Resistência do solo à penetração

De acordo com Siqueira et al. (2010), o teor de água do solo apresenta correlação negativa com a resistência à penetração, e isso se dá pela redução das forças de coesão entre as partículas do solo quando ocorre o aumento da umidade. Diante disso, juntamente com as leituras de resistência do solo à penetração vertical, foram tomadas amostras deformadas de solo para a determinação do teor de água.

Os tratamentos estudados não apresentaram diferença significativa entre os teores de água do solo em nenhuma das profundidades estudadas (Tabela 24), que se justifica pelo fato das coletas terem sido realizadas 10 dias após a suspensão da irrigação, período este que correspondeu ao início da maturação fisiológica da cultura. Além disso, durante a realização das coletas ocorreu o registro de duas chuvas na área do experimento, que também contribuiu para que todos os tratamentos apresentassem a mesma umidade do solo no dia da coleta (Tabela 24).

Tabela 24. Teor de água do solo (Kg Kg^{-1}) de todos os tratamentos estudados.

Profundidade (m)	TSQ	T50%	T100%	T200%	T100Herb	T100Cl	CV%
0,00 - 0,20	0,21	0,20	0,19	0,22	0,21	0,21	13,00
0,20 - 0,40	0,21	0,21	0,19	0,23	0,19	0,23	10,77
0,40 - 0,60	0,21	0,21	0,19	0,22	0,18	0,21	10,75

Médias seguidas pelas mesmas letras na linha não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey ($P < 0,05$). TSQ = Sistema de cultivo em sequeiro; T50% = Irrigação com efluente de esgoto doméstico (EED) in natura atendendo 50% da evapotranspiração (ETP); T100% = Irrigação com EED in natura atendendo 100% da ETP; T200% = Irrigação com EED in natura atendendo 200% da ETP; T100Herb = Irrigação com EED mais herbicida atendendo 100% da ETP; T100Cl = Irrigação com EED desinfetado com hipoclorito de sódio atendendo 100% da ETP.

Observou-se diferença significativa para a resistência do solo a penetração apenas nas profundidades de 0,00-0,05m; 0,15-0,20m e 0,25-0,30m (Tabela 25). Nestas profundidades, o tratamento TSQ apresentou os maiores valores de resistência do solo. Na profundidade de 0,00-0,05 m o tratamento T100% obteve a menor média e não houve diferença estatística entre os tratamentos T50%, T200%, T100Herb e T100Cl. Nas profundidades de 0,15-0,20m e 0,25-

0,30m a menor média foi registrada no tratamento T100Herb e não observou-se diferença entre os tratamentos T50%, T100%, T200% e T100Cl.

De acordo com Grant e Lafond (1993) os valores de resistência do solo situados entre 1,5 e 3,0 MPa são tidos como críticos e dificultam o crescimento do sistema radicular das culturas. Nesse trabalho, todos os tratamentos apresentaram valores superiores a 1,5 MPa em todas as profundidades estudadas.

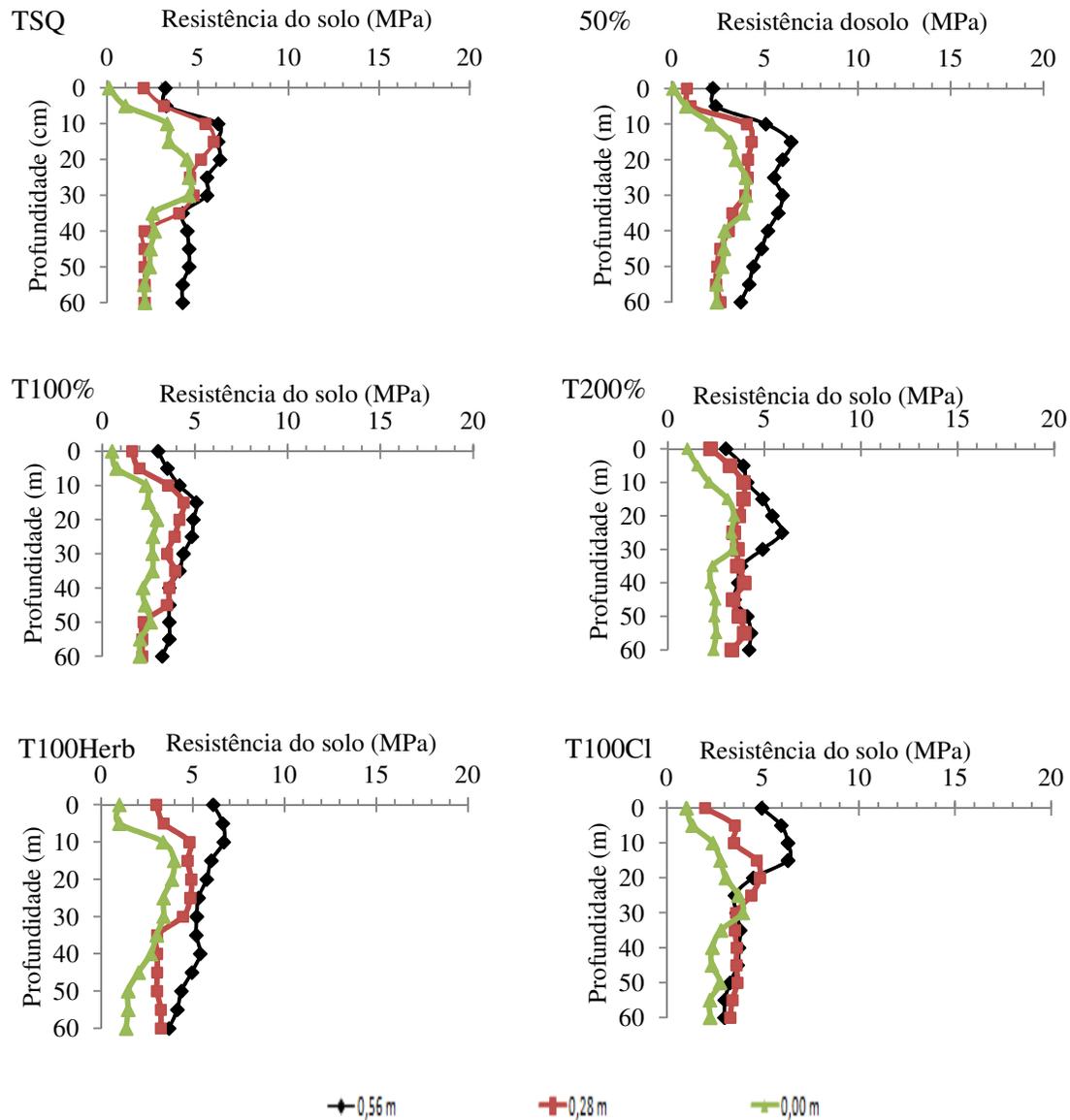
Tabela 25. Resistência a penetração do solo nas diversas profundidades estudadas.

