



EDUARDO AUGUSTO AGNELLOS BARBOSA

**SUSTENTABILIDADE AMBIENTAL DA PRODUÇÃO DE CANA-DE-
AÇÚCAR IRRIGADA COM ESGOTO DOMÉSTICO TRATADO VIA
GOTEJAMENTO SUBSUPERFICIAL**

**CAMPINAS
2014**



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
Faculdade de Engenharia Agrícola

EDUARDO AUGUSTO AGNELLOS BARBOSA

**SUSTENTABILIDADE AMBIENTAL DA PRODUÇÃO DE CANA-DE-
AÇÚCAR IRRIGADA COM ESGOTO DOMÉSTICO TRATADO VIA
GOTEJAMENTO SUBSUPERFICIAL**

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

Orientador: Prof. Dr. EDSON EIJI MATSURA

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE À VERSÃO FINAL DA TESE DEFENDIDA PELO ALUNO EDUARDO AUGUSTO AGNELLOS BARBOSA, E ORIENTADO PELO PROF. DR. EDSON EIJI MATSURA.

A handwritten signature in blue ink, appearing to be "EAB", is written over a horizontal line.

CAMPINAS
2014

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

B234s Barbosa, Eduardo Augusto Agnellos, 1984-
Sustentabilidade ambiental da produção de cana-de-açúcar irrigada com esgoto doméstico via gotejamento subsuperficial / Eduardo Augusto Agnellos Barbosa. – Campinas, SP : [s.n.], 2014.

Orientador: Edson Eiji Matsura.
Tese (doutorado) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Agrícola.

1. Água residuária. 2. Gases de efeito estufa. 3. Indicadores ambientais. 4. Solos - Qualidade. 5. Irrigação. I. Matsura, Edson Eiji, 1956-. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Agrícola. III. Título.

Informações para Biblioteca Digital

Título em outro idioma: Environmental sustainability of sugarcane production irrigated with domestic sewage by subsurface drip

Palavras-chave em inglês:

Wastewater

Greenhouse gases

Environmental indicators

Soils - Quality

Irrigation

Área de concentração: Água e Solo

Titulação: Doutor em Engenharia Agrícola

Banca examinadora:

Edson Eiji Matsura [Orientador]

José Fernandes de Melo Filho

Aderson Soares de Andrade Júnior

Janaína Braga do Carmo

Zigomar Menezes de Sousa

Data de defesa: 23-05-2014

Programa de Pós-Graduação: Engenharia Agrícola

Este exemplar corresponde à redação final da **Tese de Doutorado** defendida por **Eduardo Augusto Agnellos Barbosa**, aprovada pela Comissão Julgadora em 23 de maio de 2014, na Faculdade de Engenharia Agrícola da Universidade Estadual de Campinas.



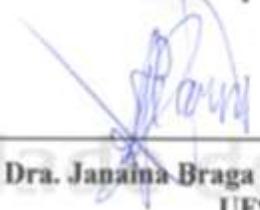
Prof. Dr. Edson Eiji Matsura - Presidente e Orientador
Feagri/Unicamp



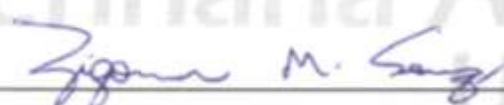
Prof. Dr. José Fernandes de Melo Filho - Membro Titular
UFRB



Dr. Aderson Soares de Andrade Júnior - Membro Titular
Embrapa/CPAMN



Profa. Dra. Janaina Braga do Carmo - Membro Titular
UFSCar



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

RESUMO

A agricultura irrigada atualmente requer um alto consumo de água, gerando questionamentos sobre a sustentabilidade da prática, devido a redução da disponibilidade hídrica para diversos fins e pelos conflitos de uso múltiplo da água. Entretanto, a irrigação apresenta expressiva contribuição para a produção agrícola e se destaca como prática eficiente para elevar a produtividade, minimizando o impacto da expansão agrícola e desmatamento. Dentre as soluções para este problema, destaca-se a utilização do esgoto doméstico tratado (EDT) e da irrigação por gotejamento subsuperficial (IGS). Estudos recentes comprovam o potencial de ambas as práticas na produção de cana-de-açúcar, porém elas carecem de informações consistentes dos impactos ambientais ocasionados na produção agrícola. Neste contexto, o estudo objetivou avaliar a sustentabilidade ambiental da cana-de-açúcar cultivada em condição não irrigada, e irrigada via IGS com água de reservatório superficial (ARS) e EDT, com e sem complementação nutricional. Foram avaliados os aspectos quantitativos e qualitativos da cana-de-açúcar, a pegada hídrica, a qualidade do solo e o balanço dos gases de efeito estufa. No ciclo da primeira cana-soca, constatou um vigoroso desenvolvimento das plantas irrigadas com EDT, com incrementos nas produções de colmo e açúcar, em relação a não irrigada. Ocorreu redução na pegada hídrica da cana-de-açúcar IGS, devido ao incremento na produção de colmo e reduções na demanda hídrica dos componentes verde e cinza. A redução do componente cinza foi reflexo da menor perda de NO_3^- por lixiviação nos cultivos irrigados com EDT. Constatou-se uma pequena modificação da qualidade do solo, com indícios de perda de qualidade nos indicadores de acidificação, que ocorreu expressivamente nos tratamentos fertirrigados. A emissão acumulada de gases de efeito estufa (EAG) foi superior nos cultivos irrigados com EDT e no não irrigado, com o C-CO₂ obtendo maior participação no EAG. No cultivo não irrigado, houve alta perda de N-N₂O, diferindo significativamente dos tratamentos irrigados, indicando eficiência da IGS em reduzir a emissão deste gás. A cana-de-açúcar irrigada com EDT apresentou maior depósito de carbono proveniente da massa seca remanescente na área, com saldo positivo entre as entradas e saídas de carbono, e diferindo do cultivo não irrigado. Os resultados permitem afirmar que nas condições edafoclimáticas o uso do EDT na irrigação da cana-de-açúcar ocasionou melhorias ambientais e consequentemente ganhos na sustentabilidade ambiental.

Palavras-Chave: água residuária; gases de efeito estufa; indicadores ambientais; solo - qualidade; irrigação.

ABSTRACT

The irrigated agriculture currently requires a high consumption of water, raising questions about the sustainability of the practice, due to reduced water availability for various purposes and conflicts of multiple use of water. However, the irrigation presents significant contributions to agricultural production and stands as an efficient procedure for increasing productivity, minimizing the impact of agricultural expansion and deforestation. Among the solutions to this problem, stands out the use of treated domestic sewage (TDS) and subsurface drip irrigation (SDI). Recent studies shown potential of both practices in the production of sugarcane, but they lacks consistent information on the environmental impacts caused in agricultural systems. In this context, the study aimed to evaluate the environmental sustainability of sugarcane grown in condition non-irrigated and irrigated by SDI, with water from of reservoir surface (freshwater) and TDS, with and without nutritional supplementation by fertigation. To achieve the aim were evaluated the aspects quantitative and qualitative of sugarcane, the water footprint, the soil quality and the greenhouse gas balance. In the first ratoon cane cycle, verified a vigorous growth of plants irrigated with TDS, with increases in the yield of stem and sugar when compared to non-irrigated. Occurred a decrease in water footprint of sugarcane irrigated by SDI, due to increased production of stem and reductions in water demand of green and grey components. The reduction of the grey component was due to lower loss of NO_3^- by leaching in treatments irrigated with TDS. Low modification of soil quality was verified, with evidence of quality loss in indicators relative to acidification, which occurred of form expressive in fertirrigated treatments. The cumulative emission of greenhouse gases (CEG) was higher in irrigated cultivation with TDS and non-irrigated, with the $\text{CO}_2\text{-C}$ obtaining greater participation in the CEG. In the non-irrigated cultivation occurred a high $\text{N}_2\text{O-N}$ loss, that differed significantly from the irrigated treatments, indicating efficiency of SDI in reducing the emission of this gas. The sugarcane irrigated with TDS showed higher deposit of carbon from the remaining dry mass in the area, with a positive balance between carbon inputs and outputs, differing from non-irrigated cultivation. The results indicate that the use of TDS in sugarcane irrigation, caused environmental improvements and consequently gains in ecological sustainability.

Key words: wastewater; greenhouse gases; environmental indicators; soils - quality; irrigation.

SUMÁRIO

RESUMO	vii
ABSTRACT	ix
LISTA DE FIGURAS	xvii
LISTA DE TABELAS	xxi
INTRODUÇÃO.....	1
HIPÓTESE	3
OBJETIVOS	3
Geral	3
Específicos	3
REVISÃO DE LITERATURA	4
Produção de cana-de-açúcar e aspectos ambientais.....	4
Irrigação em cana-de-açúcar.....	5
Irrigação por gotejamento subsuperficial	7
Uso da água residuária na agricultura.....	9
Sustentabilidade Agrícola.....	11
METODOLOGIA GERAL	13
CAPÍTULO I - Crescimento e produção da cana-de-açúcar irrigada com esgoto doméstico tratado via gotejamento subsuperficial	19
Resumo	19
Introdução	20
Material e Métodos	21
Resultados e Discussão	23
Conclusão	34
Referencias Bibliográficas.....	35
CAPÍTULO II - Pegada hídrica da cana-de-açúcar irrigada com efluente de esgoto tratado via irrigação por gotejamento subsuperficial	40
Resumo	40
Introdução	40
Material e Métodos	43

Resultado e Discussão	47
Conclusão	58
Referência Bibliográficas	58
CAPITULO III - Qualidade do solo cultivado com cana-de-açúcar irrigada com esgoto doméstico tratado via gotejamento subsuperficial	63
Resumo	63
Introdução	64
Material e Métodos	67
Resultado e Discussão	73
Conclusão	78
Referencias Bibliográficas	79
CAPÍTULO IV - Efeito da aplicação de esgoto doméstico tratado e fertirrigação via gotejamento subsuperficial na emissão de gases de efeito estufa	85
Resumo	85
Introdução	86
Material e Métodos	87
Resultados e Discussão	91
Conclusão	100
Referências Bibliográficas	100
CONSIDERAÇÕES FINAIS	106
CONCLUSÃO GERAL	109
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	110
ANEXOS	116

*A minha mãe Márcia pela sua dedicação, exemplo e amor,
Ao meu pai Djalma e minha irmã Flávia pelo apoio e amor incondicional,
A minha amada Camila pelo seu amor, compreensão e dar sentido a isto que
chamamos de vida.*

DEDICO

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador, Prof. Dr. Edson Eiji Matsura, pela amizade, ensinamentos, confiança e total apoio para o desenvolvimento deste estudo.

Aos amigos e companheiros de projeto, Aline Nazário, Daniel Feitosa, Ivo Zution, Leonardo Nazário e Natália Tuta, por não pouparem esforços no desenvolvimento desta pesquisa, contribuições científicas e aos nossos momentos de confraternização.

A prof. Dra. Janaina Braga do Carmo, da Universidade Federal de São Carlos, pelo apoio no desenvolvimento do projeto, análises dos gases de efeito estufa e por suas contribuições científicas.

Aos professores e amigos da FEAGRI, Dr. Roberto Tezteslaf e Dr. Zigomar Menezes de Souza, pelos ensinamentos profissionais e pessoais.

Aos pesquisadores do Centro de Ecofisiologia Vegetal e Biofísica do IAC, Dr. Emilio Sakai, Dr. Flávio B. Arruda e Dra. Regina C. M. Pires, pelos ensinamentos ao longo da minha carreira acadêmica e valiosa amizade.

À Faculdade de Engenharia Agrícola (FEAGRI) e todos os seus funcionários pelo apoio e suporte necessários para realização da pesquisa.

À Usina Esther pelo apoio nas análises tecnológicas e ao Centro de Pesquisa Meteorológica e Climática Aplicadas a Agricultura (CEPAGRI) pelo fornecimento das informações meteorológicas.

A CAPES e CNPq pela concessão da bolsa de estudo e a FAPESP pelo apoio financeiro no desenvolvimento do projeto.

Aos alunos de graduação que sempre estiveram presente nas coletas de dados e apoio em laboratório, em especial a Nádia, Diogo, Guilherme, Rafael, Leandro e Kleber.

Aos amigos de Pós-Graduação e todos do Grupo de Pesquisa Tecnologia de Irrigação e Meio Ambiente, em especial ao Allan Mendes; Fabio de Deus; Maycon Ribeiro e Marcio Ribeiro, pela amizade e apoio durante os trabalhos de campo, disciplinas e pelos nossos momentos de descontração.

Aos amigos que conquistei durante minha passagem por Campinas, em especial ao Tanada, Milton, Kiki, Talita e André Forasteiro.

Aos amigos de moradia, Romeu e Arnaldo pelos momentos de descontração e bom convívio.

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1** - Esquema do espaçamento em linha dupla, profundidade e ponto de instalação da fita gotejadora e pontos amostrais dos sistema radicular. 13
- Figura 2** - Pontos amostrais do sistema radicular. 23
- Figura 3** - Valores mensais de precipitação (Prec) e evapotranspiração potencial (ETo) total e temperatura média do ar (Tar), coletadas durante o período experimental. 24
- Figura 4** - Volume mensal irrigado nos tratamentos com aplicação de EDT e fertirrigado (T2EF), sem complementação nutricional (T3ENf) e irrigados com ARS e fertirrigado (T4AF) sem complementação nutricional (T5ANf). 25
- Figura 5** - Desenvolvimento da área foliar por perfilho (AF), com desvio padrão, da cana-de-açúcar submetida ao cultivo não irrigado (T1NI), irrigado com EDT e fertirrigado (T2EF) e sem fertirrigação (T3ENf), irrigado com ARS e fertirrigado (T4AF) e sem fertirrigação (T5ANf). 25
- Figura 6** - Índice de área foliar (IAF), com desvio padrão, da cana-de-açúcar submetida ao cultivo não irrigado (T1NI), irrigado com EDT e fertirrigado (T2EF) e sem fertirrigação (T3ENf), irrigado com ARS e fertirrigado (T4AF) e sem fertirrigação (T5ANf). 26
- Figura 7** - Crescimento, com desvio padrão, da cana-de-açúcar submetida ao cultivo não irrigado (T1NI), irrigado com EDT e fertirrigado (T2EF) e sem fertirrigação (T3ENf), irrigado com ARS e fertirrigado (T4AF) e sem fertirrigação (T5ANf). 28
- Figura 8** - Número de perfilhos, com desvio padrão, da cana-de-açúcar submetida ao cultivo não irrigado (T1NI), irrigado com EDT e fertirrigado (T2EF) e sem fertirrigação (T3ENf), irrigado com ARS e fertirrigado (T4AF) e sem fertirrigação (T5ANf). 28
- Figura 9** - Mapas da densidade de raiz ao longo do perfil do solo nos cultivos não irrigado (A), irrigado com EDT e fertirrigado (B) e sem fertirrigação (C), irrigado com ARS e fertirrigado (D) e sem fertirrigação (E). 30
- Figura 10** - Distribuição acumulada da porcentagem de raiz nas camadas avaliadas no perfil do solo nos cultivos não irrigado (T1NI), irrigado com esgoto e fertirrigado (T2EF), sem fertirrigação (T3ENf), irrigado com água de reservatório e fertirrigado (T4AF) e sem fertirrigação (T5ANf). Profundidade efetiva do sistema radicular (PE). 31
- Figura 11** - Balanço de água no solo, com valores diários para precipitação infiltrada (PI), lâmina irrigada e de água disponível para cana-de-açúcar (LAD) e valores semanais da lâmina percolada (Perc) para o tratamento não irrigado (A) irrigado com EDT e

fertirrigação complementar (B), irrigado com EDT sem complementação nutricional (C), irrigado com ARS e fertirrigação complementar (D) e irrigado com ARS sem complementação nutricional (E), e lâmina de água disponível entre os tratamentos (F), durante o período experimental.	49
Figura 12 - Evapotranspiração de cultura para condições não padrão ($ET_{c_{aj}}$) estimada nos tratamentos não irrigado (T1NI), irrigado com EDT e fertirrigação complementar (T2EF), irrigado com EDT sem complementação nutricional (T3ENf), irrigado com ARS e fertirrigação complementar (T4AF) e irrigado com ARS sem complementação nutricional (T5ANf).	51
Figura 13 - Origem das água da evapotranspiração de cultura para condições não padrão ($ET_{c_{aj}}$) estimada nos tratamentos não irrigado (T1NI), irrigado com EDT e fertirrigação complementar (T2EF) e sem complementação nutricional (T3ENf), irrigado com ARS e fertirrigação complementar (T4AF) e sem complementação nutricional (T5ANf).	51
Figura 14 - Lixiviação de nitrato (NO_3^-) na profundidade de 0.9 m, nos tratamentos não irrigado (T1NI), irrigado com EDT e fertirrigado (T2EF) e sem complementação nutricional (T3ENf), irrigado com ARS e fertirrigado (T4AF) e sem complementação nutricional (T5ANf).	52
Figura 15 - Demanda hídrica da produção de cana-de-açúcar (DHP_{cana}), resultada das demandas hídricas dos componentes azul (DHC_{azul}), verde (DHC_{verde}) e cinza (DHC_{cinza}), nos tratamentos não irrigado (T1NI), irrigado com EDT e fertirrigação complementar (T2EF), irrigado com EDT sem complementação nutricional (T3ENf), irrigado com ARS e fertirrigação complementar (T4AF) e irrigado com ARS sem complementação nutricional (T5ANf).	54
Figura 16 - Tendências das curvas para padronização de escores, (a) mais é melhor; (b) menos é melhor; (c) valor ótimo.	70
Figura 17 - Esquema do espaçamento de plantio, profundidade de instalação do tubogotejador e coleta de amostras indeformadas utilizando o anel volumétrico e deformada na camada.	72
Figura 18 - Valores padronizado para o índice de qualidade do solo (IQS) e para as funções de não restringir o desenvolvimento radicular (DR); receber, distribuir, manter e fornecer água as plantas (CA); e receber, manter, fornecer e ciclar os nutrientes (HN).	73

Figura 19 - Escore padronizado para os indicadores de Resistência à penetração (RP); Densidade do solo (Ds); Macroporosidade (MA); Acidez potencial (H+Al); Porosidade total (PT); Diâmetro médio ponderado (DMP); Percentagem de sódio trocável (PST); Condutividade elétrica do solo (CE); Capacidade de troca catiônica (CTC); Matéria orgânica (MO); CBM = Carbono da biomassa microbiana (CBM), Quociente metabólico (qCO ₂); = Quociente microbiano (qMic).	74
Figura 20 - Fluxo de C-CO ₂ durante o período experimental nos tratamentos, não irrigado (T1NI), irrigado com EDT e fertirrigação complementar (T2EF) e sem complementação nutricional (T3ENf), irrigado com ARS e fertirrigação complementar (T4AF) e sem complementação nutricional (T5ANf).	91
Figura 21 - Fluxo de N-N ₂ O nos tratamentos, não irrigado (T1NI), irrigado com EDT e fertirrigação complementar (T2EF) e sem complementação nutricional (T3ENf), irrigado com ARS e fertirrigação complementar (T4AF), e sem complementação nutricional (T5ANf). AC, Data da adubação de cobertura no T1NI.	92
Figura 22 - Fluxo de C-CH ₄ nos tratamentos não irrigado (T1NI), irrigado com EDT e fertirrigação complementar (T2EF), irrigado com EDT sem complementação nutricional (T3ENf), irrigado com ARS e fertirrigação complementar (T4AF), irrigado com ARS sem complementação nutricional (T5ANf).	94
Figura 23 - Vista aérea da área experimental localizada na FEAGRI/UNICAMP. (1) Área de plantio com cana-de-açúcar; (B) Casa de controle e filtragem do sistema de irrigação; (C) Reatores anaeróbicos (superior) e tanque de macrófitas do sistema de tratamento do esgoto; (D) Estação Meteorológica Automática da CEPAGRI; (E) Reservatório de água superficial; (F) Laboratório de hidráulica.....	122
Figura 24 - Sistema integrado de tratamento e reúso agrícola de esgoto doméstico tratado, Feagri/Unicamp.	122
Figura 25 - Distribuição das parcelas experimentais no campo. T1NI, tratamentos não irrigado; T2EF, irrigado com EDT e fertirrigado; T3ENf, irrigado com EDT sem complementação nutricional; T4AF, irrigado com ARS e fertirrigado; e T5ANf, irrigado com ARS sem complementação nutricional.....	123
Figura 26 - Esquema da parcela experimental, com as três linhas duplas de plantio, linha de gotejamento e locais de amostragem.	123

Figura 27 - Sistema de tratamento de esgoto. Reatores anaeróbicos e tanque cultivado com macrófita.	124
Figura 28 - Instalação da fita gotejadora no campo (esquerda) e abertura do sulco de plantio com a fita gotejadora entre os sulcos de plantio (direita).....	124
Figura 29 - Sistema de filtragem, válvulas de controle e fertirrigação (esquerda) e painéis de controle do sistema de irrigação (direita).	124
Figura 30 - Instalação das sondas TDR e coleta do dados de umidade com o TDR.....	125
Figura 31 - Esquema de instalação da bateria de sondas TDR para monitoramento da umidade do solo na área experimental.	125
Figura 32 - Instalação dos extratores de solução do solo (esquerda e centro) e visão geral dos extratores no campo.	125
Figura 33 - Câmera estática, anéis para acoplar a câmera do IRGA e TDR (Esquerda), coleta de CO ₂ e visão geral do IRGA.....	126
Figura 34 - Esquema da coleta e leitura do óxido nitroso e metano. Instrumentos utilizados na coleta (esquerda, superior), Visão geral das câmara estática no campo e coleta dos gases em seringa de 60 mL (direita, superior), Armazenamento da amostra de gás em fresco de 20 mL (esquerda, inferior), e análise no cromatógrafo da UFSCar/Sorocaba (direita, inferior).	126
Figura 35 - Acamamento ocorrida na cana-de-açúcar em maio de 2013.	127
Figura 36 - Corte da cana-de-açúcar (esquerda) e separação dos colmos para estimativa da produção e análise tecnológica (direita).	127
Figura 37 - Coleta da palhada para estimativa de carbono estocado.....	127
Figura 38 - Coleta de amostras indeformada de solo nos pontos 0,0; 0,20 e 0,40 m do tubo gotejador.	128
Figura 39 - Amostragem das raízes com sonda, ao lado da trincheira de coleta das amostras de solo (esquerda, superior), separação das raízes após lavagem com auxílio de pinça (direita, superior), raízes separadas (esquerda, inferior), obtenção da massa seca de raiz (direita, inferior).	128

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Valores médios das análise química do esgoto doméstico tratado (EDT) e da água de reservatório superficial (ARS), coletadas após o sistema de filtragem, no período experimental.	14
Tabela 2 - Atributos físicos do solo, Feagri/Unicamp, Campinas, SP.	14
Tabela 3 - Médias da análise química do solo realizada antes da instalação do experimento, plantio da cana-de-açúcar, e após o corte da cana-planta, início da primeira cana-soca, em cada tratamento.	16
Tabela 4 - Análise de variância da estimativa de produção de colmos (EPC), porcentagem de sólidos solúveis (PSS), teor de sacarose do caldo (Pol), açúcar teórico recuperável (ATR) e rendimento de açúcar teórico recuperável (RA).	33
Tabela 5 - Volume de efluente domestico tratado (EDT) e água de reservatório superficial, irrigado nos tratamentos, mensalmente.	47
Tabela 6 - Estimativa total de nitrato perdido em profundidade (ENP) e demanda hídrica do componente cinza da pegada hídrica (DHC_{cinza}).	53
Tabela 7 - Análise de variância da estimativa de produção de colmos (EPC), pegada hídrica verde (PH_{verde}), cinza (PH_{cinza}) e a pegada hídrica da produção de colmo (PH_{cana}). ..	55
Tabela 8 - Indicadores selecionados para composição das funções básicas do solo.	68
Tabela 9 - Índice de qualidade do solo (IQS) e escore padronizado dos indicadores (Ind) e das funções específicas do solo (FS) do perfil de solo até a profundidade de 0,60 m, no cultivo não irrigado com adubação em cobertura (T1NI).	71
Tabela 10 - Análise de variância dos indicadores de qualidade do solo.	75
Tabela 11 - Massa seca de raiz da menor linha dupla até a profundidade de 0,60 m (MR), emissões acumuladas de C-CO ₂ , N-N ₂ O e C-CH ₄ na menor entre linha de plantio durante o ciclo de cultivo, fator de emissão do N-N ₂ O (FE) e total de N aplicado em cada tratamento.	95
Tabela 12 - Análise de variância para a emissão de gases de efeito estufa (GEE) e participação do N-N ₂ O sobre o PAG, carbono acumulado nas folhas e ponteiros (F+P), palhada, sistema radicular (SR), estoque de carbono remanescente na área (ECR) e balanço entre ECR e PAG (ΔC_{cana}), ao final do ciclo de cultivo da primeira cana-soca.	98

Tabela 13 - Análises realizadas durante o período experimental dos parâmetros biológicos, químicos e dos macronutrientes, da água de reservatório superficial (ARS), coletada após o sistema de filtragem.....	116
Tabela 14 - Análises realizadas durante o período experimental dos parâmetros físicos, dos micronutrientes e metais pesados, presente na água de reservatório superficial (ARS), coletada após sistema de filtragem.	116
Tabela 15 - Análises realizadas durante o período experimental dos parâmetros biológicos, químicos e dos macronutrientes, do esgoto doméstico tratado (EDT), coletado após o sistema de filtragem.....	117
Tabela 16 - Análises realizadas durante o período experimental dos parâmetros físicos, dos micronutrientes e metais pesados, presente no esgoto doméstico tratado (EDT), coletado após sistema de filtragem.	117
Tabela 17 - Quantidade de nutrientes aplicado via esgoto domésticos tratado (EDT) e fertilizantes minerais (FM) no tratamento irrigado com EDT e fertirrigação complementar (T2EF), durante o período experimental.	118
Tabela 18 - Quantidade de nutrientes aplicado via esgoto domésticos tratado (EDT) e fertilizantes minerais (FM) no tratamento irrigado com EDT sem complementação nutricional (T3ENf), durante o período experimental.....	119
Tabela 19 - Quantidade de nutrientes aplicado via água de reservatório superficial (ARS) e fertilizantes minerais (FM) no tratamento irrigado com ARS e fertirrigação complementar (T4AF), durante o período experimental.....	120
Tabela 20 - Quantidade de nutrientes aplicado via água de reservatório superficial (ARS) e fertilizantes minerais (FM) no tratamento irrigado com ARS sem complementação nutricional (T5ANf), durante o período experimental.....	121

INTRODUÇÃO

O crescimento populacional e abertura de novos mercados, como o observado nos países em desenvolvimento, elevou o consumo de bens e serviços, resultando em maior demanda por recursos naturais. Entretanto, a exploração dos recursos, ocorre de forma desordenada, promovendo inúmeros problemas ambientais e conflitos sociais, demandando conhecimentos para a criação de modelos de desenvolvimento, que permitam a expansão econômica em equilíbrio com os anseios sociais e ambientais.

O setor agrícola é o principal consumidor de água, com valores próximos a 70% de toda água utilizada pela sociedade (FAO, 2013), e, os conflitos pelos usos múltiplos são cada vez mais evidentes, até mesmo em regiões com considerável disponibilidade hídrica, como o Sudeste do Brasil. Desta maneira, a busca por métodos de irrigação eficientes no uso da água, juntamente com a utilização de fontes alternativas, como o esgoto doméstico tratado, será fundamental para o desenvolvimento sustentável da agricultura.

Uma das primeiras formas de descarte do esgoto foi sua aplicação na agricultura, mas esta prática tornou-se desaconselhável, devido ao potencial de contaminação da população com patógenos, colocando em risco a saúde pública. No entanto, a redução na disponibilidade de água, crescimento do setor agrícola e pressão social por produção com menor impacto aos ecossistemas, impulsiona o avanço nas pesquisas de reuso e produção agrícola sustentável no Brasil, de maneira a ampliar a qualidade do meio e a produção agrícola.

O uso do esgoto doméstico tratado na agricultura apresenta melhores perspectiva quando aplicada via irrigação por gotejamento subsuperficial (IGS), devido as características do sistema de irrigação, como alta uniformidade de aplicação e por dispor a água diretamente no sistema radicular das culturas, evitando o molhamento da superfície do solo, parte aérea das plantas e eliminar os problemas de deriva do esgoto, quando comparada aos métodos de irrigação por aspersão. Devido as características da IGS, o uso da fertirrigação ganha também melhores perspectivas, possibilitando uma maior eficiência na aplicação dos fertilizantes, visto que em sistemas fertirrigados os nutrientes são aplicados conforme a necessidade de nutrientes em cada fase de desenvolvimento das plantas, reduzindo as perdas por volatilização e lixiviação.

Embora as pesquisas estejam dedicando-se ao estudo da utilização de esgoto doméstico tratado e da irrigação por gotejamento subsuperficial na agricultura, a adoção destas técnicas são raras entre os agricultores, que ocorre entre outros fatores, devido a baixa divulgação dos órgãos de extensão, legislação apropriada, fatores socioeconômicos, incertezas nas respostas ambientais e da baixa ou nenhuma valorização ambiental dos produtores que adotam tais práticas agrícolas.

O uso de modelos capaz de mensurar a qualidade do ambiente frente aos diversos manejos adotados na agricultura é uma ferramenta poderosa, pois permite sintetizar o seu “estado”, facilitando a interpretação e análise das técnicas agrícolas, possibilitando tomada de decisão que reduza ou limite os impactos ambientais, além de transmitir informações complexas de forma simplificada.

A avaliação da sustentabilidade é composta por mecanismos complexos, pois envolvem parâmetros econômicos, sociais e ambientais. Neste trabalho, a sustentabilidade foi desenvolvida no âmbito dos aspectos ambientais, destacando os impactos da introdução da irrigação por gotejamento subsuperficial e disposição de esgoto doméstico tratado na produção de cana-de-açúcar.

Em sistemas agrícolas, a sustentabilidade ambiental deve contemplar os indicadores de produção e qualidade do produto, as interações de indicadores relativos a qualidade do solo, o consumo e poluição dos recursos hídricos e o fluxo de gases com potencial de aquecimento global. Assim, a avaliação destes parâmetros permite uma caracterização apropriada dos efeitos da aplicação de esgoto doméstico tratado e da fertirrigação sobre a sustentabilidade ambiental da produção de cana-de-açúcar.

HIPÓTESE

A aplicação de esgoto doméstico tratado via irrigação por gotejamento subsuperficial, proporciona benefícios a sustentabilidade ambiental da produção de cana-de-açúcar, em virtude da redução da pegada hídrica, da emissão de gases de efeito estufa, do consumo de fertilizantes e baixo efeito nas propriedades físicas, químicas e microbiológicas do LATOSSOLO VERMELHO Distroférico, após dois ciclos de cultivos da cana-de-açúcar.

OBJETIVOS

Geral

Avaliar os aspectos ambientais da produção de cana-de-açúcar cultivada em condições não irrigada e irrigada via gotejamento subsuperficial com água de reservatório superficial e esgoto doméstico tratado, com e sem fertirrigação, utilizando indicadores de qualidade do solo, de emissão dos gases do efeito estufa e do uso da água.

Específicos

Avaliar o desenvolvimento da parte aérea e do sistema radicular, produção de colmos e qualidade tecnológica da cana-de-açúcar irrigada com esgoto doméstico tratado e água de reservatório via gotejamento subsuperficial, com e sem complementação nutricional via fertirrigação e testemunha não irrigada. (Capítulo 1)

Avaliar o consumo direto e indireto da água, na produção de colmos de cana-de-açúcar, utilizando o modelo da pegada hídrica. (Capítulo 2)

Realizar o balanço de gases do efeito estufa, contabilizando as emissões de carbono, óxido nitroso e metano em contraste ao carbono da cana-de-açúcar remanescente na área após a colheita dos colmos. (Capítulo 3).

Analisar a qualidade do solo utilizando relações de crescimento do sistema radicular, dinâmica de água e nutrientes, por meio de indicadores químicos, físicos e microbiológicos do solo (Capítulo 4)

REVISÃO DE LITERATURA

Produção de cana-de-açúcar e aspectos ambientais

A cana-de-açúcar, gênero *Saccharum* é uma planta originária da região do sudeste asiático e parte da Oceania. No Brasil seu cultivo se deu logo no início da colonização, com os primeiros relatos datando de 1532 em São Vicente – SP. Porém, foi nos estados da região Nordeste que a cultura se fixou inicialmente. No final do século XVI, os estados de Pernambuco e Bahia contavam com uma centena de engenhos (FIGUEIREDO, 2008). Em meados da década de 1970, com a crise do petróleo, o Brasil se tornou o maior produtor mundial de etanol (MOZAMBANI et al., 2006) e atualmente o país apresenta posição de destaque, sendo o maior produtor mundial de açúcar e etanol de cana-de-açúcar. No início do ano 2000, o setor passou por uma segunda fase de expansão, com a produção nacional de cana-de-açúcar duplicando em 11 anos, a qual foi de 307 mil Mg, na safra 1999/2000, para 620 mil Mg, na safra 2010/2011 (ÚNICA, 2012).

O crescimento do setor ocorreu em consequência da maior demanda por etanol, tendo como principais motivos, o surgimento dos automóveis “flex” e a exigências ambientais estabelecidas no protocolo de Kyoto, o qual o Brasil é signatário, que tem como prioridade a redução nas emissões de gases de efeito estufa e a busca por fontes alternativas de energia. Outro fator fundamental para a expansão do setor sucroalcooleiro foi a maior demanda internacional pelo açúcar brasileiro. Segundo dados do MAPA (2013), a exportação de açúcar nacional saltou de 11 mil Mg em 2001 para 26 mil Mg no ano de 2012.

Atualmente, o complexo da cana-de-açúcar no Brasil representa a segunda maior fonte de oferta interna de energia (18%), sendo superada apenas pelo petróleo e derivados (37,9%) (EPE, 2010). A cultura apresenta uma área plantada de aproximadamente 8,7 milhões de hectare, ou seja, pouco mais que 2% da terra arável do país. O Estado de São Paulo é o maior produtor nacional de cana-de-açúcar, detendo 58,3% da produção nacional, com um rendimento médio de 85,4 Mg ha⁻¹ (IBGE, 2013).

A rápida expansão do setor sucroalcooleiro, principalmente na última década, ocasionou inúmeros questionamentos em termos da viabilidade do sistema de produção e nas melhorias ambientais em longo prazo, provocando altercações sobre a sustentabilidade do setor sucroalcooleiro. As discussões sobre os reais efeitos da cana-de-açúcar nas

melhorias e ganhos ambientais, é consequência da carência de informações e da falta de mecanismos eficientes na avaliação dos impactos ambientais proporcionado pelo seu cultivo.

Dentre os principais aspectos ambientais que afetam a sustentabilidade do cultivo de cana-de-açúcar estão, às queimadas, que liberam monóxidos de carbono, hidrocarbonetos e ozônio na atmosfera (KIRCHHOFF et al., 1991), o uso do solo sem padrões conservacionistas, as aplicações sem critério técnico de herbicidas, fertilizantes minerais e orgânicos e, a expansão em área da cultura, que ocasiona perdas diretas da biodiversidade, reduções das áreas de recargas dos lençóis freáticos e das áreas destinadas à produção de alimentos.

A eliminação das queimadas no cultivo da cana-de-açúcar, em algumas regiões, foi um grande avanço na busca da sustentabilidade do setor, pois além de reduzir as emissões de gases, essa medida garante uma maior conservação do solo, devido a deposição de palhada, evitando perdas de solo por processos erosivos e, aumentando a vida biológica do solo (GARBIATE et al., 2011). Em contrapartida, a colheita mecanizada com cana crua contribui para o aumento da emissão de gases de efeito estufa, porém, em menor proporção que a cana-de-açúcar colhida com queima (FIGUEIREDO et al., 2010; FIGUEIREDO e LA SCALA, 2011). Outra medida que vem de encontro com a busca da sustentabilidade da produção de cana-de-açúcar foi a criação do zoneamento agrícola (MANZATTO, 2009), que definiu as áreas aptas ao cultivo em sistemas não irrigados.

Entre outros fatores, a redução da expansão do cultivo de cana-de-açúcar é atingida com melhorias nas áreas de produção, como eliminação do déficit hídrico e adequado suprimento nutricional, o que garante aumentos na produção por unidade de área e, assim, contribui para a redução do desmatamento e ocupação de áreas para produção de alimentos.

Irrigação em cana-de-açúcar

O rendimento médio da produção de cana-de-açúcar no Brasil é baixo quando comparado aos resultados obtidos em pesquisas de cana-de-açúcar irrigada (BARBOSA et al., 2012a; PIRES et al., 2014). O potencial de aplicação da tecnologia da irrigação na cultura da cana-de-açúcar é promissor, conforme demonstrado por Santos e Frizzone (2006) e Dalri e Cruz (2008), os quais verificaram maior desenvolvimento dos parâmetros

vegetativo, como crescimento, densidade de colmo, índice de área foliar, aumento da produtividade agrícola e do rendimento de açúcar irrigada frente ao cultivo sem reposição hídrica via irrigação. Há indícios de maior longevidade do canavial, reduzindo os custos com a reforma do mesmo.

Analisando o efeito de estresse hídrico na cana-de-açúcar, Inman-Bamber (2004) verificou reduções no acúmulo de biomassa em condições de déficit hídrico no solo, com a produção de matéria seca do colmo sendo reduzida a 55%, no tratamento em que o déficit hídrico foi imposto a partir da fase de alongamento do colmo, quando comparada às plantas irrigadas.

Realizando uma avaliação econômica da irrigação complementar na cultura da cana-de-açúcar na região norte do Estado de São Paulo, Matioli et al. (1998) concluíram que a irrigação complementar proporcionou aumento dos rendimentos esperados da cultura e, os retornos líquidos foram maiores quando considerados os benefícios indiretos, como: a redução no custo com arrendamento, plantio, tratos culturais e transporte da cana. Magro (2000) relata que a viabilidade econômica da irrigação da cana deve considerar a distância da fonte de água e o custo para adubação, bem como a umidade do solo na época de plantio e de brotação da soqueira.

Avaliando o efeito da irrigação no cultivo de cana-de-açúcar no Estado de Alagoas, em uma região com precipitação anual de 1300 mm, Magro (2000) verificou que o uso do gotejamento proporcionou aumentos de produtividade no segundo corte de 90 t ha^{-1} quando comparado à condição não irrigada. E segundo informações de Robertson et al. (1999), estima-se que haja um retorno de 1 a 2 tonelada de açúcar para cada 1000 tonelada de água usada, sendo essa eficiência mais elevada no caso de lavouras irrigadas.

Dentre os sistemas de irrigação, o gotejamento subsuperficial (IGS) aos poucos é incorporado nas lavouras comerciais de cana-de-açúcar, e se mostra como opção viável para suprimento hídrico da cana-de-açúcar cultivada na região centro-sul do Brasil. A IGS possibilita maior adensamento do plantio, por reduzir a competição entre os perfilhos por água e nutriente, neste caso quando se utiliza a fertirrigação. Pires et al. (2014) avaliando o efeito da irrigação e da fertirrigação por IGSs na produção e no rendimento de açúcar da cana cultivada em três espaçamentos, sendo dois de linha simples (1,5 e 1,8 m) e um de

linha dupla (1,4 x 0,4 m), verificaram incrementos na ordem de 14 Mg ha⁻¹ quando adotado o cultivo em linha dupla, frente aos sistemas de espaçamento em linha simples.

Com os resultados obtidos em diversos estudos, infere-se que a cana-de-açúcar mesmo sendo uma cultura tida como rústica, responde de forma positiva a utilização da irrigação, tornando-se viável a implementação de sistemas de irrigação em seu cultivo, com melhores perspectiva para o uso da irrigação por gotejamento subsuperficial.

Irrigação por gotejamento subsuperficial

A agricultura irrigada é responsável por 44% da produção mundial de alimentos e ocupa apenas 18% de toda área agricultável do mundo. No Brasil somente 5% da área colhida é irrigada, porém, essas áreas correspondem a 16% da produção nacional (FAO, 2014). Estes números enaltecem a importância da irrigação para garantir o crescimento da produção agrícola. Em contrapartida, a agricultura irrigada é o principal setor consumidor de água, e, o uso da água sem critérios embasados no conhecimento científico, pode colocar em risco a oferta de recursos hídricos e a sustentabilidade dos ecossistemas. Neste cenário, a busca por métodos de irrigação eficientes na aplicação e uso da água se tornam imprescindível para o desenvolvimento da agricultura irrigada.

O sistema de irrigação por gotejamento subsuperficial apresenta características desejáveis para a redução líquida no consumo de água, pois a água é aplicada diretamente na zona radicular das plantas, proporcionando economia, devido às reduções nas perdas por evaporação direta do solo e drenagem profunda (LAMM e TROOIJEN, 2003; LAMM et al., 2007). Lamm et al. (1995) avaliando o consumo de água pela irrigação, na cultura do milho, verificaram que a necessidade de irrigação líquida foi reduzida em 25% quando utilizado a IGS, em comparação a irrigação por gotejamento superficial. Marques et al. (2006) cita também como vantagem do sistema a economia nos tratos culturais e mão de obra e o menor índice de doença por evitar o contato da água com as folhas e caule das plantas. Além de possibilitar a aplicação de águas com elevado teor de matéria orgânica, como a vinhaça (BARBOSA et al. 2013a).

Os primeiros ensaios com IGS foram desenvolvidos nos Estados Unidos e Israel no início da década de 60. De início estes experimentos foram assolados por problemas relativos ao entupimento de emissores e baixa uniformidade de distribuição. No entanto,

com as melhorias dos tubos plásticos, das técnicas de filtragem e limpeza de tubulações, e novos designs de emissores aliados a busca de métodos eficientes no uso da água, fez ressurgir nas duas últimas décadas o interesse pela IGS (LAMM et al., 2007).

A irrigação por gotejamento subsuperficial é caracterizada por ser um sistema de baixa vazão e pressão, necessitando de irrigações frequentes para manter o solo sempre próximo da capacidade de campo (REICH et al., 2009). Os principais problemas do sistema estão relacionados ao entupimento dos emissores, instrução radicular ou formação de crosta microbiana nos emissores, pois a detecção de entupimentos e avaliação da uniformidade de distribuição, são de difíceis mensuração.

