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

**Reciclagem de água e nutrientes pela irrigação da cana-de-açúcar
com efluente de estação de tratamento de esgoto**

Magnus Dall’Igna Deon

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

**Piracicaba
2010**

Magnus Dall'Igna Deon
Engenheiro Agrônomo

Reciclagem de água e nutrientes pela irrigação da cana-de-açúcar com efluente
de estação de tratamento de esgoto

Orientador:
Prof. Dr. **ADOLPHO JOSÉ MELFI**

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

Piracicaba
2010

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

Deon, Magnus Dall'Igna

Reciclagem de água e nutrientes pela irrigação da cana-de-açúcar com efluente de estação de tratamento de esgoto / Magnus Dall'Igna Deon. - - Piracicaba, 2010.
88 p. : il.

Tese (Doutorado) - - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", 2010.

1. Águas residuárias 2. Cana-de-açúcar 3. Efluentes 4. Esgotos sanitários 5. Irrigação
6. Irrigação por superfície 7. Reúso da água I. Título

CDD 633.61
D418r

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

AGRADECIMENTOS

A todos que contribuíram com a realização deste trabalho.

Aos professores Adolpho José Melfi e Célia Regina Montes pela atenção e supervisão.

A Tamara Maria Gomes e Diana Signor pelo auxílio imprescindível à realização deste trabalho.

Aos professores Antonio Roque Dechen, Carlos Eduardo Pellegrino Cerri, Carlos Tadeu dos Santos Dias, Edgar Gomes Ferreira de Beauclair, Francisco Antonio Monteiro, Quirino Augusto de Camargo Carmello e ao pesquisador científico Heitor Cantarella.

Aos técnicos Alexandra Ayres Montebelo, Fabiana Cristina Fracassi, Geraldo de Arruda Junior, Gustavo Gobet Baldi, Luis Antonio Silva Junior, Lúcia Helena S. Pavan Forti, Lurdes A.D. Gonzáles, Maria Antonia Zambetta Perez, Nivanda Maria Moura Ruiz, Ednéia C. S. Mondoni e funcionários Clotilde M. B. Cunha, Paulo Sebastião e Sueli M.A. C. Bovi.

Aos estagiários Adriano Lênin Cirilo de Carvalho, Bruno Galli, Bruno Pereira de Campos, Bruno Simionato Castro, Diego Rodrigues Moreira, Elisabete da Silva, Eric Ricardo Ferreira dos Santos, Marcelo Sparsa Menegasso, Nathália Brancher, Rosana Sanae Onodera.

Aos colegas do Nupegel Alessandra Monteiro de Paula, Bruno Fernando Faria Pereira, Gilberto Carlos Sundefeld Júnior, Julius Blum, Rafael Marques Pereira Leal, Rafael Rodrigues da Silva, Roberta Clemente Santin, Sandra Fernandes Furlan, Uwe Heinz Willi Herpin.

Ao grupo COSAN e ao SEMAE pela participação e colaboração na pesquisa.

Ao programa de pós graduação em Solos e Nutrição de Plantas pela oportunidade e ao Departamento de Ciência do Solo pela cessão da infra-estrutura de análise.

À Fundação CAPES pela bolsa de estudos concedida e à FAPESP pelo apoio financeiro ao desenvolvimento do projeto (processo nº 04/14315-4).

SUMÁRIO

RESUMO.....	7
ABSTRACT	9
LISTA DE FIGURAS	11
LISTA DE TABELAS	13
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	15
1 INTRODUÇÃO	17
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	19
2.1 Uso de efluente de tratamento de esgoto na agricultura.....	19
2.2 A cultura da cana-de-açúcar	20
2.3 Diagnose foliar	22
2.4 Problemas potenciais da irrigação com EETE	24
3 MATERIAL E MÉTODOS.....	27
3.1 Localização e caracterização da área experimental.....	27
3.2 Tratamento do esgoto	31
3.3 Variedade, manejo e tratamentos	31
3.4 Avaliações químicas.....	34
3.5 Avaliações vegetativas.....	36
3.6 Avaliações produtivas	36
3.7 Análises estatísticas.....	37
3.7.1 Altura.....	38
3.7.2 Tombamento	38
3.7.3 Produtividade	38
3.7.4 Química do solo	39
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	41
4.1 Necessidade de irrigação	41
4.2 Balanço de nutrientes no sistema	43
4.3 Nitrogênio do solo	46
4.4 Fósforo e enxofre do solo.....	48
4.5 Acidez do solo	51

4.6 Bases trocáveis do solo	56
4.7 Diagnose do estado nutricional pela análise foliar	60
4.8 Altura das plantas	66
4.9 Dinâmica de perfilhos	67
4.10 Tombamento da cana	68
4.11 Produtividade da cultura	69
4.12 Qualidade industrial	74
5 CONCLUSÕES.....	77
REFERÊNCIAS	79

RESUMO

Reciclagem de água e nutrientes pela irrigação da cana-de-açúcar com efluente de estação de tratamento de esgoto

A cultura da cana-de-açúcar, pelo alto consumo de água e de nutrientes, além da destinação industrial, apresenta características ideais para o recebimento de efluente de estações de tratamento de esgoto (EETE) sob a forma de irrigação. Esta prática tem como objetivo a reciclagem de nutrientes e de água, o incremento da produtividade e a economia de fertilizantes, de terra arável e de água potável. Apesar das múltiplas vantagens ambientais, não é desprovida de riscos, e este trabalho teve como objetivos avaliar a dinâmica de nutrientes no sistema solo-planta de canavial irrigado com efluente de esgoto tratado em dois ciclos consecutivos da cana-soca e a influência do aporte de nutrientes e outros elementos via efluente sobre a nutrição mineral da cana-de-açúcar. Foram aplicadas lâminas de irrigação com o esgoto tratado entre 0 (sem irrigação) e 200 % da exigência de água pela cultura, em gotejamento subsuperficial. Foram avaliados os aportes de nutrientes e outros elementos pelo efluente, os efeitos na composição nutricional da planta e da fração trocável do solo e o desempenho quantitativo e qualitativo da cultura. Concluiu-se que o efluente pode fornecer até 163 kg ha⁻¹ de N; 14 kg ha⁻¹ P; 145 kg ha⁻¹ de K; 80 kg ha⁻¹ de Ca; 28 kg ha⁻¹ de Mg; 207 kg ha⁻¹ de S; 0,45 kg ha⁻¹ de B; 0,07 kg ha⁻¹ de Cu; 0,25 kg ha⁻¹ de Fe e 0,18 kg ha⁻¹ de Mn, sendo fonte potencial de nutrientes à cultura da cana-de-açúcar, principalmente N, Ca e S, precisando de complementação mineral de P, K, Mg e micronutrientes. O estado nutricional da cultura, avaliado pela diagnose foliar melhorou para N, Mg, S e Cu no segundo ano avaliado. A folha +1 foi mais sensível às alterações de disponibilidade de nutrientes. A presença de elementos no efluente que podem potencialmente provocar degradação nas propriedades físicas do solo, tal como o sódio, contaminação de águas subterrâneas, como o nitrogênio, ou ainda tóxicos, como cromo e cobre, exige monitoramento constante da área agrícola que recebe este resíduo. Neste trabalho de curto prazo, estes elementos não representaram problemas. A irrigação com EETE proporcionou aumento do desempenho vegetativo da cultura e um ganho de produtividade na cana-de-açúcar de até 19,84 e 40,47 Mg ha⁻¹, na primeira e na segunda socas, respectivamente. A qualidade industrial da cana-de-açúcar não foi alterada significativamente pela irrigação com EETE. Este trabalho mostrou que a irrigação com EETE é exequível, possui potencial econômico e seria uma solução possível para parte da demanda agrícola de água e dos problemas de poluição dos corpos d'água naturais.

Palavras-chave: Água residuária; Cana-de-açúcar; Efluentes; Esgotos sanitários; Irrigação localizada; Reuso da água; Irrigação subsuperficial; Elementos essenciais

ABSTRACT

Water and nutrients recycling by sugarcane irrigation with sewage treatment plant effluent

Sugarcane cultivation, due to the high water and nutrients consumption, besides the industrial utilization, has ideal characteristics for receiving sewage treatment plant effluent (STPE) as irrigation. This practice aims to recycle nutrients and water, increasing productivity and decreasing the use of fertilizers, agricultural land and potable water. Despite the many environmental benefits, it has risks, and this study aimed to evaluate the dynamics of nutrients in the soil-sugarcane plant system irrigated with treated sewage effluent in two consecutive sugarcane ratoon cycles and the influence of nutrient and other elements added as effluent on the sugarcane mineral nutrition. Irrigations with treated sewage were applied up to 200% of the crop water requirement by subsurface drip. Nutrient and other elements input by the effluent, its effect on plant nutritional composition, soil exchangeable fraction and the quantitative and qualitative sugarcane performance were evaluated. Effluent can provide up to 163 kg ha⁻¹ N, 14 kg ha⁻¹ P, 145 kg ha⁻¹ K, 80 kg ha⁻¹ Ca, 28 kg ha⁻¹ Mg, 207 kg ha⁻¹ S, 0.45 kg ha⁻¹ B, 0.07 kg ha⁻¹ Cu, 0.25 kg ha⁻¹ Fe and 0.18 kg ha⁻¹ Mn, being a potential source of N, Ca and S, needing additional P, K, Mg and micronutrients fertilization. Sugarcane nutritional status as assessed by foliar analysis was improved for N, Mg, S and Cu in the second ratoon evaluated. Top visible dewlap leaf was more sensitive to changes in the nutrients availability. The presence of elements in the effluent that can potentially cause degradation in soil physical properties, such as sodium, groundwater contamination, such as nitrogen, or toxic substances, such as chromium and copper, requires constant monitoring of the agricultural area that receives this residue. In these short-term experiments there were no such problems. The replacement of crop evapotranspiration by irrigation with STPE provided an increase in vegetative performance and a gain in productivity of the sugarcane by 19.84 and 40.47 Mg ha⁻¹, in the first and in the second ratoon, respectively. Industrial quality of sugarcane was not significantly affected by irrigation with STPE. This study showed that irrigation with STPE is potentially feasible, has economic potential, and would be a possible solution to part of the agricultural water demand and natural water bodies pollution problems

Keywords: Wastewater; Sugarcane ; Nutrients ; Effluent ; Subsurface drip ; Irrigation, Essential minerals

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Localização da área experimental	27
Figura 2 - Croqui da área experimental	33
Figura 3 - Temperaturas máxima, mínima e média mensais observadas durante o experimento	41
Figura 4 - Precipitação pluviométrica e irrigação referente a 100% da ET _c	42
Figura 5 - Potencial matricial em três profundidades do solo durante o experimento	42
Figura 6 – Amônio, Nitrato, e N total do solo após um ano de irrigação com EETE.....	47
Figura 7 - P e S disponíveis no solo após um ano de irrigação com EETE.....	49
Figura 8 - Alteração do P disponível do solo após um ano de irrigação com EETE.....	51
Figura 9 - pH, Al, H+Al e Saturação por bases no solo após um ano de irrigação com EETE	52
Figura 10 - Alteração do pH do solo após um ano de irrigação com EETE em função dos tratamentos.	54
Figura 11 - Alteração do pH do solo após um ano de irrigação com EETE em função da profundidade	54
Figura 12 - Alteração da acidez potencial do solo após um ano de irrigação com EETE	55
Figura 13 - Alteração da saturação por bases do solo após um ano de irrigação com EETE	55
Figura 14 - K, Ca, Mg e Na trocáveis no solo após um ano de irrigação com EETE	56
Figura 15 - Soma de bases trocáveis no solo após um ano de irrigação com EETE	57
Figura 16 - Alteração do K do solo após um ano de irrigação com EETE.....	59
Figura 17 - Alteração do Mg do solo após um ano de irrigação com EETE em função da profundidade	59
Figura 18 - Alteração do Na do solo após um ano de irrigação com EETE em função da profundidade	60

Figura 19 - Concentração de N, P, Mg, S, Fe e Mn na folha +1 da cana-de-açúcar aos 4 meses de brotação da 1ª soca em função da irrigação com EETE.....	63
Figura 20 - Concentração de K, Fe, Mn, na folha +3 da cana-de-açúcar aos 4 meses após a rebrota da 1ª soca e P, Mg e Cu na folha +3 da cana-de-açúcar aos 4 meses após a rebrota da 2ª soca em função da irrigação com EETE.	64
Figura 21 - Concentração de N, P, Mg, S, Fe e Mn na folha +1 da cana-de-açúcar aos 4 meses após a rebrota da 2ª soca em função da irrigação com EETE.....	65
Figura 22 - Altura das plantas ao final do ciclo em função da irrigação com EETE nos dois anos-safra avaliados.....	66
Figura 23 - Dinâmica de perfilhos na primeira e segunda soca da cana-de-açúcar irrigada com EETE.	68
Figura 24 - Probabilidade calculada e frequência de tombamento observada na cana-de-açúcar irrigada com EETE	69
Figura 25 - Produtividades da cana-de-açúcar por tratamento nos três anos estudados.....	70
Figura 26 - Componente do modelo de produtividade da cana-de-açúcar, primeira e segunda soca, devido à irrigação com diferentes lâminas de EETE.....	73
Figura 27 - Sólidos solúveis totais no caldo da cana-de-açúcar irrigado com EETE na 1ª soca.	75
Figura 28 - Açúcar Total Recuperável da cana-de-açúcar irrigada com EETE em função da intensidade da irrigação na 2ª soca.....	76

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Valores de referência para diagnose do estado nutricional da cana de açúcar.....	24
Tabela 2 - Caracterização física do solo da área de estudo	29
Tabela 3 - Caracterização química do solo da área antes da aplicação dos tratamentos	30
Tabela 4 - Coeficientes de cultura (Kc) empregados para cálculo da irrigação no experimento.....	33
Tabela 5 - Métodos para análise química do efluente.....	34
Tabela 6 - Métodos para análise química do solo	35
Tabela 7 - Métodos para análise química do material vegetal	36
Tabela 8 - Precipitação e irrigação aplicada durante o experimento.....	43
Tabela 9 - Caracterização do efluente de estação de tratamento de esgoto e aporte de elementos pela irrigação nos dois anos estudados.....	44
Tabela 10 - Concentração de nutrientes nas frações do colmo na primeira soca.....	45
Tabela 11 - Concentração de nutrientes nas frações do colmo na segunda soca	45
Tabela 12 - Exportação de nutrientes e Na pela colheita da cana de açúcar nos dois anos irrigados com EETE	46
Tabela 13 - Superfície de resposta para a diferença dos teores de P e S disponíveis no solo no início do experimento e após um ano de aplicação de irrigação com EETE, em função da intensidade de irrigação e da profundidade do solo	50
Tabela 14 - Superfície de resposta para a diferença do pH, alumínio trocável, acidez potencial e saturação por bases no solo no início do experimento e um ano após a aplicação da irrigação, em função da intensidade de irrigação e da profundidade do solo	53
Tabela 15 - Superfície de resposta para a diferença dos teores trocáveis de K, Ca, Mg, Na e a soma de bases no solo no início do experimento e um ano após a aplicação da irrigação, em função da intensidade de irrigação e da profundidade do solo	58