Profundidade (m)	TSQ	T50%	T100%	T200%	T100Herb	T100Cl	CV%
0,00 - 0,05	4,16 a	3,67 ab	1,36 b	3,61 ab	2,09 ab	2,87 ab	32,86
0,05 - 0,10	4,60	4,95	3,73	4,06	3,34	3,37	15,29
0,10 - 0,15	5,12	4,89	4,61	4,59	3,96	3,96	10,60
0,15 - 0,20	5,25 a	4,83 ab	4,48 ab	4,14 ab	3,99 b	4,15 ab	9,37
0,20 - 0,25	4,85	4,51	4,51	3,89	3,81	4,19	15,21
0,25 - 0,30	4,91 a	4,35 ab	4,63 ab	3,72 ab	3,51 b	3,97 ab	11,63
0,30 - 0,35	3,53	3,75	4,26	3,39	3,59	3,23	15,81
0,35 - 0,40	3,01	3,71	3,67	3,25	3,13	3,26	20,15
0,40 - 0,45	2,97	3,53	3,40	3,22	3,12	3,09	19,54
0,45 - 0,50	2,95	2,96	3,16	3,25	2,80	3,39	21,02
0,50 - 0,55	2,74	2,95	2,91	2,89	2,59	2,58	19,19
0,55 - 0,60	2,75	2,77	2,90	2,85	2,45	3,28	17,74

Médias seguidas pelas mesmas letras na linha não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey (P<0,05). TSQ = Sistema de cultivo em sequeiro; T50% = Irrigação com efluente de esgoto doméstico (EED) in natura atendendo 50% da evapotranspiração (ETP); T100%= Irrigação com EED in natura atendendo 100% da ETP; T200% = Irrigação com EED in natura atendendo 200% da ETP; T100Herb = Irrigação com EED mais herbicida atendendo 100% da ETP; T100Cl = Irrigação com EED desinfetado com hipoclorito de sódio atendendo 100% da ETP.

Observou-se que os valores de resistência do solo aumentaram à medida que o ponto de amostragem se distanciou da linha da soqueira, que pode ser explicado pela maior

influência da compactação provocada pelo tráfego de máquinas e pela menor concentração de raízes nesses pontos, que juntos, contribuíram para o aumento da densidade do solo e, conseqüentemente, da resistência a penetração vertical (Figura 32).



TSQ - Sistema de cultivo em sequeiro

T50% - Irrigação com efluente de esgoto doméstico (EED) in natura atendendo 50% da evapotranspiração (ETP)

T100% - Irrigação com EED in natura atendendo 100% da ETP

T200% - Irrigação com EED in natura atendendo 200% da ETP

T100Herb - Irrigação com EED mais herbicida atendendo 100% da ETP

T100Cl - Irrigação com EED desinfetado com Hipoclorito de sódio atendendo 100% da ETP

Figura 32. Resistência do solo a penetração vertical do solo influenciada pela irrigação com efluente de esgoto doméstico nos diferentes tratamentos.

Com base na classificação de USDA (1993), no ponto situado a 0,56 m de distância da linha da soqueira, todos os tratamentos apresentaram uma RP classificada como sendo alta (> 2,0 Mpa) e muito alta (ente 4,0 e 8,0 MPa), e isso pode ser explicado devido ao fato desse ponto ter sido localizado na linha de tráfego das máquinas e implementos agrícolas. De acordo com Roque et al. (2010), o tráfego de máquinas aumenta a densidade do solo, diminui o diâmetro médio ponderado de agregados e a macroporosidade na linha do rodado, fatores esses que contribuem para o aumento da resistência à penetração do solo.

No ponto situado a 0,28m de distância da linha da soqueira, os valores de resistência do solo foram menores do que os observados no ponto distanciado a 0,56m, com exceção apenas dos tratamentos T200% e T100Cl que apresentaram valores maiores, principalmente, abaixo da profundidade de 0,40 m. No ponto correspondente a linha da soqueira (0,00m), todos os valores foram menores do que os observados nos pontos situados a 0,28 e 0,56 m de distância do referencial, que se justifica pela maior presença de raízes na linha da soqueira e pela menor influência do tráfego de máquinas sobre essa região.