Para evitar problemas de entupimento dos emissores na IGS, alguns cuidados devem ser tomados. Lamm et al. (2007) e Reich et al. (2009) citam inúmeros aspectos a ser observado na IGS, como o uso da água de boa qualidade, evitando águas com elevado pH, ferrosas e carbonada. O sistema de filtragem é outro aspecto importante e recomenda-se a combinação dos filtros de areia com os de disco ou tela. A instalação de maiores números de válvulas antivácuo são fundamentais, evitando a sucção de partículas para o interior dos emissores, além de adequada limpeza das linhas de irrigação com cloro e ácidos. Quando não há ocorrência de problemas de entupimento a IGS apresenta elevada uniformidade de aplicação, sendo superior a irrigação por gotejamento superficial (GIL et al., 2008).

Devido à alta uniformidade de aplicação, constante suprimento hídrico e a aplicação diretamente na zona radicular das culturas, o uso dos fertilizantes via fertirrigação ganha melhores perspectivas de uso na IGS (LAMM e TROOEN, 2003). O uso da fertirrigação melhorar a eficiência no uso dos nutrientes, devido ao fracionamento da adubação conforme a marcha de absorção de nutrientes pelas plantas, diferentemente do sistema convencional, que aplica os fertilizantes em alta quantidade, em no máximo três aplicações, favorecendo o processo de lixiviação e perdas dos nutrientes (ROBERTS, 2008).

Por se tratar de um sistema de irrigação em que a água é aplicada diretamente na zona radicular em baixa vazão e alta frequência, a aplicação de esgoto, ganha melhores perspectivas de uso na agricultura, pois não há contato do efluente com a parte aérea das plantas e efeito deriva, tornando-se seguro para as pessoas e meio ambiente (LAMM e TROOEN, 2007). A IGS possui capacidade de reduzir a lixiviação de elementos químicos (MARQUES et al., 2006), causadores de desordem ambiental, como nitrogênio presente em

quantidade expressivas nos efluentes doméstico (TZANAKAKIS et al., 2009). Conforme o exposto, destaca-se que a IGS apresenta características adequadas para aplicação de esgoto doméstico na agricultura e redução no consumo de água para irrigação, garantido o adequado suprimento hídrico para as plantas e a segurança alimentar para a população.

Uso da água residuária na agricultura

No Brasil, 30% dos municípios lançam esgoto não tratado em rios, lagos ou lagoas, destes municípios, 23% usam a água a jusante do corpo receptor para irrigação das culturas e 16% para abastecimento urbano (KRONEMBERGER et al., 2011). O lançamento de esgoto não tratado ou de baixa qualidade de tratamento, contribui para o agravamento da poluição dos ambientes aquáticos, redução da disponibilidade de água para consumo domésticos e encarecimento no tratamento.

Uma das primeiras formas de tratamento do esgoto foi sua aplicação na agricultura. Entretanto a prática tornou-se desaconselhável devido ao potencial de contaminação da população com patógenos, colocando em risco a saúde pública. No entanto, os problemas de escassez de água e o aumento das pesquisas sobre técnicas de aplicação segura e controlada de águas residuárias na agricultura fizeram ressurgir o interesse pelo assunto (AZEVEDO e OLIVEIRA, 2005).

Segundo Mierzwa (2005), no Brasil até o ano de 2004, não havia nenhum registro sobre a aplicação planejada e em grandes escala, sobre a utilização de esgoto tratado na agricultura. Águas residuárias para uso em irrigação podem ser provenientes de diferentes setores da sociedade, dentre estes se destacam o urbano, sendo o esgoto doméstico tratado (EDT) uma opção interessante para cultivos próximos aos centros urbanos e na irrigação de culturas com potencial para a produção de energia e fibra.

Avaliando a aplicação de diferentes lâminas de EDT via gotejamento subsuperficial na cana-de-açúcar, Freitas et al. (2013) verificaram maior crescimento do colmo e maior produtividade quando comparados com o tratamento sem irrigação. Assim, os autores concluíram que o uso de EDT na cultura da cana-de-açúcar favorece o crescimento e a produtividade de colmo.

O aproveitamento de águas residuárias na agricultura, além de constituir em prática de reuso de água, traz outros benefícios como a contribuição para a nutrição de culturas

agrícolas devido a alguns elementos essenciais às plantas presente nos efluentes (MEDEIROS et al. 2005; LEAL et al., 2009b). Estudos em Lins, interior de São Paulo, mostraram a viabilidade de utilização de EDT doméstico na irrigação e nutrição da cana-de-açúcar (LEAL et al., 2009a; BLUM et al., 2012). Estes estudos demonstraram baixa contaminação com metais pesados no esgoto doméstico tratado e acréscimo de produtividade de aproximadamente 50% em relação ao cultivo tradicional. Cabe ressaltar que o aumento de produção pela disposição de EDT esta relacionado ao tipo de solo, cultura, clima e práticas de manejo.

Apesar do efluente de esgoto tratado repor quantidades significativas de nutrientes ao solo, Blum et al. (2012) avaliando a nutrição mineral da cana-de-açúcar irrigada com EDT, concluíram que a aplicação do EDT não deve ser a única fonte nutricional, sendo necessário a complementação de alguns nutrientes. A irrigação da culturas com efluentes requer cuidados e monitoramento constantes, pois as pesquisas utilizando o EDT, principalmente na cana-de-açúcar são recentes e, os efluentes urbanos apresentam grandes variações, temporais e espaciais na sua composição.

A principal limitação do uso de água residuárias na agricultura, conforme relatada por Ayers e Westcot (1999), é a presença de íons tóxicos e relativas concentrações de sódio, podendo gerar uma degradação do ambiente produtivo, como salinização do meio, o que acarretaria em perda do potencial produtivo ou até mesmo inviabilização do cultivo nessas áreas. Outro problema destacado por estes autores seria a tolerância das culturas a este tipo de efluente. Segundo Katerji et al. (1997), os sais solúveis contidos nas águas de irrigação podem, em certas condições climáticas, salinizar o solo e modificar a composição iônica no complexo sortivo, alterando as características físicas e químicas do solo, como o regime de umidade, aeração, nutrientes, desenvolvimento vegetativo e produtividade.

Avaliando a aplicação de água residuária via gotejamento superficial nas características físico-química do solo, Leal et al. (2009b) verificaram alterações nas porcentagem de sódio trocável e condutividade elétrica, com incremento em ambos os atributos, os quais podem prejudicar o desenvolvimento das plantas e a qualidade do solo. Desta forma, a aplicação de água residuária precisa ser realizada de forma cautelosa, respeitando as limitações do ambiente produtivo, fazendo jus a suas qualidades para o meio ambiente e garantir a segurança alimentar para população.

Sustentabilidade Agrícola

O termo desenvolvimento sustentável foi primeiramente discutido pela International Union for the Conservation of Nature and Natural Resources (IUCN), no documento intitulado *World's Conservation Strategy* (IUCN et al., 1980). Neste documento, ficou estabelecido que o desenvolvimento sustentável deve considerar os aspectos referentes às dimensões sociais e ecológicas, bem como fatores econômicos, fatores dos recursos vivos e não vivos e as vantagens de curto e longo prazo de ações alternativas.

Uma das definições mais conhecidas e aceitas internacionalmente, do conceito de desenvolvimento sustentável, foi estabelecida no Relatório de Brundtland, 1985, elaborado pela Comissão Mundial de Meio Ambiente e Desenvolvimento (World Commission on Environment and Development – WCDE) como sendo aquele que atenda as necessidades do presente sem comprometer a possibilidade das gerações futuras de atenderem suas próprias necessidades. A meta da sustentabilidade é fundamentada na conservação ambiental, desenvolvimento econômico e o bem estar humano, entre outros objetivos (KOEHLER e HECHT, 2006).

Do termo geral de sustentabilidade, tem-se a sustentabilidade ambiental, conceituada como a capacidade de explorar os recursos naturais, sem comprometer e ameaçar a disponibilidade e qualidade dos recursos naturais ao longo do tempo. A sustentabilidade ambiental esta alicerçada nas dimensões ambientais, do conceito estabelecido pelo Relatório de Brundtland. Segundo Kajikawa (2008), este conceito difere do termo conservação, pois a conservação está focada em preservar os recursos naturais, independentemente de fins humanos.

Em sistemas agrícolas, o desenvolvimento sustentável está intimamente ligado aos aspectos ambientais. Segundo Rodrigues (2011), a agricultura sustentável esta inserida no manejo dos ecossistemas agrícolas de modo a manter e ampliar sua produtividade, a qualidade do ambiente (ar, água e solo), a diversidade biológica e da paisagem e, preservando a qualidade de vida das pessoas. De maneira complementar, Jordan (2007) e Lal (2009) destacam que a sustentabilidade agrícola conecta-se intimamente aos fatores solo, água e a emissão de gás com potencial de aquecimento global e, a alteração de um desses fatores coloca em risco a sustentabilidade do setor. Lal (1999) ressalta que a

sustentabilidade deve ser analisada considerando os indicadores de produção, pois se houver ganhos ambientais sem manutenção ou aumento da produtividade, o sistema se torna insustentável ao longo do tempo. Complementarmente, Kajikawa (2008) destaca que a capacidade de manter ou sustentar o estado de produção, a um determinado nível de colheita, esta direcionada na sustentabilidade ambiental.

Para Lopes (2007), a busca do desenvolvimento sustentável representa um dos maiores desafios para a humanidade e, em especial, para o Brasil, pois nos últimos anos o país passou de uma exploração agroindustrial intensa, as quais ocuparam e utilizaram os recursos naturais de forma desordenadas, colocando em risco a nossa rica base de recursos. Dentre as explorações agroindustriais podemos destacar o setor sucroalcooleiro que nas três últimas décadas apresentou crescimento expressivo.

O uso de mecanismo capaz de mensurar a valoração ambiental da aplicação de novas técnicas na agricultura é fator fundamental na avaliação da sustentabilidade de sistemas agrícolas. A avaliação da sustentabilidade ecológica, em sistemas agrícolas, deve considerar os indicadores de qualidade do solo, de fluxo de gases do efeito estufa e do uso da água (JORDAN, 2007; KAJIKAWA, 2008; LAL, 2009).

Os indicadores de desenvolvimento sustentável são usados para auxiliar na coleta, processamento e uso das informações, com o objetivo de melhorar a tomada de decisões, orientando de forma mais inteligente as ações políticas, medições do progresso e orientando mecanismos de controle de “feedback” em todos os pilares da sustentabilidade (HOSSEINI e KANEKO, 2011). Para a OECD (2001), a formulação de indicadores para avaliar o desenvolvimento sustentável é uma ferramenta poderosa na tomada de decisão e avaliar o desempenho ambiental de um local, sendo que os indicadores devem fornecer informações essenciais sobre o estado de um fenômeno, de forma significativa.

Para garantia da sustentabilidade das atividades produtivas será necessário o investimento em conhecimento científico e tecnológico permitindo desenvolver sistemas produtivos inovadores, voltados para o aumento da produtividade dos recursos naturais e serviços ambientais utilizados no agronegócio (LOPES, 2007). Nesta pesquisa, a sustentabilidade da produção de cana-de-açúcar irrigada com esgoto doméstico tratado foi analisada por meio dos indicadores de qualidade do solo, balanço de gases do efeito estufa e uso da água.

METODOLOGIA GERAL

O experimento foi desenvolvido no campo experimental da Faculdade de Engenharia Agrícola da Universidade Estadual de Campinas (FEAGRI/ UNICAMP), Campinas, SP. latitude de 22°53'S e longitude de 47°05'W. O clima da região, segundo classificação de Köppen, é do tipo Cwa/Cfa, com temperatura média anual de 22,3°C, umidade relativa média de 62% e pluviometria total anual de 1425 mm. O solo da área foi classificado como LATOSSOLO VERMELHO Distroférico (EMBRAPA, 2006).

Antes do plantio de cana-de-açúcar a área foi cultivada com milho e feijão. O plantio da cana-de-açúcar, realizado em maio de 2011, foi manual na profundidade de 0,30 m e distribuiu de 5 a 6 toletes, com 3 gemas cada, por metro linear. A variedade cultivada foi a RB867515, caracterizada por crescimento rápido, porte alto, elevada produtividade de colmo e teor de sacarose e eventual acamamento, especialmente em ambientes favoráveis a produção (HOFFMANN et al., 2008).

Empregou-se o delineamento experimental em blocos casualizados (DBC), com cinco tratamentos e cinco repetições, totalizando 25 parcelas experimentais. As parcelas foram compostas por três linhas duplas de plantio com 18 m de comprimento, cada linha dupla de plantio apresentava espaçamento de 1,8 m, desta forma, cada parcela apresentava uma área de 97,2 m². O espaçamento em linha dupla foi composto de uma menor linha de 0,4 m por 1,4 m na maior entre linha dupla (1,4 x 0,4 m), conforme ilustrado na Figura 1.

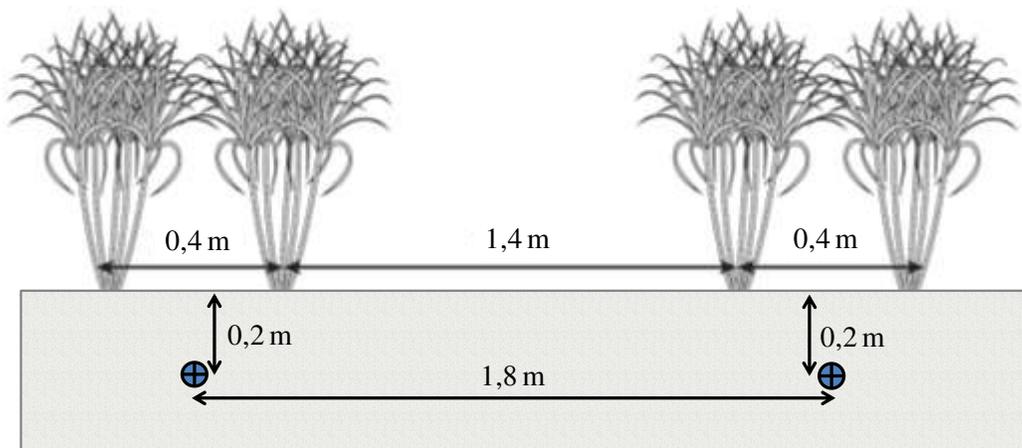


Figura 1 - Esquema do espaçamento em linha dupla, profundidade e ponto de instalação da fita gotejadora e pontos amostrais dos sistema radicular.

Para caracterização química do solo, , coletou-se amostras na camada de 0,0-0,20 m antes do plantio e após o corte da cana-planta, em setembro de 2012, nas camadas de 0,0-0,20; 0,20-0,40 e 0,40-0,60. A coleta foi realizada em todas as parcelas e ambas as análises estão ilustradas na Tabela 3.

Tabela 3 - Médias da análise química do solo realizada antes da instalação do experimento, plantio da cana-de-açúcar, e após o corte da cana-planta, início da primeira cana-soca, em cada tratamento.

Atributos	Camada	pH	P	S	Na	Ca	Mg	K	H + Al	Al	CTC	PST	V	M.O
Unidade	m	H ₂ O	mg dm ⁻³			cmolc dm ⁻³					%			
Antes do plantio da cana-de-açúcar														
Área geral	0,0-0,20	5,6	19,3	15,4	1,90	5,1	0,94	0,57	3,3	0,10	9,9	0,08	66,4	3,76
Após colheita primeira soca														
T1NI	0,0-0,20	5,6	13,0	14,9	2,00	4,3	1,00	0,75	3,9	0,07	9,9	0,09	60,2	3,83
	0,20-0,40	5,6	8,3	13,7	1,97	4,2	0,90	0,38	4,0	0,10	9,5	0,09	57,8	3,27
	0,40-0,60	5,7	3,3	11,5	2,00	4,0	0,87	0,28	3,5	0,03	8,7	0,10	60,2	2,53
T2EF	0,0-0,20	5,5	15,0	12,8	1,83	4,1	1,00	0,65	3,9	0,00	9,7	0,08	59,3	3,67
	0,20-0,40	5,6	8,7	11,5	2,07	4,1	0,93	0,39	3,9	0,00	9,3	0,10	58,4	3,03
	0,40-0,60	5,7	2,7	9,8	2,10	3,4	0,83	0,27	3,5	0,00	8,1	0,11	56,5	2,30
T3ENf	0,0-0,20	5,7	15,7	4,5	1,50	4,9	1,13	0,85	3,7	0,00	10,6	0,06	64,9	4,13
	0,20-0,40	5,7	6,0	5,3	1,63	4,6	0,97	0,50	3,5	0,00	9,6	0,07	62,6	3,43
	0,40-0,60	5,7	3,0	6,5	1,67	4,0	0,83	0,32	3,2	0,00	8,4	0,09	61,5	2,60
T4AF	0,0-0,20	5,7	13,3	10,1	1,83	4,8	0,93	0,50	3,5	0,00	9,7	0,08	62,8	4,30
	0,20-0,40	5,7	8,0	9,8	1,50	4,0	0,87	0,42	3,6	0,00	8,9	0,07	59,0	3,60
	0,40-0,60	5,8	3,0	6,2	1,40	3,9	0,83	0,30	3,1	0,00	8,1	0,08	61,6	2,70
T5ANf	0,0-0,20	5,8	11,0	5,2	1,33	3,9	1,07	0,75	3,3	0,00	9,0	0,06	63,6	3,83
	0,20-0,40	5,8	9,0	8,7	1,73	3,9	0,93	0,54	3,3	0,00	8,7	0,09	60,8	3,33
	0,40-0,60	5,9	4,7	7,2	1,80	3,5	0,87	0,33	3,0	0,00	7,8	0,10	59,9	2,50

A adubação seguiu a recomendação de ROSSETO et al. (2008). Como o solo apresentava adequados valores de P e K, a adubação foi realizada para obtenção de altas produtividades, aplicando como adubação de base 120, 40 e 80 kg ha⁻¹ de N, P₂O₅ e K₂O, respectivamente. No T1NI, a adubação foi executada no dia 03 de janeiro de 2013, aplicando os adubos manualmente na menor entre linha de plantio (0,40 m), utilizando-se como fonte de NPK, a ureia, o MAP e o sulfato de potássio.

Nos tratamentos fertirrigados (T2EF e T4AF), a aplicação dos fertilizantes ocorreu de forma complementar os nutrientes contidos nas águas de irrigação, realizada de acordo com a marcha de absorção de nutrientes da cana-soca (HAAG et al.,1987). Os fertilizantes utilizados na fertirrigação foram o nitrato de cálcio, sulfato de potássio e MAP, com frequência semanal de aplicação. Os fertilizantes foram diluídos em um tanque de 50 L e o sistema de injeção foi do tipo venture. Descrição completa da dose de fertilizantes aplicados mensalmente é apresentado no anexo B.

As fitas gotejadoras foram instaladas a 0,20 m de profundidade, e alocada na entre linha da menor fileira de cultivo (0,40 m) (Figura 1). Empregou-se a fita-gotejadora modelo Dripnet PC (Netafin[®], Israel), caracterizada por ser autocompensante na faixa de pressão de 0,4 a 2,4 kgf cm⁻². A vazão e o espaçamento entre os gotejadores foram, respectivamente, de 1,0 L h⁻¹ e 0,55 m para a ARS, e 1,6 L h⁻¹ e 0,65 m para o EDT. A diferença na vazão dos gotejadores foi em consequência de doação dos materiais pela empresa NETAFIM, entretanto, a diferenciação da vazão dos gotejadores não influencia a formação do bulbo molhado, conforme estudo apresentado por ELAIUY et al. (2012), utilizando as mesmas fitas-gotejadoras e no solo da área experimental, verificaram ausência de diferenciação nas dimensões do bulbo molhado, quando aplicado água de abastecimento urbano e EDT.

As irrigações foram realizadas no período de outubro de 2012 a junho de 2013, sendo suspensa 45 dias antes do corte, para favorecimento do acúmulo de sacarose no colmo (CARDOZO e SENTELHAS, 2013). O manejo da irrigação foi realizado com base no balanço hídrico do solo considerando a diferença entre o teor de água no solo (estimado a partir das leituras da Ka realizadas com o TDR) e a capacidade de campo nas camadas 0-0,2; 0,2-0,4 e 0,4-0,6 m (umidade do solo a tensão de 10 KPa). O cálculo do volume de água foi realizado de acordo com as equações 1 e 2:

$$V_i = (\theta_{cc} - \theta_i) * V_s * N_l \quad (\text{Eq.1})$$

Onde, V_i – volume de água de irrigação por tratamento (m^3); θ_i – umidade volumétrica do solo medido pelo TDR nas profundidades de interesse ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$, 0,60 m); θ_{cc} – umidade do solo em capacidade de campo nas profundidades de interesse ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$, 0,60 m); V_s – volume de solo explorado por linha (m^3); e N_l – numero de linhas irrigadas por tratamento.

$$V_s = P_s * L_{fg} * C_f \quad (\text{Eq. 2})$$

Onde: V_s – volume de solo explorado por linha (m^3); P_s – Profundidade amostrada pelas sondas (0,60 m); L_{fg} – largura da faixa do gotejador (0,5 m, de acordo com os resultados obtidos por Elauy et al., 2012); C_f – comprimento da faixa (18 m de largura da parcela mais 0,5 m).

Utilizou-se a técnica de Reflectometria no Domínio do Tempo (TDR), para determinação da umidade e, instalou um conjunto de sonda nas três parcelas centrais, até a profundidade de 0,60 m. Antes das águas entrarem nas parcelas, foi realizada a filtração em filtros de areia.

As informações climatológicas foram obtidas da estação meteorológica automática (EMA) do Centro de Pesquisa Meteorológicas e Climáticas Aplicada a Agricultura (CEPAGRI, 2013), localizada a 300 m da área experimental. Com os dados foram estimados a evapotranspiração de referência (ET_o) utilizando o modelo de Pennam-Montheith (ALLEN et al., 1998).

CAPÍTULO I - Crescimento e produção da cana-de-açúcar irrigada com esgoto doméstico tratado via gotejamento subsuperficial

Resumo

Avaliações do desenvolvimento vegetativo e parâmetros produtivos são importantes indicativos para o entendimento dos efeitos do uso de irrigação e diferentes qualidades de água em sistemas agrícolas. Assim, o estudo objetivou avaliar o desenvolvimento da parte aérea e radicular e os parâmetros quantitativos e qualitativos referente ao rendimento de colmo e açúcar, da cana-de-açúcar irrigada com esgoto doméstico tratado (EDT) via gotejamento subsuperficial (IGS), com e sem complementação nutricional. Os tratamentos propostos foram: cultivo não irrigado com adubação de cobertura (T1NI), irrigado com EDT e fertirrigação complementar (T2EF), irrigado com EDT sem adubação complementar (T3ENf), irrigado com água de reservatório superficial (ARS) e fertirrigação complementar (T4AF) e irrigado com ARS sem adubação complementar (T5ANf). Para avaliação do efeito dos tratamentos sobre o desenvolvimento vegetativo, foram analisados a área foliar por perfilho, índice de área foliar, crescimento do perfilho e número de perfilhos durante o ciclo de cultivo. Após o corte determinou a estimativa de produção de colmo, qualidade do caldo, rendimento de açúcar e desenvolvimento do sistema radicular. Os cultivos irrigados com EDT apresentaram elevado desenvolvimento da área foliar por perfilho e índice de área foliar, e, juntamente com o T4AF, obtiveram as maiores estimativa de produção de colmos, superando os valores registrados no T1NI. A qualidade tecnológica foi alterada no T3ENf, com incremento na porcentagem de sólidos solúveis, teor de sacarose do caldo e açúcar teórico recuperável, quando comparado ao T1NI. Os cultivos irrigados, independentemente da qualidade de água, ocasionaram incremento no rendimento teórico de açúcar recuperável. O comportamento do sistema radicular dos cultivos irrigados apresentaram tendência de deslocamento para a região do bulbo úmido, já a profundidade efetiva não foi alterada pelo uso da irrigação. Os resultados dos parâmetros vegetativos e qualitativos, de uma maneira geral, permitem afirmar que a aplicação de EDT beneficiou o desenvolvimento e a produção da cana-de-açúcar.

Palavras-Chave: Produção de colmo, Rendimento de açúcar, Sistema radicular, Efluente urbano.

Introdução

A cana-de-açúcar é uma planta estratégica para redução dos impactos ambientais ocasionado pelo setor energético, especialmente o petrolífero, se tornando uma *commodity* energética global competitiva (GOLDEMBERG, 2007). Entretanto, a rápida expansão do setor, suscita inúmeros questionamentos decorrente dos impactos negativos ao ambiente, principalmente pelo desmatamento, uso do solo sem padrões conservacionistas, poluição das águas e ocupação de áreas com alto potencial para produção de alimentos (GOLDEMBERG et al., 2008).

A elevação da produção de cana-de-açúcar, resultante da adequada disponibilidade hídrica e nutricional, favorece a redução da expansão territorial, minimizando os impactos ambientais do setor sucroalcooleiro. Contudo, a utilização da irrigação para suprimento hídrico e a aplicação de fertilizantes minerais, ocasiona problemas ambientais relacionados ao alto consumo de água na agricultura irrigada (FAO, 2013). Já aplicação de fertilizantes minerais contribui para a emissão de gases de efeito estufa (IPCC, 2007; KERN et al., 2010) e poluição de água pelos processo de lixiviação e escoamento superficial (CORRELL, 1998; THORBURN et al., 2011). Como alternativa, a aplicação de esgoto doméstico tratado (EDT) é fonte viável para suprimento hídrico e nutricional da cana-de-açúcar (FONSECA et al., 2007; LEAL et al., 2009b; TZANAKAKIS et al., 2009), porém, segundo estudo realizado por BLUM et al. (2012), o EDT não deve ser a única fonte nutricional, necessitando de complementação.

A disposição do EDT apresenta melhores perspectivas quando aliada a irrigação por gotejamento subsuperficial (IGS), pois as águas são emitidas na zona radicular das culturas, em alta uniformidade de aplicação (GIL et al., 2012) reduzindo o risco de percolação e escoamento superficial. Devido as características da IGS, o consumo de água é reduzido (LAMM et al., 1995) e, estudos demonstram favorecimento no desenvolvimento e produtividade da cana-de-açúcar (DALRI e CRUZ, 2008; LEAL et al., 2009) quando irrigada via gotejamento subsuperficial, não prejudicando o desenvolvimento do sistema radicular (SOUSA et al., 2013) e a qualidade tecnológica do caldo (PIRES et al., 2014).

Avaliações biométricas, qualitativas e de produção, são importantes ferramentas para verificar o efeito da introdução de novas técnicas de manejo agrícola, permitindo distinguir os efeitos na planta e, assim, elucidar os caminhos racionais para a sua produção.

Desta forma, o estudo objetivou avaliar o desenvolvimento da parte aérea e radicular, a qualidade tecnológica e a estimativa de produção de colmo e açúcar, da cana-de-açúcar irrigada com duas qualidades de água, complementadas ou não com fertilizantes minerais via fertirrigação e testemunha não irrigada.

Material e Métodos

Os parâmetros biométricos, foram mensurados até junho de 2013, devido ao acamamento ocorrido após este mês, dificultando a coleta dos dados biométricos. A altura da planta foi determinada do solo até o final do ponteiro e o número de perfilhos foi contabilizado em 4 m da linha de plantio, na linha dupla central. Para estimativa da área foliar (AF), empregou o método não destrutivo proposta por Hermann e Câmara (1999), como adaptação do fator de forma, para as condições e variedade do experimento, conforme apresentado por Tuta (2012). Para determinação da área foliar, mensurou o comprimento e largura da folha +3 (folha adulta totalmente desenvolvida), e com auxílio da Equação 1, estimou a área foliar por perfilho (AF).

$$AF = (C \times L \times 0,81) \times (NFV + 2) \quad (\text{Eq.1})$$

Onde: C e L, representam o comprimento e largura da folha +3; 0,81, fator de forma obtido por Tuta (2012) para a variedade RB 867515; NFV, número de folhas verdes com pelo menos 20% de área verde (a partir da +1); 2, fator de ponderação para folhas que ainda não estão expandidas completamente.

Com os valores de área foliar por perfilho (AF), número de perfilhos em 1 metro linear (NP) e espaçamento entre linha de plantio (S), estimou-se o índice de área foliar (IAF), utilizando a Equação 2.

$$IAF = \left(\frac{NP}{S}\right) \times AF \quad (\text{Eq. 2})$$

A colheita da cana-de-açúcar foi realizada manualmente com a cana-crua, em agosto de 2013. Para estimativa da produção de colmos (EPC), determinou a massa de colmo

presente em 1 m da linha de plantio em todas as parcelas experimentais. Assim a determinação da EPC foi obtida por meio da Equação 3.

$$EPC = \frac{MC \times \left[\left(\frac{100}{Esp} \right) \times 100 \right]}{1000} \quad (\text{Eq. 3})$$

Onde: MC, representa a massa fresca de colmo em 1 m de linha (kg); Esp, o espaçamento entre linha (m), com o espaçamento em linha dupla (1,4 x 0,4 m), totalizando 1,80 m, para o cálculo considerou que cada fileira estava espaçada a 0,90 m; 100, fator de conversão de 1 m⁻¹ para m⁻¹ cultivado em 1 hectare; 1000, fator de conversão de kg para Mg.

Após pesagem dos colmos presente em 1 m de linha planta, separou-se cinco colmos, os quais foram enviados para análise tecnológica, realizada no laboratório da Usina Ester, Cosmópolis – SP. A determinação da porcentagem de sólidos solúveis (PSS), teor de sacarose do caldo (Pol) e açúcar total recuperável (ATR) seguiu as instruções da CONSECANA (2006). Com os valores de ATR e EPC, foi estimado o rendimento de açúcar teórico recuperável (RA), conforme equação 4.

$$RA = \frac{ATR \times EPC}{1000} \quad (\text{Eq. 4})$$

Posteriormente a colheita, foram coletadas amostras de raízes, em uma malha de 0,60 x 0,80 m, tomando-se como referência a linha de instalação da fita gotejadora (Figura 4). A amostragem das raízes seguiu a metodologia proposta por Fujiwara et al. (1994), utilizando-se uma sonda com 0,072 m de diâmetro interno. A coleta foi realizada por camada de 0,20 m, assim o volume amostrado foi de 0,8143 dm³. Após a amostragem, realizou-se a separação das raízes do solo, lavando as amostras em peneira de 1 mm e separação das impurezas, palhas e solo residual, com auxílio de pinças, em seguida as amostras foram secas em estufa a 72°C, até peso constante. Com as amostras secas, determinou-se a massa de raiz seca e estimou-se a densidade de raízes.

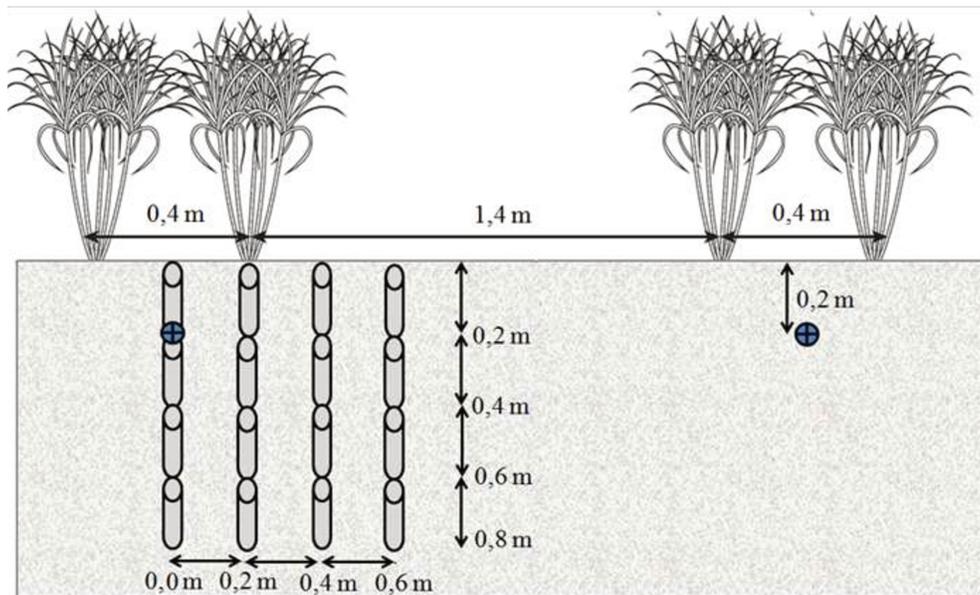


Figura 2 - Pontos amostrais do sistema radicular.

Com os valores médios de densidade de raiz foram confeccionados mapas de contorno da distribuição das raízes ao longo do solo, com auxílio do software Surfer 9.0 e, utilizando a técnica da interpolação pelo inverso do quadrado da distância. Os resultados biométricos e de produção foram submetidos à análise de variância e as médias comparadas entre si pelo teste de Tukey ($p > 0,05$).

Resultados e Discussão

Os valores mensais da temperatura média do ar e precipitação total mensal coletada na estação meteorológica automática e a os valores estimado de ETo total mensal, estão ilustrados na Figura 3.

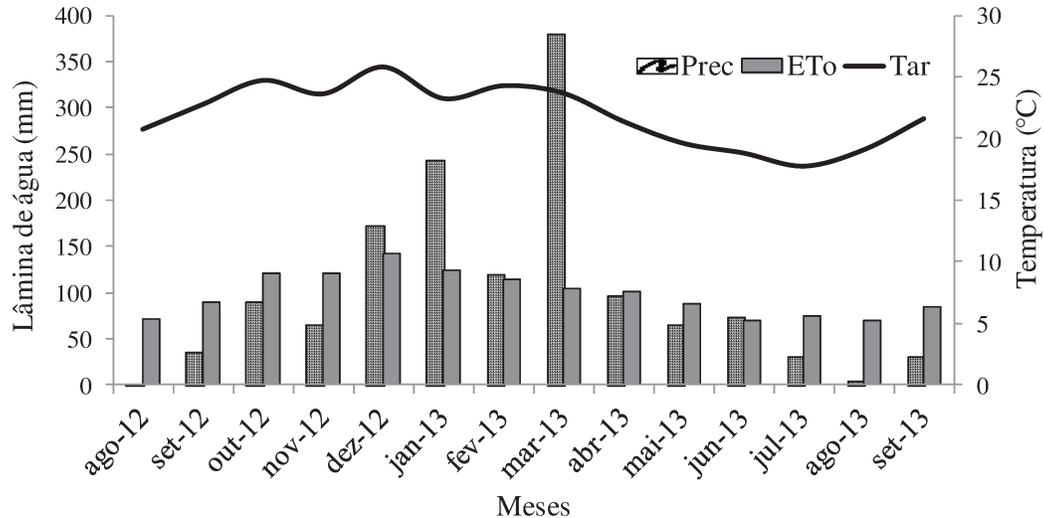


Figura 3 - Valores mensais de precipitação (Prec) e evapotranspiração potencial (ETo) total e temperatura média do ar (Tar), coletadas durante o período experimental.

Durante o período experimental, observou-se que a ETo foi superior as precipitação, em seis dos 12 meses de cultivo, e em outros 4 meses o total ETo foi similar a Prec, indicando a necessidade do uso da irrigação em certos períodos do ano para a região. Altas precipitações foram observadas no período de dezembro a março. No mês de março o total precipitado apresentou valores atípicos para a região, com uma lâmina total neste mês sendo de 380 mm.

A temperatura média do ar durante o ciclo foi de 21,9°C, com valor médio máximo e mínimo, mensalmente, de 26 a 17,7°C no meses de dezembro de 2012 e julho de 2013, respectivamente. No fase de maturação da cana-de-açúcar, meses de junho a agosto a temperatura média do ar e as baixas precipitações ocorrida na área proporcionaram condições favoráveis ao processo de maturação da cana-de-açúcar

A lâmina mensal aplicada em cada tratamento irrigado encontra-se na Figura 4. Durante a estação chuvosa, meses de janeiro a março, a lâmina aplicado nos tratamentos fertirrigados foram superiores aos não fertirrigados pois mesmo não havendo necessidade de reposição hídrica, foi realizada a complementação nutricional, aplicado assim uma lâmina de água superior. Nos meses de abril e maio o cultivo T2EF apresentou maior demanda hídrica em relação aos demais cultivos.

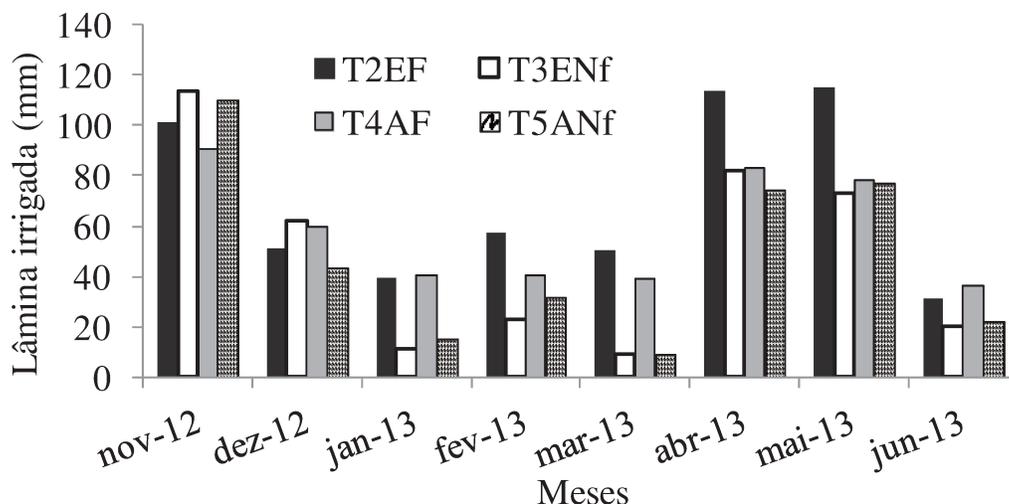


Figura 4 - Volume mensal irrigado nos tratamentos com aplicação de EDT e fertirrigado (T2EF), sem complementação nutricional (T3ENf) e irrigados com ARS e fertirrigado (T4AF) sem complementação nutricional (T5ANf).

A evolução da área foliar foi semelhante entre os cultivos irrigados até março de 2013, fase de estabilização dos perfilhos (BEZUIDENHOUT et al., 2003). A partir desta fase, em abril de 2013, verifica-se elevação da AF dos tratamentos irrigados com efluentes, tornando superior ao cultivo irrigado com ARS (Figura 5). Na última amostragem antes do acamamento, a AF do tratamento T2EF se destacou dos demais tratamentos, com valor médio de $0,64 \text{ m}^2 \text{ perf}^{-1}$, sendo superior a AF mensurada no cultivo não irrigado em 20%.

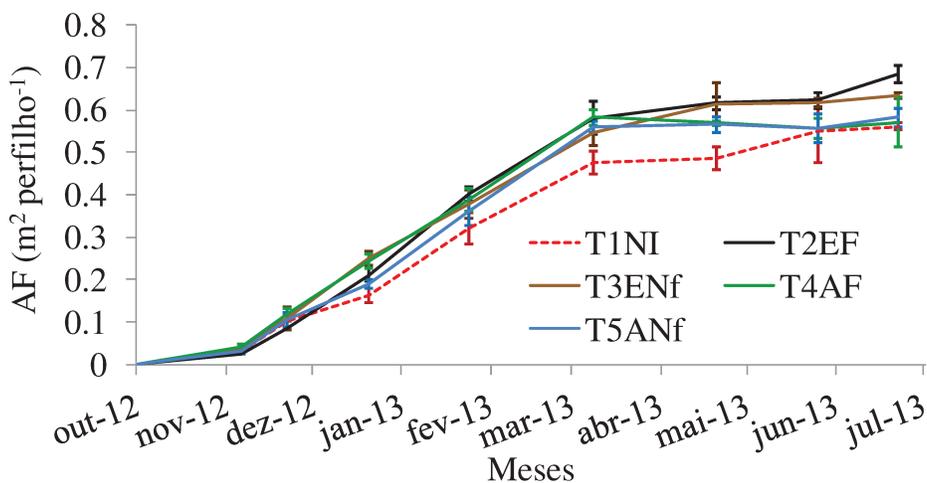


Figura 5 - Desenvolvimento da área foliar por perfilho (AF), com desvio padrão, da cana-de-açúcar submetida ao cultivo não irrigado (T1NI), irrigado com EDT e fertirrigado (T2EF) e sem fertirrigação (T3ENf), irrigado com ARS e fertirrigado (T4AF) e sem fertirrigação (T5ANf).

A disponibilidade hídrica e o fornecimento de N, para a cana-de-açúcar, são importantes determinantes da taxa fotossintética (HEERDEN et al., 2010). Assim, o adequado fornecimento destes fatores de produção, via EDT, eleva a área foliar da cana-de-açúcar quando comparada ao cultivo não irrigado a partir do segundo mês de crescimento (Figura 5). O resultado revela que o fornecimento do EDT elevou a AF no final do ciclo quando comparada a cana-de-açúcar irrigada com ARS, mesmo com adequado fornecimento de NPK, indicando efeito de outros elementos presente no EDT em favorecer o desenvolvimento foliar.

O desenvolvimento do índice de área foliar (IAF) da cana-de-açúcar submetida aos diferentes tratamentos, encontra-se ilustrado na Figura 6. Por meio das curvas de IAF ao longo do ciclo, observa-se rápida evolução entre os meses de dezembro de 2012 a março de 2013. Conforme observado para a AF, o IAF foi elevado no T2EF, com valores variando, a partir de janeiro de 2013 até a colheita, entre 6,5 a 8,0 $m^2 m^{-2}$. Os tratamentos T1NI e T5ANf apresentaram valores de IAF similares, com máximo IAF próximo a 6,0 $m^2 m^{-2}$. Os resultados obtidos indicam que o déficit hídrico ocorrido no tratamento T1NI e a baixa disponibilidade de nutrientes do T5ANf, ocasionaram efeitos similares no desenvolvimento e valor de IAF.

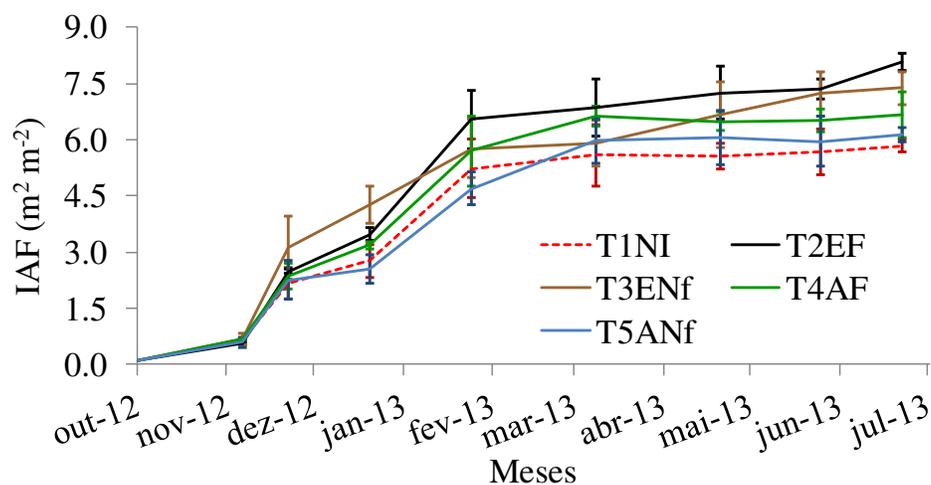


Figura 6 - Índice de área foliar (IAF), com desvio padrão, da cana-de-açúcar submetida ao cultivo não irrigado (T1NI), irrigado com EDT e fertirrigado (T2EF) e sem fertirrigação (T3ENf), irrigado com ARS e fertirrigado (T4AF) e sem fertirrigação (T5ANf).