Tabela 16 - Concentrações de nutrientes nas folhas da cana-de-açúcar aos 4 meses após a colheita e resultado da análise de variância para os fatores estudados em dois ciclos irrigados com EETE	61
Tabela 17 - Coeficiente de Correlação de Pearson das produtividades dos três anos avaliados entre si e com a irrigação com EETE	71
Tabela 18 - Coeficiente de Correlação de Pearson das produtividades dos três anos avaliados com as medidas biométricas e com a irrigação com EETE	71
Tabela 19 - Atributos qualitativos da cana-de-açúcar nos três ciclos estudados.....	75

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ADA – Argila Dispersa em Água
ARC – Teor de açúcares redutores da cana
ATR – Açúcar total recuperável
Brix – Teor de sólidos solúveis de caldo
CE – Condutividade elétrica
CID – Carbono inorgânico dissolvido
COD – Carbono orgânico dissolvido
CT – Carbono total
CTC – Capacidade de troca catiônica do solo
DBO – Demanda bioquímica de oxigênio
DQO – Demanda química de oxigênio
EETE – Efluente de estação de tratamento de esgoto
ETc – Evapotranspiração da cultura
ETE – Estação de tratamento de esgoto
GF - Grau de Floculação
GD - Grau de Dispersão
Kc – Coeficientes de cultura
LD – Limite de detecção
MO – Matéria orgânica do solo
NP – Nitrogênio no material particulado
NT – Nitrogênio total
PBU – Peso do bagaço (bolo) úmido
POL – teor de sacarose aparente do caldo
RAS – Razão de adsorção de sódio
SB – Soma de bases (K, Ca, Mg e Na)
V – saturação do complexo de troca do solo por bases

1 INTRODUÇÃO

Apesar da reconhecida importância para a saúde pública desde o século XVII (FERRIMAN, 2007), no início do novo milênio, apenas 52,2% dos municípios brasileiros dispõem de sistemas de coleta de esgoto, e destes, apenas 38,7% tratam o esgoto (IBGE, 2002). Tem se buscado a universalização da coleta e tratamento de esgotos como políticas públicas, mas o reuso da água é ainda incipiente e o único subproduto do tratamento de esgoto que tem uso regulamentado atualmente é o lodo (DA FONSECA et al., 2007).

Dentre os insumos mais fundamentais à produção agrícola de alimentos e matérias primas, apenas a água provém de fontes renováveis e mesmo esta se encontra escassa em grande parte do mundo (ANDERSON, 2003). Os nutrientes minerais, de uso obrigatório nos sistemas modernos de produção, como potássio (ROBERTS, 2008) e, principalmente, fósforo (CORDELL; DRANGERT; WHITE, 2009) enfrentarão o esgotamento das jazidas num futuro não muito distante.

A preocupação em retornar os nutrientes minerais levados nos alimentos dos campos para as cidades remonta à descoberta da importância destes minerais à agricultura (LIEBIG, 1840) e é condição fundamental à sustentabilidade da existência humana no planeta (ANDERSON, 2003), sendo o reuso da água e nutrientes presentes nos esgotos domésticos parte essencial dessa política (DA FONSECA et al., 2007). Além disso, o reuso agrícola ajuda a diminuir os riscos potenciais ao ambiente ou à saúde pública que resultariam da descarga de esgotos ou efluentes diretamente nos corpos d'água (WHO, 2006).

Este trabalho é parte de um esforço para validar a prática do reuso agrícola dos efluentes de estação de tratamento de esgoto (EETE) no Brasil e estabelecer parâmetros de uso para diferentes culturas, como o milho (DA FONSECA; MELFI; MONTES, 2005), café (HERPIN et al. 2007), girassol (GLOAGUEN et al. 2007), capim (DA FONSECA et al., 2007b) cana-de-açúcar (LEAL et al., 2009), e laranja (SANTOS et al. 2009). Pode-se citar como vantagens desta prática a reciclagem de nutrientes e de água, o incremento da produtividade e a economia de fertilizantes, de terra arável e de água potável.

A cultura da cana-de-açúcar apresenta condições particularmente favoráveis ao recebimento destes tipos de efluentes sob a forma de irrigação (VELOSO; DUARTE; SILVA, 2004). E, além da crescente importância econômica para o estado de São Paulo e o Brasil, a necessidade mundial de substituição de fontes de energia fóssil pelas renováveis acarreta em múltiplos benefícios ambientais dessa prática.

Em um sistema de reuso, é fundamental o conhecimento das potencialidades produtivas da cultura e suas necessidades de água e nutrientes. O presente trabalho insere-se neste contexto com o objetivo de contribuir para o conhecimento da técnica e dos efeitos do aproveitamento do efluente de tratamento de esgoto na irrigação da cana-de-açúcar.

1.1 Hipóteses de trabalho

- A irrigação da cana-de-açúcar é uma opção viável agrônômica e ambientalmente para a disposição do efluente secundário de esgoto tratado.
- Os nutrientes adicionados ao sistema agrícola pela irrigação com EETE são suficientes para a manutenção da cultura.
- A lâmina de irrigação que produz o melhor resultado na produtividade da cultura é maior que a evapotranspiração da cultura, pelo maior aporte de nutrientes.

1.2 Objetivos específicos

- Avaliar a capacidade da irrigação com EETE de atender as necessidades hídricas e minerais da cultura da cana-de-açúcar em dois ciclos consecutivos da cana-soca.
- Avaliar a influência do aporte de nutrientes e outros elementos via efluente secundário de esgoto tratado sobre a nutrição mineral e o desempenho produtivo da cana-de-açúcar.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Uso de efluente de tratamento de esgoto na agricultura

Sistemas de tratamento de esgoto do tipo australiano, que se utiliza de lagoas de estabilização, estão entre os mais comuns em uso no Brasil (VON SPERLING, 1996). Este sistema possui baixo custo e pouca manutenção, porém o efluente líquido gerado não atende aos parâmetros desejáveis para sua disposição em corpos de água superficial (VON SPERLING, 1996; PIVELI et al. 2008). Apesar da satisfatória remoção de sólidos orgânicos e inorgânicos, e da diminuição da demanda bioquímica de oxigênio e de patógenos, a quantidade de nutrientes e outros elementos dissolvidos no efluente é elevada (BASTOS, 2003; FONSECA, 2005; PIVELI et al., 2008).

De efeito poluente tem destaque a quantidade de nitrogênio e fósforo dissolvidos no efluente, com grande potencial de eutroficação de corpos d'água, principalmente de represas (JARVIE et al., 2005; VALENTE et al., 1997). Estes elementos, juntamente com potássio, cálcio, magnésio, enxofre, boro, cobre, ferro, manganês e zinco, todos encontrados no EETE, são minerais essenciais, de fornecimento obrigatório para o desenvolvimento das plantas (EPSTEIN; BLOOM, 2005).

Assim, a irrigação utilizando estas águas residuárias é um dos métodos mais recomendados para destinação destes resíduos (ASANO et al., 1987; FONSECA et al., 2007; PESCOD, 1992; PIVELI et al., 2008). É um método viável, pois garante a produtividade da colheita, por causa do fornecimento de água e nutrientes (DA FONSECA, 2005; FIRME, 2007), e a preservação da qualidade ambiental, devido à proteção das águas superficiais, evitando lançamentos diretos nos corpos d'água (CORAUCCI et al., 1999).

As plantas receptoras de EETE devem satisfazer a maioria dos critérios estabelecidos por Segarra et al. (1996), que são (i) alta absorção de N, (ii) elevado consumo d'água, (iii) possibilidade de processamento; (iv) potencial de mercado; (v) viabilidade econômica.

A FAO calcula que o consumo de água pela agricultura brasileira representa 61 % do consumo total no país (FAO, 2010). Ao menos uma parte da água utilizada na

irrigação poderia ser substituída por água já utilizada em outra aplicação, como é o caso do EETE (DA FONSECA et al., 2007). Os maiores potenciais de uso agrícola das águas residuárias estão na irrigação de parques e jardins e em algumas culturas como o algodão (desde que o caroço não vá para alimentação animal), seringueira, florestas de pinheiros e eucaliptos, cana-de-açúcar (desde que para a produção de álcool e o bagaço não vá para alimentação animal), entre outras (VELOSO; DUARTE; SILVA, 2004).

No Brasil, as estações de tratamento do tipo australiano caracterizam-se, ainda, por estarem distribuídas de forma difusa e afastada dos centros urbanos, próximas das áreas agrícolas. E a demanda agrícola por água é particularmente elevada na época mais seca do ano, quando os cursos d'água dispõem de menor vazão, e o lançamento dos efluentes representaria maior risco, ou não atenderia aos parâmetros mínimos exigidos (PIVELI et al. 2008).

Na Bacia Hidrográfica dos rios Piracicaba, Capivari e Jundiaí, são produzidos em torno de 1,85 milhões de m³ de esgoto por dia, que seriam suficientes para irrigar 30.000 hectares (ALVES JR. et al., 2004). No entanto, pouco se conhece sobre os efeitos do uso dessas águas na agricultura brasileira, os males que podem existir no seu uso na produção de alimentos, na degradação do solo, e em outros impactos diretos e indiretos ao ambiente (ALVES JR. et al., 2004).

2.2 A cultura da cana-de-açúcar

O Brasil produz aproximadamente 600 milhões de toneladas de cana-de-açúcar em uma área plantada de 7,6 milhões de hectares, dos quais 52,3% localizam-se no estado de São Paulo (FNP CONSULTORIA & COMÉRCIO, 2009). Esta cultura possui características ideais para a irrigação com efluente de tratamento de esgoto, pois atende as premissas citadas por Segarra et al. (1996), sendo classificada por Alves Jr. et al. (2004) como cultura depuradora de água.

Ayers e Westcott (1985) classificam a cana-de-açúcar como semi-tolerante à saturação de sódio trocável no solo, razão pela qual podem ser observados prejuízos à produtividade com a irrigação sob condições salinas (SANTANA et al., 2007).

Em experimento conduzido em Lins por membros do mesmo grupo de trabalho em que se insere essa pesquisa, foi observada resposta muito positiva da cultura à irrigação com EETE (FIRME, 2007; LEAL, 2007). O efeito da irrigação de cana-de-açúcar com EETE na concentração de nutrientes no colmo não foi significativo para N, P, K e Mg ou foi considerado inconsistente, como para Ca e Na (LEAL et al., 2009).

O aumento de produtividade é esperado em resposta tanto ao maior suprimento de nitrogênio (PRADO; PANCELLI, 2006; MOURA et al, 2005), como à irrigação (BERNARDO, 2006; MOURA et al., 2005). Não têm sido observadas alterações na qualidade tecnológica da cana-de-açúcar à época da colheita, tais como Brix, Pol, teor de fibra e de açúcares redutores em resposta ao aporte mais elevado de nitrogênio (FIRME, 2007; PRADO; PANCELLI, 2006; TRIVELIN, 2000).

Em trabalho realizado na Índia, a irrigação da cana-de-açúcar com água potável favoreceu o perfilhamento, a altura da planta, o índice de área foliar e a produção de colmos e de açúcar até uma dose 80 % da evapotranspiração. A eficiência no uso da água decresceu com o aumento da disponibilidade hídrica, sendo maior sob regimes mais secos que sob condições de maior frequência de irrigação (PRASAD; VERMA; PRASAD, 1990).

Em um estudo conduzido na Usina São Martinho (SP), com cana-de-açúcar irrigada com água potável por gotejamento subterrâneo foi obtida uma produtividade média de 155 t ha⁻¹ em oito cortes, sendo que produtividades da ordem de 140 a 160 t ha⁻¹ são comuns em até 10 ou 12 cortes naquela região (AGUIAR, 2006). Segundo o mesmo autor, o aumento na produtividade pode reduzir o custo de implantação do canavial, tendo-se em vista a necessidade de menor área plantada para a mesma produção, acarretando menor tempo de uso de implementos, quantidade de calcário e adubos, dentre outros. Este autor estima que o ganho obtido através do aumento da produtividade e da longevidade do canavial com a utilização do sistema de gotejamento subterrâneo reduz em 15 a 25 % o custo da tonelada de cana produzida.

No experimento de Lingle; Weidenfeld e Irvine (2000), o uso de água com salinidade acima de 1,25 dS m⁻¹ reduziu o comprimento do colmo, o peso fresco, o número de internódios, a biomassa da parte aérea, o peso total de colmos e o número de colmos na cana-de-açúcar. A irrigação com água de salinidade até este limite

permitiu que os parâmetros avaliados apresentassem o mesmo desempenho que quando irrigados com água pura. A salinidade da água de irrigação também causou diminuição acentuada no número de internódios por colmo. Contudo, o número de colmos foi menos afetado pela salinidade que a biomassa aérea e o peso total de colmos, que foram reduzidos de 50 a 60 % no tratamento mais salino (4,70 dS m⁻¹).

A ordem de extração dos macronutrientes pela cana-planta obtidos por Orlando Filho et al. (1980) e Coleti et al. (2006) foi: K > N > P > Mg > Ca. Segundo Samuels (1969), a colheita de 100 t de cana-de-açúcar remove do solo 192, 148, 73, 51, 45 e 23 kg de K, N, Ca, Mg, S e P, respectivamente.

Oliveira (2008) estudou 11 variedades diferentes sob cultivo irrigado em Carpina-PE e obteve a média de exportação de 98 kg ha⁻¹ de N, 15 kg ha⁻¹ de P, 184 kg ha⁻¹ de K, 193 kg ha⁻¹ de Ca e 63 kg ha⁻¹ de Mg para uma produtividade de 196 Mg ha⁻¹ de cana.