5.5 Produtividade

No ano de execução desse trabalho, 2010, a área experimental apresentou várias falhas nas linhas de plantio e tombamento de plantas em quase todas as parcelas, o que inviabilizou a análise de produtividade desse ano.

Histórico dos anos anteriores

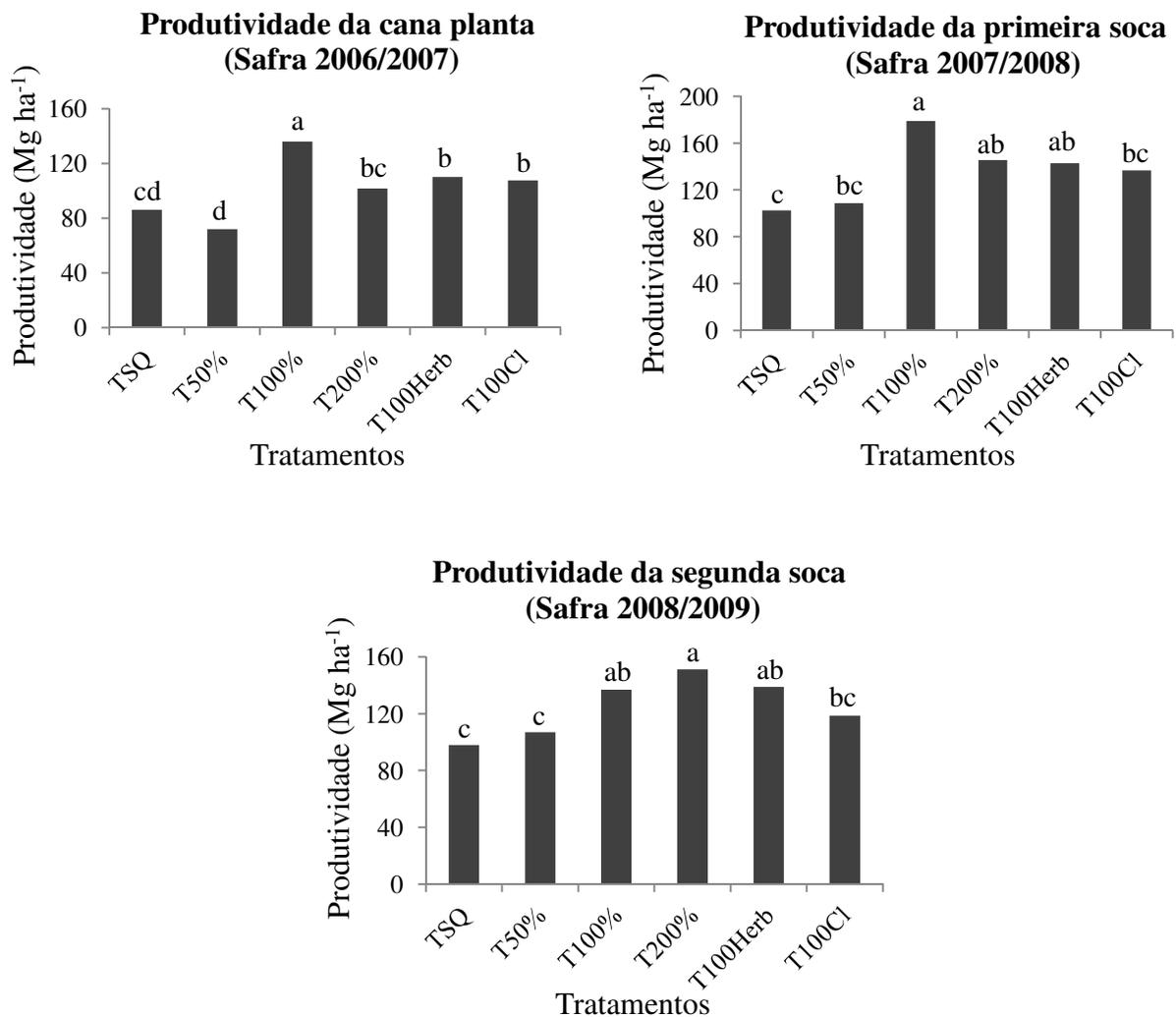
Houve diferença significativa entre os valores de produtividade encontrados nos três primeiros anos da cultura (Figura 33). No primeiro e no segundo ano, correspondentes a cana planta e a primeira soca, os tratamentos TSQ e T100% apresentaram a menor e a maior média, respectivamente. Na segunda soca, o tratamento T200% apresentou a maior produtividade e não houve diferença entre os tratamentos TSQ e T50%, que apresentaram os menores valores observados (Figura 33).

Os tratamentos irrigados apresentaram uma produtividade média de 105,43 t ha⁻¹, 142,42 t ha⁻¹ e 130,49 t ha⁻¹ para o primeiro, o segundo e o terceiro ano, respectivamente, valores esses que corresponderam a 22,40%, 38,86% e 33,12% a mais do que a produtividade apresentada pelo tratamento TSQ para os mesmos ciclos. Esses valores também foram maiores

do que a produtividade média ocorrida no estado de São Paulo no mesmo período, cujos valores registraram 84,59 t ha⁻¹, 85,20 t ha⁻¹ e 85,42 t ha⁻¹ para os anos de 2007, 2008 e 2009, nessa ordem (IBGE, 2010).

Leal et al. (2009) também observaram incrementos na produtividade da cana-de-açúcar irrigada com EED quando comparada a cana-de-açúcar cultivada sem irrigação. Esses autores acreditam que grande parte da produtividade obtida pelos tratamentos irrigados tenha sido proporcionada devido ao contínuo fornecimento de água pela irrigação, o que favoreceu um maior desenvolvimento vegetativo. Além disso, o aporte de nutrientes promovido pelo EED também proporcionou melhores condições para o desenvolvimento da cultura.