A análise do desenvolvimento do IAF apresenta relação direta com o acúmulo de biomassa e produção de colmos nas diferentes fases de desenvolvimento da cana-de-açúcar

(SIMÕES et al., 2005; LUO et al., 2013). Desta forma, reduções no IAF pelo déficit de água no solo e baixa disponibilidade de nutrientes, ocasionam detrimento da produção de colmos (INMAN-BAMBER e SMITH, 2005; BOKHTIAR e SAKURAI, 2005), reduzindo a capacidade de interceptação da radiação (SILVA e COSTA, 2012) e conseqüentemente a taxa fotossintética da cana-de-açúcar (HEEDEN et al., 2010).

Nos cultivos irrigados, o maior desenvolvimento do IAF na fase inicial da cana-de-açúcar, ocasiona prematuridade na redução dos perfilhos (SILVA e COSTA, 2012). Na fase de senescência dos perfilhos ocorreu expressivo aumento do IAF em todos os tratamentos, porém no T2EF o desenvolvimento do IAF elevou-se rapidamente no período de dezembro de 2012 a janeiro de 2013, saltando de 2,5 para 6,5 m² m⁻² (Figura 6). Para Silva e Costa (2012), a máxima interceptação da radiação ocorre quando o IAF foi igual ou maior a 6 m² m⁻². No período de senescência dos perfilhos, janeiro de 2012, o tratamento T5ANf apresentou o menor IAF, com valor próximo a 4,70 m² m⁻².

A avaliação do IAF mostrou-se satisfatória, distinguindo os efeitos da aplicação do EDT sobre o desenvolvimento da cana-de-açúcar. Para Inman-Bamber (2004), o desenvolvimento foliar é um indicador altamente sensível do status hídrico da planta, respondendo de forma reminiscente a introdução de diferentes manejos de irrigação.

O crescimento das plantas não foi afetado pelos tratamentos impostos, apresentando desenvolvimento similar (Figura 7). A maior variação de altura foi verificada em abril de 2013, com o tratamento T3ENf obtendo a altura superior as mensuradas no T1NI e T5ANf em 0,44 e 0,32 m, respectivamente. Entretanto, a partir de maio de 2013, as plantas dos tratamentos irrigados com ARS (T4AF e T5ANf) exibiram ganhos levemente superiores aos observado nos demais, igualando a altura dos perfilhos no final do ciclo de cultivo.

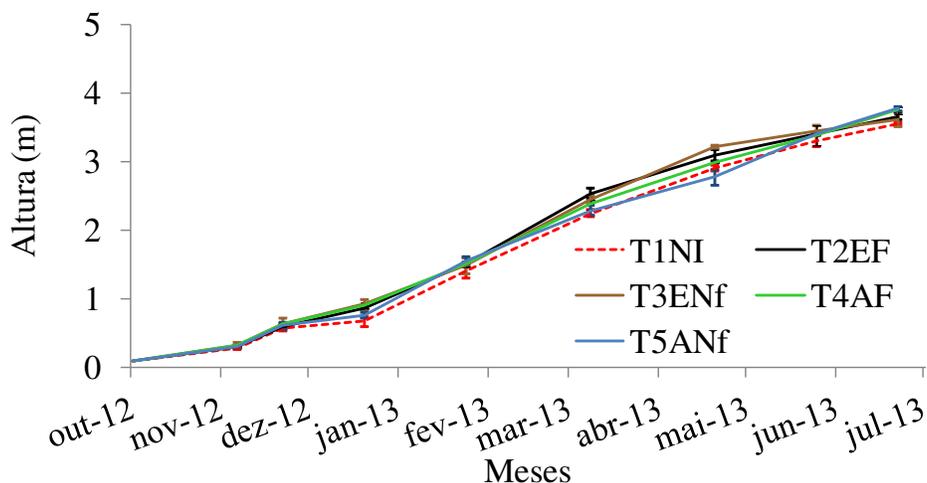


Figura 7 - Crescimento, com desvio padrão, da cana-de-açúcar submetida ao cultivo não irrigado (T1NI), irrigado com EDT e fertirrigado (T2EF) e sem fertirrigação (T3ENf), irrigado com ARS e fertirrigado (T4AF) e sem fertirrigação (T5ANf).

A dinâmica de perfilhamento na cana-soca, divide-se basicamente em três estágios (BEZUIDENHOUT et al., 2003). O primeiro caracterizado pelo intenso perfilhamento, ocorreu após a brotação (outubro de 2012) até o ponto de máximo perfilhamento (dezembro de 2013) (Figura 8). Ao final desta fase, observou-se que os cultivos irrigados com EDT, apresentaram perfilhamento superior aos demais tratamentos, com valor médio de 28 perf. m^{-2} . Os valores de máximo perfilhamento estão de acordo com o obtido por Bell e Garside (2005), porém, utilizando a irrigação por aspersão, com máximo perfilhamento variando de 20 a 30 perf. m^{-2} .

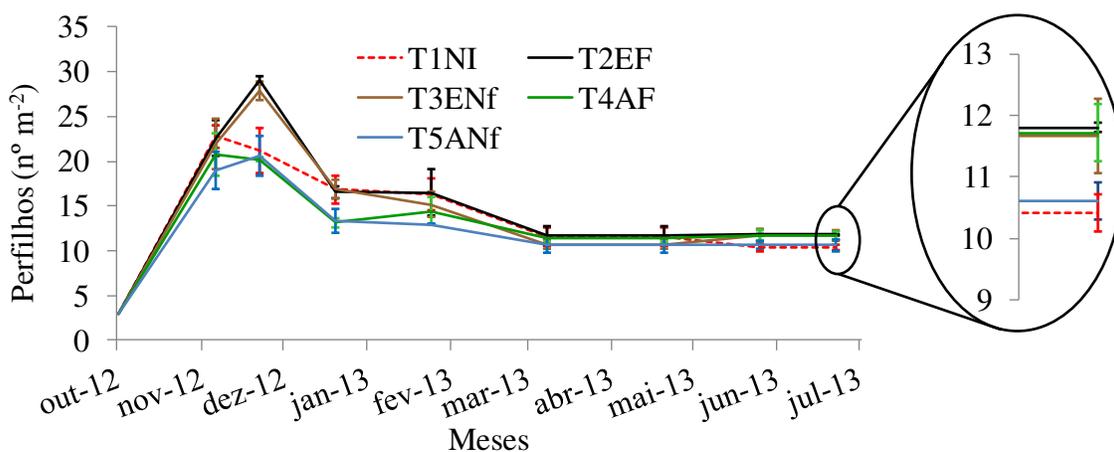


Figura 8 - Número de perfilhos, com desvio padrão, da cana-de-açúcar submetida ao cultivo não irrigado (T1NI), irrigado com EDT e fertirrigado (T2EF) e sem fertirrigação (T3ENf), irrigado com ARS e fertirrigado (T4AF) e sem fertirrigação (T5ANf).

Na segunda fase da dinâmica de perfilhamento, dezembro de 2012 a março de 2013, caracterizada pela senescência dos perfilhos, houve uma acentuada morte de perfilhos nos cultivos irrigados com EDT e, aproximação do perfilhamento dos tratamentos T1NI e irrigados com ARS. De maneira análoga, Robertson et al. (1999) observaram que a adequada disponibilidade hídrica ocasionou alto perfilhamento na fase inicial, entretanto acentuada redução no número de perfilhos, na segunda fase de perfilhamento, igualando a população de plantas do cultivo irrigado e não irrigado, aos 180 dias após o plantio. A morte acentuada de perfilhos nos tratamentos T2EF e T3ENf, verificada principalmente entre os meses de dezembro e janeiro, advém do alto IAF (INMAN-BAMBER, 2004). A senescência dos perfilhos decorre principalmente da competição por radiação (BEZUIDENHOUT et al., 2003) e, acentua-se quando 70% da radiação é interceptada pelo dossel vegetativo (INMAN-BAMBER, 2004), características observada por meio do IAF.

O terceiro estágio de perfilhamento, caracterizado pela estabilização do número de perfilhos, ocorreu a partir de abril de 2013. Em junho, constatou que o perfilhamento dos T2EF, T3ENf e T4AF, foi superior em 1,13 perf. m⁻², em relação ao T1NI e T5ANf. Este aumento de perfilho, proporciona um ganho de 13300 colmos produtivos por hectare, favorecendo a produção. Resultado similar foi evidenciado por Barbosa et al., (2013), que verificaram aumento na ordem de 13000 e 10000 perfilho ha⁻¹, nos ciclos da segunda e terceira cana-soca, respectivamente.

O comportamento da densidade de raiz no perfil do solo foi ligeiramente diferenciado entre os tratamentos. O cultivo não irrigado concentrou as raízes logo abaixo da linha de plantio até a profundidade de 0,30 m, com densidade de 0,60 g dm⁻³, e tendência de distribuição uniforme nas duas primeiras camadas (Figura 9A), este tipo de comportamento foi evidenciado por Sousa et al. (2013) ao avaliar a distribuição do sistema radicular de cultivo não irrigado.

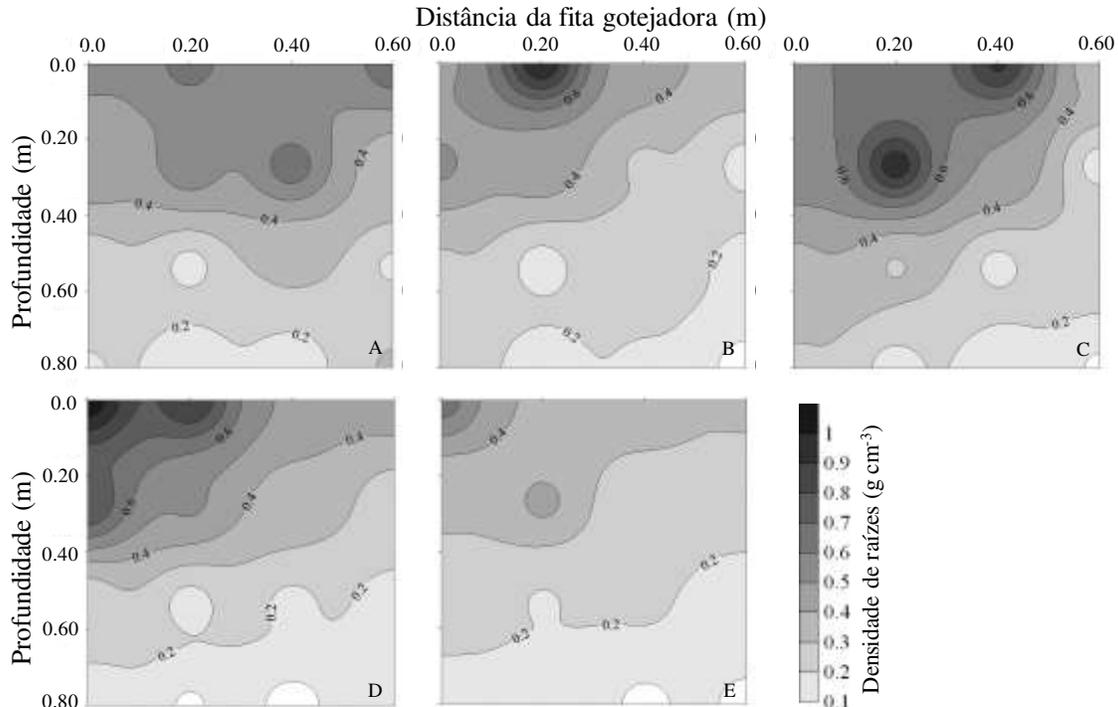


Figura 9 - Mapas da densidade de raiz ao longo do perfil do solo nos cultivos não irrigado (A), irrigado com EDT e fertirrigado (B) e sem fertirrigação (C), irrigado com ARS e fertirrigado (D) e sem fertirrigação (E).

No cultivo irrigado com EDT e fertirrigado, houve alta concentração das raízes próxima a linha de plantio, com densidade variando de 0,6 a 0,9 g dm⁻³, na camada de 0,0-0,20 m e, com a distribuição das raízes no perfil, com tendências de deslocar para a linha do gotejador (Figura 9B). O T3ENf, apresentou alta concentração de raízes a 0,40 m da linha de gotejo, com deslocamento para a linha de plantio, na profundidade 0,30 m, a densidade de raiz nesta região variou de 0,7 a 0,9 g dm⁻³.

Os tratamentos irrigados com ARS obtiveram comportamento análogo, possuindo as maiores concentrações de raiz na região da linha do gotejados e na camada de 0,20 m. Entretanto a densidade de raiz foi diferente entre esses tratamentos, o T4AF apresentou variação de 0,70 a 1,00 g dm⁻³ e o T5ANf de 0,30 a 0,60 g dm⁻³, na camada de 0,0-0,20 m acima da linha de gotejamento (Figura 9D-E).

Nos cultivos irrigados verifica-se tendências do sistema radicular a se deslocar para a região do bulbo molhado, diferentemente do não irrigado que obteve comportamento homogêneo no sentido horizontal do solo. Este comportamento ocorreu pois em sistemas irrigados e fertirrigados, as raízes tendem a acompanhar a umidade do solo e aplicação de

nutrientes (Basso et al., 2003; Zotarelli et al., 2009). Os tratamentos irrigados e com aplicação de N, apresentaram ganho na massa de raiz em relação ao T5ANf, o qual não houve aplicação de N. Otto et al. (2009) destacam o efeito da aplicação deste elemento, no aumento da zona radicular em cana-de-açúcar, com elevação na densidade de raízes próxima a região de aplicação de nitrogênio.

A porcentagem cumulativa do sistema radicular da cana-de-açúcar, ilustradas nas Figuras 10, revelou que a profundidade efetiva para a cana-de-açúcar nas condições do estudo, concentram até a profundidade de 0,60 m (ALVAREZ et al., 2000; FARIAS et al., 2008), com exceção do T4AF que obteve 80% das raízes até a profundidade de 0,40 m. Avaliando o efeito da aplicação de doses de EDT via IGS e cultivo não irrigado, Sousa et al. (2013) verificaram 80% das raízes da cana-de-açúcar até 0,40 m, com exceção da aplicação de 50% da lâmina requerida que proporcionou maior aprofundamento das raízes, com profundidade efetiva de 0,60 m.

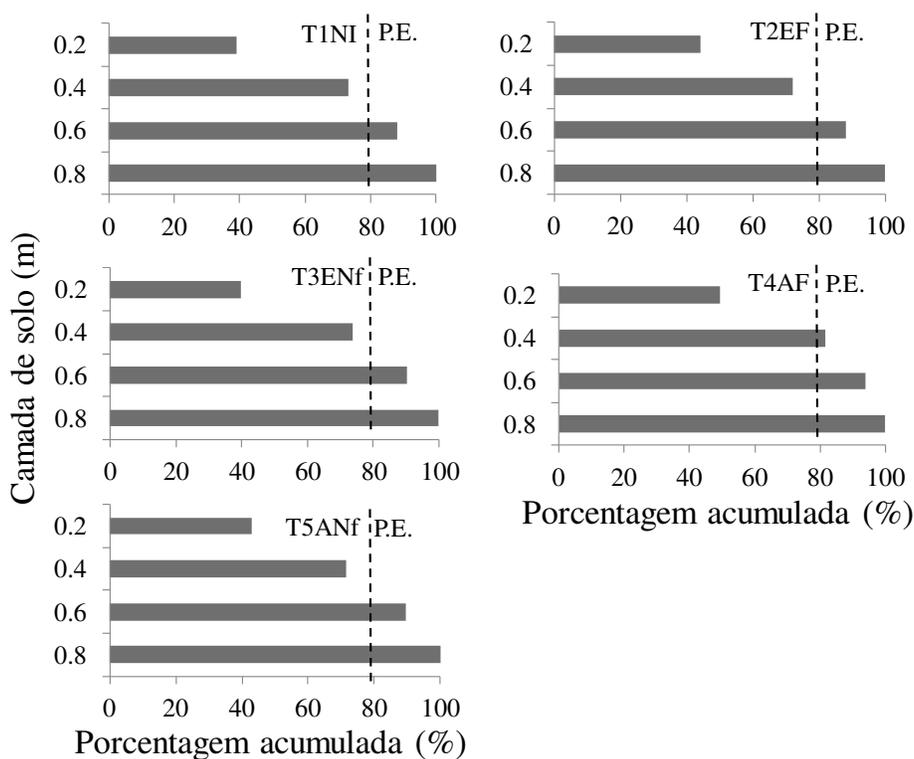


Figura 10 - Distribuição acumulada da porcentagem de raiz nas camadas avaliadas no perfil do solo nos cultivos não irrigado (T1NI), irrigado com esgoto e fertirrigado (T2EF), sem fertirrigação (T3ENf), irrigado com água de reservatório e fertirrigado (T4AF) e sem fertirrigação (T5ANf). Profundidade efetiva do sistema radicular (PE).

A distribuição do sistema radicular da cana-de-açúcar não foi afetada pela irrigação, diferindo do proposto por Smith et al. (2005) que observaram diferenças no desenvolvimento do sistema radicular da cana-de-açúcar em condições irrigada e não irrigada. Observou-se um baixo aprofundamento do sistema radicular, para a camada de 0,60-0,80 m (Figura 10). Nesta camada a concentração de raiz foi inferior a 10% do total explorado, corroborando com Farias et al (2008) e Sousa et al. (2013) ao irrigarem a cana-de-açúcar via gotejamento subsuperficial e pivô central, respectivamente.

O baixo aprofundamento do sistema radicular no T1NI pode ter ocorrido em virtude da adubação de cobertura, promovendo concentração do sistema radicular nas camadas superiores, conforme observado por Otto et al. (2009) ao aplicar doses de ureia em cobertura no cultivo de cana-de-açúcar em Latossolo Vermelho distrófico.

Os cultivos irrigados, especialmente com aplicação de água de reservatório, desloca as raízes para a região do bulbo molhado e a PE do sistema radicular da cana-de-açúcar irrigada com água de reservatório e fertirrigação complementar foi de 0,40 m, já nos demais tratamentos as raízes tiveram maior aprofundamento com a profundidade efetiva detectada a 0,60 m.

A análise de variância da estimativa da produção de colmos (EPC), revelou aumentos significativos dos tratamentos T2EF, T3ENf e T4AF em relação ao T1NI (Tabela 4). Esse resultado está de acordo com os obtidos por Wiedenfeld (2004); Dalri e Cruz (2008); Pires et al. (2014). Aplicando diferentes doses de efluente via gotejamento subsuperficial durante o ciclo da cana-planta, Leal et al. (2009a) obtiveram valores de EPC semelhantes aos observados nesta pesquisa, com o cultivo não irrigado obtendo a EPC próxima a 150 Mg ha^{-1} , e o cultivo irrigado com 100% da demanda hídrica se destacando, com produção de 240 Mg ha^{-1} .

Tabela 4- Análise de variância da estimativa de produção de colmos (EPC), porcentagem de sólidos solúveis (PSS), teor de sacarose do caldo (Pol), açúcar teórico recuperável (ATR) e rendimento de açúcar teórico recuperável (RA).

Tratamentos	EPC	PSS	Pol	ATR	RA
	Mg ha ⁻¹	brix	%	kg Mg ⁻¹	Mg ha ⁻¹
T1NI	161b	18,8 b	16,6 b	143b	22,9b
T2EF	235a	18,9 ab	17,1 ab	146ab	34,5a
T3ENf	238a	20,2 a	18,4 a	155a	36,7a
T4AF	222a	19,2 ab	17,0 ab	146ab	32,4a
T5ANf	210ab	19,8 ab	18,1 ab	153ab	32,1a
Teste de F	5,68*	3,22*	4,92*	4,09*	7,64*
C.V.	13,9	3,79	4,46	3,75	15,33

Médias seguidas pelas mesmas letras não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de significância, C.V., coeficiente de variação. Tratamento não irrigado (T1NI), irrigado com esgoto e fertirrigado (T2EF) e sem fertirrigação (T3ENf), irrigado com água ARS e fertirrigado (T4AF) e sem fertirrigação (T5ANf).

Os tratamentos T2EF e T3ENf apresentaram EPC de 235 e 238 Mg ha⁻¹, respectivamente, e observou altos valores de IAF ao longo do ciclo, beneficiando a interceptação da radiação e acúmulo de biomassa (MUCHOW et al., 1994; INMAMBAMBER, 2004). Foi evidenciado também, aumentos no número de perfilhos (13300 perf. ha⁻¹), contribuindo para a elevação da EPC destes tratamentos em relação ao T1NI. O adequado fornecimento hídrico, sem aplicação de nutrientes, não ocasiona aumentos significativos na EPC em relação ao cultivo não irrigado, com adubação em cobertura, conforme os resultados observado na Tabela 4, para os tratamentos T5ANf e T1NI.

Os valores médios da porcentagem de sólidos solúveis (PSS), teor de sacarose do caldo (Pol), foram adequados para a realização da colheita (Tabela 4), com os parâmetros qualitativos superiores ao mínimo recomendado para recebimento na unidades industriais, os quais são de 18 °Brix e 14,5% de Pol do caldo (FERNANDES, 2003; CONSECA, 2006). Destaca-se que a maturação da cana-de-açúcar ocorreu em condições favoráveis, como redução da temperatura média do ar, déficit hídrico no solo, paralisação do fornecimento de N e redução da radiação e luminosidade (LEGENDRE, 1975; DU et al. 1998; GLAZ e GILBERT, 2006; CARDOZO e SENTELHAS, 2013). Estudo realizado por Scarpari e Beauclair (2009) indica que a temperatura variando de 20 a 10°C ativa positivamente o processo de maturação, sem causar danos pelo frio. Por meio da Figura 3, observa-se que a temperatura média do ar, nesta fase, esteve abaixo dos 20°C, favorecendo a concentração de sacarose.

A qualidade tecnológica da cana-de-açúcar foi alterada pela adoção do tratamento T3ENf em relação ao cultivo não irrigado, havendo incrementos significativos na ATR (Tabela 4). O menor desenvolvimento vegetativo da cana-de-açúcar submetida no T1NI, reduz a produção de fotoassimilados, como frutose e glicose (DU et al., 1998), e a capacidade de armazenagem desses monossacarídeos, devido a redução na biomassa de colmos (MUCHOW et al., 1996). O resultado obtido pelo T3ENf, ocorreu devido ao alto valor de Pol, apresentando extração teórica de 12 kg de açúcar por tonelada de colmo, a mais que o cultivo não irrigado. Os demais tratamentos não apresentaram diferenças significativas da ATR em relação ao T1NI, conforme observado também para PSS e Pol.

Em consequência dos bons níveis de EPC e ATR, o rendimento de açúcar teórico recuperável (RA) foi alto entre os tratamento irrigados, diferindo significativamente do cultivo não irrigado (Tabela 4). Carvalho et al. (2009) avaliando o rendimento de açúcar em cultivos manejados com diferentes lâminas de água no solo, relataram que o rendimento de açúcar foi crescente com o aumento dos níveis de água. Deon et al. (2010) destaca que a elevação do RA é consequência, principalmente, do aumento da produção de colmos. O rendimento de açúcar do T3ENf foi 13,8 Mg ha⁻¹ superior ao obtido T1NI, ilustrando benefícios da irrigação de EDT na cana-de-açúcar.

Conclusão

O desenvolvimento da parte aérea, área foliar por perfilho e índice de área foliar, foram alterados pela aplicação do esgoto doméstico tratado em relação ao cultivo não irrigado e irrigado com água de reservatório sem adubação complementar.

A aplicação do esgoto doméstico tratado e da água de reservatório complementada com fertilizantes minerais via gotejamento subsuperficial promoveram incrementos na estimativa de produção de colmos em relação ao cultivo não irrigado.

A adoção da irrigação por gotejamento subsuperficial, independentemente da qualidade da água ou aplicação de fertilizantes via fertirrigação, elevou o rendimento de açúcar teórico recuperável.

O cultivo irrigado com água de reservatório sem complementação nutricional apresentou menor densidade de raízes até a camada de 0,60 m, em relação aos cultivos irrigados e não irrigados e, a adoção da irrigação por gotejamento subsuperficial não alterou

a profundidade efetiva do sistema radicular da cana-de-açúcar em relação ao cultivo não irrigado, com exceção do tratamento irrigado com água de reservatório e fertirrigação complementar, que reduziu a profundidade efetiva.

Referencias Bibliográficas

ALLEN, R.G.; PEREIRA, L.S.; RAES, D.; SMITH, M. **Crop evapotranspiration – Gidelines for computing crop water requirements**. Irrigation and Drainage, Roma: FAO. 1998. 300p.

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

BARBOSA, E.A.A.; ARRUDA, F.B.; PIRES, R.C.M.; SILVA, T.J.A., SAKAI, E. Cana-de-açúcar fertirrigada com vinhaça via irrigação por gotejamento subsuperficial em três ciclos de cana-soca. **Rev. Bras. Eng. Agric.**, v.17, n.6, p.588-594, 2013.

BASSOI, L.H., HOPMANS, J.W., JORGE, L.A.C., ALENCAR, C.M., SILVA, J.A.M. Grapevine root distribution in drip and microsprinkler irrigation. **Sci. Agríc.**, v.60, n.2, p.377-387. 2003.

BELL, M.J.; GARSIDE, A.L. Shoot and stalk dynamics and the yield of sugarcane crops in tropical and subtropical Queensland, Australia. **Field Crops Research**, v.92, p.231–248, 2005.

BEZUIDENHOUT, C.N., O’LEARY, G.L.; SINGELS, A.; BAJIC, V.B.; A process based model to simulate changes in tiller density and light interception of sugarcane crops. **Agricultural systems**, v.76, p.589-599, 2003.

BLUM, J.; MELFI, A.J.; MONTES, C.R. Nutrição mineral da cana-de-açúcar irrigada com efluente de esgoto tratado, em área com aplicação de fosfogesso. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.47, p.593-602, 2012.

BOKHTIAR, S.M.; SAKURAI, K. Effect of application of inorganic and organic fertilizers on growth, yield and quality of sugarcane. **Sugar Tech**, v.7, n.1, p.33-37, 2005.

CAPUTO, M.M.; BEAUCLAIR, E.G.F.; SILVA, M.A.; PIEDADE, S.M.S. Resposta de genótipos de cana-de-açúcar à aplicação de indutores de maturação. **Bragantia**, v.67, n.1, p.15-23, 2008.

CARDOZO, N.P.; SENTELHAS, P.C. Climatic effects on sugarcane ripening under the influence of cultivars and crop age. **Sci. Agríc.**, v.70, n.6, p.449-456, 2013.

CARVALHO, C.M.; AZEVEDO, H.M.; DANTAS NETO, J.; FARIAS, C.H.A.; SILVA, C.T.S.; GOMES FILHO, R.R. Rendimento de açúcar e álcool da cana-de-açúcar submetida a diferentes níveis de irrigação. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias** v.4, n.1, p.72-77, 2009.

Conselho dos produtores de cana-de-açúcar, açúcar, álcool do Estado de São Paulo, CONSECANA. Manual de instruções. Piracicaba, 5ªed., 2006, 112p.

CORRELL, D.L. The role of phosphorus in the eutrophication of receiving waters: A review. **J. Environ. Qual.**, v.27, p.261-266, 1998.

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

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

DU, Y.C.; NOSE, A.; WASANO, K.; UCHIDA, Y. Responses to water stress of enzyme activities and metabolite levels in relation to sucrose and starch synthesis, the Calvin cycle and the C4 pathway in sugarcane (*Saccharum sp.*) leaves. **Aust. J. Plant Physiol.**, v.25, p.253-260, 1998.

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Rio de Janeiro: EMBRAPA Solos, 306p. 2006.

FERNANDES, A.C. **Cálculos na agroindústria de cana-de-açúcar**. 2.ed. Piracicaba: STAB, 2003. 240p.

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. **Rev. Bras. Eng. Agríc. Ambient.**, v.12, n.4, p.356-362, 2008.

FONSECA, A.F.; HERPIN, U.; PAULA, A.M.; VICTÓRIA, R.L.; MELFI, A.J. Agricultural use of treatment sewage effluents: Agronomic and environmental implications and perspective for Brazil. **Sci. Agric.**, v.64, n.2, p.194-209, 2007.

Food and agriculture organization, FAO. **Crop water information: Sugarcane**, 2013. Disponível em: <http://www.fao.org/nr/water/cropinfo_sugarcane.html> Acesso em: 11 fevereiro 2014.

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

FUJIWARA, M.; KURACHI, S. A. H.; ARRUDA, F. B.; PIRES, R. C. M.; SAKAI, E. A **técnica de estudo de raízes pelo método do trado**. Campinas: Instituto Agrônômico, 9p. 1994.

GIL, M.; RODRIGUEZ-SINOBAS, L.; JUANA, L.; SANCHEZ, R.; LOSADA, A. Emitter discharge variability of subsurface drip irrigation in uniform soils: effect on water-application uniformity. **Irrigation Science**, Amsterdam, v.26, p.451-458, 2008.

GLAZ, B.; GILBERT, R.A. sugarcane response to water table, periodic flood, and foliar nitrogen on organic soil. **Agron. J.**, v.98, n.616-621, 2006.

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

GOLDEMBERG J. Ethanol for a sustainable energy future. **Science**, v.315, p.808–810, 2007.

HEERDEN, P.D.R.; DONALDSON. R.A.; WATT, D.A.; SINGELS, A. Biomass accumulation in sugarcane: unravelling the factors underpinning reduced growth phenomena. **Journal of Experimental Botany**, v.61, n.11, p.2877–2887, 2010.

HERMANN, E.R.; CÂMARA; G.M. Um método simples para estimar a área foliar da cana-de-açúcar. **Revista da STAB**, Piracicaba, v. 17, p. 32-34, 1999.

INMAN-BAMBER, N.G. Automatic plant extension measurement in sugarcane in relation to temperature and soil moisture. **Field Crops Research**, v.42, p.135-142, 1995.

INMAN-BAMBER, N.G. Sugarcane water stress criteria for irrigation and drying off. **Field Crops Research**, v.89, p. 107-122, 2004.

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

Intergovernmental panel on climate change, IPCC. **Climate change 2007 - The Physical Science Basis**. Contribution of working group I to the fourth assessment report of the IPCC. Cambridge: Cambridge University Press, p.996, 2007.

KERN, J.; HELLEBRAND, H.J.; SCHOLZ, V.; LINKE, B. Assessment of nitrogen fertilization for the CO₂ balance during the production of poplar and rye. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v.14, p.1453-1460, 2010.

LAMM, F.R.; MANGES, H.L.; STONE, L.R.; KHAN, A.H.; ROGERS, D.H. Water requirement of subsurface drip-irrigated corn in northwest Kansas. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v.38, n.2, p.441-448, 1995.

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

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

LEGENDRE, B. L. Ripening of Sugarcane: Effects of Sunlight, Temperature, and Rainfall. **Crop Sci.**, v.15, p.349–352, 1975.

LUO, J.; QUE, Y.; ZHANG, H.; XU, L. seasonal variation of the canopy structure parameters and its correlation with yield-related traits in sugarcane. **The ScientificWorld Journal**, v.2013, p.1-12, 2013.

MUCHOW, R.C.; ROBERTSON, M.J. WOOD, A.W. Growth of sugarcane under high input conditions in tropical Australian. II. Sucrose accumulation and commercial yield, **Field Crops Research**, v.48, p.27-36, 1996.

MUCHOW, R.C.; SPILLMAN, M.F.; THOMAS, M.R. Radiation interception and biomass accumulation in a sugarcane crop grown under irrigated tropical conditions. **Australian Journal of Agricultural Research**, v.45, n.1, p.37-49, 1994.

OLIVEIRA, R.A.; DAROS, E.; ZAMBON, J.L.C.; WEBER, H.; IDO, O.T.; BESPALHOK-FILHO, J.C.; ZUFFELLATO-RIBAS, K.C.; KOEHELER, H.S. Crescimento e desenvolvimento de três cultivares de cana-de-açúcar, em cana-planta, no Estado de Paraná: taxas de crescimento. **Scientia Agrária**, v.6, n.2, p. 85-89, 2005.

OTTO, R.; FRANCO, H. C. J.; FARONI, C. E.; VITTI, A. C.; TRIVELIN, P. C. O. Fitomassa de raiz e parte aérea da cana-de-açúcar relacionada à adubação nitrogenada de plantio. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.44, n.4, p.398-405, 2009.

PIRES, R.C.M.; BARBOSA, E.A.A.; ARRUDA, F.B.; SAKAI, E.; SILVA, T.J.A. Effects of subsurface drip irrigation and different planting arrangements on the yields and technological quality of sugarcane. **J. Irrig. Drain. Eng.**, v.-, p.-, 2014.

ROBERTSON, M.J.; INMAN-BAMBER, N.G.; MUCHOW, R.C.; WOOD, A.W. Physiology and productivity of sugarcane with early and mid-season water deficit. **Field Crops Research**, v.64, p.211-227, 1999.

ROBERTSON, M.J.; WOOD, A.W.; MUCHOW, R.C. Growth of sugarcane under input conditions in tropical Australia. I. Radiation use, biomass accumulation and partitioning. **Field Crops Research**, v.48, p.11-25, 1996.

SCARPARI, M.S.; BEAUCLAIR, E.G.F. Physiological model to estimate the maturity of sugarcane. **Sci. Agric.**, v.66, n.5, p.622-628, 2009.

SILVA, A.L.C.; COSTA, W.A.J.M. growth and radiation use efficiency of sugarcane under irrigated and rain-fed conditions in Sri Lanka. **Sugar Tech**, v.14, n.3, p.247–254, 2012.

SIMÕES, M.S.; ROCHA, J.V.; LAMPARELLI, R.A.C. Spectral variables, growth analysis and yield of sugarcane. **Sci. Agric.**, v.62, n.3, p. 199-207, 2005.

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

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

THORBURN, P.J.; BIGGS, J.S.; ATTARD, S.J.; KEMEI, J. Environmental impacts of irrigated sugarcane production: Nitrogen lost through runoff and leaching. **Agricultural, Ecosystems and Environment**, v.144, p.1-12, 2011.

TZANAKAKIS, V.A.; PARANYCHIANAKIS, N.V.; ANGELAKIS, A.N. Nutrient removal and biomass production in land treatment systems receiving domestic effluent. **Ecological Engineering**, Amsterdam, v.35, p.1485-1492, 2009.

WIEDENFELD, B. Scheduling water application on drip irrigated sugarcane. **Agricultural Water Management**, v.64, n.2, p.169–181, 2004.

ZOTARELLI, L., SCHOLBERG, J.M., DUKES, M.D., MUÑOZ-CAPERNA, R., ICERMAN, J. Tomato yield, biomass accumulation, root distribution and irrigation water use efficiency on a sandy soil, as affected by nitrogen rate and irrigation scheduling. **Agricultural Water Management**, v.96, n.1, p.23-34. 2009.

CAPÍTULO II - Pegada hídrica da cana-de-açúcar irrigada com efluente de esgoto tratado via irrigação por gotejamento subsuperficial

Resumo

A aplicação de esgoto doméstico tratado (EDT), via irrigação por gotejamento subsuperficial (IGS), reduz a captação de água e o risco de poluição das águas, além de favorecer o aumento de produção da cana-de-açúcar, elevando a eficácia no uso da água para produção de colmos. A mensuração do consumo de água em diferentes sistemas de cultivo pode ser realizada utilizando a metodologia da pegada hídrica, que apresenta como vantagens a distinção das origens das águas e contabilização dos consumos direto e indireto. Desta forma o estudo objetivou avaliar a pegada hídrica da cana-de-açúcar irrigada com EDT e água de reservatório superficial (ARS) via IGS, com e sem complementação nutricional pela fertirrigação, e cultivo não irrigado. Para determinação da pegada hídrica, foi realizado o balanço hídrico, obtendo o consumo direto de água pela evapotranspiração de cultura para condições não padrão ($ET_{c_{aj}}$) e o volume percolado, que juntamente com o nitrato lixiviado abaixo da zona radicular, estimou-se o consumo indireto de água. Da $ET_{c_{aj}}$, foram estimados os componentes verdes, água de chuva consumida pela cultura, e o componente azul, água de irrigação. Com os valores de consumo direto e indireto e com a produção de colmos e rendimento de açúcar, estimou-se a pegada hídrica da cana-de-açúcar (PH_{cana}) em cada tratamento. A utilização da IGS na cana-de-açúcar reduziu a PH_{cana} , em decorrência da maior produção de colmos e economia no consumo de água. A economia de água nos cultivos irrigados ocorreu, principalmente, devido ao menor consumo de água oriundo do componente verde. Observou-se que os cultivos irrigados com EDT reduziu o consumo de água cinza, em decorrência da menor lixiviação de nitrato. A aplicação de EDT não ocasionou alteração na PH_{cana} quando confrontado ao cultivo irrigado com ARS.

Palavras chaves: Consumo de água; Lixiviação de nitrato, Balanço hídrico, Água residuária.

Introdução

O crescimento e a concentração populacional, juntamente com a maior demanda por bens e serviços, ocasiona expressivos aumentos no uso e poluição das águas, gerando conflitos, problemas sanitário e escassez de água para atender as demandas sociais (WHO, 2012) e ambientais. A agricultura é o principal setor consumidor de água, sendo responsável por 70%,

entretanto, as áreas irrigadas representam 18% das cultivadas e concebem 44% da produção agrícola (FAO, 2014). Neste cenário, faz-se necessário a busca por técnicas que elevem a eficiência no uso da água e propiciem o reuso, como, por exemplo, o uso do esgoto doméstico de maneira segura e controlada.

A aplicação de esgoto doméstico tratado (EDT) para suprimento hídrico das plantas proporciona o adequado desenvolvimento vegetal, não ocasionando detrimientos da produção (HAMODA, 1987; AL-HAMAIEDEH e BINO, 2010; TRAVIS et al., 2010), especialmente na irrigação por gotejamento (ORON, 1991). A irrigação com EDT apresenta a vantagem de fornecer nutrientes as plantas, com destaque para o nitrogênio, fósforo e enxofre (VAZQUEZ-MONTIEL et al., 1996; LEAL et al., 2009). Porém, cuidados devem ser tomados devido ao risco de contaminação do solo por elementos tóxicos, salinização e disseminação de patógenos que afetam a saúde do homem (BOND, 1998; AL-HAMAIEDEH e BINO, 2010).

Dentre as técnicas de irrigação com economia no consumo de água, se destaca a irrigação localizada, principalmente, a irrigação por gotejamento subsuperficial (IGS) (LAMM et al., 1995), pois irriga apenas a área de cultivo e, no caso da IGS, a água é aplicada diretamente na zona radicular, reduzindo as perdas por evaporação direta do solo e percolação profunda (AYARS et al., 1999; SKAGGS et al., 2004), além de apresentar alta uniformidade de aplicação (GIL et al., 2008), favorecendo o uso da fertirrigação (LAMM e TROOEN, 2003). A IGS apresenta a vantagem de melhorar a segurança na aplicação de águas residuária, reduzindo o risco de disseminação de patógenos, pois a aplicação é realizada diretamente na zona radicular, não havendo contato com a parte aérea das plantas e efeitos da deriva (CAMP, 1998). Entretanto, a utilização da IGS pode intensificar o risco de salinização do solo (ORON et al., 1999; HANSON et al., 2008).

O monitoramento do uso da água melhora a compreensão do efeito da introdução de novas técnicas sobre seu consumo e poluição, indicando para a sociedade os caminhos de produção com menor impacto social e ambiental. Dentre os indicadores de uso da água, o modelo da pegada hídrica (PH) é conveniente por considerar o seu consumo direto e indireto. Assim a PH é um indicador abrangente da apropriação dos recursos hídricos (HOEKSTRA et al., 2011) e caracteriza a sustentabilidade dos ambientes produtivos (ZHANG et al., 2013).

O conceito de pegada hídrica, introduzido por HOEKSTRA (2003), é definido como o volume de água utilizado direta e indiretamente para a produção de bens e serviços. O modelo

orienta os consumidores e usuários sobre o volume de água utilizado na produção, definindo as origens e identificando os gargalos referente ao uso da água (CHAPAGAIN e HOEKSTRA, 2011), possibilitando tomada de decisão coerente frente ao manejo da água.

O consumo direto, na produção vegetal, representa basicamente a água utilizada pelas plantas durante as fases fenológicas, caracterizada pela evapotranspiração da cultura (ET_c) (SIEBERT E DÖLL, 2010). Na agricultura, os componente do consumo direto são, o componente verde (C_{verde}), definido pela água da chuva que contribui para a umidade do solo (precipitação efetiva), e é em algum momento consumida pelas plantas, e, o componente o azul (C_{azul}) que representa a água captada de reservatório hídrico (superficial ou subsuperficial) utilizada na irrigação das culturas (CHAPAGAIN e ORR, 2009). O consumo indireto, componente cinza (C_{cinza}), é representado pelo volume de água necessário para assimilar e diluir os poluentes aplicados ou gerados durante as fases de produção, de tal forma que seus efeitos sejam neutralizados, não proporcionando riscos aos dependentes do recurso hídrico (HOEKSTRA et al, 2011).

No modelo da pegada hídrica não há entradas para a contabilização das águas residuárias incorporadas no processo produtivo, isto ocorre pois os efluentes quando são reutilizados, não afetam diretamente a disponibilidade de água para os ecossistemas. A prática do reuso provavelmente reduzirá a pegada hídrica do sistema produtivo, por reduzir ou eliminar o C_{azul}. O efeito da aplicação de EDT na agricultura está condicionado ao componente cinza, devido as possíveis cargas de poluentes carreadas pelos efluentes.

A pegada hídrica é função do volume de água consumido pela produção de determinado produto. Desta forma, o aumento de produtividade proporcionado pela IGS (PIRES et al., 2014) pode reduzir a PH_{cana}. Além de reduzir a lixiviação do nitrato (ZOTARELLI et al., 2009) por elevar a eficiência na aplicação dos adubos.