Beauclair (1994) observou que a concentração de P₂O₅ no caldo variou entre 26 até mais de 700 g Mg⁻¹, sendo este o nutriente que sofre maior variação entre as áreas e variedades. No entanto, o nutriente exportado em maior quantidade no caldo é o K.

Em quatro anos consecutivos de estudo no Texas, Wiedenfeld e Enciso (2008) não encontraram resposta produtiva da cana de açúcar a lâminas de irrigação calculadas com Kc 20% maior e 20% menor que o recomendado. Os autores encontraram, entretanto, resposta da cultura até a maior dose de N aplicada, de 180 kg ha⁻¹, afirmando que a injeção de N na irrigação em várias pequenas aplicações é mais efetiva que uma aplicação simples. Essa resposta da cultura foi mais intensa com a repetição dos ciclos produtivos.

2.3 Diagnose foliar

A análise de tecidos vegetais foi desenvolvida para prover informações sobre o estado nutricional das plantas, como forma de direcionar o manejo nutricional para produções ótimas (SMITH; LONERAGAN, 1997). Se a concentração de um elemento essencial no tecido da planta estiver abaixo do nível necessário ao crescimento ótimo, diz-se que a planta está deficiente (EPSTEIN; BLOOM, 2006).

A folha, na maioria dos casos, é o órgão da planta onde ocorrem as alterações fisiológicas devido a distúrbios nutricionais. Em função disto, quase sempre o diagnóstico nutricional das plantas é feito pela técnica que, de forma ampla, se denomina diagnose foliar (BATAGLIA; DECHEN; SANTOS, 1996; CURI, 1993).

Supondo existir um valor ótimo para a concentração foliar de um nutriente, podem ser estabelecidos padrões de interpretação da análise química, para uma determinada cultura e com a padronização da amostragem (MUNSON; NELSON, 1973).

Em seu trabalho pioneiro, Gallo; Alvarez e Abramides (1962) selecionaram a porção de 20 cm central da folha +3, excluída a nervura, no sistema de Kuijper, aos 4 e aos 8-9 meses, como os materiais mais adequados à diagnose do estado nutricional da cana-de-açúcar no estado de São Paulo. Atualmente, a recomendação oficial para o Estado de São Paulo considera a análise da folha +1 durante a fase de maior crescimento vegetativo (Raij et al. 1996). Uma compilação de valores de referências para as duas folhas da cana estudadas é apresentada na Tabela 1.

Prado e Pancelli (2008) observaram relação linear entre a concentração de N na folha +3 e a produtividade da cana-de-açúcar, sendo que mesmo com a aplicação de 200 kg ha⁻¹ de N na adubação, a concentração foliar permaneceu menor que 18 g kg⁻¹, e seria considerada insuficiente pela interpretação de Malavolta et al. (1996) e Bergmann (1992) (Tabela 1).

Segundo os resultados apresentados por Thomas et al. (1981), os efeitos da qualidade da água de irrigação nos constituintes minerais da folha são variáveis. Na cana-planta e de primeira soca, não houve alterações nas concentrações de nutrientes nas folhas. Na segunda e terceira socas houve aumento de Mg durante a fase de crescimento. A concentração de K diminuiu nas folhas em razão da irrigação com água salina, mas Ca, Na, Cl, N e P não foram afetados pela qualidade da água de irrigação.

Tabela 1 - Valores de referência para diagnose do estado nutricional da cana de açúcar

Nutriente	Folha +1			Folha +3		
	Faixa de suficiência		Nível crítico	Faixa de suficiência		Nível crítico
	Amderson e Bowen (1992)	Raij et al. (1996)	Calcino (1994)	Bergmann (1992)	Malavolta et al. (1996)	Schroeder et al. (1993)
	----- g kg ⁻¹ -----					
N	20-26	18-25	18	19-21	20-22	17
P	2,2-3,0	1,5-3,0	1,9	2-2,4	1,8-2,0	1,6-1,9
K	10-16	10-16	11	11-13	13-15	10,5
Ca	2,0-4,5	2-8	2	8-10	5-7	1,5
Mg	1,5-3,2	1-3	0,8	2-3	2-2,5	0,8
S	-	1,5-3	1,3	2,5-3	2,5-3	1,2
	----- mg kg ⁻¹ -----					
B	15-20	10-30	-	15-30	-	-
Cu	4-8	6-15	2	8-10	8-10	3
Fe	50-105	40-250	-	-	80-150	-
Mn	12-100	25-250	15	100-250	50-125	15
Zn	16-32	10-50	10	25-50	25-30	12

Bittencourt et al. (1992) propuseram a análise da concentração de nutrientes no caldo para diagnose nutricional da cana-de-açúcar, através de metodologia sem a digestão prévia da matéria orgânica. Os autores mostraram que há uma estreita correlação entre os teores totais de nutrientes no caldo (determinação feita com digestão da matéria orgânica) e teores livres (sem digestão da matéria orgânica). Para o N, há grandes diferenças entre os dois métodos porque grande parte deste elemento está na forma orgânica. Para o P também há diferenças, mas em menor intensidade. As concentrações de K, Ca e Mg foram similares nas duas metodologias. Segundo estes autores, a diagnose nutricional através da análise do caldo pode ser aplicada para tomadas de decisão sobre o manejo da adubação do próximo ano safra em áreas cultivadas com cana-de-açúcar.

2.4 Problemas potenciais da irrigação com EETE

Os efluentes geralmente apresentam uma relação constante entre os nutrientes, característica de cada tipo particular de resíduo, nem sempre sendo a mais adequada à produção e nutrição das culturas agrícolas (TILLMAN; SURAPANENI, 2002). Isso pode acarretar desbalanço de nutrientes no sistema solo-planta e efeitos negativos associados à sodificação, salinização e toxicidade de certos elementos.

Há também a possibilidade de contaminação do aquífero freático pela lixiviação de nitrato (NO_3^-). Para minimização desse perigo, Phillips e Sheehan (2005) recomendam que os solos ideais para recebimento de efluentes ricos em nitrogênio são aqueles com cargas positivas em subsuperfície, capazes de reter estes ânions. A assimilação de nitrogênio pelas culturas é capaz de reduzir as contaminações por nitrato e, por isso, o uso agrícola das águas residuárias deve ser feito em culturas com alta demanda de nitrogênio (VELOSO; DUARTE; SILVA, 2004).

A adição de P ao solo pela irrigação com EETE normalmente não é excessiva e a capacidade de fixação específica deste nutriente pelos solos tropicais, juntamente com a remoção pela cultura, deve prevenir o risco de contaminação das águas subterrâneas (FALKINER; POLGLASE, 1997).

De acordo com a revisão de Fonseca et al. (2007), os teores trocáveis no solo de Ca, Mg e K não são objeto de alterações consistentes com a prática da irrigação com EETE. O pH do solo também não foi alterado pelo uso de EETE na irrigação de cana-de-açúcar (LEAL et al., 2009). O emprego de água salina na irrigação da cana-de-açúcar aumentou a concentração de Na e Cl no solo, mas não alterou os teores de Ca e Mg solúveis (THOMAS et al., 1981). A alta concentração de Na presente em alguns efluentes, no entanto, pode favorecer a dessorção e a lixiviação de outros cátions, particularmente o K, como ocorreu no trabalho de Leal et al. (2009), o que demandaria o ajuste da fertilização da cultura para evitarem-se deficiências desse nutriente (KARLEN; VITOSH; KUNZE, 1976).

No Texas, o uso de água salina (4 dS m^{-1}) na irrigação não afetou a produção de cana e de açúcar, a qualidade do caldo e a quantidade de colmos industrializáveis. Contudo, em períodos com pouca chuva, houve redução na produção de cana, brix, pol, pureza do caldo e comprimento do colmo. A água salina também diminuiu as taxas de crescimento na segunda e terceira socas (THOMAS et al., 1981).

Outro problema provocado pela presença de Na no efluente pode ser a deterioração das qualidades físicas do solo, com compactação, migração de argilas e perda da permeabilidade do solo, decorrentes da propriedade dispersante do Na sobre as argilas (MEURER, 2004). Os problemas do Na podem ser amenizados se a ocorrência de chuvas for eficiente na lixiviação deste elemento (MANCINO; PEPPER,

1992) e o manejo da irrigação pode utilizar-se de lâmina 25% maior que a evapotranspiração da cultura, induzindo a lixiviação dos sais excedentes (TANJI, 1990).

Os resultados das pesquisas não têm demonstrado risco de contaminação dos produtos agrícolas com metais pesados pela baixa disponibilidade destes contaminantes nos efluentes derivados de esgotos domésticos (TOZE, 2006; FONSECA, 2005), somada à grande capacidade do solo de adsorvê-los (AHMAD et al., 2003) e à capacidade das plantas de reter e complexar os elementos tóxicos nas raízes (EPSTEIN; BLOOM, 2005). No entanto, dada a persistência dos metais pesados no ambiente, o monitoramento desses elementos em solos que recebem EETE no longo prazo é de vital importância (BOND, 1998).

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Localização e caracterização da área experimental

O experimento foi conduzido no município de Piracicaba – SP ($22^{\circ}46'28''$ S, $47^{\circ}36'23''$ O, altitude média 582 m), em área agrícola próxima à estação de tratamento de esgoto CECAP (Figura 1). A plantação de cana-de-açúcar é administrada pela Usina Santa Helena, do Grupo Cosan. O clima da região segundo classificação de Köppen é do tipo Cwa, subtropical úmido, com 1276,5 mm anuais de precipitação e temperaturas do mês mais quente superior a 22°C e do mês mais frio inferior a 18°C .

Figura 1 - Localização da área experimental, ao lado da estação de tratamento de esgoto CECAP

A área experimental plantada com cana-de-açúcar possui 240 m de comprimento, ao longo da curva de nível do terreno, por 40 m de largura, no sentido da maior

declividade e o solo é predominantemente classificado como ARGISSOLO VERMELHO AMARELO Eutrófico típico (AQUINO, 2008). A caracterização física do solo encontra-se na Tabela 2 e os resultados preliminares das análises químicas são apresentados na Tabela 3

Tabela 2 - Caracterização física do solo da área de estudo

Tratamento	Profundidade	Argila	Silte	Areia Fina	Areia Grossa	ADA ^a	GF ^b	GD ^c
----- % -----								
T75	0-10	35,3	31,0	26,7	7,0	17,1	51,5	48,5
T75	10-20	36,7	31,0	26,9	5,4	19,1	48,0	52,0
T75	20-40	39,6	31,3	23,0	6,1	21,3	46,2	53,8
T75	40-60	45,5	31,6	18,6	4,4	2,94	93,5	6,5
T75	60-80	49,7	26,1	19,2	5,0	1,2	97,6	2,4
T75	80-100	56,4	24,2	15,5	3,9	0,4	99,3	0,07
T200	0-10	41,0	28,3	23,9	6,8	17,1	58,2	41,8
T200	10-20	42,4	26,0	25,2	6,5	16,7	60,5	39,5
T200	20-40	47,1	29,0	23,4	5,5	13,3	71,7	28,3
T200	40-60	58,7	18,7	18,2	4,4	1,0	98,3	1,7
T200	60-80	58,0	20,1	17,5	4,4	0,04	99,9	0,1
T200	80-100	57,1	20,5	18,6	3,8	0,04	99,9	0,1
T150	0-10	45,8	21,2	25,8	7,3	19,2	58	42
T150	10-20	42,0	24,8	26,5	6,7	17,2	59	41
T150	20-40	47,2	23,7	23,8	5,3	12,9	72,6	27,4
T150	40-60	52,6	20,1	21,8	5,5	0,02	99,7	0,3
T150	60-80	52,5	23,1	19,5	4,9	0,5	98,9	1,1
T150	80-100	55,1	20,3	19,7	4,9	0,06	99,9	0,01
T25	0-10	36,5	35,4	22,2	5,9	20,4	44,0	56,0
T25	10-20	35,0	35,5	23,2	6,3	19,8	43,4	56,6
T25	20-40	41,1	34,6	19,6	4,7	22,0	46,3	53,7
T25	40-60	50,5	32,5	13,7	3,3	3,2	93,6	6,4
T25	60-80	46,7	39,1	12,2	2,0	0,3	99,3	0,7
T25	80-100	50,4	38,0	9,9	1,8	0,4	99,2	0,8
SI	0-10	48,7	19,9	23,7	7,8	14,8	69,6	30,4
SI	10-20	49,0	20,4	22,9	7,7	15,2	69,0	31
SI	20-40	53,3	17,9	23,2	5,6	2,9	94,5	5,5
SI	40-60	54,5	17,5	21,9	6,0	0,04	99,9	0,1
SI	60-80	53,7	17,7	23,2	5,5	0,04	99,9	0,1
SI	80-100	53,9	17,2	22,6	6,3	0,02	100	0,0
T50	0-10	48,3	22,1	24,3	5,3	9,1	81,1	18,9
T50	10-20	49,5	21,4	22,6	6,6	7,3	85,2	14,8
T50	20-40	50,9	21,7	21,0	6,4	0,2	99,6	0,04
T50	40-60	52,7	18,9	22,7	5,7	0,04	99,9	0,01
T50	60-80	52,3	17,9	24,0	5,8	0,26	99,5	0,05
T50	80-100	48,6	21,5	24,4	5,5	0,06	99,9	0,01
T100	0-10	46,8	21,2	23,8	8,2	13,5	71,1	28,9
T100	10-20	36,1	37,0	24,9	2,0	11,9	67,0	33
T100	20-40	46,6	20,5	26,9	6,1	13,2	71,7	28,3
T100	40-60	49,5	20,8	23,2	6,6	1,93	96,1	3,9
T100	60-80	45,6	21,9	26,3	6,2	1,5	96,7	3,3
T100	80-100	44,9	21,1	26,6	7,4	4,3	90,4	9,6
T125	0-10	48,6	20,8	23,1	7,5	14,2	70,7	29,3
T125	10-20	45,9	22,5	24,7	6,9	13,6	70,3	29,7
T125	20-40	51,2	20,5	22,7	5,7	3,0	94,2	5,8
T125	40-60	55,3	16,9	22,2	5,6	0,04	99,9	0,1
T125	60-80	51,8	19,2	23,0	5,9	0,08	99,8	0,2
T125	80-100	51,5	18,2	23,1	7,2	0,18	99,6	0,4

^a Argila Dispersa em Água; ^b Grau de Floculação; ^c Grau de Dispersão

Tabela 3 - Caracterização química do solo da área antes da aplicação dos tratamentos