Os menores valores de produtividade registrados no tratamento TSQ também podem ser justificados pelo maior desenvolvimento de raízes registrado nesse tratamento, pois de acordo com Vasconcelos (2003), o gastos energéticos com fotoassimilados para a produção de raízes mais profundas comprometem o potencial produtivo da cultura, uma vez que as reservas que poderiam ser utilizadas para a produção da parte aérea (colmo e folhas) são deslocadas para a produção e manutenção do sistema radicular.



TSQ - Sistema de cultivo em sequeiro

T50% - Irrigação com efluente de esgoto doméstico (EED) in natura atendendo 50% da evapotranspiração (ETP)

T100% - Irrigação com EED in natura atendendo 100% da ETP

T200% - Irrigação com EED in natura atendendo 200% da ETP

T100Herb - Irrigação com EED mais herbicida atendendo 100% da ETP

T100Cl - Irrigação com EED desinfetado com Hipoclorito de sódio atendendo 100% da ETP

Figura 33. Produtividade da cultura ocorrida nas safras 2006-2007, 2007-2008 e 2008-2009. Médias seguidas pelas mesmas letras não diferem estatisticamente pelo teste Tukey ($P < 0,05$).

6. CONCLUSÕES

A irrigação com efluente de esgoto doméstico reduziu área, o comprimento e o volume do sistema radicular.

O uso de efluente de esgoto doméstico aumentou os teores de cálcio, magnésio, nitrogênio, sódio, a saturação por bases, a capacidade de troca de cátions, e reduziu a acidez potencial e os teores de carbono do solo. Além disso, apresentou alto potencial para o fornecimento de P e para a redução do pH.

A irrigação com efluente de esgoto doméstico não promoveu o aumento da argila dispersa em água, nem o aumento da microporosidade do solo.

O tratamento TSQ apresentou menores valores de densidade do solo, os maiores índices de agregação (DMP e AGRI%) e os maiores valores de macroporosidade.

Os pontos mais distantes da linha da soqueira apresentaram maior resistência do solo à penetração vertical.

O uso de efluente de esgoto doméstico na irrigação da cana-de-açúcar proporcionou incrementos na produtividade da cultura.

7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADEKALU, K. O.; OKUNADE, D. A. Effects of pond water and sewage effluent treatments on yield and nutrient uptake of maize. *Tropical Agriculture*, v.79, n.2, p.120-124, 2002.

AGUIAR, M. I. **Qualidade física do solo em sistemas agroflorestais**. 2008. 91 p. Dissertação (Mestrado em solos e nutrição de plantas) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa.

ALCANTARA, R. M. M.; CARDOSO, M. J. **Fertilidade e adubação em solos do Meio-Norte do Brasil**. In: LEITE, L. F. C.; OLIVEIRA, F. C.; ARAÚJO, A. S. F. 1 ed. Teresina, EMBRAPA Meio-Norte, 2006. Cap. II, p. 67-107.

ALMEIDA NETO, O. B.; MATOS, A. T.; ABRAHAO, W. A. P.; COSTA, L. M.; DUARTE, A. Influência da qualidade da água de irrigação na dispersão da argila de latossolos. **Revista brasileira de ciências do solo**, Viçosa, v. 33, p.1571-1581, 2009.

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

ALVES, L. R. A.; BACCHI, M. R. P. Oferta de exposição de açúcar do Brasil. **Revista Economia Rural**, Rio de Janeiro, v. 42, n.1, p. 09 - 33, 2004.

AMARAL, E. F. **Quantificação de raízes usando imagens digitais**. Empresa de Pesquisa Agropecuária – Centro de Pesquisa Agropecuária do Acre. Rio Branco, Acre, nº 125. 1998, p.1-3, (EPAA, Boletim Técnico).

ANDRADE, A. R. S.; GUERINI, I. A.; GARCIA, C. J. B.; KATEZ, I.; GUERRA, H. O. C. Variabilidade espacial da densidade do solo sob manejo da irrigação. **Ciência agrotécnica**, Lavras, v. 29, n. 2, p. 322-329, 2005. a

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 de engenharia agrícola e ambiental**, v. 9, suplemento, p. 212-216, 2005. b

ARCHELA, E.; CARRARO A.; FERNANDES, F.; BARROS, O. N. F.; ARCHELA, R. S. Considerações sobre a geração de efluentes líquidos em centros urbanos. **Geografia**, Londrina, v. 12, n. 1. p. 517-525. 2003.

AZEVEDO, A. C.; BONUMÁ, A. S. Par tículas coloidais, dispersão e agregação em Latossolos. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, **Viçosa**, v. 34. p. 609-617, 2004.

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**, Jaboticabal, v. 25, n. 1, p. 253-263, 2005.