As avaliação da pegada hídrica na produção de cana-de-açúcar são generalistas, pois utilizam valores médios de produção, dos fatores climáticos, da perda de nitrato e do consumo de água via irrigação (MEKONNEM e HOEKSTRA, 2011; GERBENS-LEENES e HOEKSTRA, 2012; SCHOLTEN, 2012), assim os resultados deste trabalhos indicam maior PH_{cana} em cultivos irrigados. Entretanto, estudo realizado na região Nordeste do Brasil com a IGS e considerando a mesma perda de nitrato entre os cultivos, sugere uma menor PH_{cana} em relação aos cultivos tradicionais sem irrigação (ANDRADE Jr. et al., 2012).

Neste contexto, a pesquisa tem como objetivo avaliar a pegada hídrica e a perda de nitrato por lixiviação no cultivo de cana-de-açúcar irrigada com EDT e água de reservatório superficial (ARS) via gotejamento subsuperficial, com e sem adição de fertilizantes minerais via fertirrigação, na região Centro-Sul do Brasil.

Material e Métodos

Para o cálculo da pegada hídrica, realizou inicialmente o balanço hídrico de entrada-saída de água no agroecossistema, permitindo a distinção dos componentes verde e azul (SIEBERT e DÖLL, 2010) e a estimativa dos valores percolados. As entradas de água no sistemas foram, as precipitações infiltradas (P_i) e as irrigações (I). As saídas foram contabilizadas pela evapotranspiração da cultura (ETc) e percolação abaixo da zona radicular (Perc). Assumiu-se que os escoamentos laterais de entrada e saída se anularam e toda a água precipitada que permeou o dossel vegetativo, infiltrou no solo. A área apresenta baixa declividade (máxima de 3%) e está localizada entre dois camalhões. O efeito da ascensão capilar foi desconsiderado devido a alta profundidade do lençol freático. Como área de controle para avaliação da pegada hídrica considerou-se a camada do solo de 0,0-1,00 m.

A variação no armazenamento da água no solo (ΔARM) foi estimada pela lâmina de água disponível (LAD) e considerando as entradas e saídas de água no perfil explorado pelo sistema radicular. Desta forma, a ΔARM foi obtida por meio da equação simplificada entre as entradas e saídas (Equação 1).

$$\Delta ARM = LAD + (P_i + I) - (ETc + Perc) \quad (\text{Eq. 1})$$

A precipitação infiltrada (P_i) foi determinada pela diferença entre o total precipitado e a lâmina retida pelo dossel vegetativo (PRUSKI et al., 2001). A lâmina retida foi estimada por meio da Equação 2, proposta por Ehlers (1989), a qual determina a máxima interceptação da chuva pela cobertura vegetal (ICV) utilizando o índice de área foliar (IAF).

$$ICV = 0,932 + 0,4999IAF + 0,0057IAF^2 \quad (\text{Eq. 2})$$

A LAD foi determinada por meio da capacidade total de água no solo (CTA), a qual representa a lâmina de água que o solo suporta até a capacidade de campo, expressa em mm. Para tanto, considerou que no primeiro dia do experimento a LAD é igual a CTA, ou seja, o solo estava na capacidade de campo. A CTA foi obtida utilizando parâmetros físico-hídrico do solo e delimitando o perfil explorado pelo sistema radicular da cana-de-açúcar. Para tanto aplicou a Equação 3 para obtenção da CTA,mm.

$$CTA = \left(\frac{\theta_{cc} - \theta_{pmp}}{10} \right) \times Z \quad \text{Eq. 3)}$$

Onde, θ_{cc} e θ_{pmp} , representam a umidade do solo ($\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$) na capacidade de campo e ponto de murcha permanente, respectivamente; Z a profundidade efetiva do sistema radicular em cada estágio de desenvolvimento (mm).

A profundidade efetiva do sistema radicular foi crescente ao longo do ciclo de cultivo, e ponderou o valor máximo de 0,60 m, conforme informações obtidas no Capítulo I deste estudo.

A evapotranspiração da cultura (ETc) foi obtida seguindo a metodologia proposta por Allen et al. (1998). A evapotranspiração da cultura foi estimada para condições não padrão (ETc_{aj}) (Equação 4), relacionando a evapotranspiração de referência (ETo) com o coeficiente de cultura basal ajustado (K_{cb aj}) e o coeficiente de umidade do solo (Ks).

$$ETc_{aj} = ETo \times (K_{cb aj} \times Ks) \quad \text{(Eq. 4)}$$

A ETo foi estimada utilizando as informações climatológicas coletadas da estação meteorológica de CEPAGRI, localizada a 300 m da área experimental, utilizou-se o modelo de Penman-Monteith (Equação 5), para estimar a ETo.

$$ETo = \frac{0,48\Delta (Rn - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma (1 + 0,3u_2)} \quad \text{(Eq. 5)}$$

Onde ETo, evapotranspiração de referência (mm dia^{-1}); Rn, radiação líquida sobre a superfície da cultura ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$); G, densidade do fluxo de calor do solo ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$); T, temperatura do ar a 2 m de altura ($^{\circ}\text{C}$); u_2 , velocidade do vento a 2 m de altura (m s^{-1}); e_s , pressão

de saturação de vapor (kPa); e_a , pressão atual de vapor (kPa); $e_s - e_a$, déficit de pressão de saturação de vapor (kPa °C⁻¹); Δ , tangente à curva de saturação de vapor (kPa °C⁻¹) e γ , constante psicrométrica (kPa °C⁻¹).

Como a cana-de-açúcar possui rápido desenvolvimento e cobertura do solo, e o sistema de irrigação utilizado foi o gotejamento subsuperficial, não havendo molhamento da superfície do solo, foi utilizado o K_{cbaj} , conforme Equação 6 (ALLEN et al., 1998), este coeficiente representa principalmente o efeito da transpiração, assim, foram aplicadas informações referentes a cobertura vegetal, utilizando os índices de área foliar (IAF), obtidos durante as fases de desenvolvimento da cana-de-açúcar (Capítulo I, Figura 6).

$$K_{cb\ aj} = K_{c\ min} + (K_{cb\ full} - K_{c\ min})(1 - \exp[-0,7IAF]) \quad (\text{Eq. 6})$$

Onde $K_{cb\ aj}$ representa o valor ajustado do coeficiente basal (K_{cb}); $K_{cb\ full}$ é o máximo coeficiente basal estimado para as condições de clima e vegetação no dia, determinado por meio da Equação 7, e $K_{c\ min}$ representa o coeficiente mínimo do coeficiente de cultura (K_c) para solos descobertos, utilizado o valor de 0,20 para cana-de-açúcar (ALLEN et al. 1998).

$$K_{cb\ full} = K_{cb(tab)} + [0,04(u_2 - 2) - 0,004(UR_{min} - 45)]\left(\frac{h}{3}\right)^{0,3} \quad (\text{Eq. 7})$$

Onde, $K_{cb(tab)}$, representa o valor de K_{cb} tabelado para as fases média, caracterizada pelo intenso crescimento vegetativo, e na fase final de cultivo, disponível em Allen et al (1998). Os parâmetros u_2 e UR_{min} , representam a velocidade do vento a 2 m de altura e a umidade relativa mínima diária, respectivamente. O parâmetro "h" representa a altura da cana-de-açúcar mensurada em campo, a cada 30 dias. A altura diária foi estimada aplicando o ganho médio diário no período entre duas mensurações biometrias, ao longo de todo ciclo de cultivo da cana-de-açúcar (Figura 7, Capítulo I).

A estimativa do coeficiente de umidade do solo (K_s), que representa o efeito da redução da umidade do solo sobre a capacidade da planta em absorver água, foi realizada aplicando o modelo logarítmico (Equação 8) proposto por Bernardo et al., (2006).

$$K_s = \frac{\ln(LAD + 1)}{\ln(CTA + 1)} \quad (\text{Eq. 8})$$

Onde, LAD, lâmina de água disponível no solo (mm); CTA, capacidade total de água no solo (mm).

A determinação da pegada hídrica da cana-de-açúcar (PH_{cana}) e os seus componentes foram determinadas de acordo com Hoekstra et al. (2011). A PH_{cana} foi obtida do somatório das pegadas hídricas dos componentes verde, azul e cinza, conforme Equação 9.

$$PH_{cana} = PH_{azul} + PH_{verde} + PH_{cinza} \quad (\text{Eq. 9})$$

O consumo direto foi obtido pela evapotranspiração da cana-de-açúcar ($ET_{c_{aj}}$), separando desta a demanda hídrica do componente azul (DHC_{azul}) e verde (DHC_{verde}). A DHC_{azul} foi exclusiva dos tratamentos irrigados com ARS, e foi obtida pelo volume total aplicado. A irrigação com EDT não foi computada, pois sua aplicação não afeta diretamente o fluxo natural das águas, sendo originária de outras atividades antrópicas, local de contabilização desta água. Estimou-se a demanda hídrica do componente verde aplicando a Equação 10. Nos cultivos irrigados considerou-se que toda a água aplicada via irrigação, foi, em algum momento, consumida pela cultura, permitindo separar a DHC_{verde} e DHC_{azul} da $ET_{c_{aj}}$.

$$DHC_{verde} = 10 \times \sum_{d=1}^{dcc} ET_{verde} \quad (\text{Eq. 10})$$

Onde ET_{verde} representa a evapotranspiração de água verde. O fator "10" visa converter a lâmina de água (mm) para volume por hectare ($m^3 \text{ ha}^{-1}$). O somatório foi realizado ao longo do período de cultivo, desde o primeiro dia ($d=1$) até a colheita (dcc , representa a duração do ciclo de cultivo).

A demanda hídrica do componente cinza da pegada hídrica (DHC_{cinza}), foi determinado a partir da Equação 11, utilizando o nitrato como a fonte de poluição da água doce (Chapagain et al., 2006; Liu et al., 2011).

$$DHC_{cinza} = \frac{E_{fl}(C_{efl} - C_{nat})}{(C_{max} - C_{nat})} \quad (\text{Eq. 11})$$

A coleta do nitrato para análise foi realizada utilizando extratores de solução do solo alocados a 0,90 m de profundidade. No estudo foi considerado a profundidade de 0,60 m como efetiva do sistema radicular, desta forma, o nitrato abaixo desta camada não está disponível para as plantas e irá em algum momento contaminar os corpos hídricos.

A determinação da concentração do nitrato nas amostras de solução do solo (C_{efl}) foi realizada no Laboratório de Saneamento da FEAGRI, utilizando a técnica da espectrofotometria. Para o cálculo do DHC_{cinza} , determinou-se a concentração do nitrato na água do reservatório superficial (C_{nat}), a qual apresentou baixa variação durante o ano, com a concentração média de $0,3 \text{ mg L}^{-1}$. Utilizou-se o valor de 10 mg L^{-1} como referência para a concentração máxima (C_{max}), conforme recomendado pela Organização Mundial da Saúde (CHAPAGAIN et al., 2006). A descarga do efluente (Efl), representada pela percolação (Perc), foi determinada empregando o balanço hídrico (Equação 1). Porém, utilizando informações semanais, devido ao melhor ajuste na estimativa da Perc.

Os resultados obtidos para estimativa de produção de colmos, rendimento teórico de açúcar recuperável e pegada hídrica dos componentes verde, cinza e total, foram submetidas a análise de variância, com as médias comparadas entre si pelo teste de Tukey ($p > 0,05$).

Resultado e Discussão

Por meio da Tabela 5, observa-se que nos meses de novembro de 2012, e, de abril a maio de 2013 o volume irrigado foi alto, já nos meses de janeiro a março de 2013, o volume irrigado decaiu, especialmente nos tratamentos sem adubação complementar (T3ENf e T5ANf). A baixa lâmina de irrigação observada nos meses de janeiro e março ocorreu em virtude das chuvas, as quais foram superiores a E_{To} em 118 e 276 mm (Figura 3), nos tratamentos não fertirrigado, T3ENf e T5ANf, foram aplicados 1160 e $1126 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$.

Tabela 5 - Volume de efluente doméstico tratado (EDT) e água de reservatório superficial, irrigado nos tratamentos, mensalmente.

Meses	Out-12	Nov-12	Dez-12	Jan-13	Fev-13	Mar-13	Abr-13	Mai-13	jun-13	Total
Tratamentos	Volume Irrigado ($\text{m}^3 \text{ ha}^{-1}$)									
T2EF	0,0	298,4	150,0	115,0	167,5	148,1	333,8	338,9	91,7	1643,4
T3ENf	0,0	334,5	182,5	32,0	67,4	26,7	241,9	215,8	59,2	1160,9
T4AF	0,0	266,6	174,7	119,3	119,4	114,3	244,8	230,3	106,6	1375,9
T5ANf	0,0	324,4	127,0	44,1	92,6	27,3	219,1	227,5	64,6	1126,6

T2EF, Tratamento irrigado com EDT e fertirrigado; T3ENf, irrigado com EDT sem complementação nutricional; T4AF, irrigado com ARS e fertirrigado; T5ANf, irrigado com ARS sem complementação nutricional.

Nos tratamentos T2EF e T4AF, o volume irrigado foi superior a $100 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$, nos meses de janeiro e março, em virtude do uso da água para prática da fertirrigação, pois mesmo não havendo necessidade de reposição hídrica foi realizada a aplicação semanal dos nutrientes via fertirrigação. Ao final do ciclo foram aplicados 1644 e $1375 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ nos tratamentos T2EF e T4AF, respectivamente. Os volumes totais de água aplicados, via irrigação, nos tratamentos T4AF e T5ANf, representam a demanda hídrica do componente azul (DHC_{azul}).

Com os valores estimados diariamente da lâmina de água disponível no solo (LAD), precipitação infiltrada (PI) e com as lâminas de água aplicadas em cada evento de irrigação e valores semanais da lâmina percolada (Perc), foram confeccionados os mapas de balanço hídrico para cada tratamento, conforme apresentado nas Figura 11 A-E. Devido ao alto volume precipitado nas duas primeiras semanas de março, a lâmina percolada foi apresentada a cada três dias, para melhor visualização.

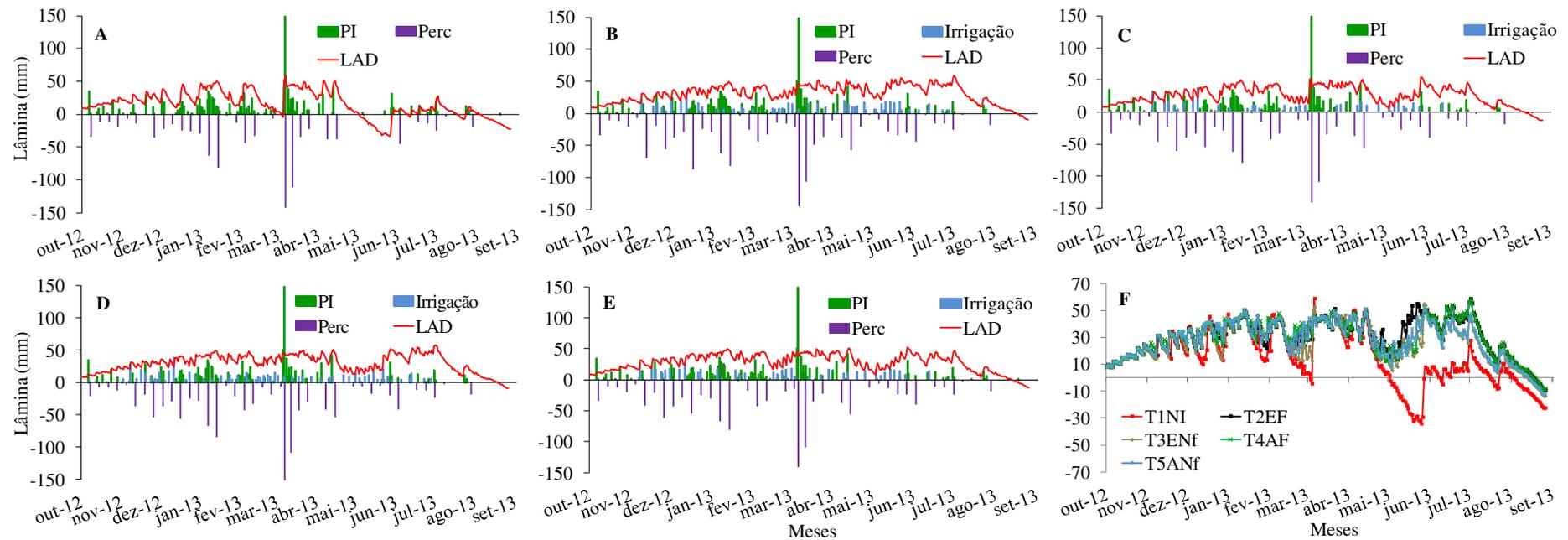


Figura 11 - Balanço de água no solo, com valores diários para precipitação infiltrada (PI), lâmina irrigada e de água disponível para cana-de-açúcar (LAD) e valores semanais da lâmina percolada (Perc) para o tratamento não irrigado (A) irrigado com EDT e fertirrigação complementar (B), irrigado com EDT sem complementação nutricional (C), irrigado com ARS e fertirrigação complementar (D) e irrigado com ARS sem complementação nutricional (E), e lâmina de água disponível entre os tratamentos (F), durante o período experimental.

A precipitação infiltrada (PI) apresentou baixa variação entre os tratamentos (Figura 11A-E), com o T1NI obtendo a menor interceptação de chuvas (99 mm), e opostamente o T2EF obteve a maior interceptação (120 mm), do total precipitado de 1340 mm. Desta forma, a retenção de chuva pelo dossel vegetativo apresentou variação de 7,4 a 9,0%. Os valores estão de acordo com estimado por Cabral et al. (2012), nos ciclos da primeira e segunda soca, os quais alcançaram retenção próxima a 7%, representando uma lâmina retida de 88 a 90 mm para uma precipitação total de 1353 mm. Ao final do estudo, as PI foram de 1241, 1219, 1225 1230 e 1241 mm, para os tratamentos T1NI, T2EF, T3ENf, T4AF e T5ANf, respectivamente.

O tratamento T1NI, obteve uma lâmina percolada (Perc) de 379 mm, sendo o menor valor médio entre os tratamentos (Figura 11A). A menor percolação do T1NI foi reflexo da baixa umidade no solo no momento das precipitações, necessitando de uma maior lâmina de água para preencher os poros do solo e, assim iniciar o processo de drenagem profunda. Nos tratamentos irrigados, o T4AF apresentou a Perc mais elevada, com valor médio ao final do ciclo de 763 mm, já o T3ENf obteve a menor Perc entre os tratamentos irrigados, com lâmina de 611 mm. Os tratamentos T2EF e T5ANf apresentaram valores similares, com média de 720 mm.

A variação da lâmina de água disponível (LAD) no solo em todos os tratamentos, estão ilustradas na Figura 11F. O T1NI apresentou maior variação na amplitude da LAD e frequentemente com valores abaixo aos cultivos irrigados. No período de maio 2013, o T1NI entrou em déficit hídrico acentuado e, posteriormente a LAD manteve-se baixa, com exceção da primeira semana de julho de 2013. Déficit hídrico de tal magnitude pode provocar efeitos deletérios na capacidade da planta em acumular biomassa, conforme observado por Inman-Barmber (2004).

Do balanço hídrico de entrada e saída foram determinados os consumos direto de água da cana-de-açúcar, estabelecido pela evapotranspiração de cultura fora das condições padrão ($ET_{c_{aj}}$) (Figura 12). Plotando os dados de $ET_{c_{aj}}$ é possível observar que o T1NI apresentou menor consumo de água (862,4 mm), refletindo o efeito do déficit hídrico sobre a capacidade da cana-de-açúcar em absorver água no solo. A $ET_{c_{aj}}$ entre os tratamentos fertirrigados e entre os não fertirrigados, foram semelhantes, com uma lâmina média de 1060 e 1020 mm, respectivamente.

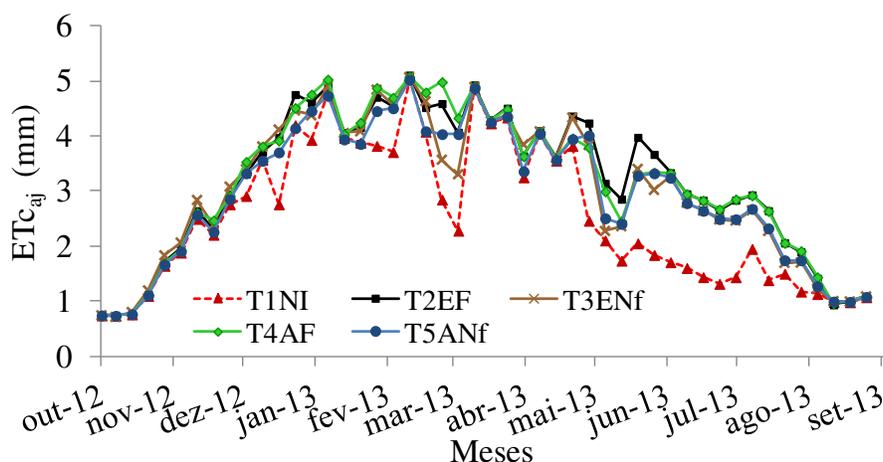


Figura 12 - Evapotranspiração de cultura para condições não padrão ($ET_{c_{aj}}$) estimada nos tratamentos não irrigado (T1NI), irrigado com EDT e fertirrigação complementar (T2EF), irrigado com EDT sem complementação nutricional (T3ENf), irrigado com ARS e fertirrigação complementar (T4AF) e irrigado com ARS sem complementação nutricional (T5ANf).

A lâmina de água consumida pela cana-de-açúcar submetida ao T1NI, foi 200 mm inferior a estimada para o T2EF. Entretanto, como o consumo direto de água no T1NI é originária basicamente do C_{verde} e, nos cultivos irrigados com EDT não é realizado o comupto do efluente. Com base neste resultado, não foi possível afirmar que o T1NI apresentou menor pegada hídrica oriunda do consumo direto. Desta forma, desmembrou-se a participação das águas de diferentes origens na composição da $ET_{c_{aj}}$ (Figura 13), determinando assim a lâmina evapotranspirada do C_{verde} .

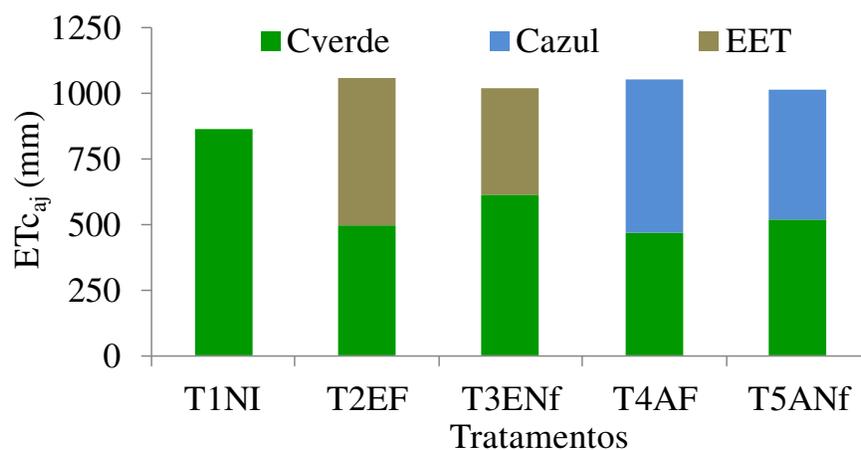


Figura 13 - Origem das água da evapotranspiração de cultura para condições não padrão ($ET_{c_{aj}}$) estimada nos tratamentos não irrigado (T1NI), irrigado com EDT e fertirrigação complementar (T2EF) e sem complementação nutricional (T3ENf), irrigado com ARS e fertirrigação complementar (T4AF) e sem complementação nutricional (T5ANf).

Posteriormente ao desmembramento da $ET_{c_{aj}}$, constatou-se que o tratamento não irrigado apresentou a lâmina ET_{verde} de 862 mm, correspondendo a um demanda hídrica do componente verde (DHC_{verde}) de $8620 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$. O tratamento T4AF obteve a menor DHC_{verde} , com volume estimado em $4665 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$, sendo inferior ao calculado para o T1NI e T3ENf em 85 e 31%, respectivamente. A maior DHC_{verde} entre os cultivos irrigados foi constatada no T3ENf, com valor estimado em $6147 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$. No T2EF e T5ANf, a DHC_{verde} foi de 4989 e $5201 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$, respectivamente.

A dinâmica do nitrato abaixo da zona radicular da cana-de-açúcar, profundidade de 0,90 m, apresentou comportamento distinto entre o tratamentos não irrigado e os irrigados. No tratamento T1NI, após a adubação em janeiro de 2012, o teor de nitrato elevou-se rapidamente, atingindo o valor médio próximo a $3,51 \text{ mg L}^{-1}$ (Figura 14), concomitantemente neste período foram verificadas intensas percolações (Figuras 11A), acarretando em perdas acentuadas de NO_3^- durante a estação chuvosa.

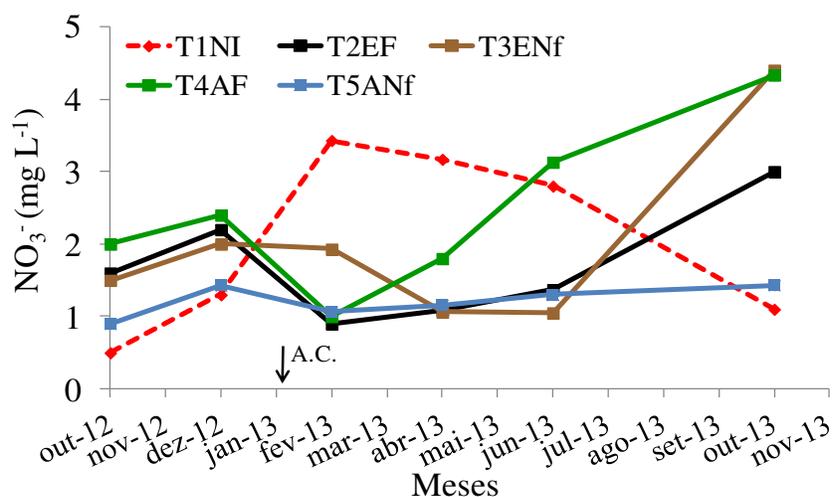


Figura 14 - Lixiviação de nitrato (NO_3^-) na profundidade de 0,9 m, nos tratamentos não irrigado (T1NI), irrigado com EDT e fertirrigado (T2EF) e sem complementação nutricional (T3ENf), irrigado com ARS e fertirrigado (T4AF) e sem complementação nutricional (T5ANf).

*A.C., Época da adubação de cobertura.

Ao final do ciclo de cultivo, a perda de nitrato no T1NI foi estimada em $11,03 \text{ Kg ha}^{-1}$ de NO_3^- (Tabela 6). Ao analisar as perdas de NO_3^- por lixiviação em diferentes localidades no Estado de Nebraska, EUA, Elrashidi et al. (2005) verificaram que em áreas agricultáveis a taxa de lixiviação do NO_3^- foram da ordem de $1,06$ a $8,36 \text{ Kg ha}^{-1} \text{ ano}$ e, relatam a textura do solo e o volume precipitado como principais fatores edafoclimáticos de influenciam na

lixiviação do nitrato. A perda do T1NI representou 9,2% do N total aplicado no T1NI, valor próximo dos citados por Chapagain et al. (2006) quando analisaram a pegada hídrica da produção de algodão e Aldaya e Hoekstra (2010) para a produção de cereais e tomates, que utilizaram o nitrato no cálculo do DHC_{cinza} , os quais citam uma perda média de 10% do N aplicado em cobertura.

Tabela 6 - Estimativa total de nitrato perdido em profundidade (ENP) e demanda hídrica do componente cinza da pegada hídrica (DHC_{cinza}).

Tratamentos	T1NI	TEF	T3ENf	T4AF	T5ANf	Teste F	C.V.	Média geral
	kg ha ⁻¹ de NO ₃ ⁻							
ENP	11,45 a	3,23 b	2,98 b	5,30 ab	1,85 b	4,96*	61,4	4,74
DHC_{cinza}	1253 a	602 b	635 b	852 ab	429 b	4,88 *	53,3	756

Médias seguidas pelas mesmas letras não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de significância. T1NI, tratamentos não irrigado; T2EF, irrigado com EDT e fertirrigação complementar; T3ENf, irrigado com EDT sem complementação nutricional; T4AF, irrigado com ARS e fertirrigação complementar; e T5ANf, irrigado com ARS sem complementação nutricional. C.V., coeficiente de variação.

Nos cultivos irrigados, observa-se incremento no teor de NO₃⁻ no T4AF após fevereiro de 2013 (Figura 14), quando houve aumento na dose de fertilizantes nitrogenados via fertirrigação, em decorrência da maior exigência nutricional pela cana-de-açúcar, durante a fase de crescimento (HAAG, 1987). Este incremento ocorre também pela aplicação de fertilizantes durante a estação chuvosa e de elevado volume drenado (Figura 11), o que contribui para a percolação do nitrato para as camadas mais profundas do solo. Na fase final do ciclo, o valor estimado de NO₃⁻ foi elevado (Wu et al., 1997), com média próxima a 4,13 mg L⁻¹, maior valor médio observado entre os tratamentos. Entretanto, nesta fase a percolação foi reduzida (Figura 11C), acarretando em baixas perdas de nitrato. Ao final do ciclo, a lixiviação de NO₃⁻ foi da ordem de 5,4 kg ha⁻¹, a maior entre os cultivos irrigados e não diferindo do T1NI (Tabela 6).

Os tratamentos irrigados com EDT apresentaram comportamento semelhante, com o T3ENf apresentando maior concentração de nitrato em relação ao T2EF, nas análises realizadas em janeiro e na estimativa realizada no final do ciclo. Nestes tratamentos a perda de nitrato foi de 2,72 e 2,82 kg ha⁻¹ para o T2EF e T3ENf, respectivamente (Tabela 6). A menor variação de NO₃⁻ ocorreu no T5ANf, o qual apresentou valores máximo e mínimo de 1,5 e 0,9 mg L⁻¹ ao longo do ciclo, com uma perda estimada em 1,85 kg ha⁻¹ de NO₃⁻, a mais baixa entre todos os tratamentos.

Com os valores de nitrato lixiviado abaixo da zona radicular (Figura 14) e lâmina de água percolada (Figuras 11A-E), estimou a DHC_{cinza} . Por meio da Tabela 6, observa-se que ao final do ciclo o T1NI apresentou maior volume de água necessário para diluir os poluentes, com DHC_{cinza} de $1252 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$, e diferiu significativamente dos cultivos irrigados com EDT e ARS sem fertirrigação. Conforme observado para o nitrato total perdido, o tratamento T4AF apresentou maior valor DHC_{cinza} entre os cultivos irrigados ($852 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$), não diferindo de nenhum tratamento.

Por meio dos resultados obtidos na Tabela 6, infere-se que a aplicação de EDT, com a qualidade ilustrada na Tabela 1, ocasiona baixo impacto no componente cinza da pegada hídrica, indicando baixa poluição quando o nitrato é avaliado como poluente principal, favorecendo a adoção da IGS com EDT.

O cultivo não irrigado apresentou elevada demanda hídrica para produção de cana-de-açúcar (DHP_{cana}) em relação aos demais tratamentos, com a demanda de água média de $9872 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ (Figura 15). A redução da DHP_{cana} dos cultivos irrigados, ocorre em virtude do baixo volume de água aplicado, em consequência da IGS molhar apenas uma faixa do solo para suprimento da lâmina necessária e evitar perda de água por evaporação direta do solo, reduzindo a ET_c (HANSON et al., 1997).

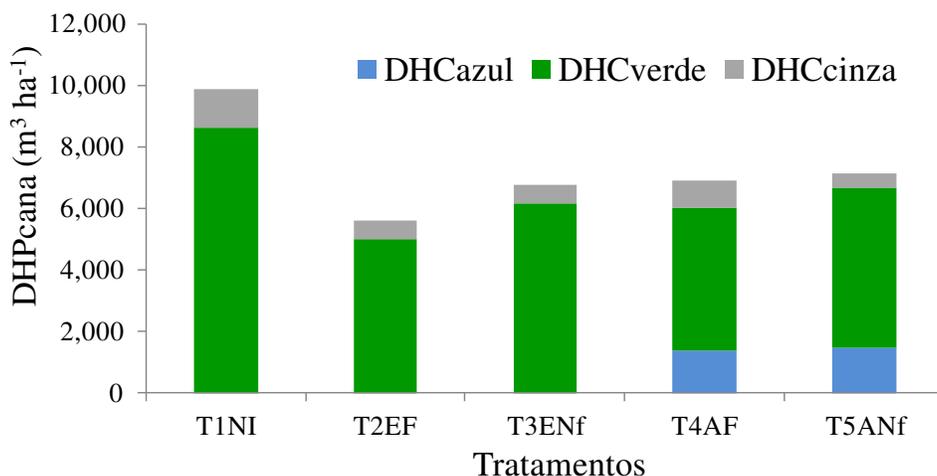


Figura 15 - Demanda hídrica da produção de cana-de-açúcar (DHP_{cana}), resultada das demandas hídricas dos componentes azul (DHC_{azul}), verde (DHC_{verde}) e cinza (DHC_{cinza}), nos tratamentos não irrigado (T1NI), irrigado com EDT e fertirrigação complementar (T2EF), irrigado com EDT sem complementação nutricional (T3ENf), irrigado com ARS e fertirrigação complementar (T4AF) e irrigado com ARS sem complementação nutricional (T5ANf).

Observa-se na Tabela 7 que a estimativa de produção de colmos (EPC) foi superior nos cultivos irrigados, com exceção do T5ANf, em relação ao T1NI. No tratamento T5ANf a aplicação de nutrientes foi mínima em decorrência da qualidade da água, reduzindo a capacidade da cana-de-açúcar expressar sua produção e, não diferindo significativamente do cultivo não irrigado, que recebeu quantidades adequadas de NPK via adubação de cobertura. Aumentos na produção de colmos pelo uso da fertirrigação via IGS na região Centro-Sul do Brasil é frequentemente detectada nos estudos com IGS na cana-de-açúcar (DALRI e CRUZ, 2008; PIRES et al., 2014).

Tabela 7 - Análise de variância da estimativa de produção de colmos (EPC), pegada hídrica verde (PH_{verde}), cinza (PH_{cinza}) e a pegada hídrica da produção de colmo (PH_{cana}).

Tratamentos	EPC	PHazul	PHverde	PHcinza	PHcana
	Mg ha ⁻¹				
T1NI	161 b	-	52,0 a	7,3 a	59,3 a
T2EF	235 a	-	21,3 b	2,7 b	24,0 b
T3ENf	238 a	-	24,2 b	2,4 b	26,6 b
T4AF	222 a	6,4	21,9 b	4,0 ab	32,3 b
T5ANf	210 ab	7,5	26,5 b	2,1 b	36,1 b
Teste de F	7.64*	-	11,8*	4,81*	11,9*
C.V.	15.33	-	22,3	45,5	19,7
Média Geral	31.7	-	29,2	3,70	35,7

Médias seguidas pelas mesmas letras não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de significância. T1NI, tratamentos não irrigado; T2EF, irrigado com EDT e fertirrigação complementar; T3ENf, irrigado com EDT sem complementação nutricional; T4AF, irrigado com ARS e fertirrigação complementar; e T5ANf, irrigado com ARS sem complementação nutricional. C.V., coeficiente de variação.

A pegada hídrica da cana-de-açúcar (PH_{cana}), nos cultivos irrigados, foi inferior a estimada no T1NI, independentemente da qualidade da água, com as reduções na PH_{cana} variando na ordem de 35,3 a 23,1 m³ Mg⁻¹, para os tratamentos T2EF e T5ANf, respectivamente (Tabela 7). Os resultados confirmam a proposição do sistema de irrigação por gotejamento subsuperficial em reduzir a pegada hídrica da cana-de-açúcar.

Os principais fatores responsáveis pela redução da PH_{cana} , foram, o aumento na EPC, a redução na DHC_{verde} e de maneira menos impactante as reduções observada na DHC_{cinza} (Figura 15). Em estudo com a cana-de-açúcar irrigada, via gotejamento subsuperficial, Andrade Jr. et al. (2012), observaram efeito similar ao obtido neste estudo, e por meio dos resultados apresentados pelos autores, fica evidente o efeito da IGS em reduzir a PH_{cana} , devido ao aumento na produção e reduções da DHC_{verde} .

Avaliando a PH da cana-de-açúcar utilizando informações da FAOSTAT, no período de 1998 a 2007, e calculando a ETc segundo (ALLEN et al., 1998) em alta resolução espacial, Mekonnen e Hoekstra (2011) verificaram que a PH_{cana} em termos globais foi de $210 \text{ m}^3 \text{ Mg}^{-1}$. Em relação aos cultivos irrigados e não irrigados, os autores observaram consumo de 238 e $176 \text{ m}^3 \text{ Mg}^{-1}$, respectivamente, valores superiores aos estimados no presente estudo.

Se aplicando os valores de produção global, informados pelo FAOSTAT (2013), para área não irrigada ($58,7 \text{ Mg ha}^{-1}$), juntamente com a DHP_{cana} do tratamento não irrigado ($9872 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$), observa-se que a PH_{cana} (168 Mg ha^{-1}) é próxima aos estimados por Mekonnen e Hoekstra (2011), indicando que a redução da PH_{cana} no T1NI, em relação a média global, ocorreu pelo aumento da EPC, não pela redução da demanda hídrica na produção. Porém, se utilizarmos esta mesma aproximação para os cultivos irrigados, constata-se que o efeito da aplicação da IGS na PH_{cana} , é reflexo tanto do aumento da EPC quanto da redução da DHP_{cana} .

Atualmente, segundo Gerbens-Leenes e Hoekstra (2012), o Brasil apresenta PH_{cana} relativamente baixa, com valor próximo a $130 \text{ m}^3 \text{ Mg}^{-1}$, sendo o quarto país com menor PH_{cana} . Entretanto, os valores podem ser expressivamente reduzidos com o uso da IGS. Por meio dos resultados da EPC obtido neste estudo e nos realizados por Dalri e Cruz (2008); Barbosa et al. (2013); Pires et al. (2014), na região Centro-Sul do Brasil utilizando a IGS, observa-se alta capacidade da técnica em elevar a produção, com mínimo de volume irrigado, favorecendo a redução da PH_{cana} no Brasil.

Dos componentes da pegada hídrica, o azul (PH_{azul}), esteve presente apenas nos tratamentos T4AF e T5ANf, que apresentaram valor médio de 6,4 e $7,5 \text{ m}^3 \text{ Mg}^{-1}$, respectivamente (Tabela 7). Os valores referentes a água de irrigação tiveram uma participação de 21% da PH_{cana} , com valores máximo e mínimo, em ambos tratamentos, variando de 23% e 16%, respectivamente. As porcentagens da PH_{azul} estão próximas as estimadas por Mekonnen e Hoekstra (2011), que verificaram participação de 26%. Porém, ressalta que a PH_{azul} estimada em escala global foi da ordem de $57 \text{ m}^3 \text{ Mg}^{-1}$, valor extremamente acima dos obtidos neste estudo. Em termos globais, a irrigação por sulco é o principal método empregado na cana-de-açúcar, seguido pela aspersão (FAO, 2013), estes

métodos apresentam alto consumo de água quando comparado ao IGS (HANSON et al., 1997; LAMM et al., 2007), elevando a PH_{azul} da cana-de-açúcar.

Em estudo com a cana-de-açúcar irrigada via pivô central, utilizando diferentes porcentagens da ETo como manejo da irrigação (25 a 100%), na região Nordeste do Brasil, Albuquerque (2013), verificou que a PH_{azul} variou de 69,7 a 97,7 $m^3 Mg^{-1}$, representando de 50 a 61% da PH_{cana} . Constata-se que o efeito da irrigação na PH_{cana} , é fortemente influenciado pelo sistema e manejo da irrigação e condições climáticas.

Por meio da Tabela 8, observa-se a ocorrência de efeito significativo na pegada hídrica verde (PH_{verde}), com os tratamentos irrigados diferindo significativamente do T1NI ($p < 0.05$). A PH_{verde} dos tratamentos irrigados, apresentou valor médio de 23,5 $m^3 Mg^{-1}$, sendo inferior ao obtido pelo T1NI em aproximadamente 54%. Este resultado comprova que nas condições edafoclimáticas do estudo, a IGS possui capacidade de reduzir a PH_{verde} em cultivos de cana-de-açúcar. Efeito similar foi constatado no estudo desenvolvido por Andrade Jr. et al. (2012), na Região Nordeste do Brasil.

Nos tratamentos T4AF e T5ANf, a participação da PH_{verde} na pegada hídrica da cana foi de 68 e 73%, respectivamente. Esses valores estão abaixo do estimado nos demais tratamentos, os quais apresentaram porcentagem similar, sendo em média de 89%. Em relação aos valores referenciados por Mekonnen e Hoekstra (2011), a participação da PH_{verde} está acima da contribuição referenciada em áreas irrigadas, para valores globais (50%) e para a produção de cana-de-açúcar no Brasil (55%), avaliada por Scholten (2012). Este resultado indica que a PH_{cana} em sistemas irrigados por gotejamento subsuperficial, apresentam menor dependência da água captada de coleções hídricas, em relação ao demais sistemas, gerando assim ganhos ambientais.

Conforme relatado, o tratamento T1NI apresentou baixa EPC (Tabela 7) e maior DHC_{cinza} (Figura 14) quando confrontada aos cultivos irrigados, com exceção do T5ANf. Desta forma, a PH_{cinza} do T1NI foi alta (7,3 $m^3 Mg^{-1}$) e diferiu significativamente dos tratamentos irrigados, com exceção do T4AF. O resultado do T1NI foi próximo ao relatado por Scholten (2012), para a produção de cana-de-açúcar no Brasil, que utilizou valores médios obtidos no banco de dados da FAOSTAT de 2008, alcançaram um valor médio de 8 $m^3 Mg^{-1}$.

O tratamento T4AF apresentou valores intermediários, não diferindo de nenhum tratamento, com valor médio para a PH_{cinza} de $4,0 \text{ m}^3 \text{ Mg}^{-1}$. Já os tratamentos irrigados com EDT apresentaram valores próximos ao cultivo sem adição de N durante o ciclo de cultivo, sugerindo benefícios da utilização do esgoto, com as características obtidas neste ciclo (Tabela 1) em elevar a estimativa de produção de colmo e reduzir os impactos ambientais ocasionado pela adição do N na agricultura.