Trat.	Prof.	M.O.	pH	P	K	Ca	Mg	Na	Al	H+Al	SB ^a	CTC ^b	V ^c	S	B	Cu	Fe	Mn	Zn
		g/kg		mg/kg									%						
T75	0-10	27	6,3	6,6	2,2	37	24	0,3	<1	19	74,5	113,3	77	9	0,12	0,9	20	39,3	0,4
T75	10-20	21	6,2	8,1	1,2	34	23	0,6	<1	20	73,8	113,5	75	37	0,11	1,2	39	73,1	0,3
T75	20-40	23	5,3	7,1	0,6	27	16	0,7	<1	26	58,8	110,1	63	13	0,12	0,9	19	36,8	0,3
T75	40-60	20	5,0	3,9	0,5	20	11	0,7	5	32	43,7	106,9	50	25	0,09	0,8	15	25,8	0,2
T75	60-80	18	4,9	10,0	0,7	14	8	0,8	7	32	35,2	99,0	42	14	0,08	0,5	12	19,8	0,2
T75	80-100	13	4,8	4,2	0,7	9	8	0,7	7	31	29,4	90,9	37	20	0,03	0,3	9	5,5	<0.1
T200	0-10	27	6,1	8,5	1,6	33	20	0,4	<1	20	56,0	75,3	73	17	0,11	1	21	52,7	0,4
T200	10-20	27	6,0	3,3	1,0	30	18	0,5	<1	20	53,5	72,7	72	12	0,09	1	18	48,6	0,4
T200	20-40	22	5,5	2,2	0,6	28	14	0,5	<1	23	40,7	65,7	65	23	0,07	1	18	38,8	0,2
T200	40-60	18	5,3	5,2	0,4	22	9	0,6	1	22	37,6	61,2	59	67	0,08	0,4	8	12,1	<0.1
T200	60-80	29	5,1	1,5	0,3	16	6	0,6	2	24	27,0	54,6	48	10	0,12	1,1	20	60,6	0,6
T200	80-100	15	5,0	2,3	0,3	11	6	0,5	4	25	20,0	49,7	41	30	0,01	0,3	6	5,8	<0.1
T150	0-10	16	6,2	8,4	1,9	31	21	0,4	<1	20	58,6	77,9	74	44	0,06	0,4	7	8,8	<0.1
T150	10-20	28	6,1	7,1	1,0	31	19	0,5	<1	20	55,1	75,6	72	17	0,14	1,1	21	59,1	0,4
T150	20-40	25	5,8	8,6	0,6	25	14	0,6	<1	21	47,9	70,4	65	17	0,12	1,1	20	57,4	0,3
T150	40-60	19	5,4	<1	0,4	21	11	0,6	<1	22	36,6	60,4	60	28	0,06	0,8	18	43,7	0,2
T150	60-80	16	5,1	1,8	0,4	17	9	0,7	2	23	26,4	53,2	53	52	0,07	0,4	8	15	<0.1
T150	80-100	17	4,9	1,8	0,3	11	9	0,5	3	24	20,9	48,5	46	29	0,06	0,4	8	14,2	<0.1
T25	0-10	23	6,1	7,2	3,0	33	20	0,3	<1	23	86,2	132,2	71	14	0,1	0,9	18	22,6	0,4
T25	10-20	23	6,1	8,5	2,0	30	18	0,3	<1	25	75,3	124,6	67	13	0,09	0,9	19	22,5	0,3
T25	20-40	19	5,8	9,9	0,9	24	13	0,3	<1	25	67,8	117,4	61	19	0,1	0,8	18	21,5	0,4
T25	40-60	15	5,5	5,2	0,6	21	11	0,4	<1	26	58,9	109,9	56	30	0,1	0,5	9	5,4	<0.1
T25	60-80	12	5,4	2,8	0,5	16	9	0,3	<1	23	52,5	98,5	53	21	0,09	0,2	7	2,3	<0.1
T25	80-100	11	5,3	2,4	0,5	12	8	0,3	<1	24	45,1	93,9	46	13	0,08	0,2	6	3,5	<0.1
SI	0-10	23	6,2	10,6	3,2	38	18	0,3	<1	22	80,4	123,7	73	20	0,12	0,9	13	33,7	0,6
SI	10-20	26	6,1	7,8	1,7	34	16	0,3	<1	23	76,8	121,9	69	14	0,11	1	13	34,6	0,7
SI	20-40	24	5,8	4,6	0,9	20	10	0,3	<1	23	66,4	112,4	57	33	0,1	0,8	12	27	0,3
SI	40-60	17	5,6	3,0	0,5	20	8	0,3	<1	24	55,0	103,0	54	50	0,04	0,4	6	5,9	<0.1
SI	60-80	17	5,4	7,5	0,4	14	9	0,3	1	24	44,5	93,2	48	46	0,05	0,3	5	4,8	<0.1
SI	80-100	16	5,3	2,7	0,4	11	11	0,3	1	26	43,4	95,4	44	59	0,02	0,2	5	3,8	<0.1
T50	0-10	21	5,9	7,0	2,4	29	16	0,2	<1	23	67,8	113,0	68	45	0,1	0,6	8	17,4	0,1
T50	10-20	23	5,9	4,4	1,4	24	13	0,2	<1	24	65,1	112,3	62	42	0,11	0,6	7	17,5	0,2
T50	20-40	18	5,4	2,7	0,5	16	7	0,3	<1	27	44,5	98,0	47	63	0,08	0,4	7	9,1	<0.1
T50	40-60	15	5,0	2,1	0,3	11	4	0,3	2	28	24,0	79,8	35	80	0,09	0,3	6	5,6	<0.1
T50	60-80	15	4,8	1,6	0,3	9	3	0,3	3	28	20,2	75,3	31	43	0,07	0,3	5	4,1	<0.1
T50	80-100	13	4,8	1,4	0,2	8	3	0,2	3	27	17,7	71,6	28	46	0,05	0,2	4	2,2	<0.1
T100	0-10	26	6,1	13,9	2,5	33	18	0,3	<1	22	69,3	112,8	71	24	0,15	1,1	16	45,9	0,5
T100	10-20	27	6,3	13,1	1,9	34	18	0,3	<1	21	69,1	110,8	72	25	0,13	1,2	19	52	0,6
T100	20-40	25	5,7	16,0	1,0	26	14	0,4	<1	25	54,9	104,4	63	23	0,13	1,3	22	59,5	0,6
T100	40-60	21	5,4	5,8	0,6	24	12	0,4	<1	26	47,6	99,6	59	48	0,13	1	21	51,3	0,2
T100	60-80	19	5,3	5,4	0,5	20	11	0,5	<1	26	43,2	94,8	55	46	0,1	1	28	64,6	0,2
T100	80-100	23	5,3	5,0	0,7	20	10	0,4	<1	27	43,2	96,6	53	8	0,09	0,7	14	29,2	0,2
T125	0-10	24	6,4	13,0	1,6	33	17	0,4	<1	17	55,2	69,2	76	24	0,1	1	12	33,5	0,4
T125	10-20	26	6,3	10,4	1,1	31	16	0,5	<1	17	54,0	68,7	73	24	0,09	1	12	32	0,3
T125	20-40	20	5,9	3,9	0,4	29	13	0,5	<1	19	47,2	65,9	68	28	0,03	0,8	11	24	0,2
T125	40-60	16	5,7	4,2	0,4	22	9	0,5	<1	22	38,8	62,6	59	46	0,05	0,5	8	8,9	<0.1
T125	60-80	15	5,5	8,6	0,3	19	8	0,4	<1	21	23,7	44,8	57	45	0,06	0,3	6	6,6	<0.1
T125	80-100	13	5,4	1,5	0,3	15	7	0,5	<1	21	24,6	46,2	53	41	0,03	0,2	5	4,5	<0.1

^a Soma de bases trocáveis; ^b Capacidade de troca catiônica do solo; ^c Saturação por bases

3.2 Tratamento do esgoto

A ETE CECAP é operada pelo Serviço Municipal de Água e Esgoto (SEMAE). A estação utiliza sistema de tratamento do tipo australiano, produzindo a média de $10,16 \text{ L s}^{-1}$ de efluente. A sequência de tratamento do esgoto, utilizado neste experimento foi a seguinte:

1- Tratamento preliminar: Caixa de recebimento do esgoto bruto, descargas de caminhões limpa fossa e descargas de caminhões de chorume de aterro sanitário;

- Grade grossa de limpeza manual;
- Caixa de areia de limpeza manual;
- Caixa de dosagem de solução alcalinizante com cal hidratada;
- Misturador hidráulico e medidor de vazões tipo “Calha Parshall”.

2-Tratamento secundário:

- Lagoa anaeróbia, na qual a estabilização da matéria orgânica é realizada predominantemente por processos de fermentação anaeróbia, imediatamente abaixo da superfície, não existindo oxigênio dissolvido;
- Lagoa facultativa primária e secundária (2 lagoas em série), nas quais a estabilização da matéria orgânica ocorre em duas camadas, sendo a superior aeróbia e a inferior anaeróbia, simultaneamente.

3-Pós-tratamento do efluente da lagoa facultativa:

- Filtro de areia pressurizado de alta taxa.

3.3 Variedade, manejo e tratamentos

A variedade da cana-de-açúcar plantada é a SP 90-3414 (SP80-1079 x SP82-3544), que se destaca pelo porte ereto, por não florescer, isoporizar pouco e pela sua alta produção, sendo recomendada para colheita do meio para o final da safra, nos ambientes de alto potencial de produção, respondendo positivamente à melhoria deles. Apresenta teor de sacarose e de fibra médios. É suscetível à escaldadura e intermediária ao carvão e broca (TASSO JÚNIOR, 2007). A cana foi plantada no dia 05/09/2006 e a primeira colheita realizada em 11/08/2007, antes da implantação do sistema de irrigação.

A fertilização mineral para P e K foi realizada conforme recomendação de Raij et al. (1996), baseada em análise de solo prévia, utilizando-se superfosfato triplo e cloreto de potássio e a metade da dose recomendada de nitrogênio, sob a forma de nitrato de amônio, baseado na experiência de Fonseca (2005) e Firme (2007), que comprovaram a capacidade do EETE de suprir o N para as plantas. Na adubação de plantio foram utilizados o equivalente a 15 kg de N, 180 kg de P_2O_5 e 100 kg de K_2O por hectare, incorporados no sulco. A primeira e a segunda soca foram adubadas com 60 kg de N, 30 kg de P_2O_5 e 120 kg de K_2O por hectare, incorporados levemente ao lado das linhas de plantio.

Após a colheita da cana-planta, iniciou-se a aplicação dos tratamentos experimentais, com a irrigação com o EETE proveniente da estação de tratamento de esgoto. Para tanto, o canavial foi dividido em 32 parcelas de 30 por 10 m. Cada parcela possui seis linhas de plantio em nível, espaçadas 1,4 m entre elas. Foram consideradas bordaduras a linha de plantio do lado da maior cota do terreno, duas linhas do lado oposto e ainda os 5 metros iniciais e finais das linhas na parcela, restando três linhas centrais de 20 m, com área útil de 84 m² (Figura 2).

O efluente foi bombeado e filtrado, para a distribuição no campo através de linhas de gotejadores enterrados a 15 cm de profundidade dispostos ao lado das linhas de plantio. A primeira linha de cada parcela, no lado da menor cota do terreno não foi irrigada, para minimizar a interferência entre parcelas. Para o manejo da irrigação foi medida a evaporação do tanque Classe A, instalado em área próxima à área experimental. As leituras foram realizadas três vezes por semana, para estimativa da evapotranspiração da cultura (ET_c), utilizando os coeficientes de cultura (K_c) propostos por Doorenbos e Pruitt (1977) que levam em consideração os diferentes estádios de desenvolvimento (Tabela 4). A irrigação foi suspensa um mês antes da data programada da colheita, para favorecer o amadurecimento da cana.

Tabela 4 - Coeficientes de cultura (Kc) empregados para cálculo da irrigação no experimento

Idade do Cultivo	Fase do crescimento	Kc
meses		
0 - 1	do plantio a 0,25 da cobertura completa	0,55
1 - 2	de 0,25 a 0,5 da cobertura completa	0,8
2 - 2,5	de 0,5 a 0,75 da cobertura completa	0,9
2,5 - 4	de 0,75 a cobertura completa	1,0
4 - 10	Utilização máxima	1,05
10 - 11	Envelhecimento precoce	0,8
11 - 12	Maturação	0,6

A intensidade da irrigação constitui os tratamentos estudados: (1) T25 = irrigação com EETE, 25% da evapotranspiração máxima da cultura; (2) T50 = irrigação com EETE, 50% da evapotranspiração máxima da cultura; (3) T75 = irrigação com EETE, 75% da evapotranspiração máxima da cultura; (4) T100 = irrigação com EETE, 100% da evapotranspiração máxima da cultura; (5) T125 = irrigação com EETE, 125% da evapotranspiração máxima da cultura; (6) T150 = irrigação com EETE, 150% da evapotranspiração máxima da cultura; (7) T200 = irrigação com EETE, 200% da evapotranspiração máxima da cultura; (8) SI = sem irrigação. Cada tratamento foi replicado quatro vezes (Figura 2).

Figura 2 - Croqui da área experimental (escala 1 : 2.100)

A eficiência do manejo da irrigação foi avaliada por dois métodos: hidrômetros instalados em cada linha lateral de gotejadores para a aferição da lâmina aplicada e tensiômetros instalados nas parcelas do tratamento T100, nas profundidades de 20, 40 e 60 cm.

3.4 Avaliações químicas

As análises químicas foram realizadas no Laboratório de Química do Nupegel e nos Laboratórios de Tecido Vegetal e de Análise de Solo do Departamento de Ciência do Solo, na USP/ESALQ.

O EETE empregado na irrigação foi coletado bimestralmente para análise. As análises realizadas estão listadas na Tabela 5. As quantidades irrigadas foram computadas e, a partir desses resultados, calculadas as entradas de nutrientes e outros elementos no sistema solo-planta pelo EETE.