- BALL-COELHO, B.; SAMPAIO, E. V. S. B.; TIESSEN, H.; STEWART, J. W. B. Root dynamic in plant ratoon crops of sugar cane. **Plant and soil**, v. 142, p. 297-305, 1992.
- BAUMGARTHER, D.; SAMPAIO, S. C.; SILVA, T. R.; TEO, C. R. P. A.; VILAS BOAS, M. A. Reúso de águas residuárias da piscicultura e da suinocultura na irrigação da cultura do alface. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 27, n. 1, p. 152-163, 2007.
- BEAUCLAIR, E. G. F.; SCAPARI, M. S. Noções fitotécnicas. In: Ripoli, T. C. C.; Ripoli, M. L. C. CASAGRANDE, D. V.; IDE, B. Y. **Plantio de cana-de-açúcar: estado da arte**. Piracicaba: T.C.C. Ripoli, 2007. P. 65-73.
- BAYER, C.; MIELNICZUK. **Dinâmica e função da matéria orgânica**. In: _____. Fundamentos da Matéria orgânica do solo: Ecossistemas Tropicais e Subtropicais. 2008 (cap. 2, p.7-18).
- BERNARDO, S.; SOARES, A.; MONTOVANI, E. C. Manual de irrigação. 7ª Ed. Viçosa: Ed. UFV, 2005.
- BIONE, G; COSTA, C. A. G.; GONDIM, R. S.; MONTENEGRO, A. A. T.; OLIVEIRA, V. H. Distribuição do sistema radicular anão precoce clone (CCP-09) em cultivo irrigado e sequeiro, Ceará, Brasil. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, v. 30, n. 1, p. 1-6, 2008.
- BREMNER, J. M., MULVANEY, C. S. Total nitrogen. In: PAGE, A. L., ed. Methods of soil analysis. Madson: American Society of Agronomy, 1982.
- BUSO, P. H. M. **Estudo do sistema radicial de cana-de-açúcar no plantio em gema e tolete**. 2006. 88 p. Dissertação (Mestrado em Agronomia: Produção vegetal) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba.
- CARVALHO, E. P. Formulação e uma estratégia para garantir o aumento da produção. In: seminário “UMA ESTRATÉGIA PARA O ETANOL BRASILEIRO”, 2006, Rio de Janeiro. Rio de Janeiro: Casa do Brasil, 2006. 8 p.
- CASAGRANDE, A. A.; **Tópicos de morfologia e fisiologia da cana-de-açúcar**. Jaboticabal: FUNEP, 1991. 157 p.
- COPPOLA, A.; SANTINI, A.; BOTTI, P.; VACCA, S.; COMEGNA, V.; SEVERINO, G. Methodological approach for evaluating the response of soil hydrological behavior to irrigation with treated municipal wastewater. **Journal of Hydrology**, Amsterdam. v. 292, p. 114-134. 2004.
- COSTA, M. C.; MAZZA, J. A.; VITTI, C. G.; JORGE, L. A. C. Distribuição radicular, estado nutricional e produção de colmos e de açúcar em soqueiras de dois cultivares de cana-de-açúcar em solos distintos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. Viçosa, v.31, p. 1503-1514, 2007.

COUTINHO, F.S.; LOSS, A.; PEREIRA, M. G.; RODRIGUES JUNIOR, D. J.; TORRES, J. L. R. Estabilidade de agregados e distribuição do carbon em Latossolo sob sistema plantio direto em Uberaba, Minas Gerais, **Comunicata Scientia**, Bom Jesus, v. 1, n. 2, p. 100 – 105, 2010.

CUENCA, M.A. G.; NAZARIO, C. C. **Caracterização Agrossocioeconomica da atividade canvieira no Brasil, Distribuição espacial na produção mundial 1961-2003 – Situação no Brasil entre 1990 e 2002**. Aracaju, SE: EMBRAPA TABULEIROS COSTEIROS 2005, 24 p.(EMBRAPA TABULEIROS COSTEIROS, Recomendação Técnica, 1).

DA FONSECA, A. F. **Disponibilidade de Nitrogênio, alterações nas características químicas do solo e do milho pela aplicação de esgoto tratado**. 2001. 126 p. Dissertação (Mestrado) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba.

DA FONSECA, A. F.; HERPIN, U.; DIAS, C. T. S.; MELFI, A. J. Nitrogen Forms, pH and Total Carbon in a Soil Incubated with Treated Sewage Effluent. **Brazilian Archives of Biology and Technology**, v. 50, n. 5, 2007.

DA FONECA, A. F.; MELFI, A. J.; MONTES, C. R. Maize growth and changes in soil fertility after irrigation with treated sewage effluent. Part I plant dry matter yield and soil nitrogen and phosphorus availability. *Communications in soil science and plant analysis*, New York, v. 36, n. 36, p. 1965-1981, 2005.

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

DEON, M. D. **Reciclagem de águas e nutrientes pela irrigação da cana-de-açúcar com efluente de tratamento de esgoto**. 2010. 89p. Tese (Doutorado em Ciências) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba.

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

DUARTE, A. S.; AIROLDI, R. P. S.; FOLEGATTI, M. V.; BOTREL, T. A.; SOARES, T. M. Efeitos da aplicação de efluentes tratado na solo: pH, matéria orgânica, fósforo e potássio. **Revista brasileira de engenharia agrícola e ambiental**, Campinas Grande, v. 12, n. 13, p. 302-310, 2008.

EASA, A. HANMIURA, T. Physical properties of wastewater contaminated underlying clayey soil. **Journal of environmental science for sustainable society**, v.3, p. 9-18, 2009.

EMBRAPA- Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (1997). Manual de métodos de análises de solo. (Centro Nacional de Pesquisa de Solos: Rio de Janeiro).

FALKINER, R. A.; SMITH, C. J. Changes in soil chemistry in effluent-irrigated *Pinnus radiata* and *eucaliptus grandis*. **Australian journal of soil research**, v. 35, p. 131-147, 1997.

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

FIRME, L. P. **Efeito da irrigação com efluente de esgoto tratado no sistema solo-planta em Latossolo cultivado com cana-de-açúcar**. 2007. 110 p. Tese (Doutorado em Agronomia) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba.