Em termos globais, os cultivos irrigados e não irrigados proporcionam médias similares de PH_{cinza} , com valores próximos a $13 \text{ m}^3 \text{ Mg}^{-1}$ (MEKONNEM e HOEKSTRA, 2011). Porém, ressalta que tais estimativas foram realizadas preconizando que 10% do N aplicado foi perdido e adotando a fertilização nitrogenada próxima de 80 kg ha^{-1} . No T2EF, aplicou quantidades satisfatória de N, ao longo do ciclo, entretanto a PH_{cinza} esteve abaixo dos valor médio global, sendo da ordem de $2,7 \text{ m}^3 \text{ Mg}^{-1}$, ressaltando os benefícios em reduzir os impactos ambientais ocasionado pela agricultura.

Conclusão

Os resultados deste estudo sugerem que nas condições edafoclimáticas, a cana-de-açúcar irrigada via gotejamento subsuperficial reduz a pegada hídrica da cana-de-açúcar em relação ao cultivo não irrigados, em resposta ao menor consumo de água e maior produção de colmos.

A cana-de-açúcar irrigada via gotejamento subsuperficial possui menor pegada hídrica dos componentes do consumo direto e indireto da água.

A aplicação de esgoto doméstico tratado, com e sem complementação nutricional, via irrigação por gotejamento subsuperficial reduz a lixiviação do nitrato em relação ao cultivo não irrigado com adubação de cobertura.

Referência Bibliográficas

ALBUQUERQUE, M.F. Medições e modelagem da pegada hídrica da cana-de-açúcar cultivada no Brasil. 2013, 40 f. **Dissertação** (Mestre em Meteorologia) - Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2013.

ALDAYA, M.M.; HOEKSTRA, A.Y. The water needle for Italians to eat and pizza. **Agriculture Systems**, v.103, p.351-360, 2010.

AL-HAMAIIEDEH, H.; BINO, M. Effect of treated grey water reuse in irrigation on soil and plants. **Desalination**, v.256, n.1-3, p.115–119, 2010.

ALLEN, R.G.; PEREIRA, L.S.; RAES, D.; SMITH, M. **Crop evapotranspiration – Guidelines for computing crop water requirements**. Irrigation and Drainage, Roma: FAO. 1998. 300p.

ANDRADE Jr.; BASTOS, E.A.; AGUIAR NETO, A.O.; BRAGA, D.L.; SILVA, M.E.; NOLETO, D.H. Agricultural water footprint of ethanol and sugar from sugarcane under fertigation production system. In: **International Conference of Agricultural Engineering**, Valência, Espanha, p.1-5, 2012. Disponível em: <http://cigr.ageng2012.org/images/fotosg/tabla_137_C0739.pdf> Acessado em: 11 outubro 2013.

AYARS, J.E.; PHENE, C.J.; HUTMACHER, R.B.; DAVIS, K.R.; SCHONEMAN, R.A.; VAIL, S.S.; MEAD, R.M. Subsurface drip irrigation of row crops: a review of 15 years of research at the Water Management Research Laboratory. **Agricultural Water Management**, v.42, n.1, p.1-27, 1999.

BARBOSA, E.A.A.; ARRUDA, F.B.; PIRES, R.C.M.; SILVA, T.J.A., SAKAI, E. Cana-de-açúcar fertirrigada com vinhaça via irrigação por gotejamento subsuperficial em três ciclos de cana-soca. **Rev. Bras. Eng. Agric.**, v.17, n.6, p.588-594, 2013.

BERNARDO, S.; SOARES, A.A.; MANTOVANI, E.C. **Manual de irrigação**. 8ª ed. Viçosa: UFV, Imprensa Universitária, 2006. 625p.

BOND, W.J. Effluent irrigation, an environmental challenge for soil science. **Australian Journal of Soil Research**, v.36, n.4, p.543-556, 1998.

CABRAL, O.M.R.; ROCHA, H.R.; GASH, J.H.; LIGO, M.A.V.; TATSCH, J.D.; FREITAS, H.C.; BRASILIO, E. Water use in a sugarcane plantation. **GCB Bioenergy**, v.4, p.555-565, 2012.

CAMP, C. R. Sugarcane drip irrigation: a review. **ASAE**, v.41, n.5, p.1353-1367, 1998.

CHAPAGAIN, A.K.; HOEKSTRA, A.Y. The blue, green and grey water footprint of rice from production and consumption perspectives. **Ecological Economics**, v.70, n.4, p.749-758, 2011.

CHAPAGAIN A.K, HOEKSTRA A.Y, SAVENIJE H.H.G, GAUTAM R. The water footprint of cotton consumption: an assessment of the impact of worldwide consumption of cotton products on the water resources in the cotton producing countries. **Ecological Economics**, v.60, n.1, p.186-203. 2006

CHAPAGAIN, A.K., ORR, S. An improved water footprint methodology linking global consumption to local water resources: a case of Spanish tomatoes. **Journal of Environmental Management**, v.90, n.2, p.1219-1228, 2009.

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

EHLERS, W. Transpiration efficiency of oat. **Agronomy Journal**, v.81, n.-, p.810-817. 1989.

ELRASHIDI, M.A.; MAYS, M.D.; FARES, A.; SEYBOLD, C.A.; HARDER, J. L.; PEASLEE, S. D.; Van NESTE, P. Loss of nitrate-nitrogen by runoff and leaching for agricultural watersheds. **Soil Science**, v.170, n.12, p.969-984, 2005.

Food and agriculture organization, FAO. **Water Use**, 2014. Disponível em: <http://www.fao.org/nr/water/aquastat/water_use/index.stm> Acesso em: 18 fevereiro 2014.

Food and agriculture organization, FAO. **Crop water information: Sugarcane**, 2013. Disponível em: <http://www.fao.org/nr/water/cropinfo_sugarcane.html> Acesso em: 11 fevereiro 2014.

GERBENS-LEENES, W.; HOEKSTRA, A.Y; MEER, T.H.V.D. The water footprint of bioenergy. **PNAS**, v.106, n.25, p.1-5, 2009.

GERBENS-LEENES, W.; HOEKSTRA, A.Y. The water footprint of sweeteners and bio-ethanol. **Environment International**, v.40, p.202-211, 2012.

GIL, M.; RODRIGUEZ-SINOBAS, L.; JUANA, L.; SANCHEZ, R.; LOSADA, A. Emitter discharge variability of subsurface drip irrigation in uniform soils: effect on water-application uniformity. **Irrigation Science**, v.26, p.451-458, 2008.

HAMODA, M.F. Effluent quality variations in relation to water reuse for irrigation. Journal of Environmental Science and Health. Part A: **Environmental Science and Engineering**, v.22, n.2, p.161-187, 1987.

HANSON, B.; HOPMANS, J.W.; ŠIMŮNEK, J. Leaching with subsurface drip irrigation under saline, shallow groundwater conditions. **Vadose Zone J.**, v.7, n.2, p.810-818, 2008.

HANSON, B.R.; SCHWANKL, L.J.; SCHULBACH, K.F.; PETTYGROVE, G.S. A comparison of furrow, surface drip, and subsurface drip irrigation on lettuce yield and applied water. **Agricultural Water Management**, v.33, p.139-157, 1997.

HERATH, I.; CLOTHIER, B.; GREEN, S.; HORNE, D.; SINGH, R.; MARSH, A.; BUCHANAN, A.; BURGESS, R. Measuring the grey-water footprint of potato production. In: **2nd New Zealand Life Cycle Assessment**, p.1-6, 2012. Disponível em: <http://www.massey.ac.nz/~flrc/workshops/12/Manuscripts/Herath_2012.pdf>, Acesso em 16 janeiro 2013.

HOEKSTRA, A. Y. **Virtual water trade**: Proceeding of the International Expert Meeting on Virtual Water. Delft: IHE, 248p., 2003.

HOEKSTRA, A. Y.; CHAPAGAIN, A. K.; ALDAYA, M. M.; MEDEIROS, M. M. **The water footprint assessment manual**: Setting the global standard. London: Earthscan., 205p., 2011.

INMAN-BAMBER, N.G. Sugarcane water stress criteria for irrigation and drying off. **Field Crops Research**, v.89, p. 107-122, 2004.

LAMM, F.R.; MANGES, H.L.; STONE, L.R.; KHAN, A.H.; ROGERS, D.H. Water requirement of subsurface drip-irrigated corn in northwest Kansas. **Transactions of the ASAE**, v.38, n.2, p.441-448, 1995.

LAMM, F.R.; TROOIJEN, T.P. Subsurface drip irrigation for corn production: a review of 10 years of research in Kansas. **Irrigation Science**, v.22, p.195-200, 2007.

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

LIU, C.; KROEZE, C.; HOEKSTRA, A.; GERBENS-LEENES, W. Past and future trends in grey water footprint of anthropogenic nitrogen and phosphorus inputs to major world rivers. **Ecological Indicators**, v.18, p.42-49, 2012.

MEKONNEN, M.M.; HOEKSTRA, A.Y. The green, blue and grey water footprint of crops and derived crop products. **Hydrol. Earth Syst. Sci.**, v.15, p.1577-1600, 2011.

ORON, G.; DEMALACH, Y.; HOFFMAN, Z.; MANOR, Y. Effluent reuse by trickle irrigation. **Water Science & Technology**, v.24, n.9, p.103-108, 1991.

PIRES, R.C.M.; BARBOSA, E.A.A.; ARRUDA, F.B.; SAKAI, E.; SILVA, T.J.A. Effects of subsurface drip irrigation and different planting arrangements on the yields and technological quality of sugarcane. **J. Irrig. Drain. Eng.**, v.-, p.-, 2014.

PRUSKI, F.F.; RODRIGUES, L.N.; SILVA, D.D. Modelo hidrológico para estimativa do escoamento superficial em áreas agrícolas. **Rev. Bras. Eng. Agríc.**, v.5, n.2, p.301-307, 2001.

SCHOLTEN, W. The water footprint of sugar and sugar-based ethanol. 2009. 146 f. Tese (Ph.D. in Water Engineering and Management) - Faculty of Engineering Technology, Civil Engineering and Management, University of Twente, Enschede, Holanda, 2009.

SIEBERT, S.; DÖLL, P. Quantifying blue and green virtual water contents in global crop production as well as potential production losses without irrigation, **J. Hydrol.**, v.384, p.198-207, 2010.

SKAGGS, T.H.; TROUT, T.J.; ŠIMŮNEK, J.; SHOUSE, P.J. Comparison of HYDRUS-2D simulations of drip irrigation with experimental observations, **J. Irrig. Drain. Eng.**, v.130, p.304-310, 2004.

TRAVIS, M.J.; WIEL-SHAFRAN, A.; WEISBROD, N.; ADAR, E.; GROSS, A. Greywater reuse for irrigation: Effect on soil properties, **Science of The Total Environment**, v.408, p.2501-2508, 2010.

VAZQUEZ-MONTIEL, O.; HORAN, N.J.; MARA, D.D. Management of domestic wastewater for reuse in irrigation. **Water Science and Technology**, v.33, n.10-11, 355-362, 1996.

WORLD HEALTH ORGANIZATION. **UN-water global annual assessment of sanitation and drinking-water (GLAAS) 2012 report**: the challenge of extending and sustaining services. Suécia:WHO Library, 2012, 101p.

WU, J.J.; BERNARDO, D.; MAPP, J.H.P.; GELETA, S.; TEAGUE, M.L.; WATKI-IS, K.B.; SABBAGH, G.J.; ELLIOTT, R.L.; STONE, J.F. An evaluation of nitrogen runoff and leaching potential in the High Plains. **J. Soil Water Cons.**, v.52, p.73-80. 1997.

ZHANG, G.P., HOEKSTRA, A.Y.; MATHEWS, R.E. Water Footprint Assessment (WFA) for better water governance and sustainable development, **Water Resources and Industry**, v.1-2, n-, p.1-6, 2013.

ZOTARELLI, L.; SCHOLBERG, J.M.; DUKES, M.D.; MUNOZ-CARPENA, R.; ICERMAN, J. Tomato yield, biomass accumulation, root distribution and irrigation water use efficiency on a sandy soil, as affected by nitrogen rate and irrigation scheduling. **Agricultural Water Management**, v.96, p.23-34, 2009.

CAPITULO III - Qualidade do solo cultivado com cana-de-açúcar irrigada com esgoto doméstico tratado via gotejamento subsuperficial

Resumo

O uso de efluentes urbanos para irrigação e suprimento nutricional de plantas constitui em prática fundamentada no desenvolvimento sustentável das cidades e do campo. Entretanto, o esgoto doméstico tratado (EDT) possui propriedade salino-sódica, e concentrações consideráveis de nutrientes e matéria orgânica em sua composição, podendo modificar as características e a qualidade do solo. Neste cenário, o estudo objetiva avaliar a qualidade do solo cultivado com cana-de-açúcar, irrigada com EDT e água de reservatório superficial (ARS), via gotejamento subsuperficial, com e sem complementação nutricional. A qualidade do solo foi determinada utilizando a metodologia proposta por Karlen e Stott (1994) e foram selecionados indicadores físicos, químicos e microbiológicos para composição das funções básica do solo. A qualidade do solo, de forma geral, foi alta entre os tratamentos (>0,85). Nas funções do solo constatou-se uma adequada capacidade do solo receber, distribuir, manter e fornecer água as plantas. A função de promover o adequado desenvolvimento radicular obteve o menor índice de qualidade do solo, especialmente nos tratamentos fertirrigados. Os cultivos fertirrigados apresentaram maior perda de qualidade nos indicadores relacionados a acidificação do solo, com aumento significativo na acidez potencial e redução do pH do solo em relação ao cultivo irrigado com água de reservatório sem complementação nutricional. A disposição do EDT com complementação nutricional ocasionou incrementos na condutividade elétrica em relação ao cultivo irrigado com água sem complementação nutricional e, elevou o teor de sódio e porcentagem de sódio trocável no solo para os tratamentos irrigados com água de reservatório e o não irrigado, porém os níveis obtidos foram baixos, não alterando a qualidade dos indicadores para o adequado uso do solo. A avaliação conjunta dos indicadores físicos, químicos e microbiológicos do solo, utilizando a metodologia proposto por Karlen e Stott (1994), permite afirmar que os tratamentos não ocasionaram alterações na qualidade do solo para sistema agrícola, no período de estudo e nas suas condições edafoclimáticas.

PALAVRAS CHAVES: Atributos do solo; Indicadores de qualidade, Microbiologia do solo, Efluente urbano.

Introdução

A disposição do esgoto doméstico tratado (EDT) é prática antiga (PARANYCHIANAKIS et al., 2006) e apresenta potencial de expansão, em consequência do crescimento populacional, que gera pressões sobre os recursos hídricos, tanto pela captação de água quanto pela disposição de poluentes carreados pelos efluentes urbanos. O crescimento populacional promove também uma maior demanda por produtos agrícolas, tornando imprescindível o desenvolvimento de técnicas que elevem a produção.

Os efluentes domésticos apresentam características salino-sódica e sua disposição no solo incrementa os teores de Na^+ e porcentagem de sódio trocável (AYERS e WESTCOT, 1999). Altos níveis de sódio no solo, eleva o potencial de desestruturação pela dispersão da argila (ALMEIDA NETO et al., 2009; PAES et al., 2013) reduzindo o diâmetro médio ponderado (DMP) dos agregados do solo, além de alterar a condutividade hidráulica por aumentar a obstrução dos poros (FRENKEL et al., 1978; SHAINBERG et al., 1981). O baixo nível de macroporos, eleva a capacidade de retenção da água, dificultando a absorção pelas plantas (MALLIK et al., 1984) e em condição oposta, a drenagem da água para as camadas mais profundas é acelerada (HILLEL et al., 2003), necessitando de reposições frequentes de água.

Águas com característica salino-sódica afeta a condutividade elétrica do solo, podendo alterar o potencial osmótico e capacidade das plantas em absorver água (RHOADES, 1992; LAMBERS, 2003). Modificações no potencial osmótico ocasiona detrimento dos fatores microbiológicos, carbono da biomassa microbiano (CBM), quociente metabólico ($q\text{CO}_2$), quociente microbiano ($q\text{Mic}$) e decréscimo no estoque de carbono do solo (C_{org}) (CHOWDHURY et al., 2011; SETIA et al., 2012; SETIA et al., 2013). Entretanto a disposição de EDT fornece carbono orgânico ao solo (SINGH et al., 2012) favorecendo sua microbiologia e estruturação.

Avaliando o efeito da aplicação de esgoto urbano, Kayikcioglu (2012) observaram decréscimo no carbono da biomassa microbiana, em estudo de curto prazo. O autor acredita que as concentrações de metais pesados e a relação entre a demanda bioquímica de oxigênio (DBO) e o carbono orgânico dissolvido (COD) do efluente tenha contribuído para a redução do CBM. Mangkoedihardjo (2006) propôs que a relação DBO/COD superior a 1 ocasionam maior biodegradação da MO, fato evidenciado por Kayikcioglu (2012).

O coeficiente microbiano (q_{Mic}), juntamente com o coeficiente metabólico (q_{CO_2}), são importantes indicadores qualitativos dos solos (Jenkinson e Ladd, 1981; Franchini et al., 2007). O q_{Mi} indica a qualidade da matéria orgânica e maiores valores de q_{Mic} sugere ciclagem de nutrientes e tendência de menor acúmulo de C no solo (ANDERSON e DOMSCH, 1989). Condições de baixo q_{Mic} indicam redução do CBM em ritmo mais rápido que a MO (KAYIKCIOGLU, 2012) e incremento no teor de C_{org} no solo e menor ciclagem de nutrientes (ANDERSON e DOMSCH, 1989).

Diversos estudos demonstram a viabilidade da utilização do EDT na irrigação da cana-de-açúcar, promovendo o aumento de produtividade em relação ao cultivo tradicional (LEAL et al., 2009a; BLUM et al., 2012), devido ao suprimento hídrico e nutricional, elevando a CTC do solo e disponibilizando de NPK (LEAL et al., 2009b; TZANAKAKIS et al., 2009). Entretanto, avaliando aspectos nutricionais da cana-de-açúcar, BLUM et al. (2012) constataram que a aplicação do EDT não deve ser a única fonte nutricional, necessitando de complementações nutricionais.

Mudanças nos padrões de adubação, como a substituição da adubação de cobertura pela fertirrigação, provoca alterações nas características químicas do solo. Em sistemas irrigados por gotejamento, ocorre concentração dos nutrientes no bulbo molhado, menor lixiviação, incrementos na condutividade elétrica e elevação do potencial de acidificação do solo, especialmente quando utilizados fertilizantes nitrogenados (TEIXEIRA, 2005; DOBERMANN, 2007).

O processo de acidificação do solo é avaliado pelo pH e acidez potencial ($H+Al$). O aumento na $H+Al$ reflete um baixo poder tampão do solo e facilidade de troca destes elementos entre a fase sólida e a líquida, prejudicando o desenvolvimento do sistema radicular (MCKENZIE e NYBORG, 1984; HALING et al., 2011). Correlacionando os atributos químicos do solo com a produção de cana-de-açúcar, Cerri e Magalhães (2012) observaram positiva influência da $H+Al$ sobre a produção de colmos.

A aplicação de esgoto doméstico e da irrigação por gotejamento ocasiona baixa alteração, em curto período, da densidade do solo (D_s) e resistência à penetração (RP). Entretanto, alterações nestes parâmetros ocasionam prejuízo para o desenvolvimento radicular e dinâmica da água no solo. Nos cultivos sem limitação da disponibilidade hídrica, a RP é o principal agente físico limitante do desenvolvimento radicular (MOULIA

et al., 2013). Bengough et al. (2011) indicam que a RP >2,0 MPa eleva em 42% a impedância mecânica ao desenvolvimento das raízes. Este valor é relatado por Otto et al. (2009) como crítico para o desenvolvimento da raiz de cana-de-açúcar, em estudo na região Sudeste de Brasil.

Conforme apresentado, os estudos direcionados a avaliação das modificações nos atributos do solo, irrigado com EDT ou fertirrigados, são realizados basicamente caracterizando os efeitos da prática sobre algumas características do solo. Este tipo de avaliação, embora consistente para avaliar causa-efeito e entendimento dos mecanismos e dinâmica das propriedades do solo, não são adequadas quando se deseja caracterizar a qualidade do solo, por não usar simultaneamente a interação das propriedades físicas, químicas e microbiológicas em um índice sintético, único.

A avaliação da qualidade do solo é um processo complexo, constituído da agregação e simplificação dos atributos e funções do solo. E devido a sua complexidade o conceito não é universalmente aceito e muito discutido (MELO FILHO et al., 2007). Para adequada estimativa da qualidade do solo, segundo Doran e Parkin (1996) e Glover et al. (2000) é necessário que os fatores do solo funcionem em conjunto. Assim é imprescindível o uso de modelo capaz de integrar os atributos físicos, químicos e microbiológico do solo junto as suas funções específicas.

Dentre os modelos empregados para avaliação da qualidade do solo, destaca-se o proposto por Karlen e Stott (1994). O modelo foi concebido no enfoque da sustentabilidade e apresenta características desejáveis para comparar diferentes sistemas de manejo. Neste modelo as informações complexas do solo são transformadas em informações compreensíveis, orientando as tomadas de decisões com menor impacto sobre as funções do solo e identificando as funções que necessitam de correções ou maiores atenções durante o ciclo de produção.

No modelo de Karlen e Stott (1994), as funções específicas do solo são interagidas e compostas por indicadores, os quais são selecionados frente a sua capacidade em transmitir informações sobre o crescimento e atividade biológica das raízes; regulação e distribuição do fluxo de água; e fornecimento de nutrientes as plantas e funcionar como um filtro natural (LARSON e PIERCE, 1994; ISLAM e WEIL, 2000; MELO FILHO et al, 2007; FERNANDES et al, 2011).

Nestes contextos, o presente estudo objetiva avaliar a qualidade do solo, por meio da interação dos indicadores nas funções específicas do solo, conforme Karlen e Stott (1994), no cultivo de cana-de-açúcar não irrigada e irrigada via gotejamento subsuperficial com efluente de esgoto tratado e água de reservatório superficial, com e sem complementação nutricional.

Material e Métodos

A quantificação, em termos de qualidade do solo, do efeito da aplicação dos cinco tratamentos, seguiu a metodologia proposta por Karlen e Stott (1994). Segundo Fernandes et al. (2011) esta metodologia apresenta como principais vantagens a sua flexibilidade, facilidade de uso e potencial para uso interativo entre produtores. Neste modelo são atribuídos pesos as funções específicas do solo, sendo um sistema aditivo (Melo Filho et al., 2007). A qualidade do solo foi obtida por meio da Equação 1.

$$IQS = \sum FS(wt) \quad (\text{Eq. 1})$$

Onde: IQS, representa o índice de qualidade do solo; FS, as funções específicas do solo que compõe o índice; e, wt, o peso numérico atribuído a cada função na composição geral do índice de qualidade do solo.

As funções específicas do solo (FS_n) foram selecionadas conforme Larson e Pierce (1994); Melo Filho et al, (2007) e Fernandes et al, (2011), para sistemas ecossistemas agrícolas, sendo: (a) a capacidade de não restringir o desenvolvimento radicular (SR); (b) a capacidade de receber, distribuir e fornecer água as plantas (CA); e (c) capacidade para receber, fornecer e ciclar os nutrientes (HN). O Peso numérico atribuído a cada função foi concebido perante o objetivo da pesquisa e efeitos ocasionados pelos tratamentos na qualidade do solo. O somatório das funções específicas foram normalizados em escala variando de 0 a 1.

Como os principais impactos da aplicação do EDT e da fertirrigação, em curto prazo, estão relacionados aos fatores químicos e microbiológicos do solo (AYERS e WESTCOT, 1994; LEAL et al., 2009a; LEAL et al., 2009b; KAYIKCIOGLU et al., 2012; SINGH et al., 2012), a função HN recebeu maior peso dentre as funções. Considerou baixo

valor para a função CA, pois o solo apresenta adequada estruturação, não limitando a dinâmica da água (Tabela 2), e pela água não foi fator limitante ao longo do ciclo nos tratamentos, com exceção do cultivo não irrigado.

A seleção do conjunto mínimo de indicadores para compor as funções básicas do solo, baseou-se no grau de importância, obtido após consulta na literatura especializada, tomando como base o grau de associação de cada indicador com as funções específicas do solo (Tabela 8), sendo selecionado atributos físicos, químicos e microbiológicos do solo. Na avaliação da qualidade do solo utilizou os valores médios obtidos no perfil do solo, considerando como limite a profundidade efetiva do sistema radicular, ou seja 0,60 m.

Tabela 8 - Indicadores selecionados para composição das funções básicas do solo.

FS	Peso FS	Ind	Peso Ind	Unidade	Limites			Referências
					Inferior	superior	Ótimo	
DR	0.3	RP	0.35	MPa		2		Otto et al. (2011)
		Ds	0.25	Kg dm ⁻¹		1,59		Melo Filho et al., 2007
		MA	0.20	cm ³ cm ⁻³			0,15	Carter, 2006
		pH	0.10				6,4	Van Raij et al., 2001
		H+Al	0.10	cmol _c dm ⁻³		3,8		Van Raij et al., 2001
CA	0.2	PT	0.35	cm ³ cm ⁻³			0,514	Carter, 2006
		MA	0.30	cm ³ cm ⁻³			0,15	Carter, 2006
		DMP	0.15	Mm	0,9			Fernandes et al., 2011
		PST	0.10	%		25		Ayers e Westcot, 1999
		CE	0.10	dS cm ⁻¹	4			Ayers e Westcot, 1999
HN	0.5	pH	0.10				6,4	Van Raij et al., 2001
		H+Al	0.10	cmol _c dm ⁻³		3,8		Van Raij et al., 2001
		CE	0.10	dS cm ⁻¹	3			Ayers e Westcot, 1999
		PST	0.10	%		25		Ayers e Westcot, 1999
		CTC	0.10	cmol _c dm ⁻³	4,6			Van Raij et al., 2001
		MO	0.10	%	1,5			Van Raij et al., 2001
		CBM	0.15	µg C g ⁻¹ solo seco	250			Lopes et al. (2013)
		qCO ₂	0.15	µg CO ₂ µg ⁻¹ C d ⁻¹	0,2			Kaschuk et al. (2010)
qMic	0.10	%			2,2	Jenkinson e Ladd, 1981		

FS, funções específicas do solo; DR, capacidade do solo de não restringir o desenvolvimento radicular; CA, capacidade de receber, distribuir, manter e fornecer água as plantas; HN, habilidade para receber, manter, fornecer e ciclar os nutrientes; Ind, Indicadores; RP = Resistência à penetração; DS = Densidade do solo; MA = Macroporosidade; H+Al = acidez potencial; PT = Porosidade total; DMP = Diâmetro médio ponderado; PST = Percentagem de sódio trocável; CE = Condutividade elétrica do solo; CTC = Capacidade de troca catiônica; M.O. = Matéria orgânica; CBM = Carbono da biomassa microbiana, qCO₂ = Quociente metabólico; qMic = Quociente microbiano.

Da mesma forma que foram atribuídos pesos as funções do solo, foi imposto peso aos indicadores dentro de cada função (Tabela 8), considerando a importância relativa do indicador na função que ele se relaciona. Como forma de direcionar o peso dos indicadores em cada função do solo, utilizou as informações adaptadas de Glover et al. (2000); Chaer et al. (2001); Melo Filho et al. (2007); Fernandes et al. (2011).

Para ponderação padronizada (PP) dos atributos do solo, tomou como base a função de padronização proposta por Wymore (1993) e indicada por Glover et al. (2000) conforme Equação 2. O peso numérico de cada indicador foi atribuído conforme obtido para as funções específicas do solo, conforme o grau de associação com o objetivo das função do solo (KARLEN e STOTT, 1994), e foram normalizados em escala única variando de 0 a 1,

$$PP = \frac{1}{1 + \left(\frac{B-L}{x+L}\right)^{2S(B+x-2L)}} \quad (\text{Eq. 2})$$

Onde: PP representa a pontuação padronizada; B, o valor crítico ou limite-base do indicador, cujo escore padronizado é 0,5 estabelecendo o limite entre a ruim e a boa qualidade do solo; L, o valor inicial ou mais baixo que uma propriedade do solo possa expressar; S a inclinação da tangente à curva no ponto correspondente ao valor crítico do indicador; e x, o valor médio do indicador medido no campo,

Para aplicação da equação de padronização de escore é necessário calcular a inclinação da tangente à curva no ponto correspondente ao valor crítico do indicador (S), que é determinada por meio da Equação 3.

$$S = \frac{\log\left(\frac{1}{PP}\right) - 1}{\log\left(\frac{B-L}{x-L}\right) \times 2(B+x-2L)} \quad (\text{Eq. 3})$$

As curvas de padronização dos escores para os indicadores de qualidade do solo apresentam três tendências (KARLEN e STOTT, 1994), as quais são:

- “Mais é melhor”, utilizada para indicadores cujo aumento no valor melhora a qualidade do solo, um exemplo é a capacidade de troca de cátions (CTC) (Figura 17A);
- “Menos é melhor”, utilizada para indicadores cuja redução do seu valor melhora a qualidade do sol, um exemplo seria a resistência à penetração (RP) (Figura 17B);
- “valor ótimo”, utilizado para indicadores cujo valor melhorar a qualidade do solo dentro de uma faixa, sua redução ou aumento proporciona redução da qualidade do solo, um exemplo é a macroporosidade do solo (Ma) (Figura 17C).

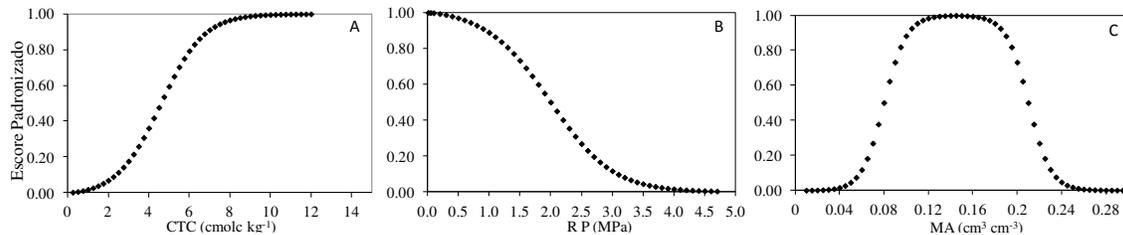


Figura 16 - Tendências das curvas para padronização de escores, (a) mais é melhor; (b) menos é melhor; (c) valor ótimo.

Para a padronização dos indicadores em escala variando de 0 a 1, foi realizada a padronização de escores. Desta forma se os indicadores estiverem no seu limite crítico, que corresponde ao valor de 0,5 na ponderação dos escores, o índice de qualidade do solo estimado será igual a 0,5. E sendo o valor máximo do índice de qualidade igual a 1,0 ou próximo desse valor, melhor será a qualidade do solo. Para entendimento da padronização de escores das funções do solo e cálculo do IQS, é apresentado um exemplo na Tabela 9, para tanto utilizou-se o tratamento não irrigado (T1NI).

Tabela 9 - Índice de qualidade do solo (IQS) e escore padronizado dos indicadores (Ind) e das funções específicas do solo (FS) do perfil de solo até a profundidade de 0,60 m, no cultivo não irrigado com adubação em cobertura (T1NI).

FS	Peso FS (A)	Ind	Unidade	Peso Ind (B)	VMO $\pm \sigma$	Escore padronizado (C)	(B x C)	% participação	Σ (B x C) (D)	(D x A)	IQS
DR	0,3	RP	MPa	0,35	1,776 \pm 0,61	0,61	0,21	27,08	0,79	0,24	
		Ds	Kg dm ⁻¹	0,25	1,261 \pm 0,08	0,94	0,24	29,95			
		MA	cm ³ cm ⁻³	0,20	0,122 \pm 0,028	1,00	0,20	25,32			
		pH		0,10	5,614 \pm 0,16	0,77	0,08	9,84			
		H+Al	cmol _c dm ⁻³	0,10	3,752 \pm 0,73	0,61	0,06	7,81			
CA	0,2	PT	cm ³ cm ⁻³	0,35	0,537 \pm 0,02	1,00	0,35	35,05	1,00	0,20	
		MA	cm ³ cm ⁻³	0,30	0,122 \pm 0,028	1,00	0,30	29,95			
		DMP	Mm	0,15	1,645 \pm 0,54	1,00	0,15	15,00			
		PST	%	0,10	0,08 \pm 0,02	1,00	0,10	10,02			
		CE	dS cm ⁻¹	0,10	1,16 \pm 0,40	1,00	0,10	9,99			
HN	0,5	pH		0,10	5,614 \pm 0,16	0,77	0,08	8,91	0,87	0,43	0,87
		H+Al	cmol _c dm ⁻³	0,10	3,752 \pm 0,81	0,61	0,06	7,08			
		CE	dS cm ⁻¹	0,10	1,16 \pm 0,40	0,97	0,10	11,20			
		PST	%	0,10	0,08 \pm 0,02	1,00	0,10	11,51			
		CTC	cmol _c dm ⁻³	0,10	8,33 \pm 1,42	1,00	0,10	11,51			
		MO	%	0,10	3,11 \pm 0,74	0,94	0,09	10,84			
		CBM	μ g C g ⁻¹ solo seco	0,15	314,7 \pm 82,1	0,66	0,10	11,34			
		qCO ₂	μ g CO ₂ μ g ⁻¹ C d ⁻¹	0,15	0,033 \pm 0,02	0,97	0,15	16,76			
		qMic	%	0,10	1,99 \pm 0,81	0,94	0,09	10,83			

VMO = Valor médio observado; σ = Desvio padrão; DR = Promover o adequado desenvolvimento do sistema radicular; CA = Capacidade de receber, armazenar, distribuir e fornecer água as plantas; HN = habilidade para receber, manter, fornecer e ciclar os nutrientes; RP = Resistência à penetração; DS = Densidade do solo; MA = Macroporosidade; H+Al = acidez potencial; PT = Porosidade total; DMP = Diâmetro médio ponderado; PST = Percentagem de sódio trocável; CE = Condutividade elétrica do solo; CTC = Capacidade de troca catiônica; M.O. = Matéria orgânica; CBM = Carbono da biomassa microbiana, qCO₂ = Quociente metabólico; qMic = Quociente microbiano.

Os atributos do solo foram obtidos após abertura de trincheira em três blocos, coletando solo nas camadas de 0,0-0,20; 0,20-0,40 e 0,40-0,60 m e em três pontos por camada, sendo estes na linha de gotejamento, plantio e a 0,40 m da linha de gotejamento, conforme o esquema apresentado na Figura 16. Em cada trincheira, primeiramente foram coletadas amostras indeformadas, com auxílio de anéis volumétricos, e posteriormente mensurado a densidade do solo (Ds), porosidade total (Pt) e macroporosidade (MP).

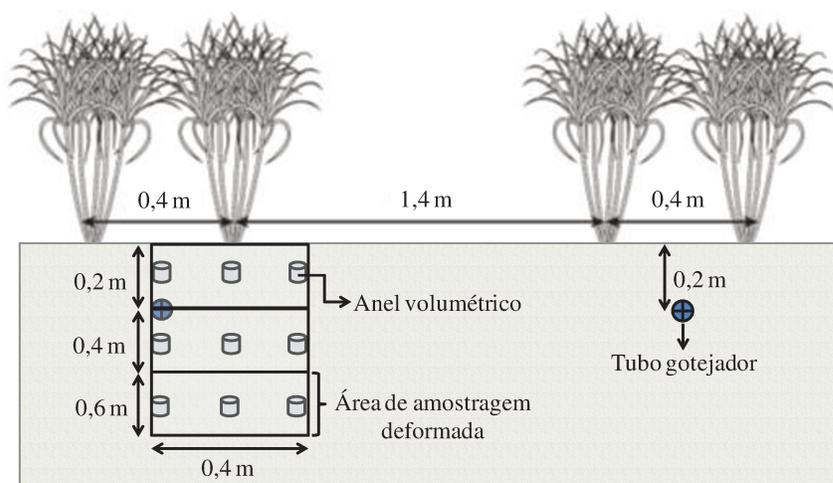


Figura 17 - Esquema do espaçamento de plantio, profundidade de instalação do tubogotejador e coleta de amostras indeformadas utilizando o anel volumétrico e deformada na camada.

Nas trincheiras foram coletadas também amostras deformadas, para determinação da acidez potencial (H+Al), pH, condutividade elétrica (CE), capacidade de troca de cátions (CTC), porcentagem de sódio trocável (PST), matéria orgânica (MO), biomassa microbiana (CBM), quociente metabólico (qCO_2), quociente microbiano ($qMic$) e diâmetro médio ponderado (DMP). Nesta amostragem coletou solo na área representada pela camada de 0,20 m, e a 0,40 m a partir do tubo gotejador, no sentido vertical, conforme Figura 16. A resistência a penetração (RP) foi determinada a partir da superfície do solo, utilizando o medidor automatizado SoloTrack (Falker).

As análises dos atributos químicos e físicos do solo, com exceção da resistência a penetração, foram determinados segundo Camargo et al, (2009). Os atributos microbiológicos foram analisados no laboratório de microbiologia do Instituto Agrônomo (IAC). A biomassa microbiana foi obtida pelo método da fumigação-extração (JEANKINSON e POWLSON, 1976) e o qCO_2 foi estimado por meio da razão entre a CBM e a atividade microbiana, sendo este

último parâmetro mensurada pelo método da titulação. O q_{Mic} foi estimado pela razão entre o CBM e o C_{org} do solo.

Após obtenção dos indicadores em cada camada de solo amostrada, realizou-se a análise de variância dos indicadores para cada camada e no perfil do solo (0,0-0,60 m), com as médias sendo comparadas entre si pelo teste de Tukey a 5% de significância.

Resultado e Discussão

Os tratamentos ocasionaram, entre si, baixa alteração na qualidade do Latossolo Vermelho distroférico (LVd), o qual apresentou adequadas características agrônômicas. O IQS esteve entre 0,86 nos cultivos irrigados com EDT a 0,90 no tratamento irrigado com ARS sem complementação nutricional (Figura 18). Avaliando a qualidade do solo irrigado com esgoto tratado, com tempo de aplicação variando de 2 a 40 anos, em três áreas na Espanha, Coronado et al. (2013) verificaram baixa alteração na qualidade do solo irrigado com EDT e com água de reservatório, concluindo que o esgoto ocasiona baixa alteração no IQS.

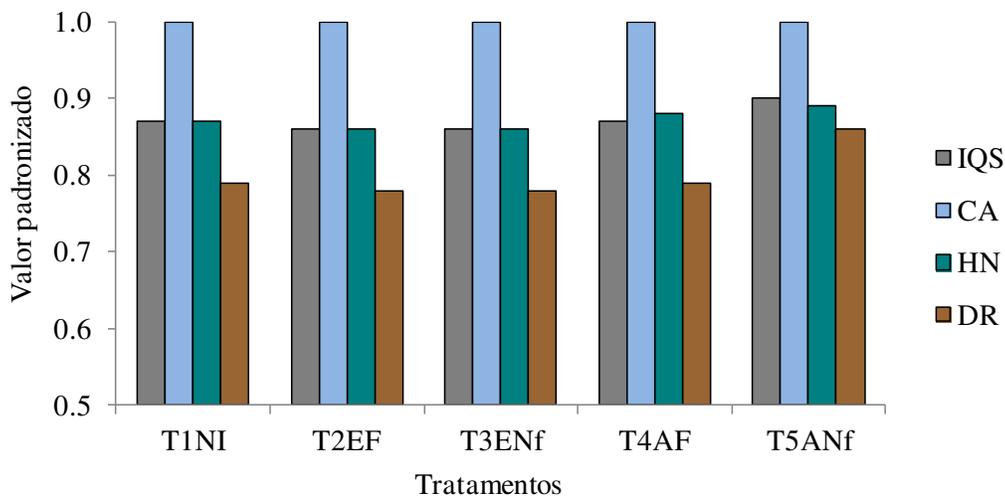


Figura 18 - Valores padronizado para o índice de qualidade do solo (IQS) e para as funções de não restringir o desenvolvimento radicular (DR); receber, distribuir, manter e fornecer água as plantas (CA); e receber, manter, fornecer e ciclar os nutrientes (HN).

Apesar dos bons valores de IQS foi possível evidenciar reduções em algumas funções do solo, como a de promover o adequado desenvolvimento do sistema radicular, que possuiu valores padronizados próximo a 0,78, com exceção do T5ANf, que obteve valor de 0,80 (Figura 18). A

perda de qualidade desta função ocorreu em virtude dos indicadores relacionados a acidificação do solo (pH e H+Al) e resistência do solo a penetração (RP) (Figura 19).

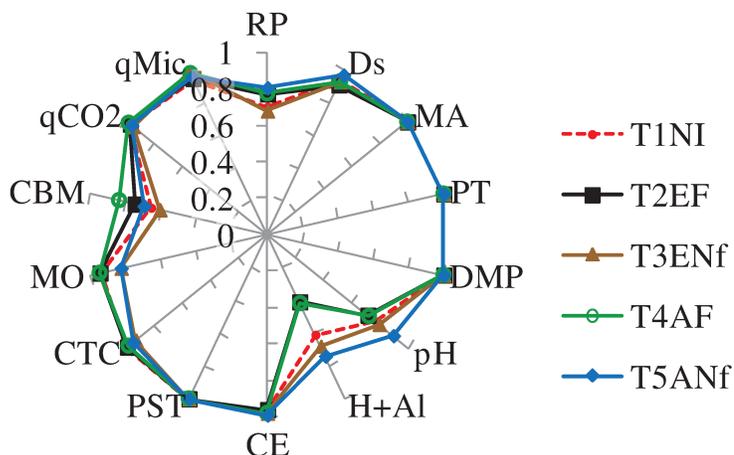


Figura 19 - Escore padronizado para os indicadores de Resistência à penetração (RP); Densidade do solo (Ds); Macroporosidade (MA); Acidez potencial (H+Al); Porosidade total (PT); Diâmetro médio ponderado (DMP); Percentagem de sódio trocável (PST); Condutividade elétrica do solo (CE); Capacidade de troca catiônica (CTC); Matéria orgânica (MO); CBM = Carbono da biomassa microbiana (CBM), Quociente metabólico (qCO₂); = Quociente microbiano (qMic).

A acidez potencial apresentou diferença significativa entre os tratamentos no perfil de 0,0-0,60 m (Tabela z). Evidenciou-se que o uso da fertirrigação elevou a acidez potencial, com os tratamentos T2EF e T4AF obtendo valores médios de 4,14 e 4,08 cmol_c dm⁻³, os quais diferiram do tratamento T5ANf que obteve valor médio de 2,65 cmol_c dm⁻³. O aumento dos valores de acidez potencial reduz a qualidade do solo, pois reflete uma maior facilidade de troca de prótons entre a fase sólida e a líquida do solo, prejudicando o desenvolvimento do sistema radicular (MCKENZIE e NYBORG, 1984; HALING et al., 2011).