Tabela 5 - Métodos para análise química do efluente

Fração*	Variáveis**	Determinação	Referência
B	Sólidos Totais	Filtração + Gravimetria	Eaton (1995)
	pH, CE	Potenciometria	
FV	COD, CID	Combustão catalítica oxidativa	Sugimura e Suzuki (1998)
EC	N total, C total	Combustão a seco	Nelson e Sommers (1996)
	P, S, B, Al, Ca, Mg, Cu, Fe, Mn, Zn, Cd, Cr, Ni, e Pb	ICP-OES	-
	Cl ⁻ , F ⁻	Cromatografia líquida	-
	NO ₃ ⁻ , NO ₂ ⁻ , NH ₄ ⁺	FIA – CE	Ruzicka e Hansen, (1975)

* B = Bruto; FV = Filtrado em Filtro de Fibra de Vidro; EC = Filtrado em Filtro de Éster Celulose;

** CE = Condutividade Elétrica; CID= Carbono Inorgânico Dissolvido; COD = Carbono Orgânico Dissolvido;

A razão de adsorção de sódio do efluente foi calculada pela fórmula:

$$\text{RAS} = [\text{Na}^+] / (0,5[\text{Ca}^{2+}] + 0,5[\text{Mg}^{2+}])^{1/2} \quad (1)$$

As amostras de solo para análises químicas foram coletadas no início do experimento e após um ano de aplicação dos tratamentos, nas profundidades de 0-10, 10-20, 20-40, 40-60, 60-80 e 80-100 cm para análise química. Uma fração das amostras foi congelada para a análise do nitrogênio. No solo foram analisados os parâmetros de fertilidade e de disponibilidade de nutrientes e elementos potencialmente contaminantes (Tabela 6).

Tabela 6 - Métodos para análise química do solo

Variável	Extrator	Determinação	Referência
N total, C total	Combustão a seco	Analizador elementar	Nelson e Sommers (1996)
P	Mehlich-1	Colorimetria	Embrapa (1999)
K, Na		EEC	
N-NO ₃ ⁻ , N-NO ₂ ⁻	KCl 1M	FIA - colorimetria	-
N-NH ₄ ⁺			Ruzicka e Hansen (1975)
Al, Ca, Mg		ICP-OES	Embrapa (1999)
S	Ca(H ₂ PO ₄) ₂ .H ₂ O	Turbidimetria	Fox (1987)
pH	H ₂ O	Potenciometria	Raij et al. (2001)
H + Al	(CH ₃ COO) ₂ Ca.H ₂ O 0,5 M	Titulação NaOH	Embrapa (1999)

Após quatro meses de brotação da soqueira da cana-de-açúcar, foram coletadas amostras para as análises de tecido foliar. A amostragem consistiu na coleta do terço central das folhas +1 (RAIJ et al., 1996) e +3 (GALLO; ALVAREZ; ABRAMIDES, 1962). Dentro da área útil de cada parcela foram coletadas 25 folhas, descartando-se a nervura. Este material, após secagem em estufa de circulação forçada a 65 °C, foi analisado quimicamente (Tabela 7).

Tabela 7 - Métodos para análise química do material vegetal

Elementos	Digestão	Determinação	Referência
N	Sulfúrica	Semi-micro- Kjeldahl	Malavolta et al. (1997)
K, Na	Nitríco-Perclórica	EEC	
S		Turbidimetria	
P		Colorimetria	
Al, Ca, Mg, Cu, Fe, Mn, Zn		ICP-OES	
B	Incineração		

3.5 Avaliações vegetativas

Durante o desenvolvimento da cultura, aproximadamente a cada 60 dias, foram realizadas avaliações do perfilhamento, sempre nos mesmos intervalos marcados em nove pontos de um *grid* regular 3 x 3, dentro da área útil das parcelas de 5 dos tratamentos (SI, T50, T100, T150 e T200). A avaliação consistiu da contagem de colmos existentes em 9 metros lineares, ou seja, 9 contagens de um metro linear demarcado em cada ponto do *grid*.

Na semana anterior à colheita foram avaliados: (i) altura da planta – medida de 9 colmos marcados por parcela, do nível do solo até a inserção da folha; (ii) tombamento das plantas - considerando a área com tombamento quando da ocorrência de inclinação de colmos maior que 45° na região de um metro adjacente ao ponto marcado. Estas medidas foram realizadas em todos os dez tratamentos.

3.6 Avaliações produtivas

A colheita da 1ª e da 2ª soca, com aplicação dos tratamentos, ocorreu em 14/07/2008 e 07/07/2009. Nestas ocasiões foi medida a produção de biomassa pesando-se os colmos produzidos na área útil das parcelas com uma célula de carga adaptada a uma carregadeira.

Foram, também, coletados dez colmos dentro da área útil de cada parcela, formando uma amostra composta, para a determinação da extração de nutrientes e da qualidade tecnológica da cana-de-açúcar. Os colmos foram processados e analisados no Laboratório de Sacarose da Usina Santa Helena em Rio das Pedras – SP. Depois de

desfibrados e prensados a 250 kgf cm^{-2} por um minuto para extração do caldo, foram analisados os parâmetros peso do bagaço úmido (PBU) por diferença de peso; sólidos solúveis totais no caldo (Brix) com um refratômetro digital e sacarose aparente no caldo (POL) com um sacarímetro/polarímetro digital, após clarificação do caldo com mistura clarificante à base de alumínio. Foram calculados a pureza aparente do caldo, açúcares redutores na cana (ARC) e açúcar total recuperável (ATR) segundo os procedimentos oficiais do Conselho dos Produtores de Cana-de-Açúcar, Açúcar e Alcool de São Paulo (CONSECANA, 2006). Amostras do caldo extraído no processamento foram congeladas e o bolo úmido (bagaço) foi seco em estufa de circulação de ar, com a umidade restante determinada pela diferença de massa. Ambos foram analisados quimicamente (Tabela 7).

A extração total de nutrientes e de outros elementos foi estimada com base nos resultados da análise química e rendimento proporcional do bagaço e do caldo coletados na época da colheita.

3.7 Análises estatísticas

A distribuição do sistema de irrigação impôs restrições à aleatorização das parcelas (Figura 2). Este fato limita o estudo estatístico dos resultados àquelas análises que podem ser consideradas menos sensíveis a essa restrição. Por isso optou-se pela realização de análises de covariância para os parâmetros dos quais se dispunha de valores prévios. Sem essa possibilidade, os parâmetros do desenvolvimento vegetativo e a composição química dos tecidos vegetais foram analisados por regressão polinomial ou não linear, considerando-se que estes tipos de análise têm aplicação justificável mesmo sem a estimação correta do erro experimental (PIMENTEL-GOMES; GARCIA, 2002). No caso das variáveis medidas no solo, realizaram-se análises apenas para as diferenças observadas entre os resultados anteriores à implantação do experimento e os posteriores. Todos os testes foram realizados com o auxílio do programa estatístico SAS - System for Windows 8.2 (SAS INSTITUTE, 1999).

3.7.1 Altura

A altura das plantas, medida na época da colheita, foi ajustada a um modelo de Mitscherlich dependente da irrigação por ajuste não linear pelo *proc nlin* do SAS (SCHABENBERGER; PIERCE 2002).

O modelo utilizado foi:

$$y = a (1 - e^{-b(x+c)}) \quad (2)$$

onde 'y' representa a altura medida da base do colmo até a inserção da folha +1 na época da colheita, e 'x' é a intensidade da aplicação de EETE e 'a', 'b' e 'c' são parâmetros ajustados.

Para modelos não lineares, como os obtidos pelo *proc nlin* do SAS, não são definidos valores de R². Para estimar a qualidade do ajuste, foi calculado o pseudo-R² pela eq. (3):

$$\text{pseudo-R}^2 = 1 - \text{sqr}/\text{sqtr} \quad (3)$$

onde 'sqr' é a soma de quadrados do resíduo corrigida, e 'sqtr' é a soma de quadrados totais.

3.7.2 Tombamento

A incidência de tombamentos foi considerada uma variável binária, analisada por regressão logística pelo *proc logistic* do SAS (UCLA, 2008).

3.7.3 Produtividade

Foi utilizado um modelo não-linear de Mitscherlich para o ajuste da produtividade à irrigação com EETE, e um componente linear para a co-variável (SCHABENBERGER; PIERCE, 2002):

$$y = d x_2 + a (1 - e^{-b(x_1+c)}) \quad (4)$$

no qual 'y' é a produtividade obtida na safra irrigada (Mg ha⁻¹), 'x₂' é a co-variável produtividade da cana-planta não irrigada, 'x₁' é a lâmina de irrigação com EETE aplicada e 'a', 'b', 'c' e 'd' são os parâmetros ajustados.

Foi descartada a hipótese de não normalidade dos resíduos pelo teste de Shapiro-Wilk, para confirmar a natureza aleatória do resíduo da regressão.

3.7.4 Química do solo

Para interpretação de suas alterações, os resultados das análises químicas do solo foram subtraídos dos valores obtidos antes da aplicação dos tratamentos (Tabela 3) e depois realizada análise por superfícies de resposta, utilizando o *proc rsreg* do SAS.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Necessidade de irrigação

As temperaturas máxima, mínima e média mensais observadas durante o experimento são apresentadas na Figura 3.

Durante a primeira soca da cultura (ano safra 2007-2008), foram registrados 1519,0 mm de precipitação pluvial (Figura 4). Os déficits de água momentâneos (Figura 5) foram complementados pela irrigação com EETE, totalizando 545,8 mm de necessidade de irrigação ($T_{100} - 100\%$ da Evapotranspiração da cultura - ET_c), tendo sido aplicados até 1091,6 mm no tratamento T200.

Na segunda soca (ano safra 2008-2009), a precipitação acumulada foi de 1088,8 mm, enquanto a irrigação foi de 461,6 mm (Figura 4). Foram aplicados até 993,2 mm de EETE no tratamento com a maior lâmina. Contudo, neste ano, a irrigação foi prejudicada pela manutenção da estação de tratamento de esgoto nos meses de fevereiro e março (Figura 4).

Figura 3 - Temperaturas máxima, mínima e média mensais observadas durante o experimento

Figura 4 - Precipitação pluvial e irrigação referente a 100 % da ETc

Figura 5 - Potencial matricial em três profundidades do solo no tratamento T100 durante o experimento

A quantidade de EETE aplicado pela irrigação e a precipitação acumulada em cada ano safra e entre a colheita e a amostragem de folhas ocorrida em dezembro são

exibidas na Tabela 8. Pode-se observar que 60% do EETE no primeiro ano e 46% no segundo foram aplicados até a época da amostragem foliar, motivo pelo qual se espera que os resultados destas análises reflitam a alteração provocada pela irrigação.

Tabela 8 - Precipitação e irrigação aplicada durante o experimento

	Precipitação	Irrigação (100% ETc)
	-----mm-----	
Acumulado até 12/2007	387,0	339,4
Ano safra 2007/08	1519,0	565,8
Acumulado até 12/2008	454,6	214,3
Ano safra 2008/09	1088,8	461,6

4.2 Balanço de nutrientes no sistema

Os resultados das análises do efluente utilizado na irrigação, bem como as quantidades calculadas de elementos adicionados pela irrigação no primeiro (GOMES et al, 2009), e no segundo ano estudados estão sintetizadas na Tabela 9.

Por esses resultados, é possível verificar que o efluente da estação do CECAP em Piracicaba tem menos restrições ao uso que o efluente da estação de tratamento de Lins-SP (DA FONSECA et al., 2007c; LEAL et al. 2009). Apesar das condutividades elétricas semelhantes, a concentração de sódio nesta última apresenta-se sempre acima de 100 mg L^{-1} , e a RAS sempre maior que $9 \text{ (mmol L}^{-1})^{1/2}$. Pela classificação de qualidade da água para irrigação (PESCOD, 1992), ambos os efluentes possuem ligeira a moderada restrição de uso quanto ao prejuízo à capacidade de infiltração de água no solo. Contudo, o efluente da ETE CECAP não apresenta restrições quanto à toxicidade por B, Cl e Na. Com relação aos nutrientes, o efluente apresenta concentrações de N e P semelhantes ao observado nos experimentos anteriores, em Lins. As concentrações de K, Ca e Mg no efluente de Piracicaba são praticamente o dobro das observadas em Lins, o que é benéfico tanto para o balanço de nutrientes no sistema quanto ao balanceamento dos efeitos do Na ao solo, resultado em menor RAS.

Tabela 9 - Caracterização do efluente de estação de tratamento de esgoto (média $\pm$ desvio padrão) e aporte de elementos pela irrigação (100% da ETc) nos dois anos estudados

Constituintes	1ª soca		2ª soca	
	EETE	Aporte	EETE	Aporte
	mg L ⁻¹	kg ha ⁻¹	mg L ⁻¹	kg ha ⁻¹
CID ¹	234,50 $\pm$ 103,42	1324,93	234,81 $\pm$ 89,68	1082,5
COD ²	23,52 $\pm$ 12,87	132,91	25,63 $\pm$ 12,86	118,1
P-PO ₄ ⁻	2,53 $\pm$ 1,94	14,3	2,24 $\pm$ 1,92	10,3
S	36,78 $\pm$ 21,90	207,79	36,6 $\pm$ 20,25	168,7
N-NH ₄ ⁺	26,33 $\pm$ 4,29	148,77	28,11 $\pm$ 5,55	129,59
N-NO ₂ ⁻	0,02 $\pm$ 0,01	0,12	0,02 $\pm$ 0,01	0,10
N-NO ₃ ⁻	0,07 $\pm$ 0,03	0,39	0,07 $\pm$ 0,04	0,32
NP ³	2,51 $\pm$ 1,01	14,19	3,41 $\pm$ 1,14	15,72
CP ⁴	13,69 $\pm$ 5,34	77,34	17,38 $\pm$ 5,36	80,12
C/N ⁵	5,49 $\pm$ 0,23	-	5,14 $\pm$ 0,36	-
NT ⁶	28,94 $\pm$ 3,90	163,48	31,61 $\pm$ 5,67	145,72
Cl-	75,01 $\pm$ 48,56	423,81	78,4 $\pm$ 43,6	361,72
Ca	14,15 $\pm$ 8,87	79,95	15,18 $\pm$ 11,89	69,97
Mg	4,97 $\pm$ 1,81	28,05	5,29 $\pm$ 1,88	24,39
Na	66,90 $\pm$ 26,50	377,97	70,8 $\pm$ 26,32	326,39
K	25,73 $\pm$ 9,89	145,38	27,5 $\pm$ 10,16	126,77
Al	< LD ⁷	-	< LD	-
B	0,08 $\pm$ 0,04	0,45	0,074 $\pm$ 0,004	0,34
Cd	< LD	-	< LD	-
Cr	0,007 $\pm$ 0,01	0,04	0,007 $\pm$ 0,01	0,03
Cu	0,013 $\pm$ 0,02	0,07	0,012 $\pm$ 0,01	0,05
Fe	0,043 $\pm$ 0,04	0,25	0,024 $\pm$ 0,01	0,11
Mn	0,031 $\pm$ 0,04	0,18	0,036 $\pm$ 0,02	0,16
Ni	< LD	-	< LD	-
Pb	< LD	-	< LD	-
Zn	< LD	-	0,01 $\pm$ 0,01	0,05
RAS ⁸	3,82 $\pm$ 1,22 (mmol L ⁻¹) ^{1/2}		4,24 $\pm$ 1,38 (mmol L ⁻¹) ^{1/2}	
pH	7,47 $\pm$ 0,24		7,49 $\pm$ 0,22	
CE ⁹	0,82 $\pm$ 0,012 dS m ⁻¹		0,84 $\pm$ 0,121 dS m ⁻¹	
Irrigação	565 mm		461 mm	

¹ Carbono Inorgânico Dissolvido; ² Carbono Orgânico Dissolvido; ³ nitrogênio total no material particulado; ⁴ carbono total no material particulado; ⁵ relação C:N no material particulado; ⁶ nitrogênio total presente no EETE; ⁷ limite de detecção; ⁸ razão de adsorção de sódio; ⁹ condutividade elétrica

Os resultados das análises químicas das duas frações do colmo, utilizadas para o cálculo da exportação de nutrientes, estão apresentados na Tabela 10 para a primeira soca e na Tabela 11 para a segunda. Para estes cálculos, foram utilizados os valores médios de $141.76 \pm 22.53 \text{ Mg ha}^{-1}$ como produtividade; $263,66 \pm 10,32 \text{ g kg}^{-1}$ de PBU e $50 \pm 2\%$ como a umidade do bagaço; resultando nos colmos constituídos por $13 \pm 1\%$ de bagaço seco e $74 \pm 1\%$ de caldo.