FUENTES, R. E.; CONSTANTINO, L. C.; SILVA, E. E.; DENDOOVEN, L. Characteristics, and carbon and nitrogen dynamics in soil irrigated with wastewater for different lengths of time, **Bioresource Technology**, v. 85, p. 179-197, 2002.

FUNBIO. 2010. Apresenta a cana-de-açúcar no Brasil. Disponível em: <<http://www.funbio.org.br/>>. Acesso: em 7 de agosto de 2011.

GALAVI, M.; JALALI, A.; RAMROODI, M.; MOUSAVI, S, R.; GALAVI, H. Effects of treated municipal wastewater on soil chemical properties and heavy metal uptake by sorghum (*Sorghum bicolor* L.). **Journal of agricultural science**, Amsterdam, v. 2, n. 3, p. 235 – 241, 2010.

GLOAGUEN, R. A. B. G. **Efeito da irrigação com efluente de esgoto tratado nas propriedades físico-hídricas de um Latossolo**. 2005. 120 p. Tese (Doutorado em Agronomia) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba.

GLOAGUEN, T. V.; GONÇALVES, R. A. B.; FORTI, M. C.; LUCAS, Y.; MONTES, C. R. Irrigation with domestic wastewater: A multivariate analysis of main soil changes. **Revista brasileira de ciência do solo**, Viçosa, v. 34, n.34, p. 1427-1434, 2010.

GOMES, M. R. M. **Análise de imagens no estudo da porosidade em Latossolo cultivado com batata (*Solanum tuberosum* L.) sob dois sistemas de irrigação**. 2008. 61 p. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Universidade Estadual Paulista “Julio de Mesquita Filho”, Botucatu.

GOMES, T. M.; MELFI, A. J.; MONTES, C. R. SILVA, E.; SUNDEFELD JUNIOR, 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**, São Paulo, v. 180, p. 17 - 23, 2009.

GONÇALVES, R. A. B.; FOLEGATTI, M. V.; GLOAGUEN, T. V.; LIBARI, P. L.; MONTES, C. R. LUCAS, Y.; DIAS, C. T. S.; MELFI, A. J. Hydraulic conductivity of a soil irrigated with treated sewage effluent. **Geoderma**, Amsterdam, v.139, p. 241-248, 2007.

GRANT, C. A.; LAFOND, G.P The effects of tillage systems and crop sequences on soil bulk density and penetration resistance on a Clay soil in southern Saskatchewan. **Canadian Journal of Soil Science**, Ottawa, v. 73, n. 2, p. 223-232, 1993.

HEIDARPOUR, M.; FARD-MOSTAFAZADEH.; ADEBI KOUPI, J.; MALEKIAN, R. The effects of treated wastewater on soil chemical properties using subsurface and surface irrigation methods. **Agricultural water management**, Amsterdam, v. 90, p. 87-94, 2007.

HESPANHOL, I. Potencial de reuso de água no Brasil: Agricultura, Industrias, municípios, recarga de aquíferos. **Bahia análises e dados**, Salvador, v. 13, n. especial, p. 411-437, 2003.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística: Estatística. 2010. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br>>. Acesso em 15 de julho de 2010.

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

JORGE, L. A. C. **Sistema radicular: Atualização do método SIARCS**. São Carlos: EMBRAPA CNPDIA, 2006. 20 p. (Boletim Técnico).

JORGE, L. A. C. CRESTANA, S. **Recomendações práticas para utilização do SIARCS 3.0 no estudo de raízes, cobertura vegetal, folhas e outras aplicações**. n. 4. São Carlos: EMBRAPA CNPDIA, 1996. 23 p. (Boletim Técnico).

KALAVROUZOTIS, K. I.; KOUKOULAKIS, P. H.; SAKELLARIOU-MAKRANTONAKI, M.; PAPANIKOLAOU, C. Effects of treated municipal wastewater on the essential nutrients interactions in the plant of *Brassica oleracea* var. Itálica. **Desalination**, Amsterdam, v. 242, p. 297-312, 2009.

KLEIN, V. A.; LIBARDI, P. L. Densidade e distribuição do diâmetro dos poros de um Latossolo Vermelho, sob diferentes sistemas de uso e manejo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v.26, n.4, p.857-867, 2002

KOUPI, J. A.; FARD, A. M.; AFYUNI, M.; BAGHERI, M. R. Effect of treated wastewater on soil chemical and physical properties in an arid region. **Plant soil environ**, Amsterdam, v.52, n.8, p. 335-334, 2006.

KOURAA, A.; FETHI, F.; FAHDE, A.; LAHLOU, A.; QUAZZANI, N. Resuse of wastewater treated by a combined stabilization pond system in Benslimane. **Urban Water**, Londres, v. 4, p. 373-378, 2002.

LAU, L. S. Water from sewage effluent by irrigation: A perspective for Hawaii. **JAWARA Journal of the American water resources association**. v. 3,n. 15. p. 740-752, 1979.

LADO, M. BEN-HUR, M. Treated domestic sewage irrigation effects on soil hydraulic properties in arid and semiarid zones: **A review. Soil & tillage research**, Amsterdam, v. 106, p. 152-163, 2009.

LEAL, R. M. P. **Efeito da irrigação com efluente de esgoto tratado em propriedades químicas de um Latossolo cultivado com Cana-de-açúcar**. 2007. 110 p. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba.

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 Agrícola**, Piracicaba, v. 66, n.2, p. 242-249, 2009.