Tabela 10 - Análise de variância dos indicadores de qualidade do solo.

Tratamentos	unidade	T1NI	T2EF	T3ENf	T4AF	T5ANf	Teste F	C.V. (%)
Ds	kg dm ⁻¹	1,26	1,28	1,25	1,25	1,21	1,35 ^{ns}	3,48
PT	cm ³ cm ⁻³	0,54	0,52	0,53	0,54	0,53	0,27 ^{ns}	4,74
MA	cm ³ cm ⁻³	0,12	0,11	0,11	0,12	0,11	0,08 ^{ns}	33,6
DMP	mm	1,65	1,65	1,65	1,85	2,12	1,97 ^{ns}	18,8
RP	MPa	1,77	1,60	1,83	1,60	1,50	1,47 ^{ns}	11,9
M.O.	%	3,11	3,13	2,84	3,19	2,82	1,29 ^{ns}	16,25
CE	dS cm ⁻¹	1,16 ab	1,35 a	1,00 ab	0,98 ab	0,85 b	3,07*	24,29
pH		5,61 ab	5,48 b	5,66 ab	5,49 b	5,95 a	3,87*	3,02
Na	cmol _c dm ⁻³	1,54 b	5,97 a	3,29 ab	1,65 b	1,50 b	7,81*	42,8
CTC	cmol _c dm ⁻³	8,33	8,90	7,30	8,33	7,63	2,08 ^{ns}	16,23
PST	%	0,08 b	0,30 a	0,20 ab	0,09 b	0,09 b	5,81*	45,1
Al+H	cmol _c dm ⁻³	3,75 ab	4,14 a	2,96 ab	4,08 a	2,65 b	5,65*	13,94
CBM	µg C g ⁻¹ solo seco	314	361	295	415	333	2,38 ⁺	27,73
qCO ₂	µg CO ₂ µg ⁻¹ C d ⁻¹	0,031	0,032	0,047	0,023	0,038	2,68 ⁺	35,13
qMic	%	1,89	1,96	2,26	2,32	2,53	1,04 ^{ns}	20,52

RP = Resistência à penetração; DS = Densidade do solo; MA = Macroporosidade; H+Al = acidez potencial; PT = Porosidade total; DMP = Diâmetro médio ponderado; PST = Percentagem de sódio trocável; CE = Condutividade elétrica do solo; CTC = Capacidade de troca catiônica; M.O. = Matéria orgânica; CBM = Carbono da biomassa microbiana, qCO₂ = Quociente metabólico; qMic = Quociente microbiano.

A acidez potencial apresenta relação inversa com o pH, assim os tratamentos fertirrigados (T2EF e T4AF) apresentaram os menores valores de pH, com média de 5,48. Os valores médios obtido pelos cultivos fertirrigados diferiram do pH médio verificado no tratamento irrigado com ARS e sem adição de fertilizantes, o qual foi de 5,95. Os resultados da H+Al e pH sugerem possíveis implicações da aplicação de fertilizantes minerais via irrigação na atenuação da acidificação do solo (NEILSEN et al., 1993; BRYLA et al., 2010). O decréscimo nos valores de pH resulta em inadequado funcionamento das disponibilidade de nutrientes pelo solo, afetando a produtividade da cana-de-açúcar (LANDELL et al., 2003), e como consequência a sustentabilidade do sistema de produção.

Conforme constatado na Figura 19, o escore padronizado da resistência do solo a penetração apresentou ligeira redução em sua qualidade. Porém, por meio da Tabela 10, evidencia-se que este efeito foi inerente ao solo estudado, pois não houve diferença significativa deste indicador entre os tratamentos. Salienta que no momento da determinação da RP a umidade do solo apresentava bons níveis de água no solo, com valor médio de $0,348 \pm 0,02$ cm³ cm⁻³, causando baixo efeito da umidade sobre a resistência do solo a penetração (BUSSCHER et al., 1997; MOLINA Jr et al., 2013), visto que estas duas variáveis apresentam alta correlação inversa (SILVEIRA et al., 2010).

O solo apresentou excelente capacidade em receber, distribuir, manter e fornecer água as plantas, com o índice padronizado para esta função próximo de 1,0 em todos os tratamentos. A adequada estruturação do solo, ocorre em virtude do alto teor de argila (Tabela 2) e bons níveis de MO e CTC (Tabela 10) (HERMAWAN e BONKE, 1997; HILLEL et al., 2003; ŠIMANSKÝ, 2012), sendo que estas duas variáveis não apresentaram diferença significativa entre os tratamentos. Os adequados valores de MO, CTC e alto teor de argila refletiram em excelentes valores de DMP, os quais estiveram próximo ao valor ideal para o manejo de solos agrícolas, que segundo Fernandes et al. (2011) é próximo a 0,9 mm. O resultado de DMP sugere uma apropriada agregação das partículas do solo e conseqüentemente resistência a ações degradantes, como presença do Na⁺ no EDT, que pode dispersar a argila resultando no processo de destruição dos agregados (ŠIMANSKÝ, 2012).

Os tratamentos influenciaram os níveis de Na no solo (Tabela 10), com o tratamento T2EF obtendo os maiores níveis de Na no solo (5,97 cmol_c dm⁻³) e diferindo dos cultivos irrigados com ARS e não irrigado, os quais apresentaram valores médios próximo de 1,56 cmol_c dm⁻³. Já o tratamento irrigado com EDT sem fertilização complementar obteve valores intermediários (3,29 cmol_c dm⁻³), não diferindo dos demais tratamentos.

Similar ao verificado para a análise do Na, a porcentagem de sódio trocáveis do tratamento T2EF diferiu dos tratamentos irrigado com ARS e do não irrigado (Tabela 10). Porém os valores observados foram baixos (AYERS e WETCOT, 1999) de forma a não influenciar o processo de dispersão da argila e não ocasionou redução no escore padronizado deste indicador, conforme observado na Figura 19. Salienta que solos com alto teor de óxido de ferro apresenta menor dispersão da argila pela presença do Na⁺ em relação aos com maiores proporções de argila ativa, devido a característica cimentante do óxidos de ferro (PAES et al., 2013).

O adequado arranjo dos agregados do solo, favorece o balanceamento entre macro e microporos e estabelece uma adequada densidade do solo (HILLEL et al., 2003), favorecendo a função CA, a qual apresentou valores padronizados próximo a 1,0 em todos os tratamentos, revelando adequada capacidade do solo em receber, manter e distribuir a água. A macroporosidade do solo esteve entre 0,10 a 0,20 cm³ cm⁻³, condição ideal para funcionamento do solo (CARTER, 2006) e não apresentou diferenças entre os tratamentos.

Os indicadores químicos relativos a função CA, os quais afetam principalmente o potencial osmótico do solo não influenciaram a capacidade do solo em transmitir água as plantas,

devido aos adequados valores de CE e PST (AYERS e WESTCOT, 1999). O solo apresenta baixa restrição a infiltração de água pelo efeito de íons sódicos (RHOADES et al., 1992) e baixa influência na condutividade hidráulica saturada (FREIRE et al., 2003), conforme indicado pelo escore da PST, o qual obteve o valor de máxima qualidade em todos os tratamentos. Entretanto, foram observadas diferenças significativas para a PST, conforme apresentado anteriormente e para a condutividade elétrica.

O cultivo irrigado com EDT e fertirrigado apresentou os maiores valores de CE, com média de $1,35 \text{ dS m}^{-1}$ e diferiu significativamente do tratamento irrigado com ARS sem adição de nutrientes, o qual apresentou valores médios de $0,85 \text{ dS m}^{-1}$. O baixo nível de CE no T5ANf ocorre devido a não incorporação de fertilizantes e a qualidade da água que apresenta baixos teores nutricionais e de sódio (Tabela 1). A aplicação de fertilizantes no solo e EDT, especialmente via irrigação localizada, eleva a CE do solo (KLEIN et al., 1999; AYERS e WESTCOT, 1999; LEAL et al., 2009), em virtude das características salino dos fertilizantes e salino-sódica do esgoto doméstico.

A função do solo de ciclagem e suprimento nutricional foi adequada entre os tratamentos, com o valor padronizado para a função acima de 0,85 entre os tratamentos (Figura 18). Os indicadores que ocasionaram maior comprometimento desta função, foram a acidez potencial, o pH, conforme discutido anteriormente, e o carbono da biomassa microbiana.

Por meio da análise de CBM observou-se que o tratamento irrigado com ARS e fertirrigado obteve escore padronizado superior aos demais tratamentos, com valor de 0,84 (Figura 19). A análise estatística observou que os tratamentos não ocasionaram diferenças significativas ao nível de $p < 0,05$, entretanto, constatou-se efeito ao nível de $p < 0,10$. Neste nível de significância o tratamento T4AF diferiu do valor de CBM obtido pelo T3ANf, os quais apresentaram valores médio de 415 e $295 \mu\text{g C g}^{-1}$ solo seco, respectivamente.

O adequado suprimento de fertilizante fosfatado, garantido pela fertirrigação, certamente favoreceu o crescimento da biomassa microbiana, e conseqüentemente do CBM (Lukito et al., 1998). Em estudo com a aplicação de doses de P na cana-de-açúcar, Bezerra et al. (2008) constatou incrementos significativos da biomassa microbiana com o aumento da dose de fósforo. Sylvia et al. (1999) destaca que o P e N, são os principais nutrientes exigidos pelos microrganismos para o adequado funcionamento do metabolismo celular. Nesta pesquisa,

evidenciou que os tratamentos com maiores doses de P, ou seja os cultivos fertirrigados, obtiveram as maiores médias absolutas para o CBM (Tabela 10).

No estudo desenvolvido por Mastro et al. (2009), em área irrigada por longo período com EDT, foi constatado que o CBM foi o indicador mais sensível a aplicação do efluente. Para Powlson et al. (1987) e Franchini et al. (2007) os indicadores microbiológicos são altamente sensíveis ao uso do solo e permitem a visualização, em curtos períodos, das alterações nas características da qualidade do meio. Desta forma, os resultados de CBM indicam com antecedência maior redução na qualidade dos atributos microbiológicos no tratamento irrigado com EDT sem adubação complementar, entretanto, estudo de longo prazo devem ser realizados para comprovação desta proposição.

Os escores padronizados para o quociente metabólico e microbiano indicam mínimas alterações na atividade microbiana da comunidade (BALOTA et al., 2004), e assim, alta eficiência em converter o C assimilado em nova biomassa (MENDES et al. 2009). Observou-se na Tabela x a ocorrência de efeitos significativos na qCO_2 ao nível de $p < 0,10$, com o tratamento T3ENf obtendo o maior valor para esta variável ($0,047 \mu g CO_2 \mu g^{-1} C d^{-1}$) e diferiu-se do tratamento T4AF que obteve valor de $0,023 \mu g CO_2 \mu g^{-1} C d^{-1}$. Entretanto os níveis obtidos estiveram abaixo de $0,2 \mu g CO_2 \mu g^{-1} C d^{-1}$, sugerindo que a microbiota do solo não sofreu estresse (Franchini et al. 2007).

Os valores médio de $qMic$ não apresentaram diferenças significativas entre os tratamentos e os valores médios estiveram entre 1,98% no T1NI a 2,53% no T5ANf. Estes valores indicam um equilíbrio no solo entre o acúmulo e perda de C no solo (JENKINSON e LADD, 1981), o qual segundo estes autores é de 2,2%.

Apesar do curto prazo de estudo, para adequada caracterização das modificações na qualidade do solo pela disposição do EDT e fertirrigação, foi possível observar modificações em alguns atributos, principalmente relacionados a acidificação do solo, devido a adoção da fertirrigação. Observou incremento no CBM, nos cultivos fertirrigados e em especial no irrigado com ARS, no qual os fertilizantes NPK foram aplicados na forma mineral.

Conclusão

A avaliação conjunta dos indicadores físicos, químicos e microbiológicos do solo, utilizando a metodologia proposto por Karlen e Stott (1994), permite afirmar que os tratamentos

não ocasionaram alterações na qualidade do solo para sistema agrícola, no período de estudo e nas suas condições edafoclimáticas.

Os indicadores relacionados a acidificação do solo, acidez potencial e pH, apresentaram reduções em suas qualidades, sendo os indicadores mais limitantes, especialmente nos tratamentos fertirrigados.

Referencias Bibliográficas

ALMEIDA NETO, O. B.; MATOS, A.T.; ABRAHÃO, A.P.; COSTA, L.M.; DUARTE, A. Influência da qualidade da água de irrigação na dispersão da argila de Latossolos. **Rev. Bras. Ci. Solo**, v.33, n.6, 2009, p.1571-1581.

ANDERSON, T.H.; DOMSCH, K.H. Ratios of microbial biomass carbon to total organic in arable soils. **Soil Biology & Biochemistry**, v.21, p.474-479, 1989.

AYERS, R.S.; WESTCOT, D.W. **Water quality for agriculture**. Rome:FAO. 1994. FAO Irrigation and Drainage paper, 29. Disponível em <<http://www.fao.org/docrep/003/t0234e/t0234e00.HTM>> Acesso em 12 janeiro 2014.

BALOTA, E.L.; COLOZZI-FILHO, A.; ANDRADE, D.S.; DICK, R.P. Longterm tillage and crop rotation effects on microbial biomass and C and N mineralization in a Brazilian Oxisol. **Soil and Tillage Research**, v.77, p.137-145, 2004.

BEZERRA, R.G.D.; SANTOS, T.M.C.; ALBUQUERQUE, L.S.; CAMPOS, V.B.; PRAZERES, S.S. Atividade microbiana em solo cultivado com cana-de-açúcar submetido a doses de fósforo. **Revista Verde**, v.3, n.4, p.64-69, 2008.

BENGOUGH, A.G.; MCKENZIE, B.M.; HALLETT, P.D.; VALENTINE, T.A. Root elongation, water stress, and mechanical impedance: a review of limiting stresses and beneficial root tip traits. **Journal of Experimental Botany**, v.62, n.1, p.59-68, 2011.

BLUM, J.; MELFI, A.J.; MONTES, C.R. Nutrição mineral da cana-de-açúcar irrigada com efluente de esgoto tratado, em área com aplicação de fosfogesso. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.47, p.593-602, 2012.

BRYLA, D.R.; SHIREMAN, A.D.; MACHADO, R.M.A. Effects of method and level of nitrogen fertilizer application on soil pH, electrical conductivity, and availability of ammonium and nitrate in blueberry. **Acta horticulturae**, v.868, p.95-101, 2010.

BUSSCHER, W.J.; BAUER, P.J.; CAMP, C.R.; SOJKA, R.E. Correction of cone index for soil water content differences in a coastal plain soil. **Soil e Tillage Research**, v.43, p.205-217, 1997.

CAMARGO, O. A.; MONIZ, A. C.; JORGE, J. A.; VALADARES, J. M. A. S. **Métodos de análise química, mineralógica e física de solos do Instituto Agrônomo de Campinas**. Campinas: IAC, 77p. 2009. (Boletim Técnico 106).

CARTER, M.R., Quality critical limits and standardization. In: Lal, R. (Ed.), **Encyclopedia of Soil Science**. Marcel Dekker:New York, p.1412–1415. 2006.

CERRI, D.G.P; MAGALHAES, P.S.G. Correlation of physical and chemical attributes of soil with sugarcane yield. **Pesquisa Agropecuaria Brasileira**, v.47, n.4, p.613-620, 2012.

CHAER, G.M. Modelo para determinação de índice de qualidade do solo baseado em indicadores físicos, químicos e microbiológicos. 2001. 90f. **Dissertação** (Mestre em Microbiologia do solo) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, Brasil, 2013.

CHOWDHURY, N.; MARSCHNER, P. BURNS, R.G. Soil microbial activity and community composition: Impact of changes in matric and osmotic potential. **Soil Biology and Biochemistry**, v.43, n.6, p.1229–1236, 2011.

CORONADO, A.M.; ARCENEGUI, V.; ORENES, F.G.; SOLERA, J.M.; BENEYTO, J.M. Application of soil quality indices to assess the status of agricultural soil irrigated with treatment wastewaters. **Soil Earth**, v.4, p.119-127, 2013.

DORAN, J. W.; PARKIN, T. B. Quantitative indicators of soil quality: a minimum data set. In: DORAN, J. W.; JONES, A. J. (Eds). **Methods for assessing soil quality**. Madison:SSSA Special, n.49, p.25-37, 1996.

FERNANDES, J. C.; GAMERO, C. A.; RODRIGUES, J. G. L.; MIRÁS-AVALO, J. M. Determination of the quality index of a Paleudult under sunflower culture and different management systems. **Soil & Tillage Research**, v. 112, p. 167-174, 2011.

FRANCHINI, J.C.; CRISPINO, C.C.; SOUZA, R.A.; TORRES, E.; HUNGRIA, M. Microbiological parameters as indicators of soil quality under various soil management and crop rotation systems in southern Brazil. **Soil and Tillage Research**, v.92, p.18-29, 2007.

FREIRE, M.B.G.S.; RUIZ, H.A.; RIBEIRO, M.R.; FERREIRA, P.A.; ALVAREZ, V.H.V; FREIRE, F.J. Condutividade hidráulica de solos de Pernambuco em resposta à condutividade elétrica e RAS da água de irrigação. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.7, n.1, p.45-52, 2003

FRENKEL, H.; GOERTZEN, J.O.; RHOADES, J.D. Effects of clay type and content, exchangeable sodium percentage, and electrolyte concentration on clay dispersion and soil hydraulic conductivity. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, v.42, n.1, p.32-39, 1978.

GLOVER, J.D.; REGANOLD, J.P.; ANDREWS, P.K. Systematic method for rating soil quality of conventional, organic, and integrated apple orchards in Washington State. **Agric. Ecosys. Environ.**, v.80, p.29-45, 2000.

- HAAG, H. P.; DECHEN, A. R.; CARMELLO, Q. A. C. Nutrição mineral da cana-de-açúcar. In: PARANHOS, S. B. **Cana-de-açúcar, Cultivo e Utilização**. Campinas: Fundação Cargill, v.1, p. 88-162. 1987.
- HALING, R.E.; SIMPSON, R.J.; CULVENOR, R.A.; LAMBERS, H.; RICHARDSON A.E. Effect of soil acidity, soil strength and macropores on root growth and morphology of perennial grass species differing in acid-soil resistance. **Plant Cell Environ.**, v.34, n.3, p.444-456, 2011.
- HERMAWAN, B.; BONKE, A.A. Effect of winter cover crops and successive spring tillage on soil aggregation. **Soil Tillage Research**, v.44, p.109-120, 1997.
- HILLEL, D. **Introduction to environmental soil physics**. Elsevier, 2003, 494p.
- ISLAM, K.R.; WEIL, R.R. Soil quality indicator properties in mid-Atlantic soil as influenced by conservation management. *Journal of soil and water conservation*, v.55, p.69-78, 2000.
- JENKINSON, D.S.; LADD, J.N. Microbial biomass in soil: measurement and turnover. **Soil Biology and Biochemistry**, v.13, n.5, p.415-417, 1981.
- JENKINSON, D.S.; POWLSON, D.S. The effects of biocidal treatments on metabolism in soil: A method for measuring soil biomass. **Soil Biology and Biochemistry**, v.11, n.3, p.193-199, 1976.
- KARLEN, D. L.; STOTT, D. E. A framework for evaluating physical and chemical indicators of soil quality. In: DORAN, J. W. et al. (eds.) **Defining soil quality for a sustainable environment**. Madison:SSSA, 1994. p.53-71.
- KASCHUK, G.; ALBERTON, O.; HUNGRIA, M. Three decades of soil microbial biomass studies in Brazilian ecosystems:Lessons learned about soil quality and indications for improving sustainability **Soil Biology and Biochemistry**, v.42, p.1-13, 2010.
- KAYIKCIOGLU, H.H. Short-term effects of irrigation with treated domestic wastewater on microbiological activity of a Vertic xerofluvent soil under Mediterranean conditions. **J. Environ. Manage.**, v.15, n.102, p.108-114, 2012.
- KLEIN, I.; MEIMON, A.; SKEDI, D. Drip nitrogen, phosphorus, and potassium fertigation of 'spadona' pear. **J. Plant Nutr.**, v.22, p.489-499, 1999.
- LAMBERS, H. Introduction, dryland salinity: a key environmental issue in Southern Australia. **Plant and Soil**, v.257, n.2, p.5-7, 2003.
- LANDELL, M.G..A.; PRADO, H.; VASCONCELOS, A.C.M. Oxisol subsurface chemical attributes related to sugarcane productivity. **Sci. Agric.**, v.60, n.4, p.741-745, 2003.

LARSON, W. E.; PIERCE, F. J. The dynamics of soil quality as a measure of sustainable management. In: DORAN, J. W. et al. (Eds.). **Defining soil quality for a sustainable environment**. Madison:SSSA, 1994. p.37-51.

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. **Sci. Agric**, v.66, n.2, p. 242-249, 2009a.

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

LOPES, A.A.C.; SOUSA, D.M.G.; CHAER, G.M.; REIS JÚNIOR, F.B.; GOEDERT, W.J.; MENDES, I.C. Interpretation of microbial soil indicators as a function of crop yield and organic carbon. **Soil Biology and Biochemistry**, v.77, n.2, p.461-472, 2013.

LUKITO, H.P.; KOUNO, K.; ANDO, T. Phosphorus requirements of microbial biomass in a regosol and an andosol. **Soil Biology and Biochemistry**, v.30, n.7, p.865-872, 1998.

MALLIK, A.U.; GIMINGHAM C.H.; RAHMAN, A.A. Ecological Effects of Heather Burning: I. Water Infiltration, Moisture Retention and Porosity of Surface Soil. **Journal of Ecology**, v.72, n.3, p.767-776, 1984.

MANGKOEDIHARDJO, S. Biodegradability improvement of industrial wastewater using hyacinth. **Journal of Applied Science**, v.6, n.6 , p.1409-1414, 2006.

MASTO, R.E.; CHHONKAR, P.K.; SINGH, D.; PATRA, A.K. Changes in soil quality indicators under long-term sewage irrigation in a sub-tropical environment. **Environmental Geology**, v.56, n.6, p.1237-1243, 2009.

MCKENZIE, R.C.; NYBORG, M. Influence of subsoil acidity on root development and crop growth in soils of Alberta and northeastern British Columbia. **Can. J. Soil Sci.** v.64, p.681-97, 1984.

MELO FILHO, J. F de; SOUZA, A. L. V.; SOUZA, L da S. Determinação do índice de qualidade subsuperficial em um Latossolo Amarelo coeso dos Tabuleiros Costeiros, sob floresta natural. **Rev. Bras. Ci. Solo**, v.31, p.1599-1608, 2007.

MENDES, I.C.; HUNGRIA, M.; REIS Jr., F.B.; FERNANDES, M.F.; CHAER, G.M.; MERCANTE, F.M.; ZILI, J.E. **Bioindicadores para avaliação da qualidade do solos tropicais: utopia ou realizada**. Embrapa Cerrados:Planaltina, 31p. 2009.

MOLINA Jr, W.F.; PIEDADE, S.M.S.; AMARAL, J.R. Penetration resistance in a latosol under different moisture and penetration speeds. **Rev. Ceres**, v.60, n.5, p.715-721, 2013.

MOULIA, B. Plant biomechanics and mechanobiology are convergent paths to flourishing interdisciplinary research. **Journal of Experimental Botany**, v.64, n.15, p.4617-4633, 2013.

NEILSEN, G.H.; NEILSEN, D.; TOIVONEN, P.M.A.; HERBERT, L.C. Annual bloom-time phosphorus fertigation affects soil phosphorus, apple tree phosphorus nutrition, yield, and fruit quality. **HortScience**, v.43, p.885-890, 2008.

OTTO, R.; SILVA, A.P.; FRANCO, H.C.J.; OLIVEIRA, E.C.A. TRIVELIN, P.C.O. High soil penetration resistance reduces sugarcane root system development. **Soil Till. Res.**, v.117, p.201-210, 2011.

PAES, J.L.A.; RUIZ, H.A.; FREIRE, M.B.G.; BARROS, M.F.C.; ROCH, G.C. Dispersão de argilas em solos afetados por sais. **Rev. Bras. Eng. Agríc. Ambient.** v.17,p.1135-1142, 2013.

PARANYCHIANAKIS, N.V.; ANGELAKIS, A.N.; LEVERENZ, H.; TCHOBANOGLOUS, G. Treatment of wastewater with slow rate systems: a review of treatment processes and plant functions. **Crit. Rev. Environ. Sci. Tech.**, v.36, p.187-259, 2006.

POWLSON, D.S.; BROOKES, P.C.; CHRISTENSEN, B.T. Measurement of soil microbial biomass provides an indication of changes in total soil organic matter due to straw incorporation. **Soil Biology and Biochemistry**, v.19, n.2, p.159-164, 1987.

RHOADES, J.D.; KANDIAH, A.; MASHALI, A.M. **The use of saline waters for crop production**. Rome:FAO, 1992. FAO Irrigation and Drainage paper, 48. Disponível em <<http://www.fao.org/docrep/t0667e/t0667e00.HTM>> Acesso em 12 janeiro 2014.

SETIA, R.; GOTTSCHALK, P.; SMITH, P.; MARSCHNER, P.; BALDOCK, J.; SETIA, D.; SMITH, J. Soil salinity decreases global soil organic carbon stocks. **Sci Total Environ.**, v.465, p.267-272, 2013.

SETIA R.; SMITH, P.; MARSCHNER, P.; GOTTSCHALK, P.; BALDOCK, J.; VERMA, V.; SETIA, D.; SMITH, J. Simulation of salinity effects on past, present, and future soil organic carbon stocks. **Environ. Sci. Technol.**, v.46, n.3, 1624-1631, 2012.

SHAINBERG, I.; RHOADES J.D.; PRATHER, R.J. Effect of low electrolyte concentration on clay dispersion and hydraulic conductivity of a sodic soil. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, v.45, n.2, p.273-277, 1981.

SILVEIRA, D.C.; MELO FILHO, J.F.; SACRAMENTO, J.A.A.S.; SILVEIRA, E.C.P. Relação umidade versus resistência a penetração para um Argissolo amarelo distrocoeso no Recôncavo Baiano. **Rev. Bras. Ci. Solo**, v.34, p.659-667, 2010.

ŠIMANSKÝ, V. Soil structure stability and distribution of carbon in water-stable aggregates in different tilled and fertilized Haplic luvisol. **Acta Univ. Agric. Silv. Mendelianae Brun.**, v.20, n.3, p.173-178, 2012.

SINGH, P.K.; DESHBHRATAR, P.B.; RAMTEKE D.S. Effects of sewage wastewater irrigation on soil properties, crop yield and environment. **Agricultural Water Management**, v.103, p.100–104, 2012.

SYLVIA, D.M.; FUHRMANN, J.J.; HARTEL, P.G. & ZUBERER, D.A. Principles and applications of soil microbiology. Part I: habitat and organisms. Prentice Hall:New Jersey, p.1-168, 1999.

TZANAKAKIS, V.A.; PARANYCHIANAKIS, N.V.; ANGELAKIS, A.N. Nutrient removal and biomass production in land treatment systems receiving domestic effluent. **Ecological Engineering**, v.35, p.1485-1492, 2009.

VAN RAIJ, B., ANDRADE, J.C., CANTARELLA, H., QUAGGIO, J.A. **Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais**. Instituto Agrônômico de Campinas:Campinas, SP., 2001, 284p.

WYMORE, A.W. **Model-based system engineering: An introduction to the mathematical theory of discrete systems and to the tricotyledon theory of system design**. Boca Raton: CRC Press, 710p. 1993.

CAPÍTULO IV - Efeito da aplicação de esgoto doméstico tratado e fertirrigação via gotejamento subsuperficial na emissão de gases de efeito estufa

Resumo

A intensificação das atividades antrópicas em consequência do alto consumo de bens e serviços, pode resultar em elevação significativa nas emissões de gases de efeito estufa (GEE) e geração de águas residuárias. A produção do etanol de cana-de-açúcar possui potencial mitigador dos GEE frente aos combustíveis fósseis. A cana-de-açúcar apresenta características desejáveis para disposição de efluentes urbanos. Entretanto, a agricultura é a principal fonte emissora de dióxido de carbono, óxido nitroso e metano, especialmente em regiões de clima tropical e subtropical. Assim, o estudo tem como objetivo contabilizar as emissões de carbono, óxido nitroso e metano em contraste ao carbono remanescente na área, após o cultivo de cana-de-açúcar irrigada com esgoto doméstico tratado (EDT) e água de reservatório superficial (ARS), com e sem complementação nutricional, e cultivo não irrigado. A mensuração das emissões de C-CO₂ foi realizada utilizando analisador portátil de análise de gás por infravermelho, já o fluxo de N-NO₂ e C-CH₄ foram medidos em cromatógrafo com coleta dos gases em câmara estática fechada. O carbono remanescente na área foi estimado pela massa seca dos órgãos remanescentes na área após a colheita dos colmos. O tratamento irrigado com ARS, sem complementação nutricional, obteve menor emissão acumulada de gases de efeito estufa (EAG) (11,06 Mg C_{eq} ha⁻¹), em virtude do baixo fluxo de C-CO₂ e N-N₂O. O C-CH₄ apresentou potencial sumidouro, entretanto, com baixa participação, em todos os tratamentos. Os tratamentos irrigados com EDT apresentaram as maiores taxas de emissão de C-CO₂, diferindo significativamente do cultivo irrigado com ARS sem complementação nutricional. O cultivo não irrigado com adubação de cobertura possui elevada emissão de N-N₂O (4,86 kg N-N₂O ha⁻¹) quando comparado aos demais tratamentos, com a alta taxa de emissão de N-N₂O ocorrendo logo após as adubações de cobertura. O uso da fertirrigação via gotejamento subsuperficial, minimiza a emissão de óxido nitroso na agricultura em comparação ao cultivo não irrigado com adubação de cobertura.

Palavras Chaves: Aquecimento global, Óxido nitroso, Metano, Estocagem de carbono.

Introdução

O cultivo de cana-de-açúcar para a geração de bioenergia em substituição aos combustíveis de origem fóssil cresceu significativamente nos últimos anos, devido, entre outros fatores, ao potencial atenuador dos gases de efeito estufa (GEE) (SMITH et al., 2008). Entretanto, a liberação de gases durante o cultivo, que ocorre pelas queimadas, fertilizações e mudanças no uso do solo (SCHLESINGER, 2000; LAL, 2004), geram inúmeros questionamentos sobre os benefícios dos biocombustíveis em reduzir a emissão GEE e promover a qualidade ambiental.

Segundo dados do IPCC (2007), as atividades agrícolas são responsáveis pela emissão de 30% dos GEE, sendo que em regiões tropicais este valor pode chegar a 50%. Atualmente, diversos estudos investigam a dinâmica dos GEE e os fatores mitigadores em sistemas agrícolas. Entretanto, os estudos em áreas irrigadas são escassos, com exceção do cultivo de arroz (LI et al., 2006; LIU et al., 2013). A prática da irrigação, quando bem manejada, é medida preventiva dos gases de efeito estufa (LAL, 2004; SMITH et al. 2008), pois a aplicação de água durante os eventos de seca permite que as plantas se desenvolvam sem o efeito do estresse hídrico no solo, e conseqüentemente tenham maior oportunidade de assimilar o CO₂ atmosférico e assim acumular carbono.

Mudanças no modo de disposição dos fertilizantes, especialmente os nitrogenados, com práticas mais eficientes, como a fertirrigação, contribui para a redução das emissões de óxido nitroso e perda do N em sistemas agrícolas (LAL, 2004). É sabido que a agricultura é responsável por 84% das emissões de óxido nitroso (SMITH et al., 2008), sendo um desafio para o setor reduzir as emissões deste gás, com o uso de técnicas eficientes na aplicação dos adubos nitrogenados (BOUWMAN, 2001).

Em sistemas fertirrigados, os nutrientes são dispostos em baixa dosagem e alta frequência de aplicação, reduzindo as perdas por lixiviação e volatilização (DOBERMANN, 2007; ROBERTS, 2008). Tal prática ganha melhores perspectiva quando aplicada via irrigação por gotejamento, especialmente, o sistema subsuperficial, em virtude da alta uniformidade de aplicação de água e disposição diretamente na zona radicular das culturas (LAMM e TROOIJEN, 2003; GIL et al., 2008). A técnica da irrigação por gotejamento subsuperficial (IGS) é aconselhável também para disposição de efluentes (LAMM e AYARS, 2007), como o esgoto doméstico tratado (EDT).

A aplicação de esgoto doméstico tratado na agricultura, além de ser prática de reúso, traz consigo vantagens econômicas por reduzir a aplicação de fertilizantes, especialmente os nitrogenados (FONSECA et al., 2005; MEDEIROS et al. 2005; LEAL et al., 2009). Devido ao fornecimento de N, via esgoto, o consumo de fertilizantes minerais é reduzido, contribuindo para a mitigação do efeito estufa, visto que os fertilizantes nitrogenados não provocam emissão de GEE apenas via solo, mas também, pelo processo de fabricação. KERN et al. (2010) avaliando o balanço das emissões de GEE, verificou que a fabricação dos fertilizantes contribuiu com 54% das emissões de CO₂ equivalente na produção do centeio e 51% na produção de álamo. Entretanto, Senbayram et al. (2009), relatam que o aumento da emissão de N₂O em cultivo adubado com fertilizantes orgânicos, frente aos minerais, ocorre principalmente em condições de elevada umidade do solo. Poros do solo preenchidos com 70% ou mais de água, limita a aeração e favorece o processo de desnitrificação, resultando em abundantes emissões de N-N₂O (DAVIDSON e SCHIMMEL, 1995).

Neste contexto, o estudo tem como objetivo realizar o balanço de gases do efeito estufa, contabilizando as emissões de carbono, óxido nitroso e metano em contraste ao carbono total remanescente da cana-de-açúcar não irrigada e irrigada com EDT e ARS, com e sem complementação nutricional.

Material e Métodos

O balanço dos gases do efeito estufa (Δ GEE) foi estimado com base no CO₂ remanescente na área após a colheita da cana-de-açúcar (folhas, ponteiros, palhada e raiz) subtraído a emissão dos gases de efeito estufa, em base de CO₂ equivalente.

No processo da colheita, os perfilhos foram retirados da área com as folhas e ponteiros, permanecendo apenas a palhada. Porém, para o cálculo de carbono remanescente na área, considerou o carbono armazenado nas folhas e ponteiros como remanescente, de maneira que apenas os colmos foram retirados, para o processo industrial.

Para determinar a massa seca das folhas e ponteiros, coletou-se cinco perfilhos por parcela, separando as folhas e os ponteiros do colmo. Após a separação, as amostras foram secas em estufa de circulação forçada a 72°C, até atingir peso constante. Após a obtenção da massa seca das folhas e ponteiro por perfilho, foi estimado a massa seca total em um hectare. Para a amostragem da palhada, utilizou como molde uma caixa plástica vazada, medindo 0,556 m de

comprimento e 0,360 m de largura (0,20 m²). O molde foi alocada transversalmente na entrelinha de plantio, a palhada presente no interior do molde foi coletada e seca em estufa a 72°C até peso constante. Após a secagem foi estimado a massa seca da palhada em um hectare.

A amostragem das raízes foi realizada utilizando a metodologia proposta por Fujiwara et al. (1994), com auxílio de uma sonda, tipo trado, com 0,072 m de diâmetro interno e 0,20 m de altura (Capítulo I). Posteriormente, a amostragem separou as raízes, lavando-as com auxílio de peneiras de 1 mm e, separado as impurezas, palhas e solo residual, com auxílio de pinças. Após a separação, as amostras de raízes foram secas em estufa, igualmente aos demais restos culturais. A determinação da massa seca das raízes por hectare seguiu a metodologia descrita por Otto et al. (2009) para amostragem com sonda.

Com os valores da massa seca das folhas e ponteiros, do sistema radicular e da palhada, estimou-se a concentração de CO₂ remanescente na área (Equação 1). A concentração de C nesses componentes, seguiu os valores proposto por Beeharry (2001), que indica concentração de 49,3% para a folha e ponteiro e 49,0% para a palhada e raízes.

$$ECR = [(MS_{fp} \times 0,493) + (MS_r \times 0,49) + (MS_p \times 0,49)] \times \frac{44}{12} \quad (\text{Eq. 1})$$

Onde, ECR, representa o estoque de carbono remanescente na área após a colheita dos colmos (Mg CO₂ ha⁻¹); MS_{fp}, a massa seca das folhas mais ponteiros (Mg ha⁻¹); MS_p, a massa seca da palhada (Mg ha⁻¹); MS_r, a massa seca das raízes (Mg ha⁻¹), e 44/12 é o fator de conversão de C para CO₂.

Para a determinação do fluxo de carbono do solo (FCO₂), utilizou-se um analisador de gás por infravermelho (IRGA), portátil, LI-COR 8100. A câmara do equipamento apresenta volume interno de 835,2 cm³ com área de contato de 78,5cm³. As câmaras foram sobreposta em tubos de PVC com 6 cm de altura, em forma de colares, previamente inseridos no solo a uma profundidade de 3 cm, desta forma 3 cm ficaram exposto para acoplagem da câmara do IRGA. Os colares de PVC foram inseridos na menor entrelinha de plantio (0,40 m).

O metano (C-CH₄) e o óxido nitroso (N-N₂O) foram estimados pelo método da câmara estática fechada, com análise da concentração dos gases em cromatografia (CEF) (BALL et al., 1999; JANTALIA et al., 2008). As câmaras foram confeccionadas em tubos de PVC, do tipo *defofo*

com 23 cm de altura e 25 cm de diâmetro, e foram enterradas a 3 cm no solo, assim a altura da câmara tomando como referência a superfície do solo tinha 20 cm de altura.

Os gases foram coletados com o auxílio de seringa plástica de 60 mL e posteriormente injetados em frascos de vidro de 20 mL, fechados com septos de borracha (Bellco Glass, NJ, USA), seguindo o procedimento descrito por Sousa Neto et al. (2011). A coleta dos gases foi realizada após o fechamento da câmara nos tempos 1; 10; 20 e 30 min, conforme metodologia descrita por Carmo et al. (2013). Após a coleta os frascos foram encaminhados para a Universidade Federal de São Carlos, campus Sorocaba, com a análise dos gases em cromatografo gasoso, modelo Shimadzu GC-2014 (Shimadzu Co., Columbia, MD, USA).

Para o cálculo da taxa de emissão, o volume molar dos gases (V_m) foi corrigido para a temperatura ambiente e pressão atmosférica determinados no momento da coleta. A temperatura do ar e a pressão atmosférica foram coletadas da estação meteorológica automática da CEPAGRI, localizada a 200 m da área experimental. O fluxo dos gases (f) foi calculado por meio da Equação 2, conforme Jantalia et al. (2008).

$$f = \frac{\Delta C}{\Delta t} \times \frac{V}{A} \times \frac{m}{V_m} \quad (\text{Eq. 2})$$

Onde, $\Delta C/\Delta t$ é a mudança na concentração dos gases na câmara durante o tempo de incubação (Δt); V e A são respectivamente o volume da câmara e a área de solo coberta pela câmara, m é o peso molar de cada gás.

As coletas de gases foram realizadas em quatro parcelas experimentais. Instalou-se dois colares de PVC e duas câmeras estática por parcela, totalizando 8 amostragem de gases por tratamento, em cada evento amostral.

Para determinação das emissões ao longo do ciclo de cultivo, foram realizadas duas coletas, a cada 15 dias, até junho de 2013 e duas coletas logo após a colheita da cana-de-açúcar. No período de julho e agosto de 2013, houve paralisação das coletas do FCO_2 devido ao acamamento da cana-de-açúcar, dificultando o acesso as parcelas. Na estimativa do valor acumulado da emissão de C-CO_2 , inicialmente determinou-se a média das duas coletas realizadas a cada 15 dias. Essas coletas foram realizadas um dia antes e um dia depois da fertirrigação. Posteriormente, foi determinado o valor acumulado a cada 15 dias, utilizando a Equação 3.

$$FA_i = \sum Fd_i + [(F_{ic} - F_{fc}) \div Nd_{el}] + FA_{i-1} \quad (\text{Eq. 3})$$

Onde, FA_i , representa o fluxo acumulado estimado até o dia i ; Fd_i , é o fluxo de gás no dia i ; F_{ic} , é o valor de fluxo inicial, no intervalo entre de duas mensurações em campo; F_{fc} é o fluxo final entre o intervalo de duas leituras no campo; Nd_{el} , é o número de dias Juliano entre as duas leituras; FA_{i-1} , é o fluxo acumulado no dia anterior a estimativa do fluxo acumulado.

A frequência de amostragem do FN_2O e FCH_4 foi dividido em três etapas. Na primeira etapa foram realizadas duas amostragem por mês. Na segunda etapa, foram realizadas cinco amostragem no mês de janeiro, posteriores a adubação de cobertura e na terceira etapa voltou-se a realizar duas amostragens por mês. As coletas no período quinzenal foram efetuadas sempre após a fertirrigação. Em junho de 2013 devido ao problema de acamamento encerrou as coletas dos gases.

Para a determinação do fator de emissão (FE) do $N-N_2O$, nos tratamento com aplicação de fertilizantes nitrogenados, utilizou-se como referência o tratamento T5ANf, devido a mínima aplicação de nitrogênio ($1,28 \text{ kg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$). O cálculo foi realizado seguindo a recomendação do IPCC (2006) e Allen et al. (2010), conforme equação 4.

$$FE = \left(\frac{FA_{N-N_2O_i} - FA_{N-N_2O(T5ANf)}}{NT} \right) \times 100 \quad (\text{Eq. 4})$$

Onde, FE, representa o fator de emissão do $N-N_2O$ (%); $FA_{N-N_2O_i}$, representa o fluxo de óxido nitroso acumulado nos tratamentos que receberam doses de N; $FA_{N-N_2O(T5ANf)}$, é o fluxo de óxido nitroso acumulado no tratamento T5ANf; NT, dose de nitrogênio total aplicado em cada tratamento.

Com os valores de fluxo acumulado do $C-CO_2$, $N-N_2O$ e $C-CH_4$, foi determinada a emissão acumulada dos gases em base de CO_2 equivalente (EAG), por meio da Equação 5.

$$EAG = \left(\frac{44}{12} \times FC-CO_2 \right) + \left(\frac{44}{28} \times FN-N_2O \times 298 \right) + \left(\frac{16}{12} FC-CH_4 \times 25 \right) \quad (\text{Eq. 5})$$

Onde, $FC-CO_2$, o fluxo acumulado de $C-CO_2$; $FN-N_2O$ representa o fluxo acumulado de $N-N_2O$; $FC-CH_4$, é o fluxo acumulado de $C-CH_4$; 44/12, 44/28 e 16/12 representam a conversão

de C-CO₂, N-N₂O e C-CH₄ para CO₂, N₂O e CH₄, respectivamente; e 298 e 25 valores de conversão do N₂O e CH₄ para CO₂ equivalente (IPCC, 2007).