Tabela 10 - Concentração de nutrientes (média $\pm$ desvio padrão) nas frações do colmo na primeira soca

Elemento	Concentração no bagaço seco	Concentração no caldo	Concentração no colmo
	----- g kg ⁻¹ -----		
N	$2,26 \pm 0,36$	$0,34 \pm 0,07$	$0,54 \pm 0,02$
P	$0,28 \pm 0,01$	$0,08 \pm 0,01$	$0,09 \pm 0,02$
K	$1,74 \pm 0,06$	$1,05 \pm 0,04$	$1,01 \pm 0,04$
Ca	$0,37 \pm 0,01$	$0,11 \pm 0,01$	$0,13 \pm 0,01$
Mg	$0,42 \pm 0,01$	$0,18 \pm 0,01$	$0,19 \pm 0,01$
S	$0,40 \pm 0,01$	$0,17 \pm 0,01$	$0,18 \pm 0,01$
	----- mg kg ⁻¹ -----		
Cu	$1,51 \pm 0,12$	< LD	$0,29 \pm 0,02$
Fe	$152,6 \pm 9,68$	$9,09 \pm 0,54$	$26,76 \pm 1,47$
Mn	$31,23 \pm 0,88$	$7,19 \pm 0,18$	$9,43 \pm 0,24$
Zn	$4,59 \pm 0,22$	$0,41 \pm 0,10$	$0,88 \pm 0,07$

Tabela 11 - Concentração de nutrientes (média $\pm$ desvio padrão) nas frações do colmo na segunda soca

Elemento	Concentração no bagaço seco	Concentração no caldo	Concentração no colmo
	----- g kg ⁻¹ -----		
N	$2,26 \pm 0,36$	$0,34 \pm 0,07$	$0,54 \pm 0,09$
P	$0,29 \pm 0,05$	$0,08 \pm 0,01$	$0,14 \pm 0,02$
K	$2,13 \pm 0,42$	$1,26 \pm 0,32$	$1,49 \pm 0,32$
Ca	$0,40 \pm 0,08$	$0,10 \pm 0,02$	$0,18 \pm 0,03$
Mg	$0,43 \pm 0,08$	$0,22 \pm 0,02$	$0,27 \pm 0,03$
S	$0,34 \pm 0,05$	$0,16 \pm 0,02$	$0,21 \pm 0,02$
	----- mg kg ⁻¹ -----		
Cu	$1,49 \pm 0,77$	$0,19 \pm 0,03$	$0,53 \pm 0,22$
Fe	$132,8 \pm 54,70$	$6,14 \pm 2,07$	$39,30 \pm 14,89$
Mn	$27,01 \pm 5,74$	$5,70 \pm 1,25$	$11,31 \pm 1,99$
Zn	$8,72 \pm 1,75$	$0,98 \pm 0,31$	$3,00 \pm 0,56$

Os valores da exportação de nutrientes apresentados na Tabela 12 são inferiores aos obtidos por Orlando Filho (1983) para N, Ca, Cu; superiores para K e Fe, e equivalentes para os outros nutrientes. Já Leal et al. (2009) obtiveram maiores concentrações no colmo e conseqüentemente exportações maiores de N e K, mesmo no tratamento controle, utilizando a variedade RB 72-454. Nos resultados apresentados

por Bittencourt et al. (1992), essa variedade esteve entre as que continham maior concentração de N e K no caldo, e talvez a diferença varietal seja suficiente para explicar porque os resultados com a SP 90-3414 foram inferiores.

Tabela 12 - Exportação de nutrientes e Na pela colheita da cana de açúcar nos dois anos irrigados com EETE

Elemento	2008		2009	
	Exportação	Balanço	Exportação	Balanço
----- kg ha ⁻¹ -----				
N	76,87 ± 2,37	86,6	91,01 ± 3,74	54,71
P	14,12 ± 0,52	-4,97	16,01 ± 0,64	-5,71
K	140,66 ± 5,26	-65,64	127,92 ± 4,75	-1,15
Ca	18,96 ± 0,85	54,29	23,1 ± 0,93	15,68
Mg	27,28 ± 1,08	-11,06	30,71 ± 0,95	-6,32
S	25,42 ± 0,74	178,49	25,59 ± 0,7	143,11
Cu	0,04 ± 0,001	0	0,07 ± 0,001	0
Fe	3,83 ± 0,25	-5,334	4,48 ± 0,27	-4,37
Mn	1,33 ± 0,04	-1,424	1,44 ± 0,05	-1,28
Na	3,91 ± 0,32	374,1	3,41 ± 0,30	323,0
Zn	0,13 ± 0,01	-	0,30 ± 0,02	-

Pelos resultados do aporte de nutrientes apresentados na Tabela 9 e o balanço apresentado na Tabela 12, é possível afirmar que o EETE é fonte potencial de nutrientes à cultura da cana-de-açúcar, principalmente N, Ca e S, precisando de complementação mineral de P, K, Mg e micronutrientes.

Sendo o N potencial contaminante de água subterrâneas (DA FONSECA et al., 2007a), para a disposição de EETE, talvez seja necessária a seleção de variedades de cana-de-açúcar com maior consumo deste elemento, como parece ser o caso da RB 72-454 (LEAL et al. 2009) e da RB 86-7515 (OLIVEIRA, 2008). É sabido que o comportamento varietal interfere grandemente nos resultados de concentração de nutrientes no caldo (BITTENCOURT et al., 1992) e, conseqüentemente, no colmo.

4.3 Nitrogênio do solo

É possível observar no solo o incremento da disponibilidade de nitrogênio mineral pela irrigação com EETE (Figura 6.a e Figura 6.b). As lâminas de irrigação mais

elevadas resultaram também no aumento da profundidade em que é encontrado esse nitrogênio.

Figura 6 – Amônio (a), Nitrato (b) e N total (c) do solo após um ano de irrigação com EETE

Apesar do N presente no EETE estar predominantemente sob a forma de amônio (Tabela 9), de modo geral, as concentrações de amônio no solo são mais baixas que as de nitrato. Resultados semelhantes foram encontrados por Smith e Bond (1999). Este

comportamento evidencia o processo de nitrificação que ocorre, rapidamente, no solo, convertendo o nitrogênio da forma amoniacal para nítrica (DA FONSECA et al., 2007b).

As reações de nitrificação são afetadas pela aeração, temperatura, umidade, reação do solo, fertilizantes, matéria orgânica, relação C/N e presença de fatores tóxicos aos microrganismos (BREMNER, 1997; SNYDER et al., 2009). O processo de nitrificação é estritamente aeróbico (KHALIL; MARY; RENAULT, 2004) e ocorre com liberação de energia para os microrganismos. Lâminas de irrigação que provoquem restrições à aeração do solo podem inibir a nitrificação e favorecer o processo de desnitrificação (MOREIRA; SIQUEIRA, 2006).

Segundo Nogueira et al. (2008), a baixa relação C/N do efluente tratado aplicado ao solo, juntamente com a elevada relação C/N dos resíduos e da matéria orgânica do solo, na presença de quantidade adequada de água fornecida pela irrigação, favoreceram o metabolismo microbiano no solo e as reações de mineralização do nitrogênio.

Em áreas irrigadas com esgoto tratado, o conteúdo de C microbiano e a respiração microbiana aumentam (NOGUEIRA et al. 2008). O N aplicado, na forma de EETE, estimula a decomposição da matéria orgânica do solo e, conseqüentemente, as emissões de CO_2 aumentam e há liberação do N proveniente desta matéria orgânica. Segundo Nogueira (2008), a irrigação do capim Tifton 85 com água potável levou à redução de 112 kg ha^{-1} do estoque de N do solo por cada ano do experimento. Portanto, uma quantidade considerável de N pode prover do próprio solo, e a reposição deste nutriente é importante para a manutenção da fertilidade.

Por esses resultados, o T200 apresentou aproximadamente 32 kg ha^{-1} de N-NO_3^- e $2,86 \text{ kg ha}^{-1}$ de N-NH_4^+ disponíveis até 1 m de profundidade, após um ano de irrigação com EETE. Não é uma quantidade elevada, considerando-se que são recomendados até 120 kg ha^{-1} de N na forma de fertilizante para a adubação da cana-soca.

4.4 Fósforo e enxofre do solo

Os resultados das análises para P e S disponíveis no solo para as várias profundidades e tratamentos estão representados graficamente na Figura 7. Nota-se o

comportamento tipicamente diferente para estes dois ânions, o fosfato, sendo fortemente adsorvido pelos minerais do solo, concentra-se nos primeiros 40 cm do solo onde é incorporado pelas fertilizações ou adicionado pela irrigação com EETE. O P disponível em profundidades maiores que 40 cm é próximo de zero. Já o sulfato possui menor afinidade com os minerais do solo, sendo repelido pelas cargas negativas do solo, mais abundantes na superfície, e desce no perfil, concentrando-se nas profundidades maiores (BOHN et al., 2001), onde os minerais apresentam menos cargas negativas (Tabela 3). O destaque que o tratamento T50 tem na representação gráfica da Figura 7.b está de acordo com a expectativa de que o solo onde está assentado este tratamento apresente balanço de cargas mais positivo, em consoante com a menor soma (Figura 15) e saturação por bases (Figura 9.d), menor pH (Figura 9.a) e maior teor de alumínio trocável (Figura 9.b).

Figura 7 - P (a) e S (b) disponíveis no solo após um ano de irrigação com EETE

Foi realizada a análise estatística para a diferença entre os teores disponíveis antes do experimento, apresentados na Tabela 3, e os teores disponíveis após um ano de irrigação. Os resultados desta análise estatística estão sintetizados na Tabela 13.

Tabela 13 - Superfície de resposta para a diferença dos teores de P e S disponíveis no solo no início do experimento e após um ano de aplicação de irrigação com EETE, em função da intensidade de irrigação e da profundidade do solo

Componente do modelo	Elemento	
	P	S
Intercepto	13,15**	-6,466333 ^{ns}
Irrigação	-0,038*	-0,102567 ^{ns}
Profundidade	-0,457**	0,524337*
Irrigação ²	0,0001 ^{ns}	0,000254 ^{ns}
Profundidade ²	0,0032**	-0,004159*
Interação	0,0004*	0,000089237 ^{ns}
R ²	0,40	0,09

Na estatística para o P, foram significativos todos os fatores estudados, exceto o efeito quadrático da irrigação. Pela representação do modelo, na Figura 8, é possível observar que nas profundidades maiores que 40 cm, os efeitos sobre o P do solo são virtualmente nulos. Próximo da superfície, pode ser observado o efeito linear decrescente da irrigação com EETE sobre esse parâmetro. Este efeito pode ser devido ao melhor desenvolvimento vegetal, e, conseqüentemente, à maior extração deste nutriente pelas plantas ou pela adsorção do P pelos argilominerais que pode ser intensificada por reações como a acidificação provocada pela nitrificação. Como o aporte de P pelo EETE é pequeno em relação à fertilização aplicada (Tabela 9), é possível que ocorra, com o passar do tempo, um incremento da disponibilidade deste nutriente nas parcelas não irrigadas, onde a extração pela cultura é menor.

Já a análise estatística para a alteração do S disponível no solo não foi significativa em nenhum nível para a irrigação. A interação complexa entre a capacidade do solo de reter o sulfato de forma diferenciada em cada profundidade, a exploração do nutriente pelas plantas, e a lixiviação provocada pelas maiores lâminas de irrigação e as chuvas dificultam a modelagem do efeito dos tratamentos.

Figura 8 - Alteração do P disponível do solo após um ano de irrigação com EETE (mg kg^{-1})

4.5 Acidez do solo

O pH na camada arável do solo, onde foi montado o experimento, encontra-se em valores adequados (5,6 - 6,2) para o desenvolvimento da maioria das plantas (Figura 9.a). Nesta faixa de pH a disponibilidade de nutrientes é máxima (MALAVOLTA, 2006).

A acidez trocável, ou Al trocável, são relevantes apenas abaixo de 40 cm para os tratamentos T50 e T75 (Figura 9.b). O Al é tóxico para as culturas, representando limitação ao desenvolvimento radicular e pode ter acarretado em prejuízos produtivos às plantas destes tratamentos.

A acidez potencial, ou total ($\text{H}+\text{Al}$), é condizente com os outros resultados de pH e Al trocável apresentados (Figura 9.c). Têm destaque os tratamentos T50 e T75, que apresentam $\text{H}+\text{Al}$ mais altos em profundidade.

A saturação de bases encontra-se adequada para a cultura da cana-de-açúcar, com exceção do tratamento T50 (Figura 9.d). Pela recomendação oficial (RAIJ et al., 1996), a saturação por bases de 60 % está adequada para a cultura.