LIMA, W. L. OLIVEIRA, J. R. SAGGIN JUNIOR, O. J. RAPOSO, T. P. ALVES, G. C. SILVA, E. M. R. BERBARA, R. L. L. **Editoração de imagens para avaliação de crescimento de plantas ou microrganismos com programa SIARCS**. Seropédica: Embrapa Agroecologia Rio de Janeiro, 2006. 32p. (Boletim Técnico).

LUBELLO, C.; GORI, R.; NICESE, F. P.; FERRINI, F. Municipal-treated wastewater reuse for plant nurseries irrigation. *Water research*, v. 38, p. 2939-2947, 2004.

LUCCHESI, A. A. **Cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*)**. In: CASTRO, P. R. C.; KLUGE, R. A. *Ecofisiologia de culturas extrativas: cana-de-açúcar; seringueira; coqueiro; dendezeiro e oliveira*. Cosmópolis: Stoller do Brasil, 2001. P. 13-45.

MACEDO, I. C. Situação atual e perspectivas do etanol. **Revista estudos avançados**, São Paulo, v. 21, n. 59, p. 157-165, 2007.

MANCUSO, P. S.; SANTOS, H. F. **Reúso de água**. Barueri: Manole, 2003. 155p.

MANDAL, K. U.; BHARDWAJ, A. K.; WARRINGTON, D. N.; GOLDSTEIN, D.; TAL, A. B.; LEVY, G. J. Changes in soil hydraulic conductivity, runoff, and soil loss due to irrigation with different types of saline-sodic water. **Geoderma**, v. 36, p. 509-516, 2008.

MAPA- Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento: Estatística, Produção e Acompanhamento da Produção Sucroalcooleira safra 2009 – 2010. 2010. Disponível em: <http://mapas.agricultura.gov.br/spc/daa/Resumos/acompanhamento_produção_01_01_2010>. Acesso em: 25 de outubro de 2010.

MARQUES, K. M. C. Uso de esgotos tratados em irrigação: aspectos agrônômicos e ambientais. In: BASTOS, R. K. X. **Utilização de esgotos tratados em fertirrigação, hidroponia e psicultura**. Rio de Janeiro: ABES, 2003. (Cap. 3, p. 61-116).

MATTOS, K. M. C. **Viabilidade da Irrigação com água contaminada por esgoto doméstico na produção hortícola**. 2003.168 p. Tese (Doutorado em Agronomia) – Universidade Estadual Paulista “Julio de Mesquita Filho”, Botucatu.

MAULE, R. F.; MAZZA, J. A.; MARTHA JR, G. B. Produtividade agrícola de cultivares de cana de açúcar em diferentes solos e épocas de colheita. **Scientia Agrícola**, Piracicaba, v.8, n. 2, p. 295 - 301, 2001.

MEDEIROS, S. S.; SOARES, A. A.; FERREIRA, P. A.; NEVES, J. C. L.; MATOS, A. T.; SOUZA, J, A. A. Utilização de águas residuárias de origem doméstica na agricultura: estudo das alterações químicas do solo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola**, Campina Grande, v. 9, n. 4, p. 603-612, 2005.

MELI, S.; PORTO, M.; BELLIGNO, A.; BUFO, S. A.; MAZZATURA, A.; SCOPA, A. Influence of irrigation with lagooned urban wastewater on chemical and microbiological soil parameters in a citrus orchard under mediterranean condition. **The science of the total environment**, Amsterdam, fv. 285, n.____, p. 60-77, 2002.

MOZAMBANI, A. E.; PINTO, A. S.; SEGATO, S. V.; MATTIUZ, C. F. M.. História e morfologia da cana-de-açúcar. In: _____. **Atualização e produção de cana-de-açúcar**. EDIÇÃO. LOCAL: Prol editora gráfica, 2006. (cap.1, p.11-18).

NOGUEIRA, S. F. **Efeitos da irrigação com esgoto tratado e fertilização nitrogenada na ciclagem de carbono e nitrogênio e no metabolismo microbiano de um solo cultivado com capim-bermuda tifton 85**. 2008. 138 . Tese (Doutorado – Programa de pós graduação em Ciências. Área de concentração: Química na Agricultura e no Ambiente) – Centro de Energia nuclear na Agricultura da Universidade de São Paulo, Piracicaba.

OTTO, R.; FANCO, H. C. J.; FARONI, C. E.; VITTI, A. C.; TRIVELIN, P. C. O. Fitomassa de raízes relacionada à adubação nitrogenada de plantio. **Revista de pesquisa agropecuária**, Brasília, v. 44, n. 4, p. 398 – 405, 2009.

OTTO, R. **Desenvolvimento de raiz e produtividade de cana-de-açúcar relacionados a adubação nitrogenada**. 2007. 119p. (Mestrado em Agronomia) – Escola Superior de agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba.

PAULA, A. M.; NOGUEIRA, S. F.; DA FONSECA, E. F.; CARDOSO, E. J. B. N.; MELFI, A. J. Aporte de Carbono e Nitrogênio e atividade microbiana de solo sob pastagem irrigada com esgoto tratado. **Revista Departamento de Águas e Esgotos**, São Paulo. Edição especial. p.12-18. 2009.

PEREIRA, B. F. F. **Alterações químicas no sistema solo-planta irrigado com efluente de esgoto tratado no cultivo dos citros**. 2009. 164 p. Tese (Doutorado) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba.

RAIJ, B. van. Fertilidade do solo e adubação. Piracicaba: Potafos, 1991. 343p.

RAIJ, B. VAN.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A.; A. M.C. FURLANI, A. M. C (Ed). Recomendações de adubação e calagem para o estado de São Paulo. 2 ed. Campinas: Instituto Agrônômico, 1996. 285P . (Boletim Técnico 100).