Os valores de emissão total de C-CO₂; N-N₂O e C-CH₄, a massa seca de raiz coletada na menor entrelinha de cultivo, ou seja, no local de amostragem dos gases, emissão acumulada dos GEE com base em CO₂ equivalente (EAG), do carbono remanescente na área (CRA) após a colheita e, o balanço entre a EAG e CRA, foram submetidos a análise de variância e as médias de cada tratamento comparadas entre si pelo teste de Tukey a p<0,05.

Resultados e Discussão

O comportamento dos FC-CO₂, durante o período experimental, foram similares entre os tratamentos (Figura 20), com os maiores valores sendo obtidos durante o verão, e com queda até atingirem os valores mínimos médios no inverno. O decréscimo ocorre devido a redução na temperatura do solo, que ocasiona diminuição das atividades microbiana e das raízes. Nsabimana et al. (2009) verificaram em seis monocultivos arbóreo, que os FC-CO₂ apresentaram padrões sazonais congêneros aos verificados neste estudo. Meli et al. (2002) reforça que a variação dos atributos relacionados a microflora do solo são altamente influenciados pelas variações da temperatura.

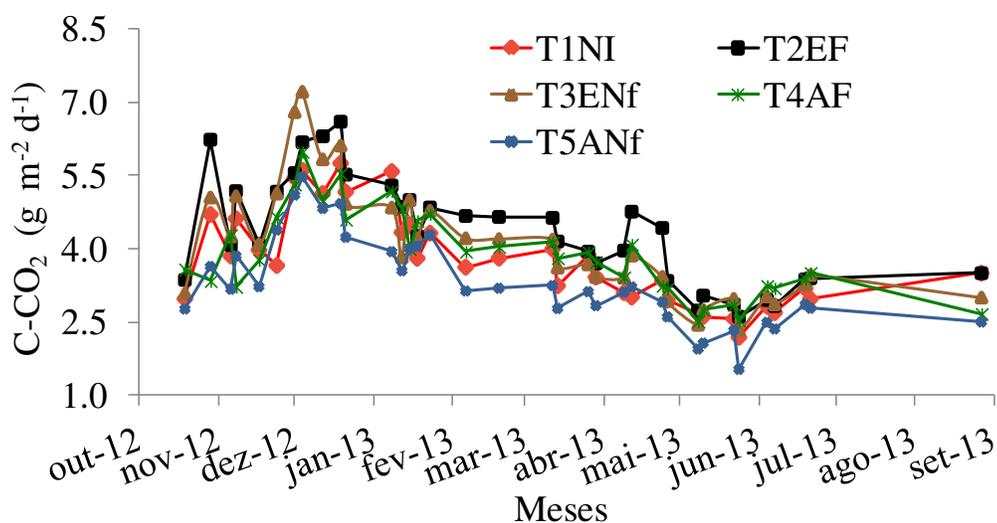


Figura 20 - Fluxo de C-CO₂ durante o período experimental nos tratamentos, não irrigado (T1NI), irrigado com EDT e fertirrigação complementar (T2EF) e sem complementação nutricional (T3ENf), irrigado com ARS e fertirrigação complementar (T4AF) e sem complementação nutricional (T5ANf).

A dinâmica de FC-CO₂ nos tratamentos irrigados com EDT apresentaram ligeiro incremento em relação ao tratamento não irrigado e, expressivo incremento quando comparado ao T5ANf (Figura 20). O T2EF obteve o maior fluxo médio, com valor de 4,20 mg m² d⁻¹, já o T5ANf apresentou o menor FC-CO₂, com valor de 2,87 mg m² d⁻¹. Em estudo com efluente de laticínio, Barton e Schipperand (2001) observaram incremento nas emissões de CO₂ quando a aplicação do efluente foi complementada com fertilizantes minerais em relação aos demais cultivos. Assim, os resultados indicou que o incremento na emissão ocorreu pelo adequado fornecimento nutricional, complementar a disposição de matéria orgânica ao solo.

Por meio da dinâmica do fluxo de N-N₂O (Figura 21) observou-se rápido incremento no FN-N₂O, 15 dias após a adubação de cobertura no cultivo não irrigado, com valores variando de 1,1 mg m⁻² d⁻¹, em dezembro de 2012, a 56,6 mg m⁻² d⁻¹ no mês seguinte. Diversos estudos relatam aumento do FN-N₂O após a adubação nitrogenada, seja mineral ou orgânica (ALLEN et al., 2010; CARMO et al., 2013; SIGNOR et al., 2013).

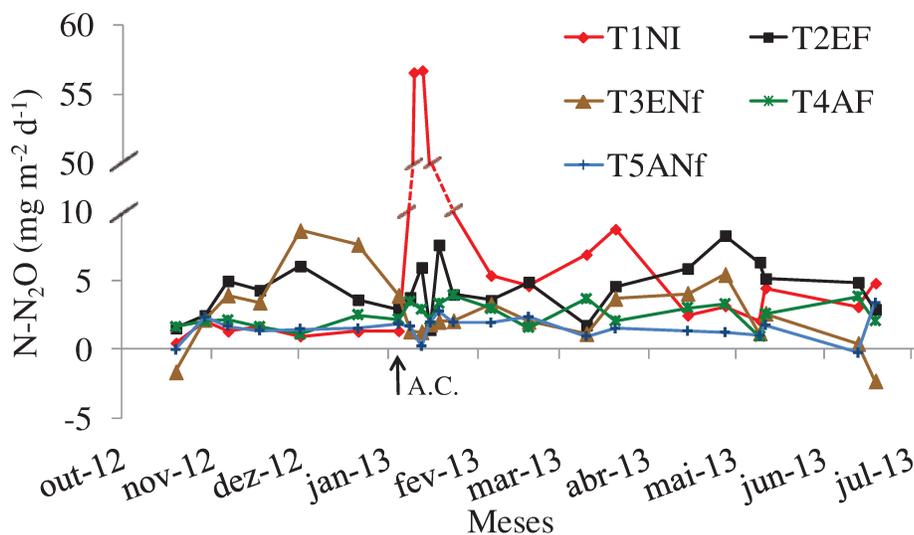


Figura 21 - Fluxo de N-N₂O nos tratamentos, não irrigado (T1NI), irrigado com EDT e fertirrigação complementar (T2EF) e sem complementação nutricional (T3ENf), irrigado com ARS e fertirrigação complementar (T4AF), e sem complementação nutricional (T5ANf). AC, Data da adubação de cobertura no T1NI.

No estudo desenvolvido por Signor et al. (2013), e realizado no ciclo da segunda cana-soca, em Piracicaba-SP, os autores constataram que a aplicação de 120 kg ha⁻¹ de ureia ocasionou fluxo máximo próximo a 60,67 mg N-N₂O m⁻² d⁻¹, em 20 dias após a aplicação de fertilizantes. Carmo et al. (2013) aplicando 60 kg ha⁻¹ de ureia no ciclo da cana-planta, constataram fluxo

máximo na linha de plantio próximo a $30 \text{ mg N-N}_2\text{O m}^{-2} \text{ d}^{-1}$, após 15 dias da adubação de cobertura. A magnitude e tempo de máxima emissão, obtida pelos autores acima, após a adubação foram semelhantes ao verificado neste estudo para o cultivo não irrigado com adubação de cobertura.

Após janeiro de 2013, o FN-N₂O do T1NI decresceu e permanece com valores próximos a $4,3 \text{ mg m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ até maio de 2013, quando foi evidenciado um segundo pico de emissão, com fluxo próximo a $8,7 \text{ mg m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ (Figura 21). No mês de maio foram verificados altos volumes de chuvas, com total mensal de 380 mm. Estudando diferentes teores de água no solo, Bateman e Baggs (2005); Ruser et al. (2006), obtiveram máximo FN-N₂O quando 70% dos poros do solo estavam preenchidos com água e, relataram que este efeito ocorreu pela intensificação do processo de desnitrificação. Para Skiba e Ball (2002), a magnitude das emissões de N-N₂O possui relação direta com a umidade do solo. Ressalta-se que durante a condução deste experimento manteve-se o solo sempre próximo a capacidade de campo, nos cultivos irrigados.

No tratamento T2EF, o fluxo de óxido nitroso, após o início das irrigações, oscilou entre $1,39 \text{ mg m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ a $8,25 \text{ mg m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ (Figura 21), com valor médio de $4,24 \text{ mg m}^{-2} \text{ d}^{-1}$, e elevados fluxos de abril a maio, período de maior volume irrigado. Em dezembro, o FN-N₂O foi ligeiramente superior no T3ENf em comparação ao T2EF, com valores médios neste mês de 8,11 e $4,81 \text{ mg m}^{-2} \text{ d}^{-1}$, respectivamente. Nos meses de novembro a dezembro, a lâmina irrigada no T3ENf foi superior ao T2EF, em aproximadamente $70 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$, indicando efeitos do incremento da lâmina de EDT no fluxo de N-N₂O. Os tratamentos irrigados com ARS, exibiram os menores valores médio de FN-N₂O, 2,34 e $1,53 \text{ mg m}^{-2} \text{ d}^{-1}$, respectivamente para o T4AF e T5ANf.

Os fluxos de metano do solo, em todos os tratamentos, foram extremamente baixos, com valor máximo, entre os tratamentos, de $0,069 \text{ mg m}^2 \text{ d}^{-1}$ ocorrendo no T3ENf, em janeiro de 2013 e, o valor mínimo foi de $-0,274 \text{ mg m}^2 \text{ d}^{-1}$, evidenciado no T1NI, em de abril de 2013 (Figura 22). Em geral, os tratamentos apresentaram comportamento sumidouro de C-CH₄, diferentemente da irrigação por inundação que contribuiu significativamente para a emissão deste gás (LIU et al., 2013). Assim, os resultados permitem afirmar que a IGS, contribui para o processo de mitigação das emissões de metano em sistemas irrigados.

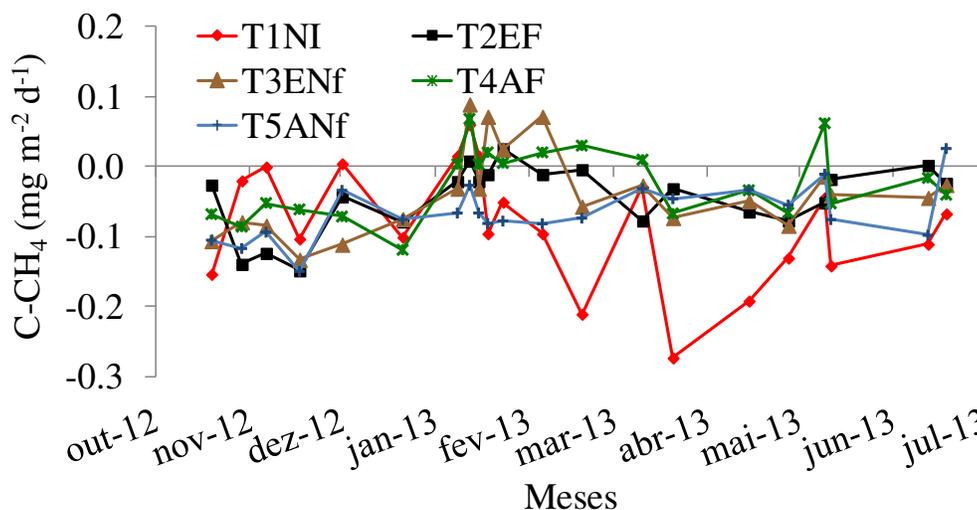


Figura 22 - Fluxo de C-CH₄ nos tratamentos não irrigado (T1NI), irrigado com EDT e fertirrigação complementar (T2EF), irrigado com EDT sem complementação nutricional (T3ENf), irrigado com ARS e fertirrigação complementar (T4AF), irrigado com ARS sem complementação nutricional (T5ANf).

Estudos com cana-de-açúcar não irrigada, apresentaram comportamento semelhante ao verificado na Figura 22, com variações próxima de zero e efeito sumidouro em alguns cultivos (DENMEAD et al., 2010; ALLEN et al., 2013; CARMO et al., 2013). Pesquisas com diferentes áreas e culturas, destacam a capacidade dos solos funcionar como drenos de metano (WANG et al., 2005; DALAL et al., 2008; KERN et al., 2012).

O incremento no fluxo pela disposição de EDT, ocasionou diferenças significativas na emissão acumulada de C-CO₂ ao T5ANf, com os tratamentos T2EF e T3ENf obtendo aumento na ordem de 23 e 18%, respectivamente (Tabela 11). Conforme apresentado por Barton e Schipper (2001), o aumento na emissão de C-CO₂ ocorre pela incorporação do carbono orgânico, com adequado suprimento de N, características presentes no EDT (Tabela 1). A matéria orgânica, com adequado teor de nitrogênio, é fonte de energia para os organismos heterotróficos, responsáveis pelo processo de mineralização da matéria orgânica (FEIGIN et al., 1991). Assim, a aplicação de efluente diretamente na zona radicular da cana-de-açúcar, contribuiu para o processo de mineralização do carbono orgânico aplicado e do solo, ocasionando elevações na emissão de C-CO₂ dos cultivos irrigados com EDT.

Tabela 11 - Massa seca de raiz da menor linha dupla até a profundidade de 0,60 m (MR), emissões acumuladas de C-CO₂, N-N₂O e C-CH₄ na menor entre linha de plantio durante o ciclo de cultivo, fator de emissão do N-N₂O (FE) e total de N aplicado em cada tratamento.

Tratamentos	MR	C-CO ₂	N-N ₂ O	FE	N total	C-CH ₄
	Mg ha ⁻¹		Kg ha ⁻¹	%	Kg ha ⁻¹	g ha ⁻¹
T1NI	0,74 ab	3,27 ab	4,95 a	3,19 a	120,0	-112,1
T2EF	0,83 ab	3,73 a	3,07 b	1,64 b	121,4	-40,6
T3ENf	0,99 a	3,59 a	2,29 bc	1,55 b	75,7	-39,84
T4AF	1,05 a	3,38 ab	1,70 cd	0,49 c	120,6	-27,91
T5ANf	0,62 b	2,88 b	1,11 d	-	1,28	-52,4
Teste F	4,91	6,31	42,2	13,78	-	78,25
Média	0,85	3,35	2,62	1,71	-	-54,56
C.V. (%)	18,42	7,55	17,44	24,90	-	8,97

Médias seguidas pelas mesmas letras não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de significância. Tratamento não irrigado (T1NI), irrigado com esgoto e fertirrigado (T2EF), irrigado com esgoto e sem fertirrigação (T3ENf), irrigado com água de reservatório e fertirrigado (T4AF) e irrigado com água de reservatório sem fertirrigação (T5ANf).

Além do efeito direto da aplicação do EDT, a disposição de água com adequado conteúdo nutricional, como o EDT e os sistemas fertirrigados, favorece o desenvolvimento do sistema radicular na região do bulbo molhado (ZOTARELLI et al., 2009; SOUSA et al. 2013). O sistema radicular é uma importante fonte de emissão de C-CO₂ do solo para a atmosfera e, segundo Melillo et al. (2002), avaliando uma área de mata, constataram que as raízes foram responsáveis por 20% da emissão total de CO₂, com o restante oriundo das atividades microbiológicas do solo.

Na cana-de-açúcar, o tamanho da atividade do sistema radicular apresenta relação direta com o tamanho da massa de raiz (OTTO et al., 2009). Por meio da Tabela 11, é constatado efeito da aplicação de EDT sem complementação nutricional e, da irrigação de ARS com fertirrigação, sobre a massa de raiz (MR), coletada na menor entrelinha (0,40 m) até a profundidade de 0,60 m, que diferiu significativamente do T5ANf. Certamente o maior desenvolvimento do sistema radicular, abaixo da área de amostragem do C-CO₂, no tratamento T3ENf, favoreceu a emissão do C-CO₂ em relação ao T5ENf.

O tratamento T2EF não ocasionou efeito sobre a MR (p<0,05) quando comparado ao T5ANf. Entretanto, o valor médio absoluto do T2EF foi 25% superior ao T5ANf, podendo contribuir para o incremento na emissão de C-CO₂. Já no T4AF, que obteve ganho próximo a 40% na massa do sistema radicular abaixo da área de coleta de gases, em relação ao T5ANf, não apresentou incrementos significativos na emissão total de C-CO₂, entretanto, foi constatado valor absoluto superior em 15%.

A emissão acumulada de N-N₂O no cultivo não irrigado com adubação de cobertura foi superior a verificada nos demais tratamentos, com valor médio de 4,95 kg ha⁻¹ (Tabela 11), determinando que a prática da fertilização nitrogenada, com a mesma quantidade de fertilizantes minerais ou orgânica (T2EF e T4AF), via fertirrigação por gotejamento subsuperficial, aplicado na profundidade de 0,20 m em cana-de-açúcar, reduz a emissão de N-N₂O ao longo do ciclo, minimizando a poluição atmosférica e é indicativo de menor perda de N no sistema produtivo.

Nos tratamentos irrigados com EDT, as emissões acumuladas de N-N₂O foram de 3,07 e 2,29 kg ha⁻¹ para o T2EF e T3ENf, respectivamente. Nestes tratamentos, e especialmente no T2EF, é possível verificar diminuição da emissão acumulada de N-N₂O, em relação ao cultivo não irrigado, mesmo mantendo o solo próximo a capacidade de campo, e com a aplicação frequente de água e com valores satisfatório de matéria orgânica (DQO de 45,6 mg L⁻¹), a qual favorece o processo de desnitrificação pelas bactérias heterotróficas (FEIGIN et al., 1991; MASTER et al., 2004; BARNARD et al., 2005) e, conseqüentemente incremento no FN-N₂O.

Nos cultivo irrigados com ARS, os valores acumulados de N-N₂O foram próximos a 1,70 e 1,11 kg ha⁻¹, nos tratamentos T4AF e T5ANf, respectivamente (Tabela 11). O resultado obtido pelo tratamento T4AF reflete maior eficiência do sistema em reduzir a emissão de N-N₂O, o qual se encontrava em condições favoráveis ao processo de desnitrificação, bem como alto fornecimento de nitrogênio (120,6 kg ha⁻¹) e umidade do solo próxima a capacidade de campo. A emissão de N-N₂O, no tratamento T4AF, foi 65% inferior a registrada no cultivo não irrigado, com adubação em cobertura.

O tratamento irrigado com EDT e fertirrigado apresentou aumento de 80% na emissão de N-N₂O em relação ao seu correspondente irrigado com ARS. Avaliando a emissão de N₂O em cultivos adubados com fertilizantes minerais e orgânicos, Ding et al. (2007), relataram que a aplicação de fertilizantes orgânicos ocasionou aumento no fluxo em relação a adubação inorgânica. Baron e Schipperand (2001) obtiveram resultados semelhantes ao comparar a aplicação de efluente de laticínio e fertilizantes inorgânicos.

A cana-de-açúcar não irrigada com adubação de cobertura apresentou fator de emissão de 3,20% (Tabela 11), valor acima do calculado pelo IPCC (2001), que é de 1,25%, e abaixo do verificado por Lisboa et al. (2011) ao realizar uma pesquisa de revisão deste fator em cultivo de cana-de-açúcar, os quais reportaram FE de 3,87%. Carmo et al. (2013), fornecendo a ureia como única fonte de N (60 kg ha⁻¹), verificaram fator de emissão próximo ao indicado pelo IPCC

(2001), com valor de 1,11%. Allen et al. (2010) aplicando 100 e 200 kg N ha⁻¹, no cultivo de cana-de-açúcar na Austrália, obtiveram FE de 1,07 e 6,70%, respectivamente.

Mensurando o fator de emissão em cultivo de cana-de-açúcar em dois solos na Austrália, Denmead et al. (2010), obtiveram FE máximo de 21% em solo sulfatado ácido, que caracteriza por inundar com facilidade e possuir altos teores de carbono orgânico (9,8%), após a aplicação de 160 kg de N ha⁻¹. Em solo de textura franco-arenosa, Denmead et al. (2010) verificaram que a aplicação de 150 kg N ha⁻¹, resultou em FE de 2,8%, resultado inferior ao obtido neste estudo. A variação no FE obtidos por Denmead et al. (2010) evidencia a forte influência dos fatores edafoclimáticos sobre o fator de emissão do N₂O em cultivos de cana-de-açúcar, sugerindo a necessidade da realização deste tipo de estudo em diversas condições edafoclimáticas de produção de cana-de-açúcar.

De acordo com os resultados na Tabela 11, os cultivos irrigados com EDT exibiram fator de emissão similar, mesmo com aplicação de diferentes quantidades de N, sendo de 1,64 e 1,55% para os tratamentos T2EF e T3ENf, respectivamente. Esse resultado difere dos obtidos por Allen et al. (2010) em cultivo de cana-de-açúcar na Austrália e, Signor et al. (2013) em Piracicaba-SP, os quais constataram aumento no FE conforme elevou-se a dose de fertilizante nitrogenado.

O cultivo fertirrigado com aplicação de ARS possui menor fator de emissão, mesmo em condições adversas, como a umidade do solo sempre próxima a capacidade de campo durante a fase de amostragem (Skiba e Ball, 2002; Ruser et al., 2006), ratificando o efeito positivo da disposição de nutrientes via fertirrigação e diretamente na zona radicular na redução da emissão de N-N₂O.

O influxo de metano no solo ocorreu de maneira acentuada no cultivo não irrigado, com acumulado de 112 g ha⁻¹, diferindo significativamente dos tratamentos irrigados (Tabela 11). O processo de influxo é consequência da oxidação do CH₄ por bactérias aeróbicas do solo, chamadas de metanotróficas (Le MER e ROGER, 2001; KERN et al., 2012), sendo influenciada pela difusividade do gás no solo (KRUSE et al., 1996; BALL et al., 1997).

A porosidade livre de água regula a difusividade do metano no solo (BALL et al., 1997; DALAL et al., 2008) e, apresenta relação inversa com o FC-CH₄ (KESSAVALOU et al., 1998). Nos cultivos irrigados, a umidade foi mantida sempre próxima a capacidade de campo, reduzindo a capacidade de oxidação do CH₄ em relação ao T1NI. A baixa capacidade dos solos irrigados em captar CH₄, frente aos não irrigados, é consequência também da degradação de compostos

orgânicos por bactérias anaeróbicas, as quais liberam o CH₄ e CO₂ para atmosfera no processo de metanogênese (KOTIAHO et al., 2010; QIN et al., 2010).

A emissão acumulada de GEE em base de carbono equivalente (EAG) e o carbono remanescente na área, proveniente das folhas e ponteiros (F+P), palhada, sistema radicular (SR) e estoque de carbono remanescente na área (ECR), juntamente com o balanço entre o EAG e ECR (ΔCO_2 cana) estão ilustrados na Tabela 12.

Tabela 12 - Análise de variância para a emissão de gases de efeito estufa (GEE) e participação do N-N₂O sobre o PAG, carbono acumulado nas folhas e ponteiros (F+P), palhada, sistema radicular (SR), estoque de carbono remanescente na área (ECR) e balanço entre ECR e PAG ($\Delta\text{C}_{\text{cana}}$), ao final do ciclo de cultivo da primeira cana-soca.

Tratamentos	EAG	F+P	Palhada	SR	ECR	ΔCO_2 cana
	Mg CO ₂ eq ha ⁻¹					
T1NI	14,28 a	17,09 c	15,12	3,16	35,37 b	21,09 b
T2EF	15,12 a	23,52 a	18,04	2,74	44,30 a	29,18 a
T3ENf	13,93 a	21,59 ab	17,91	3,37	42,86 ab	28,93a
T4AF	13,19 ab	18,31 bc	15,18	3,09	36,58 ab	23,38 ab
T5ANf	11,06 b	18,34 bc	15,10	2,17	35,61 b	24,55 ab
Teste F	8,84*	8,49*	0,74 ^{ns}	2,17 ^{ns}	6,158*	3,84*
Média	13,52	19,77	16,27	2,91	38,94	25,43
C.V. (%)	7,65	9,33	22,2	22,0	8,86	14,23

Médias seguidas pelas mesmas letras não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de significância. Tratamento não irrigado (T1NI), irrigado com esgoto e fertirrigado (T2EF), irrigado com esgoto e sem fertirrigação (T3ENf), irrigado com água de reservatório e fertirrigado (T4AF) e irrigado com água de reservatório sem fertirrigação (T5ANf).

Ao final do ciclo de cultivo, observou-se que o a EAG do tratamento T5ANf foi inferior a verificada nos demais tratamentos, diferindo significativamente dos cultivos irrigados com EDT e não irrigado. Deste resultado, pode-se inferir que apesar das emissões de gases serem dependentes da umidade do solo (RUSER et al., 2006; NSABIMANA et al., 2009), a adição de fertilizantes orgânicos ou inorgânicos, nas condições edafoclimáticas, intensifica as emissões de GEE no cultivo de cana-de-açúcar, em comparação ao cultivo com solo próximo a capacidade de campo, sem adição de fertilizantes inorgânicos ou orgânicos.

A cana-de-açúcar submetida ao tratamento T1NI apresentou EAG próxima a 14,28 Mg CO₂ eq ha⁻¹, não diferindo significativamente dos cultivos irrigados com EDT e do T4AF (Tabela 12). Neste tratamento, o N₂O foi responsável por aproximadamente 16% do EAG, o maior entre os tratamentos. Nos cultivos irrigados com EDT e ARS, a participação do óxido nitroso foi próxima a 8,6 e 5,4%, respectivamente. O cultivo irrigado com efluente e fertirrigado, obteve a maior emissão de GEE, com média de 15,12 Mg CO₂ ha⁻¹.

A análise do estoque de carbono remanescente na área após a colheita da cana-de-açúcar encontra-se ilustrada na Tabela 16. De modo geral, o CO₂ depositado pelos ponteiros e folhas foram altos e, superiores aos estimados por Beeharry (2001), que trabalhando com valores médios de depósito deste dois órgãos da cana-de-açúcar produzida na República da Maurícia, determinou uma capacidade de depósito próxima a 12 Mg CO₂ ha⁻¹.

Os maiores valores de carbono acumulado nas folhas e ponteiros foram verificados nos tratamentos irrigados com EDT, que não diferiram entre si, todavia diferiram do cultivo não irrigado e, o T2EF apresentou aumentos significativos em relação aos irrigados com ARS, com CO₂ estocado de 23,52 Mg CO₂ ha⁻¹. Já o tratamento com menor estoque de CO₂ nas folhas e ponteiros foi o T1NI, com valor de 17,02 Mg CO₂ ha⁻¹. O menor sequestro de CO₂ atmosférico pelo cultivo não irrigado é consequência da menor disponibilidade hídrica, reduzindo a absorção de CO₂ pela planta (MUCHOW et al., 1994; INMAM-BAMBER, 2004) e do fornecimento de elementos adicionais presentes no EDT.

O armazenamento de CO₂ na palhada e no sistema radicular não apresentou diferenças significativas entre os tratamentos, obtendo valores médios de 16,27 e 2,91 Mg CO₂ ha⁻¹, respectivamente (Tabela 16). Os valores estão adequados com o observado por Paula et al. (2010), que obtiveram acúmulo de 16,46 e 3,12 Mg CO₂ ha⁻¹ para a palhada e raízes, respectivamente.

Ao final do experimento, o tratamento T2EF apresentou maior taxa de carbono remanescente na área, diferindo dos tratamentos T1NI e T5ANf e, com armazenamento médio de 44,30 Mg CO₂ ha⁻¹ (Tabela 12). Os cultivos com menor taxa de depósito de carbono na área foram os tratamentos T1NI e T5ANf, com valores de 35,37 e 35,61 Mg CO₂ ha⁻¹, respectivamente. Os resultados obtidos nesta pesquisa foram superiores aos relatados por Beeharry (2001); Paula et al. (2010). Entretanto, destaca-se que estes autores trabalharam com valores médios de produção, em cada região de estudo.

O carbono remanescente não pode ser interpretado como carbono estocado, pois parte da palhada será decomposta nos próximos ciclos, emitindo CO₂, N₂O e CH₄ para a atmosfera. Desta forma, apenas uma alíquota do C será estocada no solo, permanecendo em equilíbrio dinâmico. Porém, ressalta-se que o tratamento T2EF possui maior potencial de estocagem de carbono no solo, em virtude do total depositado após o ciclo da primeira soca.

O balanço entre o CO₂ equivalente emitido e o carbono com base em CO₂ remanescente na área após um ciclo de cultivo foi positivo, em todos os tratamentos (Tabela 12). Os tratamentos irrigados com EDT se destacaram, conferindo maior capacidade em reduzir os impactos causado pelos gases de efeito estufa, com saldo de 29,18 e 28,93 Mg CO₂ ha⁻¹. Nestes tratamentos foram evidenciados altas emissões dos GEE, principalmente o C-CO₂ (Tabela 11). Porém, a capacidade de absorver carbono atmosférico e depositá-lo na área pelos restos vegetais e sistema radicular foi alta, compensando de certa forma a emissão dos GEE e tornando esse sistema com potencial para mitigar a emissão de GEE.

Os cultivos irrigados com ARS apresentaram valores medianos e não diferiram dos demais tratamentos, com médias de 23,38 e 24,55 Mg CO₂, para os tratamentos T4AF e T5ANf, respectivamente. O tratamento T5ANf, possui EAG inferior a observada nos tratamentos irrigados com EDT (Tabela 12). Porém, como destacado, esses cultivos apresentaram alta taxa de depósito de carbono, igualando estatisticamente o balanço de entrada e saída de carbono.

Conclusão

Os tratamentos irrigados com esgoto doméstico tratado e o não irrigado obtiveram as maiores emissões acumuladas de gases de efeito estufa, sendo superior ao registrado no cultivo irrigado com água de reservatório, sem complementação nutricional.

A aplicação de esgoto doméstico tratado na irrigação da cana-de-açúcar, reduz os impactos ambientais ocasionados pela emissão dos gases de efeito estufa, por favorecer o depósito de carbono proveniente da cana-de-açúcar, resultando em balanço de entrada e saída de CO₂ equivalente superior ao cultivo não irrigado.

O uso da fertirrigação via gotejamento subsuperficial, minimiza a emissão de óxido nitroso na agricultura em comparação ao cultivo não irrigado com adubação de cobertura.

Referências Bibliográficas

ALLEN, D.E.; KINGSTON, G.; RENNENBERG, H.; DALAL, R.C.; SCHMIDT, S. Effect of nitrogen fertilizer management and waterlogging on nitrous oxide emission from subtropical sugarcane soils. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v.136, p.209-217, 2010.

APHA - AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION. **Standard methods for the examination of water and wastewater**. 20. ed. Washington: American Public Health Association; AWWA; WPCF, 1999. 1569 p.

BALL, B.C.; DOBBIE, K.E.; PARKER, J.P.; SMITH, K.A. The influence of gas transport and porosity on methane oxidation in soils. **J. Geophys. Res.: Atmospheres**, v.102 p.23301-23308, 1997.

BALL, BC.; SCOTT, A.; PARKER, J.P. Field N₂O, CO₂ and CH₄ fluxes in relation to tillage compaction and soil quality in Scotland. **Soil & Tillage Research**, v.53, p.29-39, 1999.

BARTON, L.; SCHIPPERAND L.A. Regulation of nitrous oxide emissions from soils irrigated with dairy farm effluent. **J. Environ. Qual.**, v.30, n.3, p.1881-1887, 2001.

BARNARD, R.; LEADLEY, P.W.; HUNGATE, B.A. Global change, nitrification, and denitrification: A review. **Global Biogeochemical Cycles**, v.19, p.1-13, 2005.

BATEMAN, E.J.; BAGGS, E.M. Contributions of nitrification and denitrification to N₂O emissions from soils at different water-filled pore space. **Biology and Fertility of Soils**, v.41, n.6, p.379-388, 2005.

BEEHARRY, R. Carbon balance of sugarcane bioenergy systems. **Biomass and Bioenergy**, v.20, p.361-370, 2001.

BOUWMAN, A.F. **Global estimates of gaseous emissions from agricultural land**. Rome, Italy: FAO, 2001. Disponível em <<http://www.fao.org/docrep/004/Y2780E/Y2780E00.HTM>> acesso em 21/02/2013

CARMO, J.B.; FILOSO, S.; ZOTELLI, L.C.; et al. Infield greenhouse gas emission from sugarcane soil in Brazil: effects from synthetic and organic fertilizer application and crops trash accumulation. **GCB Bioenergy**, v.5, n.3, p.267-280, 2013.

DALAL, R.C.; ALLEN, D.E.; LIVESLEY, S.J.; RICHARDS, G. Magnitude and biophysical regulators of methane emission and consumption in the Australian agricultural, forest, and submerged landscapes: A review. **Plant Soil**, v.309, p.43-76, 2008.

DAVIDSON, E.A.; SCHIMEL, J.P. Microbial processes of production and consumption of nitric oxide, nitrous oxide, and methane. In: **Methods in Ecology: Trace Gases**. Matson, P.; Harriss, R. (Eds.). Blackwell Scientific. p.327-357, 1995.

DENMEAD, O.T.; MACDONALD B.C.T.; G. BRYANT, G.; T. NAYLOR, T.; WILSON, S.; GRIFFITH, D.W.T.; WANG, W.J.; SALTER, B.; WHITE, I.; MOODY, P.W. Emissions of methane and nitrous oxide from Australian sugarcane soils. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.150, n.6, p.748-756, 2010.

DING, W.; MENG, L.; CAI, Z.; HAN, F. Effects of long-term amendment of organic manure and nitrogen fertilizer on nitrous oxide emission in a sandy loam soil. **Journal Environmental Sciences**, v.19, p.185-193, 2007.

DOBERMANN, A. Nutrient use efficiency – measurement and management. In.: International Fertilizer Industry Association. **Fertilizer best management practices**. IFA:Paris, 2007. p.1-28.

FEIGIN, A.; RAVINA, I.; SHALHEVET, J. **Irrigation with treated sewage effluent: management for environmental protection**. Berlin: Springer, 1991. 224p.

FONSECA, A.F.; HERPIN, U.; PAULA, A.M.; VICTÓRIA, R.L.; MELFI, A.J. Agricultural use of treatment sewage effluents: Agronomic and environmental implications and perspective for Brazil. **Sci. Agric.**, v.64, n.2, p.194-209, 2007.

FUJIWARA, M.; KURACHI, S. A. H.; ARRUDA, F. B.; PIRES, R. C. M.; SAKAI, E. **A técnica de estudo de raízes pelo método do trado**. Campinas: Instituto Agrônômico, 9p. 1994.

GIL, M.; RODRIGUEZ-SINOBAS, L.; JUANA, L.; SANCHEZ, R.; LOSADA, A. Emitter discharge variability of subsurface drip irrigation in uniform soils: effect on water-application uniformity. **Irrigation Science**, v.26, p.451-458, 2008.

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

INMAN-BAMBER, N.G. Sugarcane water stress criteria for irrigation and drying off. **Field Crops Research**, v.89, p. 107-122, 2004.

Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC. **Climate Change 2001: The Scientific Basis**. Contribution of working group I to the third assessment report of the IPCC. Cambridge University Press:Cambridge. p.886, 2001.

Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC. **Climate change 2007: The Physical Science Basis**. Contribution of working group I to the fourth assessment report of the IPCC. Cambridge University Press:Cambridge, p.996, 2007.

JANTALIA, C.P.; SANTOS, H.P.; URQUIAGA, S.; BODDEY, R.M.; ALVES, B.J.R. Fluxes of nitrous oxide from soil under different crop rotations and tillage systems in the south of Brazil. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, v.82, p.161-173, 2008.

KERN, J.; HELLEBRAND, H.J.; GÖMMEL, M.; AMMON, C.; BERG, W. Effects of climatic factors and soil management on the methane flux in soils from annual and perennial. **Biol. Fertil. Soils**, v.48, p.1-8, 2012.

KERN, J.; HELLEBRAND, H.J.; SCHOLZ, V.; LINKE, B. Assessment of nitrogen fertilization for the CO₂ balance during the production of poplar and rye. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v.14, p.1453-1460, 2010.

KESSAVALOU, A.; MOSIER, A.R.; DORAN, J.W.; DRIJBER, R.A.; LYON, D.J.; HEINEMEYER, O. Fluxes of carbon dioxide, nitrous oxide, and methane in grass sod and winter wheat-fallow tillage management. **J. Environ. Qual.**, v.27, p.1094-1104, 1998.

KRUSE, C.W.; MOLDRUP, P.; IVERSEN, N. Modelling diffusion and reaction in soils. II. Atmospheric methane diffusion and consumption in a forest soil. **Soil Science**, v.161, p.355-365, 1996.

KOTIAHO, M.; FRITZE, H.; MERILA, P.; et al. Methanogen activity in relation to water table level in two boreal fens. **Biol. Fertil. Soils**, v.45, p.567-575, 2010.

KUZYAKOV, Y. Review: Factors affecting rhizosphere priming effects. **J. Plant Nutr. Soil Sci.**, v.165, p.382-396, 2002.

LAMM, F.R.; AYARS, J.E.; NAKAYAMA, F.S. **Microirrigation for crop production: design, operation and management**. Elsevier:Amsterdam, 2007, 618p.

LAMM, F.R.; TROOIJEN, T.P. Subsurface drip irrigation for corn production: a review of 10 years of research in Kansas. **Irrigation Science** v.22, p.195-200, 2007.

LAL, R. Soil carbon sequestration to mitigate climate change. **Geoderma**, v.23, p.1-22, 2004.

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

LE MER, J.; ROGER, P. Production, oxidation, emission and consumption of methane by soil: A review. **European Journal of Soil Biology**, v.37, p.25-50, 2001.

LI, C.; FROLKING, S.; XIAO, X.; ILL, B.M.; BOLES, S.; QIU, J.; HUANG, Y.; SALAS, W.; SASS, R. Modeling impacts of farming management alternatives on CO₂, CH₄, and N₂O emission: A study for water management of rice agriculture of China. **Global Biogeochemical Cycles**. v.19, n.3, p.1-10, 2005.

LISBOA, C.C., BUTTERBACH-BAHL, K.; MAUDER, M.; KIESE, R. Bioethanol production from sugarcane and emissions of greenhouse gases—known and unknowns. **GCB Bioenergy**, v.3, p.277-292, 2011.

LIU Y.; WAN, K.; TAO, Y.; LI, Z.; ZHANG, G.; LI, S.; CHEN, F. Carbon dioxide flux from rice paddy soils in central china: Effects of intermittent flooding and draining cycles. **PLOS ONE**, v.8, n.2, p.1-8, 2013.

MASTER, Y.; LAUGHLIN, R.J.; STEVENS, R.J.; SHAVIV, A. Nitrite formation and nitrous oxide emissions as affected by reclaimed effluent application. **J. Environ. Qual.**, v.33, p.852-860, 2004.

MEDEIROS, S.S.; SORES, A.A.; PEREIRA, P.A.; NEVES, J.C.L; MATOS, A.T.; SOUZA, J.A.A. Utilização de água residuária de origem doméstica na agricultura: estudo das alterações químicas do solo. **Rev. Bras. Eng. Agríc. Amb.**, v.9, n.4, p.603-612, 2005.

MELILLO, J.M.; STEUDLER, P.A.; ABER, J.D.; et al. Soil warming and carbon-cycle feedbacks to the climate system. **Science**, v.298, p.2173-2176, 2002.

MELI, S.; POTO, 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**, v.285, p.69-77, 2002.

MUCHOW, R.C.; SPILLMAN, M.F.; THOMAS, M.R. Radiation interception and biomass accumulation in a sugarcane crop grown under irrigated tropical conditions. **Australian Journal of Agricultural Research**, v.45, n.1, p.37-49, 1994.

NSABIMANA, D.; KLEMEDTSON, L.; KAPLIN, B.A.; WALLIN, G. Soil CO₂ flux in six monospecific forest plantations in Southern Rwanda. **Soil Biology and Biochemistry**, v.41, n.2, p.396-402, 2009.

OTTO, R.; FRANCO, H.C.J.; FARONI, C.E.; VITTI, A.C.; TRIVELIN, P.C.O. Fitomassa de raiz e parte aérea da cana-de-açúcar relacionada à adubação nitrogenada de plantio. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.44, n.4, p.398-405, 2009.

PAULA, M.; PEREIRA, F.A.R.; ARIAS, E.R.A.; SCHEEREN, B.R.; SOUZA, C.C.; MATA, D.S. Fixação de carbono e a emissão dos gases de efeito estufa na exploração da cana-de-açúcar. **Ciênc. Agrotec.**, v.34, n.3, p.633-640, 2010.

QIN, Y.M.; LIU, S.W.; GUO, Y.Q.; LIU, Q.H.; ZOU, J.W. Methane and nitrous oxide emissions from organic and conventional rice cropping systems in Southeast China. **Biol. Fertil. Soils**, v.46, 825-834, 2010.

ROBERTS, T. L. Improving nutrients use efficiency. **Turkish Journal of Agriculture and Forestry**, Ankara, v.32, p.177-182, 2008.

RUSER, R.; FLESSA, H.; RUSSOW, R.; SCHIMIDT, G.; BUEGGER, F.; MUNCH, J. C. Emission of N₂O, N₂, and CO₂ from soil fertilized with nitrate: effect of compaction, soil moisture, and rewetting. **Soil Biology and Biochemistry**, v.38, p.263-274, 2006.

SCHLESINGER, W.H. Carbon sequestration in soil: some cautions amidst optimism. **Agriculture Ecosystems and Environment**, v.82, p.121-127, 2000.

SENBAYRAM, M.; CHEN, R.; MÜHLING, K.H.; DITTERT, K. Contribution of nitrification and denitrification to nitrous oxide emissions from soils after application of biogas waste and other fertilizers. **Rapid Commun Mass Spectrom**, v.23, n.16, p.2489-2498, 2009.

SKIBA, U.; BALL, B. The effect of soil texture and soil drainage on emissions of nitric oxide and nitrous oxide. *Soil Use Management*, v.18, p.56–60, 2002.

SIGNOR, D.; CERRI, C.E.P.; CONANT, R. N₂O emissions due to nitrogen fertilizer applications in two regions of sugarcane cultivation in Brazil. **Environ. Res. Lett.**, v.8, p.1-9, 2013.

SMITH et al. Greenhouse gas mitigation in agriculture. **Phil. Trans. R. Soc.**, v.363, p.789-813, 2008.