Figura 9 - pH (a), Al (b), H+Al (c) e V - Saturação por bases (d) no solo após um ano de irrigação com EETE

A análise estatística para a diferença entre a acidez do solo antes do experimento e após a irrigação com EETE encontra-se na Tabela 14.

O pH, que representa a atividade dos íons H^+ na solução do solo, teve alteração significativa apenas em relação à profundidade e ao componente quadrático da irrigação, mas não à interação destes fatores. A representação gráfica da alteração em relação à irrigação mostra um ajuste muito pobre (Figura 10). Já em relação à

profundidade, o ajuste quadrático foi influenciado pela redução de menos de meia unidade no pH da camada superficial, entre 0 e 20 cm. Abaixo desta profundidade, o pH manteve-se estável. Pereira (2009) observou acidificação da camada superficial do solo após 11 anos de irrigação com EETE. Os resultados aqui apresentados não permitem associar alterações no pH do solo com a aplicação do EETE.

Tabela 14 - Superfície de resposta para a diferença do pH, alumínio trocável, acidez potencial (H+Al), e saturação por bases (V) no solo no início do experimento e um ano após a aplicação da irrigação, em função da intensidade de irrigação e da profundidade do solo

Componente do modelo	Parâmetro			
	pH	Al	H+Al	V
Intercepto	-0,409**	0,220554*	-4,2963**	4,6881**
Irrigação	-0,002311 ^{ns}	0,000477 ^{ns}	0,04650**	-0,06575**
Profundidade	0,020028**	0,002124 ^{ns}	-0,076344**	0,25028**
Irrigação ²	0,00001299*	-0,000005227 ^{ns}	-0,000040384 ^{ns}	-0,000212*
Profundidade ²	-0,000171**	-0,000054262 ^{ns}	0,000897**	-0,002176**
Interação	-0,000007616 ^{ns}	0,000004734 ^{ns}	-0,000157*	0,000019477 ^{ns}
R ²	0,25	0,06	0,51	0,21

Alteração mais nítida foi observada na acidez potencial (H+Al), que foi significativamente ajustada aos fatores estudados, com exceção do efeito quadrático da irrigação. A representação gráfica deste ajuste está na Figura 12. Por ela, pode ser notada a influência dos tratamentos com maior lâmina de irrigação com EETE no aumento da acidez potencial na camada superficial. Já foi observado este efeito em outros trabalhos com EETE (DA FONSECA, 2005; PEREIRA, 2009), que está relacionado à adição de grandes quantidades de N amoniacal e o processo de nitrificação no solo, que libera H⁺ (BOLAN; HEDLEY; WHITE, 1991). O mesmo processo explica o efeito sobre a saturação por bases (V) representada na Figura 13, embora a estatística para interação entre os fatores não tenha sido significativa a 5%.

Figura 10 - Alteração do pH do solo após um ano de irrigação com EETE em função dos tratamentos. As barras de erro representam o erro padrão da média (n=4)

Figura 11 - Alteração do pH do solo após um ano de irrigação com EETE em função da profundidade (média de todos os tratamentos). As barras de erro representam o erro padrão da média (n=4)

Figura 12 - Alteração da acidez potencial ($H^+ Al$) do solo após um ano de irrigação com EETE

Figura 13 - Alteração da saturação por bases (V) do solo após um ano de irrigação com EETE (%)

4.6 Bases trocáveis do solo

O subsolo é relativamente mais pobre em bases que a superfície do solo. A boa disponibilidade de Ca e Mg é característica para o solo estudado (AQUINO, 2008), e o potássio tem a distribuição mais desigual dentre os cátions (Figura 14). A distribuição do potássio é afetada pela prática de adubação e pela reciclagem da cultura, cujos restos decompõem-se próximos ou sobre a superfície do solo.

Figura 14 - K (a), Ca (b), Mg (c) e Na (d) trocáveis no solo após um ano de irrigação com EETE

Figura 15 - Soma de bases trocáveis no solo após um ano de irrigação com EETE

O Na encontra-se em quantidade pouco importante no solo, devido ao curto período de tempo estudado. Pereira (2009) observou mais de 4 mmolc kg^{-1} após 11 anos de irrigação com EETE. Este Na também distribuiu-se de maneira desigual, acumulando-se em profundidade maior que 40 cm, principalmente no tratamento T200. Arbitrando-se o valor de $1,2 \text{ kg dm}^{-3}$ para a densidade do solo, a adição de 377 kg de Na (Tabela 9) deveria resultar em $1,37 \text{ mmolc kg}^{-1}$ no solo, se distribuído uniformemente até a profundidade de 1 m no tratamento T100, e o dobro deste valor no T200. O comportamento observado é explicado pela boa quantidade de Ca e Mg no solo, que são retidos mais fortemente que o Na, e o tornam mais sujeito à lixiviação tanto pelas chuvas quanto pela lâmina de irrigação excessiva. No entanto, este elemento deve ser motivo de monitoramento, principalmente em solos mais pobres em Ca e Mg, onde o Na pode vir a dominar o complexo de troca do solo (DA FONSECA, 2005).

O K foi significativamente alterado pela irrigação com EETE (Tabela 15). Na representação gráfica do modelo estatístico, é possível observar que na profundidade intermediária estudada a alteração foi nula, limitando-se à camada superficial do solo (Figura 16). Neste caso, houve aumento do K, mas este aumento foi menor nas áreas irrigadas que na não irrigada. Além do EETE, o K é adicionado ao solo pelas adubações, e a remoção pela cultura deve ter sido maior nas parcelas irrigadas, além de que outros elementos adicionados pelo EETE deslocam o K do complexo de troca do solo, favorecendo sua lixiviação, principalmente nas lâminas de irrigação maiores que a necessidade da cultura. Estes resultados concordam com os observados por Pereira (2009), que observou uma redução do K trocável na superfície do solo proporcional a irrigação com EETE.

Tabela 15 - Superfície de resposta para a diferença dos teores trocáveis de cátions no solo no início do experimento e um ano após a aplicação da irrigação, em função da intensidade de irrigação e da profundidade do solo

Componente do modelo	Elemento				
	K	Ca	Mg	Na	SB
Intercepto	2,76025**	2,022513 ^{ns}	-3,01267**	-0,100763 ^{ns}	1,768471 ^{ns}
Irrigação	-0,007879**	0,048603 ^{ns}	0,006675 ^{ns}	-0,002268 ^{ns}	0,045142 ^{ns}
Profundidade	-0,075314**	0,035412 ^{ns}	0,219127**	0,015799**	0,195016*
Irrigação ²	0,000014 ^{ns}	-0,00009 ^{ns}	0,0000616 ^{ns}	0,0000083 ^{ns}	-6x10-6 ^{ns}
Profundidade ²	0,000501**	-0,000481 ^{ns}	-0,00196**	-0,00007 ^{ns}	-0,002011*
Interação	0,00007167**	-0,000365 ^{ns}	-0,000161 ^{ns}	-0,0000217 ^{ns}	-0,000475 ^{ns}
R ²	0,72	0,06	0,27	0,32	0,08

Já o Mg do solo foi não foi alterado significativamente pela irrigação, com os efeitos ficando restritos aos horizontes mais profundos (Figura 17). Observa-se pequena diminuição do teor trocável de Mg na camada superficial, e incremento em maiores profundidades.

Figura 16 - Alteração do K do solo após um ano de irrigação com EETE (mmol_c kg⁻¹)

Figura 17 - Alteração do Mg do solo após um ano de irrigação com EETE em função da profundidade (média de todos os tratamentos). As barras de erro representam o erro padrão da média (n=4)

Para o Na foi observado um incremento em profundidade (Figura 18), não sendo possível isolar efeito exclusivo ou combinado da irrigação. Com o uso continuado de EETE, este elemento pode atingir teores elevados no solo, requerendo cuidados especiais para seu manejo (LEAL, 2007).

Figura 18 - Alteração do Na do solo após um ano de irrigação com EETE em função da profundidade (média de todos os tratamentos). As barras de erro representam o erro padrão da média (n=4)

4.7 Diagnose do estado nutricional pela análise foliar

Os resultados das análises químicas de folhas para diagnóstico nutricional estão listados na Tabela 16, bem como os resultados da análise de variância.

Pelos resultados da análise de variância apresentados (Tabela 16), é possível concluir que na primeira soca, o efeito da irrigação com EETE sobre a análise foliar deu-se apenas para os nutrientes P, K, S, Cu, Mn e Zn. O tipo de folha amostrada foi importante para P, K, Ca, S, Cu, Mn. E a interação dos fatores influiu significativamente sobre as concentrações de Ca, Mg, Fe, Mn e Zn, sendo mais forte sobre P e S. Na segunda soca, o efeito da irrigação foi significativo para N, P, Mg, S e Cu, sendo que para os macronutrientes não houve efeito significativo da interação entre a irrigação e o tipo de folha. O tipo de folha amostrada resultou em valores significativamente

diferentes para os micronutrientes, e as únicas interações entre tipo de folha e irrigação deram-se para Cu e Mn. Estes efeitos indicam a importância da correta seleção da folha para a amostragem na cana de açúcar.

Tabela 16 - Concentrações de nutrientes nas folhas da cana-de-açúcar aos 4 meses após a colheita e resultado da análise de variância para os fatores estudados em dois ciclos irrigados com EETE

Nutriente	1ª soca					2ª soca				
	Concentração média		Fonte de variação			Concentração média		Fonte de variação		
			Irrigação	Tipo de folha	Interação			Irrigação	Tipo de folha	Interação
	+1	+3				+1	+3			
	----- g kg ⁻¹ -----					----- g kg ⁻¹ -----				
N	21,9	21,5	ns	ns	ns	18,8	19,5	***	**	ns
P	2,4	2,5	***	***	***	2,1	2,0	***	ns	ns
K	12,1	8,5	***	***	ns	10,9	10,4	ns	ns	ns
Ca	4,5	6,4	ns	***	*	1,9	3,1	ns	***	ns
Mg	1,6	1,5	ns	ns	*	1,2	1,5	***	*	ns
S	2,6	2,8	***	***	***	1,5	1,7	***	***	ns
	----- mg kg ⁻¹ -----					----- mg kg ⁻¹ -----				
B	4,0	3,5	ns	ns	ns	5,0	5,5	ns	ns	ns
Cu	4,1	3,3	*	***	ns	5,4	7,6	***	***	***
Fe	104,1	93,1	ns	ns	*	83,7	117,7	ns	***	ns
Mn	66,1	68,2	*	*	*	43,6	61,1	ns	***	**
Zn	18,7	17,9	**	ns	*	18,4	15,0	ns	***	ns

ns=não significativo; *=significativo a p<0,05; **=significativo a p<0,01; ***=significativo a p<0,001

Na primeira soca, a irrigação foi capaz de elevar as concentrações de nutrientes nas folhas +1 para P, Ca, Mg, S e Zn, sendo que S atingiu valores acima do limite considerado adequado por Raij et al. (1996) (Figura 19). Viator; Kovar e Hallmark (2002) também obtiveram aumento da concentração de Ca, S, Mn e Zn com a aplicação de gesso e S, juntamente com a aplicação de composto de lixo, nas folhas da cana-de-açúcar.

A concentração foliar de K, no entanto, diminuiu com a irrigação, provavelmente por efeito de diluição nos tecidos com o maior desenvolvimento vegetal, pois a curva de ajuste é semelhante e inversa à curva que descreveu a altura das plantas e a produtividade deste ano-safra. Já na folha +3, o ajuste decrescente da concentração de K não foi tão bom quanto na folha +1 (Figura 20.a).

As concentrações de Fe (Figura 20.b) e Mn (Figura 20.c) também permitiram ajuste à irrigação, com EETE. A baixa qualidade do ajuste, no entanto, deixa dúvidas

quanto à sua importância para o estudo dos efeitos da irrigação com EETE, principalmente porque no ano seguinte o comportamento foi oposto (Figura 21.e e 21.f). Estes micronutrientes têm sua disponibilidade alterada pelas condições de oxido-redução diferenciadas provocadas pela alteração da umidade do solo, e parece ser este o caso (BOHN; MCNEAL; O'CONNOR, 2001).

Dentre as concentrações foliares dos nutrientes estudados aos quatro meses após a brotação da 2ª soqueira (Tabela 16), Ca e Cu encontram-se abaixo da faixa considerada adequada por Malavolta et al. (1997) para a folha +3 mas não para a folha +1 pela interpretação de Raij et al. (1997) (Tabela 16). Com a variação da irrigação, as concentrações de P, Mg, S, Fe e Mn variaram significativamente nas folhas +1. O fósforo comportou-se de forma não linear e foi ajustado a um modelo de Mitschlich de máximo $2,27 \text{ g kg}^{-1}$ (SCHABENBERGER; PIERCE, 2002) (Figura 21.b). Nitrogênio, magnésio, enxofre, ferro e manganês sofreram um incremento de ajuste linear com o aumento da intensidade da irrigação, sendo que N, Mg e S apresentaram-se abaixo da faixa considerada adequada por Raij et al. (1996) no tratamento sem irrigação, sendo elevados à faixa de suficiência com a irrigação de 100% da ETc (Figura 21). Este incremento nas concentrações foliares provocado pela irrigação com EETE é decorrente tanto do maior aporte de nutrientes, quanto da melhoria das condições de absorção pelas raízes proporcionada pela manutenção da umidade adequada no solo.

A ocorrência de efeito significativo da irrigação sobre o N foliar na segunda soca, mas não na primeira (Tabela 16) é evidência que suporta a hipótese de maior efeito do N do efluente na segunda soca pelo esgotamento do N mineralizável incorporado ao solo na reforma do canavial (WIEDENFELD; ENCISO, 2009). Este é o provável motivo pelo qual Firme (2007) também não encontrou efeito significativo da irrigação com EETE na concentração foliar de N na cana-planta.

Observa-se que em todos os casos onde foi possível associar claramente a alteração da concentração foliar de um nutriente a seu fornecimento pelo EETE, o ajuste deu-se na folha +1, ou foi mais claro nestas folhas que na folha +3, com exceção do Cu. Os valores obtidos em cada folha foram significativamente diferentes para a maioria dos nutrientes. Estes efeitos indicam a importância da correta seleção da folha para a amostragem na cana-de-açúcar.