RENGASAMY, P., OLSSON, K. A. Sodicity and soil structure. **Australian Journal of agriculture Research**. v. 29, p. 935 – 952, 1991.

ROQUE, A. A. O.; SOUZA, Z. M.; BARBOSA, R. S.; SOUZA, G. S. Controle de tráfego agrícola e atributos físicos do solo em área cultivada com cana-de-açúcar. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 45, n. 7, p. 744-750, 2010.

SANDRI, D.; MATSURA, E. E. M.; TESTEZLAF, R. Alteração química do solo irrigado por aspersão e gotejamento subterrâneo e superficial com água residuária. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. Campina Grande, v.13, n.6, p.755–764, 2009.

SANTOS, A. P. R. **Efeito da irrigação com efluente de esgoto tratado, rico em sódio, em propriedades químicas e físicas de um Argissolo Vermelho Distrófico cultivado com capim tifton 85**. 2004. 95 p. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba.

SANTOS, D. **Distribuição do sistema radicular e produtividade de cana-de-açúcar (*saccharum spp*) fertirrigada por gotejamento subsuperficial**. 2010. 85 p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual Paulista “Julio de Mesquita Filho”, Botucatu.

SANTOS, E. E. F.; RIBEIRO, M. R. Influência da irrigação e do cultivo nas propriedades de um Latossolo e um Argissolo da região do submédio São Francisco: Atributos morfológicos e físicos. **Revista Brasileira de ciência do solo**, Viçosa, v. 24, p. 875-884, 2000.

SCARPARI, M. S.; BEAUCLAIR, E. G. F. Anatomia e Botânica. In: _____. **Cana de Açúcar**. Edição Especial de Comemoração de 120 anos do IAC. Campinas: Instituto Agrônômico de Campinas. 2008 (cap. 2, v.1, p. 47-56).

SEGARRA, E.; DARWISH, M. R.; ETHRIDGE, D. E. Returns to municipalities from integrating crop production with wastewater disposal. **Resources, conservation and recycling**, Amsterdam, v. 17, n. 2, p. 97-107, 1996.

SEGATO, S. V.; MATTIUZ, C. F. M.; MOZAMBANI, A. E. Aspectos Fenológicos da cana-de-açúcar. In: _____. Atualização e produção de cana-de-açúcar. Piracicaba: Prol editora gráfica, 2006 (cap.2, p. 19-36).

SIQUEIRA, D. C.; MELO FILHO, J. F.; SACRAMENTO, J. A. A. S. S.; SILVEIRA, E. C. P. Relação umidade versus resistência à penetração para uma Argissolo Amarelo distrocioso no recôncavo da Bahia. **Revista Brasileira de Ciência do solo**, Viçosa, v. 34, p. 659-667, 2010.

SOUSA, D. M. G.; MIRANDA, L. N.; OLIVEIRA, S. A. **Acidez do solo e sua correção**. In: NOVAIS et al. 1 ed. Viçosa, Sociedade Brasileira de ciência do solo, 2007. Cap. V, p. 205-274.

SOUZA, J. A. A.; BATISTA, R. O.; RAMOS, M. M.; SOARS, A. A. Alterações nas características físicas do solo decorrentes da aplicação de esgoto doméstico tratado. **Acta Scientiarum Technology**, Maringá, v. 32, n. 4, p. 361-366, 2010 a.

SOUZA, R. M.; NOBRE, R. G.; GHYI, H. R.; DIAS, N. S.; SOARES, F. A. L. S. Utilização de água residuária e de adubação orgânica no cultivo do girassol. **Revista caatinga**, Mossoró, v. 23, n. 3, p. 125- 133, 2010 b.

STREACK, C. A.; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M.; HORN, R. Relações do parâmetro S para algumas propriedades físicas de solos do sul do Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, n. especial, p. 2603-2612, 2008.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia vegetal**. 3. ed. Porto Alegre: Artmed, 2004. 719 p.

TONON, D.; CORAUCCI FILHO, B.; CRUZ, L. M. O.; GUADAGNINI, R. A.; ZEBALHO, W. A. Caracterização de efluente de lagoa anaeróbica da cidade de Franca-SP para estudo de desinfetante alternativo visando o uso na agricultura. **Revista DAE**, São Paulo, v. 180, p. 42 - 47. 2009.

USDA, Soil survey manual, Washinton, DC, USA, Soil Survey Division Staff, 1993, 437 p. (Handbook, 18).

VAN DILLEWIJN, C. Botany of sugarcane. Waltham: The chonica Botanica, 1952. 371 p.

VASCONCELOS, A. C. M.; CASAGRANDE, A. A. Fisiologia do sistema radicular. In: _____. Cana de Açúcar. Edição Especial de Comemoração de 120 anos do IAC. Campinas: Instituto Agrônômico de Campinas. 2008 (cap. 2, v.1, p.79-98).

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**, Viçosa, v. 27, n. 5, p. 849-858, 2003.

VASCONCELOS, A. C. M.; GARCIA, J. C. **Desenvolvimento radicular da cana-de-açúcar**. Piracicaba: POTAFOS, 2005. 32p.

WENDLING, B.; JUCKSCH, I.; MENDONÇA, E. S.; NEVES, J. C. L. Carbono orgânico e estabilidade de agregados de um Latossolo vermelho sob diferentes manejos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 40, n. 5, p.478-494, 2005.

YEOMANS, J. C. BREMNER, J. M. 1988. **A rapid and precise method for routine determination of organic carbon in soil**. Soil Sci. Plant Anal., 19, 1467-1476.

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

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