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

SOUSA NETO, E. CARMO, J.B.; KELLER M.; et al. Soil-Atmosphere of nitrous oxide, methane and carbon dioxide in a gradient of elevation in the coastal Brazilian Atlantic Forest. **Biogeosciences**, v.8, 33–742, 2011.

ZOTARELLI, L., SCHOLBERG, J.M., DUKES, M.D., MUÑOZ-CAPERNA, R., ICERMAN, J. Tomato yield, biomass accumulation, root distribution and irrigation water use efficiency on a sandy soil, as affected by nitrogen rate and irrigation scheduling. **Agricultural Water Management**, v.96, n.1, p.23-34. 2009.

WANG, Y.; XUE, M.; ZHENG, X.; JI, B.; DU, R.; WANG, Y. Effects of environmental factors on N₂O emission from and CH₄ uptake by the typical grasslands in the Inner Mongolia. **Chemosphere**, v.58, n.2, p.205–215, 2005.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A mensuração da sustentabilidade de sistemas agrícolas baseada na análise dos impactos ocasionado pela atividade no rendimento e qualidade do produto e nos recursos ambientais, como a água, o solo e nas emissões de gases de efeito estufa, bem como na capacidade do sistema acumular carbono atmosférico, são ferramentas poderosas na quantificação da sustentabilidade de ambientes agrícolas (LAL, 1999; JORDAN et al., 2007; LAL, 2009). Desta forma, o estudo permitiu caracterizar de forma consistente e desafiadora o efeito da aplicação de EDT sobre os aspectos ambientais e os relacionados a produção, tanto quantitativo quanto qualitativo, nas condições edafoclimáticas do experimento.

A adoção da irrigação com EDT promoveu melhorias durante o processo produtivo, refletindo em elevada estimativa de produção de colmos e rendimento de açúcar, que foram da ordem de 235 e 35,6 Mg ha⁻¹, respectivamente. Como o tratamento irrigado com EDT, sem complementação nutricional, proporcionou rendimentos similares ao irrigado com mesma qualidade de água, porém com complementação nutricional, pode-se inferir que a aplicação apenas de EDT foi eficiente em relação aos parâmetros quantitativos e qualitativos da cana-de-açúcar, mostrando-se viável na produção desta cultura, quando aplicado via irrigação por gotejamento subsuperficial.

A elevação na fitomassa de colmos e dos outros órgãos vegetativos, nos cultivos irrigados com EDT, refletiu em menor pegada hídrica e maior acúmulo de carbono atmosférico pela cana-de-açúcar, respectivamente. A qualidade do solo foi adequado nestes tratamentos, com valor padronizado de 0,86, em escala variando de 0 a 1, e quanto mais próximo de "1" melhor a capacidade do solo em exercer suas funções básicas. Assim, os resultados sugerem que a aplicação de EDT para suprimento hídrico, ocasiona ganhos ambientais sem afetar a produção, e estes resultados são alcançados mesmo em condições de não reposição nutricional. Desta forma, os resultados indicam que a aplicação apenas de EDT ocasiona melhorias nos recursos naturais e reduz a aquisição e uso de fertilizantes minerais.

O cultivo não irrigado ocasionou queda no rendimento de colmos e elevou a perda de nitrato por lixiviação e ocasionou aumento na emissão de óxido nitroso, em relação aos tratamentos irrigados. A maior perda de nitrato por lixiviação gerou um incremento na pegada hídrica cinza deste tratamento, sinalizando uma redução no potencial de autodepuração e maior potencial de eutrofização dos recursos hídricos em sistemas de cultivo com adubação de

cobertura. Estes resultados indicam também uma maior eficiência na aplicação do N na fertirrigação, admitindo a pressuposição da maior eficiência de disposição dos nutrientes, em virtude do parcelamento das aplicação conforme a necessidade das plantas.

A qualidade do solo após o cultivo da cana-planta não foi limitante para ecossistemas agrícolas, em todos os tratamentos. Constatou-se ligeira melhoria no IQS no tratamento irrigado com ARS e sem complementação nutricional em relação aos demais tratamentos, que apresentou IQS de 0,94. As principais alterações do solo foram evidenciados nos indicadores de acidificação, com incremento na acidez potencial e redução do pH nos tratamentos fertirrigados. Este tipo de efeito foi constatado em diversos trabalhos de fertirrigação em sistemas localizados (HAYNES, 1990; BAR-YOSEF, 1999; BARBOSA et al., 2013). Este resultado enaltece o uso do EDT, sem adição de fertilizantes minerais, para produção de cana-de-açúcar. Porém, cuidados devem ser observados, pois constatou do carbono da biomassa microbiana no perfil do solo quando utilizou apenas o EDT. Segundo Powlson et al. (1987) e Franchini et al. (2007), indicadores microbiológicos são sensíveis as alterações em curto período, caracterizando de forma concisa as modificações na qualidade do solo.

A emissão acumulada de gases de efeito estufa (EAG), com base em CO₂ equivalente, dos tratamentos irrigados com EDT e do não irrigado foram similares e superiores ao da cana-de-açúcar irrigada com ARS sem complementação nutricional. O C-CO₂ foi o gás com maior participação no EAG, com média de 95%. O metano apresentou características sumidoura ao longo do ciclo de cultivo, entretanto, a participação deste gás no EAG foi extremamente baixa.

Em relação ao fluxo de óxido nitroso, o cultivo não irrigado com adubação de cobertura apresentou comportamento bem elucidado na literatura para cana-de-açúcar (ALLEN et al., 2010; SIGNOR et al., 2013), com alta taxa de emissão de N-N₂O após a adubação de cobertura. Neste cultivo, verificou-se maior fator de emissão (3,20%), refletindo em alto potencial de emissão deste gás quando comparado aos cultivos fertirrigados. Este resultado ratifica a eficiência da fertirrigação em atenuar a emissão do N-N₂O.

O cultivo irrigado com EDT e fertirrigação complementar obteve maior taxa de depósito do carbono oriundo da cana-de-açúcar, especialmente o proveniente das folhas e palhas, sendo significativamente superior ao cultivo não irrigado. Devido ao maior valor estimado de carbono remanescente na área após a colheita (ECR), o tratamento irrigado com EDT e fertirrigado obteve um alto saldo no balanço entre a ECR e a EAG, e juntamente com o outro tratamento irrigado

com EDT, porém sem complementação nutricional, diferiram significativamente do cultivo não irrigado, o qual obteve o menor saldo no balanço entre as duas variáveis.

Na maioria dos parâmetros avaliados, observou comportamento estatisticamente similar entre a cana-de-açúcar irrigada com ARS e adubação complementar via fertirrigação e os tratamentos irrigados com EDT, sendo que ambos os sistemas foram eficientes em promover melhorias nos aspectos ambientais e elevação da sustentabilidade do sistema. Entretanto, recomenda-se o a disposição do EDT quando este for disponível e próximo das áreas de cultivo. É importante frisar que a distancias das áreas de cultivo, das estações de tratamento ou de centros urbanos, pode inviabilizar economicamente o uso do EDT, em virtude do custo de deslocamento deste material.

Para caracterização dos impactos ambientais ocasionado pela aplicação de esgoto doméstico tratado na produção de cana-de-açúcar, sugere-se o desenvolvimento de projeto de longa duração, e que os projetos de pegada hídrica sejam desenvolvidos em lisímetros de drenagem, obtendo desta maneira informações precisas da dinâmica do nitrato e outros elementos poluidores, como o potássio, fósforo e princípios ativos de agroquímicos.

CONCLUSÃO GERAL

As informações resultantes das análises de rendimento de colmos e açúcar, do uso da água por meio do modelo da pegada hídrica e o balanço entre a emissão de gases de efeito estufa e o carbono remanescente, durante o ciclo da primeira cana-soca, permite afirmar que a disposição do esgoto doméstico tratado proporcionou benefícios a sustentabilidade ambiental da produção de cana-de-açúcar em comparação ao cultivo não irrigado, nas condições edafoclimáticas do estudo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALLEN, D.E.; KINGSTON, G.; RENNENBERG, H.; DALAL, R.C.; SCHMIDT, S. Effect of nitrogen fertilizer management and waterlogging on nitrous oxide emission from subtropical sugarcane soils. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v.136, p.209-217, 2010.

APHA - AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION. **Standard methods for the examination of water and wastewater**. 20. ed. Washington: American Public Health Association; AWWA; WPCF, 1999. 1569 p.

AZEVEDO, L. P.; OLIVEIRA, E. L. Efeitos da aplicação de efluente de tratamento de esgoto na fertilidade do solo e produtividade de pepino sob irrigação subsuperficial. **Engenharia Agrícola**, v.25, n.1, p.253-263, 2005.

AYERS, R.S.; WESTCOT, D.W. **Water Quality for agriculture**. 3rd. ed. Rome: FAO, 1994. 174p. (Irrigation and Drainage Paper, 29).

BARBOSA, E.A.A.; ARRUDA, F.B.; PIRES, R.C.M.; SILVA, T.J.A., SAKAI, E. Cana-de-açúcar com vinhaça e adubos minerais via irrigação por gotejamento subsuperficial: Ciclo da cana-planta. **Rev. Bras. Eng. Agríc.Ambient.**, v.16, p.952-958, 2012.

BARBOSA, E.A.A.; ARRUDA, F.B.; PIRES, R.C.M.; SILVA, T.J.A., SAKAI, E. Cana-de-açúcar fertirrigada com vinhaça via irrigação por gotejamento subsuperficial em três ciclos de cana-soca. **Rev. Bras. Eng. Agric.**, v.17, n.6, p.588-594, 2013a.

BARBOSA, E.A.A.; SAKAI, E.; SILVEIRA, J.M.C.; PIRES, R.C.M. Chemical attributes in the soil profile after six years of cultivation with irrigated and fertigated coffee at two planting spaces. In: 1st CIGR Inter-Regional Conference on Land and Water Challenge, 2013, Bari. Anais... Bari, CIGR, v.1, p.1-9, 2013b.

BAR-YOSEF, B. Advances in Fertigation. **Adv. Agron.**, v.65, 72-77. 1999.

BLUM, J.; MELFI, A.J.; MONTES, C.R. Nutrição mineral da cana-de-açúcar irrigada com efluente de esgoto tratado, em área com aplicação de fosfogesso. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.47, p.593-602, 2012.

CARDOZO, N.P.; SENTELHAS, P.C. Climatic effects on sugarcane ripening under the influence of cultivars and crop age. **Sci. Agric.**, v.70, n.6, p.449-456, 2013.

CENTRO DE PESQUISA METEOROLÓGICAS E CLIMÁTICAS APLICADA A AGRICULTURA, CEPAGRI. **Condições Meteorológicas**. 2012/2013. Disponível em: <<http://www.cpa.unicamp.br>> Acessado em 01 agosto de 2012 a 30 Setembro de 2013

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

ELAIUY, M.L.C.; SANTOS, L.N.S.; SOUSA, A.C.M.; MATSURA, E.E. Application of treated domestic sewage in the soil for design the subsurface drip irrigation. In: International Conference on Agricultural Engineering/CIGR-AgEng2012 Conference, 2012, Valencia. **Proceedings CIGR**, Valencia: CIGR-AgEng, 2012.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, EPE. **Balço Energético Nacional: Ano base 2009**, Brasília: EPE, 276 p. 2010.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION, FAO. **Water Use**, 2014. Disponível em: <http://www.fao.org/nr/water/aquastat/water_use/index.stm> Acesso em: 18 fevereiro 2014.

FIGUEIREDO, E.B.; LA SCALA Jr. Greenhouse gases balance due to the conversion of sugarcane areas from burned to green harvest in Brazil. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v.141, n.1-2, p.77-85, 2011.

FIGUEIREDO, E.B.; PANOSSO, A.R.; ROMÃO, R.; LA SCALA Jr. Greenhouse gases emission associated with sugarcane production in southern Brazil. **Carbon Balance and Management**, v.5, n.3, p.1-7, 2010.

FIGUEIREDO, P. Breve histórico da cana-de-açúcar e do papel do Instituto Agrônômico no seu estabelecimento no Brasil. In: DINARDO-MIRANDA, L.L.; VASCONCELOS, A.C.M.; LANDELL, M.G.A. **Cana-de-açúcar**. Campinas: IAC, 2008, 882p.

FRANCHINI, J.C.; CRISPINO, C.C.; SOUZA, R.A.; TORRES, E.; HUNGRIA, M. Microbiological parameters as indicators of soil quality under various soil management and crop rotation systems in southern Brazil. **Soil and Tillage Research**, v.92, p.18-29, 2007.

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

GARBIATE, M.V.; VITORINO, A.C.T.; TOMASINI, B.A.; BERGAMIN, A.C.; PANACHUKI, E. Erosão em entre sulco em área cultivada com cana crua e queimada sob colheita manual e mecanizada. **Rev. Bras. ciênc. solo**, v.35, p.2145-2155, 2011.

GIL, M.; RODRIGUEZ-SINOBAS, L.; JUANA, L.; SANCHEZ, R.; LOSADA, A. Emitter discharge variability of subsurface drip irrigation in uniform soils: effect on water-application uniformity. **Irrigation Science**, v.26, p.451-458, 2008.

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

HAYNES, R.J. Movement and transformations of fertigated nitrogen below trickle emitters and their effects on pH in the wetted soil volume. **Nutr. Cycl. Agroecosyst.**, v.23, p.105-112, 1990.

HOFFMANN, H.P.; SANTOS, E.G.; BASSINELLO, A.I.; VIEIRA, M.A. Variedades RB de cana-de-açúcar. Araras: Universidade Federal de São Carlos. Programa de Melhoramento Genético da cana-de-açúcar. 2008. 30 p.

HOSSEINI, A.M.; KANEKO, S. Dynamic sustainability assessment of countries at the macro level: A principal component analysis. **Ecological Indicators**, v.11, p.811-823. 2011.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA, IBGE. **Levantamento sistemático da produção agrícola: Pesquisa mensal de previsão e acompanhamento das safras agrícolas no ano civil**. Rio de Janeiro: IBGE, v.21, n.8, 2009, 80p.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA, IBGE. **População**. 2008. Disponível em <http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/populacao>. Acesso: 01 de março de 2012.

INMAN-BAMBER, N.G. Sugarcane water stress criteria for irrigation and drying off. **Field Crops Research**, v.89, p. 107-122, 2004.

INTERNATIONAL UNION FOR CONSERVATION OF NATURE AND NATURAL RESOURCES, IUCN. **World conservation strategy: living resource conservation for sustainable development**. Gland:IUCN, 72p. 1980.

JORDAN, N.; BOODY,G.; BROUSSARD, W.; et al. Sustainable development of the agricultural bio-economy. **Science**, v.316, p.1570-1571, 2007.

KAJIKAWA, Y. Research core and framework of sustainability science. **Sustain. Sci.**, v.3, p.215-239, 2008.

KATERJI, N.; VAN-HOORN, J.W.; HAMDY, A.; MASTROILI, M. Osmotic adjustment of sugar beet in response to soil salinity and its influence on stomatal conductance, growth and yield. **Agric. Water Manage.**, v.34, p.557-569, 1997.

KIRCHHOFF, V.W.J.H.; MARINHO, E.V.A.; DIAS, P.L.S.; PEREIRA, E.B.; CALHEIROS, R.; ANDRÉ, R.; VOLPE, C. Enhancements of CO and O₃ from burnings in sugar fields. **Journal of Atmospheric Chemistry**, v.12, p.87-102, 1991.

KOEHLER, D.A.; HECHT, A.D. Sustainability, well being, and environmental protection: perspectives and recommendations from an Environmental Protection Agency forum. **Sustainability: Science, Practice & Policy**. v.2, n.2, p.22-28, 2006.

KRONEMBERG, D.M.P.; PEREIRA, R.S.; FREITAS, E.A.V.; SCARCELLO, J.A.; CLEVELARIO Jr. Saneamento e meio ambiente. In: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, IBGE (Ed.). **Atlas de saneamento**. Rio de Janeiro: IBGE p.1-36, 2011.

LAL, R. **Método para avaliação do uso sustentável dos recursos solo e água nos trópicos**. Jaguariúna: EMBRAPA, 97p. 1999

LAL, R. Soils and sustainable agriculture: A Review. In: LICHTFOUSE, E.; NAVARRETE, M.; DEBAEKE, P.; VÉRONIQUE, S.; ALBEROLA, C. (Eds.). **Sustainable agriculture**. Netherlands: Springer, p.15-23, 2009.

LAMM, F.R.; AYARS, J.E. NAKAYAMA, F.S. **Microirrigation for crop production: design, operation and management**. Amsterdam: Elsevier, 2007. 618p.

LAMM, F.R.; MANGES, H.L.; STONE, L.R.; KHAN, A.H.; ROGERS, D.H. Water requirement of subsurface drip-irrigated corn in northwest Kansas. **Transactions of the ASAE**, v.38, n.2, p.441-448, 1995.

LAMM, F.R.; TROOIEN, T.P. Subsurface drip irrigation for corn production: a review of 10 years of research in Kansas. **Irrigation Science**, v.22, p.195-200, 2007.

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

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

LOPES, M.A. **A agricultura e o desafio da sustentabilidade**, 2007. Disponível em <www.embrapa.br/embrapa/imprensa/artigos/2007/artigo.2007>, Acesso em: 25 e janeiro de 2013.

MAGRO, J.A. Irrigação em cana. **STAB**, v.19, p.44-46, 2000.

MANZATTO, C.V.; ASSAD, E.D.; BACCA, J.F.M.; ZARONI, M.J.; PEREIRA, S.E.M. **Zoneamento agroecológico da Cana-de-açúcar: Expandir a produção, preservar a vida, garantir o futuro**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 55p, 2009.

MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO, MAPA, 2012 **Complexo sucroalcooleiro: Série histórica (2001-2011)**. Disponível em: <<http://www.agricultura.gov.br/internacional/indicadores-e-estatisticas/informes-de-produtos>> Acessado em 26 de julho de 2013.

MARQUES, P.A.A.; MARQUES, T.A.; FRIZZONE, J.A. Viabilidade econômica sob condições de risco para a irrigação da cana-de-açúcar na região de Piracicaba- SP. **Irriga**, v.11, p. 55-65, 2006.

MATIOLI, C.S.; FRIZZONE, J.A.; PERES, F.C. Irrigação suplementar de cana-de-açúcar: modelo de análise de decisão para a região norte do Estado de São Paulo. **STAB**, v.17, n.2, p.42-45, 1998.

MEDEIROS, S.S.; SORES, A.A.; PEREIRA, P.A.; NEVES, J.C.L; MATOS, A.T.; SOUZA, J.A.A. Utilização de água residuária de origem doméstica na agricultura: estudo das alterações químicas do solo. **Rev. Bras. Eng. Agríc. Ambient.**, v.9, n.4, p.603-612, 2005.

MIERZWA, J. C. **Uso de águas residuárias na agricultura – O caso de Brasil**, 2005. Disponível em: <http://www.bvsde.paho.org/bvsacd/upf/mierzwa.pdf>, Acessado em 25 de abril de 2012.

MOZAMBANI, A.E.; PINTO, A.S.; SEGATO, S.V.; MATTIUZ, C.F.M. Historia e morfologia da cana-de-açúcar. In: SEGATO, S.V.; PINTO, A.S.; JENDIROBA, E.; NÓBREGA, J.C.M. **Atualização em produção de cana-de-açúcar**. Piracicaba: CP, 2006, 415p.

ORGANIZATION FOR ECONOMIC COOPERATION AND DEVELOPMENT, OECD. **OECD Environmental Indicator 2001: Toward sustainable development**. Paris: OECD, 156p. 2001.

PIRES, R.C.M.; BARBOSA, E.A.A.; ARRUDA, F.B.; SAKAI, E.; SILVA, T.J.A. Effects of subsurface drip irrigation and different planting arrangements on the yields and technological quality of sugarcane. **J. Irrig. Drain. Eng.**, v.-, p.-, 2014.

POWLSON, D.S.; BROOKES, P.C.; CHRISTENSEN, B.T. Measurement of soil microbial biomass provides an indication of changes in total soil organic matter due to straw incorporation. **Soil Biology and Biochemistry**, v.19, n.2, p.159-164, 1987.

REICH, D.; GODIN, R.; CHÁVEZ, J.L.; BRONER, I. **Subsurface drip irrigation (SDI)**. Colorado State University, Extension. Crop Series: Irrigation, n.4716, 3p. 2009.

ROBERTSON, M.J.; INMAN-BAMBER, N.G.; MUCHOW, R.C.; WOOD, A.W. Physiology and productivity of sugarcane with early and mid-season water deficit. **Field Crops Research**, v.64, p.211-227, 1999.

ROBERTS, T.L. Improving nutrients use efficiency. **Turk. J. Agric. Forest.**, v.32, p.177-182, 2008.

RODRIGUES, G. S. **Agricultura sustentável, gestão ambiental e eco-certificação de atividades rurais**. Disponível em www.cnpma.embrapa.br/down_hp/346.pdf, acessado em 25 de abril de 2013.

ROSSETTO, R.; DIAS, F. L. F.; VITTI, A. C. fertilidade do solo, nutrição e adubação. In: DINARDO-MIRANDA, L. L.; VASCONCELOS, A. C. M.; LANDELL, M. G. A. (Ed.). **Cana-de-açúcar**. Campinas: IAC, 882p. 2008.

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

SIGNOR, D.; CERRI, C.E.P.; CONANT, R. N₂O emissions due to nitrogen fertilizer applications in two regions of sugarcane cultivation in Brazil. **Environ. Res. Lett.**, v.8, p.1-9, 2013.

TUTA, N.F. Desenvolvimento e produtividade da cana-de-açúcar no ciclo da cana-planta com aplicação de efluente de esgoto tratado via gotejamento subsuperficial. 2013. 107f. **Dissertação** (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, Brasil, 2013.

TZANAKAKIS, V.A.; PARANYCHIANAKIS, N.V.; ANGELAKIS, A.N. Nutrient removal and biomass production in land treatment systems receiving domestic effluent. **Ecological Engineering**, v.35, p.1485-1492, 2009.

ÚNICA – União das indústrias de cana-de-açúcar. **Unicadata: Histórico de produção e moagem**. Disponível em <<http://www.unica.com.br/unicadata>>, Acessado em 27 de julho de 2013

ANEXOS

Anexo A - Análises da qualidade de água, realizadas durante o período experimental.

Tabela 13 - Análises realizadas durante o período experimental dos parâmetros biológicos, químicos e dos macronutrientes, da água de reservatório superficial (ARS), coletada após o sistema de filtragem.

Data	Col. Fecais	Col. Totais	E. Coli	DBO ₅	DQO	CE	pH	Al	N	NO ₃ ⁻	NO ₂ ⁻	P ₂ O ₅	K	SO ₄ ²⁻	Ca	Mg
	Presente/Ausente 100 mL ⁻¹			mg/L	μS/cm	-		mg/L								
dez-12	Presente	Presente	Ausente	< 5	56	78	7,77	0,0327	1,8	< 0,3	< 0,02	0,03	1,17	< 5	2,51	2,42
fev-13	Ausente	Presente	Ausente	< 3	8,4	71	7,13	0,0184	0,6	< 0,3	0,04	0,03	1,82	< 5	4,98	2,99
abr-13	Presente	Presente	Presente	4,6	24	58	7,09	0,0399	0,77	< 0,3	0,02	0,05	1,05	< 5	3,62	2,02
mai-13	Presente	Presente	Presente	6,7	23	57	7,16	0,0431	0,66	< 0,3	< 0,02	0,07	0,91	< 5	4,77	3,37
jun-13	Presente	Presente	Presente	< 3	7,1	62	7,30	0,042	0,71	0,3	0,03	0,01	0,72	< 5	4,03	3,00

DBO₅, demanda bioquímica de oxigênio em cinco dias; DQO, demanda química de oxigênio; CE, condutividade elétrica.

Tabela 14 - Análises realizadas durante o período experimental dos parâmetros físicos, dos micronutrientes e metais pesados, presente na água de reservatório superficial (ARS), coletada após sistema de filtragem.

Data	Turbidez	SST	Fe	Cu	Zn	Mn	Cl	B	Co	Mo	Ni	Pb	Cd	Cr	Hg
	NTU		mg/L												
dez-12	34	< 5	0,049	< 0,001	0,043	0,040	0,03	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	0,002	< 0,0001
fev-13	3,3	< 5	0,34	< 0,001	0,095	0,027	0,04	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	0,001	< 0,0001
abr-13	20	18	0,27	< 0,001	0,094	0,014	0,01	0,004	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	0,001	< 0,0001
mai-13	14	< 5	0,32	0,002	0,067	0,016	< 0,01	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	0,001	< 0,0001
jun-13	6,9	< 5	0,19	0,0013	0,039	0,017	0,02	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	0,001	< 0,0001

SST, sólidos suspensos totais; NTU, unidades nefelométricas de turbidez.

Tabela 15 - Análises realizadas durante o período experimental dos parâmetros biológicos, químicos e dos macronutrientes, do esgoto doméstico tratado (EDT), coletado após o sistema de filtragem.

Data	Col. Fecais	Col. Totais	E. Coli	DBO ₅	DQO	CE	pH	Al	N	NO ₃ ⁻	NO ₂ ⁻	P ₂ O ₅	K	SO ₄ ²⁻	Ca	Mg
	NMP 100mL ⁻¹ (x 10 ³)			mg/L		μS/cm	-	mg/L								
dez-12	72,7	112,0	64,8	8	51	1036	7.46	< 0,01	59.4	< 0,5	< 0,1	8.09	25.4	10.9	3	17.9
fev-13	92,1	241,9	92,1	< 3	31	821	7.77	0.031	47.5	< 0,5	< 0,1	7.56	21.4	16.4	3	17
abr-13	51,7	241,9	43,5	<4	41	1120	7.89	<0,01	70.8	< 0,5	< 0,1	10.08	28.2	16.5	3.9	20.8
mai-13	46400,0	78900,0	384,0	23	68	1163	6.58	0.057	76.1	< 0,5	< 0,1	10.72	16.3	4.3	3.6	18.9
jun-13	30,8	72,7	23,8	6.4	37	1319	7.84	0.081	120	<0,5	0.16	30.28	37.1	8	4	24.3

DBO₅, demanda bioquímica de oxigênio em cinco dias; DQO, demanda química de oxigênio; CE, condutividade elétrica; NMP, número mais provável.

Tabela 16 - Análises realizadas durante o período experimental dos parâmetros físicos, dos micronutrientes e metais pesados, presente no esgoto doméstico tratado (EDT), coletado após sistema de filtragem.

Data	Turbidez	SST	Fe	Cu	Zn	Mn	Cl	B	Co	Mo	Ni	Pb	Cd	Cr	Hg
	NTU		mg/L												
dez-12	17	< 5	1.2	< 0,005	0.095	0.065	0.03	0.176	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,001	< 0,00015	< 0,01
fev-13	4.4	< 5	0.506	0.024	0.053	0.09	0.02	0.458	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,001	< 0,01	< 0,00015
abr-13	6.6	40	0.827	< 0,005	0.089	0.082	0.04	0.32	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,001	< 0,01	< 0,00015
mai-13	12	< 5	1.2	< 0,005	0.042	0.068	< 0,01	0.32	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,001	< 0,01	< 0,00015
jun-13	8.4	< 5	0.652	< 0,005	0.056	0.061	< 0,01	0.078	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,001	< 0,01	< 0,00015

SST, sólidos suspensos totais; NTU, unidades nefelométricas de turbidez.

Anexo B - Fornecimento dos nutrientes pela qualidade de água e fertilizantes minerais, ao longo do tempo, nos tratamentos irrigados.

Tabela 17 - Quantidade de nutrientes aplicado via esgoto domésticos tratado (EDT) e fertilizantes minerais (FM) no tratamento irrigado com EDT e fertirrigação complementar (T2EF), durante o período experimental.

Nutrientes	N (kg ha ⁻¹)		P ₂ O ₅ (kg ha ⁻¹)		K ₂ O (kg ha ⁻¹)		Ca (kg ha ⁻¹)		Mg (kg ha ⁻¹)		S (kg ha ⁻¹)	
	EDT	F.M	EDT	F.M	EDT	F.M	EDT	F.M	EDT	F.M	EDT	F.M
Outubro	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Novembro	16.44	3.70	2.39	1.81	7.46	3.08	5.34	2.58	0.90	0.00	4.89	0.99
Dezembro	8.27	0.00	1.20	2.10	3.75	1.50	2.69	0.00	0.59	0.00	2.48	0.48
Janeiro	5.46	0.00	0.87	3.01	2.46	6.16	1.96	0.00	0.35	0.00	1.89	1.98
Fevereiro	7.96	3.46	1.34	2.94	3.58	5.88	2.85	2.20	0.50	0.00	2.75	1.88
Março	8.81	5.44	1.33	3.17	3.63	6.16	3.08	3.67	0.58	0.00	2.44	1.98
Abril	23.63	0.00	3.37	4.86	9.41	6.28	6.31	0.00	1.20	0.00	1.44	2.02
Maiο	25.76	0.00	3.63	5.20	5.52	9.50	6.41	0.00	1.22	0.00	1.46	3.05
Junho	11.00	0.00	2.78	6.71	3.40	8.24	2.23	0.00	0.37	0.00	0.73	2.64
Soma fonte	107.33	12.60	16.91	29.79	39.22	46.80	30.85	8.45	5.69	0.00	18.07	15.01
Total	119.93		46.70		86.03		39.30		5.69		33.08	

Tabela 18 - Quantidade de nutrientes aplicado via esgoto domésticos tratado (EDT) e fertilizantes minerais (FM) no tratamento irrigado com EDT sem complementação nutricional (T3ENf), durante o período experimental.

Nutrientes	N (kg ha ⁻¹)		P ₂ O ₅ (kg ha ⁻¹)		K ₂ O (kg ha ⁻¹)		Ca (kg ha ⁻¹)		Mg (kg ha ⁻¹)		S (kg ha ⁻¹)	
	EDT	F.M	EDT	F.M	EDT	F.M	EDT	F.M	EDT	F.M	EDT	F.M
Outubro	0.00	-	0.00	-	0.00	-	0.00	-	0.00	-	0.00	-
Novembro	18.43	-	2.68	-	8.36	-	5.99	-	1.00	-	5.49	-
Dezembro	10.06	-	1.46	-	4.56	-	3.27	-	0.71	-	3.01	-
Janeiro	1.52	-	0.24	-	0.69	-	0.54	-	0.10	-	0.53	-
Fevereiro	3.20	-	0.54	-	1.44	-	1.15	-	0.20	-	1.11	-
Março	1.59	-	0.24	-	0.65	-	0.56	-	0.10	-	0.44	-
Abril	17.13	-	2.44	-	6.82	-	4.57	-	0.87	-	1.04	-
Maior	16.40	-	2.31	-	3.52	-	4.08	-	0.78	-	0.93	-
Junho	7.10	-	1.79	-	2.20	-	1.44	-	0.24	-	0.47	-
Soma fonte	75.43	-	11.70	-	28.24	-	21.59	-	4.00	-	13.01	-
Total	75.43		11.70		28.24		21.59		4.00		13.01	

Tabela 19 - Quantidade de nutrientes aplicado via água de reservatório superficial (ARS) e fertilizantes minerais (FM) no tratamento irrigado com ARS e fertirrigação complementar (T4AF), durante o período experimental.

Nutrientes	N (kg ha ⁻¹)		P ₂ O ₅ (kg ha ⁻¹)		K ₂ O (kg ha ⁻¹)		Ca (kg ha ⁻¹)		Mg (kg ha ⁻¹)		S (kg ha ⁻¹)	
	EDT	F.M	EDT	F.M	EDT	F.M	EDT	F.M	EDT	F.M	EDT	F.M
Fonte	EDT	F.M	EDT	F.M	EDT	F.M	EDT	F.M	EDT	F.M	EDT	F.M
Outubro	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Novembro	0.48	10.37	0.08	4.12	0.45	3.08	0.67	11.74	0.65	0.00	1.07	2.58
Dezembro	0.31	9.62	0.05	3.25	0.30	6.98	0.44	11.02	0.42	0.00	0.70	2.24
Janeiro	0.07	11.97	0.04	3.84	0.22	8.40	0.59	13.76	0.36	0.00	0.48	2.70
Fevereiro	0.07	13.41	0.04	4.24	0.22	9.24	0.43	15.43	0.24	0.00	0.48	2.96
Março	0.09	14.17	0.05	4.46	0.16	9.63	0.55	16.30	0.39	0.00	0.46	3.09
Abril	0.19	14.16	0.12	8.07	0.26	15.36	1.17	28.40	0.83	0.00	0.98	4.93
Maiο	0.15	17.65	0.16	7.94	0.21	14.80	0.93	27.83	0.69	0.00	0.92	4.75
Junho	0.08	27.11	0.01	7.16	0.07	11.57	0.43	23.43	0.32	0.00	0.43	3.71
Soma fonte	1.44	118.47	0.54	43.07	1.89	79.07	5.20	147.90	3.89	0.00	5.50	26.96
Total	119.91		43.62		80.96		153.11		3.89		32.46	

Tabela 20 - Quantidade de nutrientes aplicado via água de reservatório superficial (ARS) e fertilizantes minerais (FM) no tratamento irrigado com ARS sem complementação nutricional (T5ANf), durante o período experimental.

Nutrientes	N (kg ha ⁻¹)		P ₂ O ₅ (kg ha ⁻¹)		K ₂ O (kg ha ⁻¹)		Ca (kg ha ⁻¹)		Mg (kg ha ⁻¹)		S (kg ha ⁻¹)	
	EDT	F.M	EDT	F.M	EDT	F.M	EDT	F.M	EDT	F.M	EDT	F.M
Outubro	0.00	-	0.00	-	0.00	-	0.00	-	0.00	-	0.00	-
Novembro	0.58	-	0.10	-	0.55	-	0.81	-	0.78	-	1.30	-
Dezembro	0.23	-	0.04	-	0.22	-	0.32	-	0.31	-	0.51	-
Janeiro	0.03	-	0.01	-	0.08	-	0.22	-	0.13	-	0.18	-
Fevereiro	0.06	-	0.03	-	0.17	-	0.34	-	0.19	-	0.37	-
Março	0.02	-	0.01	-	0.04	-	0.13	-	0.09	-	0.11	-
Abril	0.17	-	0.11	-	0.23	-	1.04	-	0.74	-	0.88	-
Maiο	0.15	-	0.16	-	0.21	-	0.92	-	0.68	-	0.91	-
Junho	0.05	-	0.01	-	0.05	-	0.26	-	0.19	-	0.26	-
Soma fonte	1.28	-	0.46	-	1.54	-	4.04	-	3.12	-	4.51	-
Total	1.28		0.46		1.54		4.04		3.12		4.51	

Anexo C - Imagens do sistema de irrigação, cultivo da cana-de-açúcar, instrumentação e coletas dos dados.



Figura 23 - Vista aérea da área experimental localizada na FEAGRI/UNICAMP. (A) Área de plantio com cana-de-açúcar; (B) Casa de controle e filtragem do sistema de irrigação; (C) Reatores anaeróbicos (superior) e tanque de macrófitas do sistema de tratamento do esgoto; (D) Estação Meteorológica Automática da CEPAGRI; (E) Reservatório de água superficial; (F) Laboratório de hidráulica.

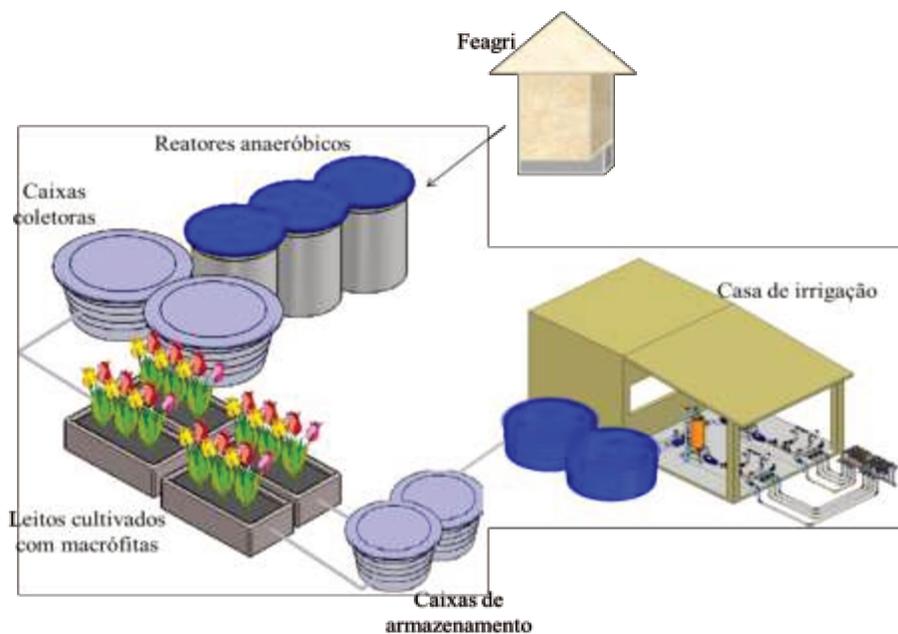


Figura 24 - Sistema integrado de tratamento e reúso agrícola de esgoto doméstico tratado, Feagri/Unicamp.

Bloco 1	T2EF	T5ANf		T3ENf	T1NI	T4AF			
Bloco 2	T4AF					T3ENf	T1NI	T2EF	T5ANf
Bloco 3	T1NI		T2EF		T4AF		T5ANf	T3ENf	
Bloco 4	T3ENf		T4AF	T1NI	T5ANf		T2EF		
Bloco 5		T1NI		T5ANf		T3ENf	T4AF		T2EF

Figura 25 - Distribuição das parcelas experimentais no campo. T1NI, tratamentos não irrigado; T2EF, irrigado com EDT e fertirrigado; T3ENf, irrigado com EDT sem complementação nutricional; T4AF, irrigado com ARS e fertirrigado; e T5ANf, irrigado com ARS sem complementação nutricional.

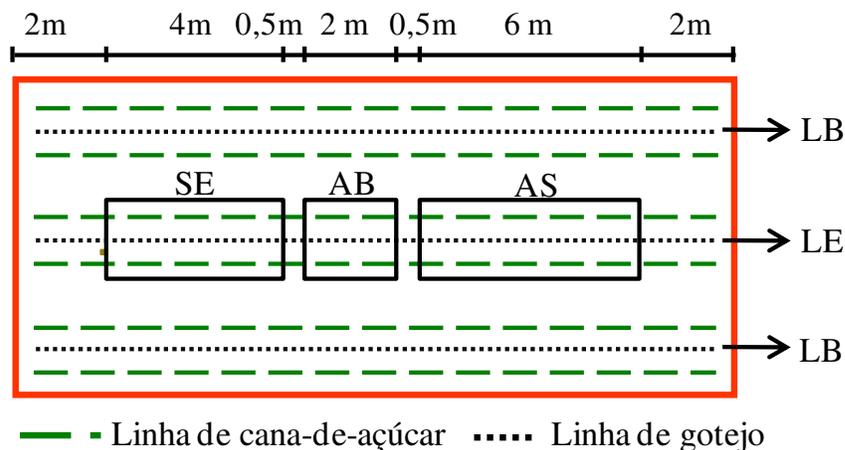


Figura 26 - Esquema da parcela experimental, com as três linhas duplas de plantio, linha de gotejamento e locais de amostragem.

*SE, área de instalação dos sensores TDR, extrator de solução e amostragem dos gases; AB, área das análises biométricas, estimativa de produção e qualidade tecnológica de final do ciclo; AS, área de amostragem do solo e sistema radicular; LB, linha de bordadura; LE, linha efetiva.



Figura 27 - Sistema de tratamento de esgoto. Reatores anaeróbicos e tanque cultivado com macrófita.



Figura 28 - Instalação da fita gotejadora no campo (esquerda) e abertura do sulco de plantio com a fita gotejadora entre os sulcos de plantio (direita)



Figura 29 - Sistema de filtragem, válvulas de controle e fertirrigação (esquerda) e painéis de controle do sistema de irrigação (direita).



Figura 30 - Instalação das sondas TDR e coleta do dados de umidade com o TDR.

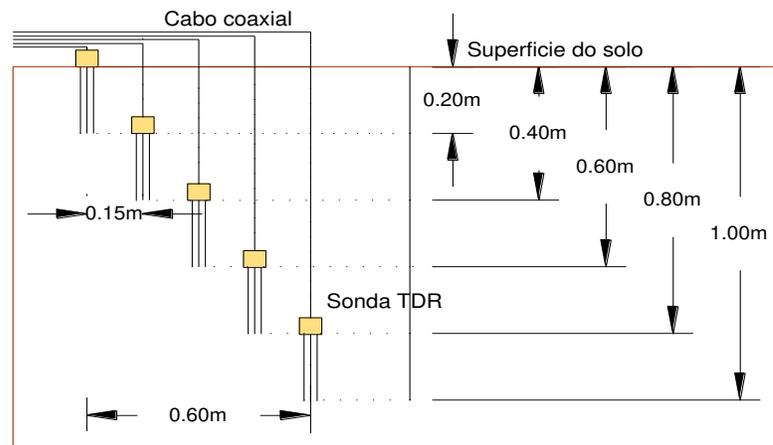


Figura 31 - Esquema de instalação da bateria de sondas TDR para monitoramento da umidade do solo na área experimental.



Figura 32 - Instalação dos extratores de solução do solo (esquerda e centro) e visão geral dos extratores no campo.



Figura 33 - Câmera estática, anéis para acoplar a câmera do IRGA e TDR (Esquerda), coleta de CO₂ e visão geral do IRGA.



Figura 34 - Esquema da coleta e leitura do óxido nítrico e metano. Instrumentos utilizados na coleta (esquerda, superior), Visão geral das câmara estática no campo e coleta dos gases em seringa de 60 mL (direita, superior), Armazenamento da amostra de gás em fresco de 20 mL (esquerda, inferior), e análise no cromatógrafo da UFSCar/Sorocaba (direita, inferior).



Figura 35 - Acamamento ocorrida na cana-de-açúcar em maio de 2013.



Figura 36 - Corte da cana-de-açúcar (esquerda) e separação dos colmos para estimativa da produção e análise tecnológica (direita).



Figura 37 - Coleta da palhada para estimativa de carbono estocado.



Figura 38 - Coleta de amostras indeformada de solo nos pontos 0,0; 0,20 e 0,40 m do tubo gotejador.



Figura 39 - Amostragem das raízes com sonda, ao lado da trincheira de coleta das amostras de solo (esquerda, superior), separação das raízes após lavagem com auxílio de pinça (direita, superior), raízes separadas (esquerda, inferior), obtenção da massa seca de raiz (direita, inferior).