Figura 19 - Concentração de a) N, b) P, c) Mg, d) S, e) Fe e f) Mn na folha +1 da cana-de-açúcar aos 4 meses de brotação da 1ª soca em função da irrigação com EETE. Barras de erro representam o erro padrão da média (n=4). As linhas horizontais tracejadas representam o limite da faixa considerada adequada por Raji et al. (1996), quando este se encontra dentro da escala do gráfico

Figura 20 - Concentração de a) K, b) Fe, c) Mn, na folha +3 da cana-de-açúcar aos 4 meses após a rebrota da 1ª soca e d) P, e) Mg e f) Cu na folha +3 da cana-de-açúcar aos 4 meses após a rebrota da 2ª soca em função da irrigação com EETE. Barras de erro representam o erro padrão da média (n=4). As linhas horizontais tracejadas representam o limite da faixa considerada adequada por Malavolta et al. (1996), quando este se encontra dentro da escala do gráfico

Figura 21 - Concentração de a) N, b) P, c) Mg, d) S, e) Fe e f) Mn na folha +1 da cana-de-açúcar aos 4 meses após a rebrota da 2ª soca em função da irrigação com EETE. Barras de erro representam o erro padrão da média (n=4). As linhas horizontais tracejadas representam o limite da faixa considerada adequada por Raij et al. (1996), quando este se encontra dentro da escala do gráfico

4.8 Altura das plantas

Os modelos de Mitschelich ajustados à altura das plantas medida na época da colheita foram:

$$1^{\text{a}} \text{ soca} \quad y = 292,6 (1 - e^{-0,0323 (x + 53,38)}) \quad \text{pseudo-}R^2=0,61 \quad (5)$$

$$2^{\text{a}} \text{ soca} \quad y = 286,1 (1 - e^{-0,0104 (x + 159,69)}) \quad \text{pseudo-}R^2=0,79 \quad (6)$$

onde 'y' representa as alturas medidas da base do colmo até a inserção da folha +1 e 'x' é a intensidade da aplicação de EETE.

Figura 22 - Altura das plantas ao final do ciclo em função da irrigação com EETE nos dois anos-safra avaliados

Pela análise do ajuste dado pela eq (5), é possível inferir que, na 1ª soca a altura máxima das plantas correspondeu a 240,4 cm no tratamento sem irrigação e a 292 cm no tratamento irrigado com 200 % da ETc (Figura 22). Na 2ª soca as plantas cresceram menos. Segundo a eq. (6), as alturas máximas foram, respectivamente, 231,7 e 279,3 cm. Ambas as diferenças no crescimento das plantas são superiores ao obtido no experimento de Farias e al. (2008) com a variedade SP 79-1011 na Paraíba, onde as alturas chegaram a 152,8 cm na cana irrigada contra 148,2 cm na cana de sequeiro. A

diferença na resposta vegetativa da cultura tem implicações não só na produtividade, como também em outros aspectos fitotécnicos como a incidência de acamamento (Tabela 18).

4.9 Dinâmica de perfilhos

Na análise da Figura 23, referente à dinâmica de perfilhos, pode-se notar o comportamento típico da cultura de emissão de brotação intensa e posterior abortamento de perfilhos (SIMÕES et al., 2005). As maiores lâminas de irrigação apresentaram maior número de perfilhos por metro linear na última avaliação do que os tratamentos sem irrigação ou com 50% da lâmina recomendada, sem sobreposição das barras de erros dos tratamentos T100 e T200 sobre T0 e T50. É relevante notar que o número de perfilhos nos tratamentos T0 e T50 caíram mais que T100, T150 e T200 entre as avaliações de 200 e 300 dias. Assim, parece sugestivo que os tratamentos que receberam lâmina de EETE igual ou maior que a ETc estabilizaram o número de perfilhos antes e em número superior, o que contribui para o aumento da produtividade. Estes dados concordam com os observados por Prasad; Verma; Prasad (1990) que verificaram aumento no número de perfilhos da cana-de-açúcar em função da irrigação até uma dose de 80 % da evapotranspiração.

Prado e Pancelli (2008) também observaram maior altura e número de perfilhos provocados pela adubação nitrogenada, associado à produtividade maior. No experimento de Lingle; Weidenfeld e Irvine (2000), o uso de água com salinidade acima de $1,25 \text{ dS m}^{-1}$ reduziu o peso total de colmos e o número de colmos na cana-de-açúcar. Contudo, o número de colmos foi menos afetado pela salinidade que a biomassa aérea e o peso total de colmos.

Figura 23 - Dinâmica de perfilhos na primeira e segunda soca da cana-de-açúcar irrigada com EETE. Barras de erro representam o erro padrão da média (n=36)

4.10 Tombamento da cana

A influência da irrigação com EETE no tombamento da cana foi altamente significativa pelo teste de Wald ($P < 0,0001$). O modelo estimado foi:

$$p = 1 - (1 / (1 + e^{(-2,4451 + 0,0165 \times x)})) \quad (7)$$

Onde 'p' corresponde à probabilidade de ocorrência de tombamento nos dois metros lineares adjacentes a um dos pontos demarcados dentro da área e 'x' corresponde à irrigação com EETE. Valendo-se da equação acima, foi plotada a probabilidade de ocorrência de tombamento na cana-de-açúcar irrigada com EETE em cada lâmina de irrigação (Figura 24). Por esses resultados pode-se inferir que a irrigação da variedade SP 90-3414 com EETE deve resultar em grande índice de tombamento nas lâminas iguais ou superiores à ETc.

Carlin et al. (2008), verificaram o aumento da produtividade da cana com o tombamento dos colmos, fato que, ressalvados os problemas para realização da colheita, pode ser observado como aspecto favorável à irrigação com EETE mesmo na indisponibilidade de variedades adaptadas a esta prática. No caso do experimento de Carlin et al. (2008), no entanto, o ganho de produtividade esteve associado à emissão de brotões, o que não é o caso neste experimento, como observado na Figura 23. O

tombamento da cultura, neste caso, deve ser considerado um problema potencial à capacidade de mecanização da colheita na área e precisa ser minimizado pelo manejo varietal, da adubação ou da irrigação.

Figura 24 - Probabilidade calculada (linha) e frequência de tombamento observada (pontos) na cana-de-açúcar irrigada com EETE

4.11 Produtividade da cultura

Os resultados de produtividade da cana na condição estudada (Figura 25) apresentam significativa variabilidade (LEAL et al., 2009; WIEDENFELD; ENCISO, 2008). Apesar disso, foi possível ajustar à produtividade da primeira e segunda soca modelos estatisticamente significativos ($P < 0,01$) da intensidade da irrigação com EETE, valendo-se da produtividade obtida nas parcelas da cana-planta como co-variável.

Os modelos ajustados à produtividade em função da irrigação com EETE foram:

$$1^{\text{a}} \text{ soca: } y = 0,9056 x_2 + 54,75 (1 - e^{-0,0184 (x_1 + 53,76)}) \quad \text{pseudo-}r^2=0,74 \quad (8)$$

$$2^{\text{a}} \text{ soca: } y = 0,3279 x_2 + 132,6 (1 - e^{-0,0056 (x_1 + 141,4)}) \quad \text{pseudo-}r^2=0,74 \quad (9)$$

nos quais 'y' é a produtividade obtida na safra irrigada, 'x₂' é a produtividade da cana-planta não irrigada e 'x₁' é a lâmina de irrigação com EETE aplicada. Igualando-se x₁ a zero, obtém-se os ajustes lineares à co-variável:

$$1^{\text{a}} \text{ soca: } y = 0,9056 x_2 + 34,37 \quad (10)$$

$$2^{\text{a}} \text{ soca: } y = 0,3279 x_2 + 72,40 \quad (11)$$

O componente não linear do ajuste aos tratamentos e o resíduo do ajuste das observações ao componente linear da co-variável (eq. 10 e 11) foram plotados no gráfico da Figura 26.

Figura 25 - Produtividades da cana-de-açúcar nos ciclos da cana-planta (antes da aplicação dos tratamentos) e na 1ª e 2ª soca (depois da aplicação dos tratamentos), por tratamento e sua ordem de distribuição no campo. As barras de erro indicam o erro padrão da média (n=4)

A correlação entre a produtividade das socas e a co-variável produtividade da cana planta diminuiu da 1ª para a 2ª soca, enquanto a correlação com a irrigação aumentou (Tabela 17). Da mesma forma, nos modelos estatísticos ajustados, o componente linear da covariável diminuiu, enquanto o modelo não linear de Mitscherlich ajustado à irrigação com EETE aumenta da 1ª para a 2ª soca, com os máximos do componente irrigação sendo 54,75 Mg ha⁻¹ e 132,6 Mg ha⁻¹ na 1ª e 2ª socas, respectivamente.

Como as curvas ajustadas têm ponto de máxima no infinito, estimou-se a lâmina de irrigação necessária para a obtenção de 90% da produtividade máxima (MALAVOLTA, 2006), que seria de 71,37% da ETc na primeira soca estudada, e

269,77% da ETc na 2ª soca, resultando em 143,93 e 153,61 Mg ha⁻¹ de cana, respectivamente.

Tabela 17 - Coeficiente de Correlação de Pearson das produtividades (Mg ha⁻¹) dos três anos avaliados entre si e com a irrigação com EETE (%ETc)

	Produtividade 2007	Produtividade 2008	Produtividade 2009
Produtividade 2008	0,81877**		
Produtividade 2009	0,53848**	0,68710**	
Irrigação	0,23068 ^{ns}	0,39375*	0,72942**

* - significativo a p<0,05, ** - significativo a p<0,01

Sendo a produtividade média da cana-planta de 104,52±9,00 Mg ha⁻¹, estima-se, pela estatística aplicada, as produtividades médias para o tratamento não irrigado como sendo de 129,05 Mg ha⁻¹ na 1ª soca irrigada e de 106,80 Mg ha⁻¹ na 2ª soca. Segundo os resultados de Beauclair (1994), em cada ressoça, a produtividade sofre um decréscimo médio de 26 Mg ha⁻¹ em relação ao corte anterior. Os resultados deste experimento são compatíveis com essa afirmação, ressaltando-se que o ciclo da cana-planta foi de doze meses e não de dezoito. A forma das curvas descritas pelos modelos ajustados à altura das plantas (Figura 22) e à produtividade (Figura 26) revela a estreita relação entre estas duas variáveis, e a possibilidade de utilização das medidas biométricas na predição da produtividade de um canavial (Tabela 18).

Tabela 18 - Coeficiente de Correlação de Pearson das produtividades (Mg ha⁻¹) dos três anos avaliados com as medidas biométricas e com a irrigação com EETE (%ETc)

	Produtividade 2007	Produtividade 2008	Produtividade 2009	Irrigação	Tombamento 2009
Tombamento 2009	0,32011*	0,39035*	0,44735**	0,61028**	
Altura 2008	0,61807**	0,61453**	0,71328**	0,60369**	0,50905**
Altura 2009	0,47101**	0,58613**	0,80308**	0,84808**	0,71072**

* - significativo a p<0,05, ** - significativo a p<0,01

A lâmina de irrigação correspondente à evapotranspiração da cultura (T100) proporcionou produtividades de 146,17 e 132,56 Mg ha⁻¹, enquanto a maior irrigação testada (T200) resultou em 148,89 e 147,27 Mg ha⁻¹ na 1ª e na 2ª soca, respectivamente (Figura 26). Os ganhos de produtividade proporcionados pela reposição da evapotranspiração com EETE são, portanto, de 17,13 e 25,76 Mg ha⁻¹. A aplicação do dobro do EETE resultou no ganho estimado de 19,84 Mg ha⁻¹ na primeira soca e 40,47 Mg ha⁻¹ na segunda.

O comportamento aproximadamente linear da produtividade em função da irrigação na 2ª soca pode ser observado no parâmetro 'b' do modelo de Mitscherlich (eq. 4) muito baixo, resultando na lâmina de 259,77% da ETc para a obtenção de 90% da produtividade máxima teórica (SCHABENBERGER; PIERCE, 2002). Por esses resultados os coeficientes de cultura de Doorembos e Pruitt (1977) para a irrigação com EETE implicariam em produção da cultura 2,6 vezes menor que seu potencial. Não deveriam ser esperadas, no entanto, respostas a irrigações maiores que a necessidade hídrica da cultura (LEAL et al., 2009; SINGH; MOHAN, 1994).

O aporte de N com o EETE na maior lâmina de irrigação deste experimento (320 kg ha^{-1}) é muito superior à adubação nitrogenada recomendada oficialmente para a cultura (120 kg ha^{-1}) e também não seria esperada resposta a esse N excessivo (CANTARELLA; TRIVELIN; VITTI, 2007). Mas há que se considerar que a recomendação de N para a cana-de-açúcar no estado de São Paulo é baseada na condição de sequeiro.

Com o emprego da irrigação, a resposta da cultura ao N torna-se muito maior (WIEDENFELD, 1995; SINGH; MOHAN, 1994), e intensifica-se com o passar dos ciclos e o esgotamento da reserva de N do solo (WIEDENFELD; ENCISO, 2009). Tendo sido observadas respostas da cana irrigada até em doses superiores a 200 kg ha^{-1} de N no Brasil (SILVA et al., 2009) e até 400 kg ha^{-1} em outros países (ISHIKAWA et al. 2009; SINGH; MOHAN, 1994), é provável que a cana irrigada com EETE esteja respondendo linearmente ao N e não à irrigação até o maior tratamento. Thorburn et al. (2003) não observaram resposta da cana irrigada a doses superiores a 80 kg ha^{-1} de N, mas em seu experimento o solo era capaz de fornecer mais de 200 kg ha^{-1} de N, situação diferente da observada neste experimento (Figura 6).

Leal et al. (2009) obtiveram produtividade bem superior à deste experimento, em um estudo semelhante. Porém, estes resultados foram obtidos no ciclo de cana-planta com 18 meses e com outra variedade na região de Lins-SP. No experimento destes autores, a irrigação foi aplicada de acordo com a medida do potencial matricial do solo avaliada por meio de tensiômetros. Este modelo de irrigação pode não ser o mais apropriado, visto que sob boa disponibilidade de água, a cana-de-açúcar parece ter consumo de hídrico bem superior à sua real necessidade (WIEDENFELD, 1995).

Figura 26 - Componente do modelo de produtividade da cana-de-açúcar, (a) primeira e (b) segunda soca, devido à irrigação com diferentes lâminas de EETE. As barras de erro representam o erro padrão da média (n=4)

De fato, no experimento de Leal et al. (2009), foram aplicados 2524 mm de irrigação, o que levou ao aporte de 742 kg ha⁻¹ de N no período de 15 meses irrigados. Sob esse aspecto, o cálculo da necessidade de irrigação a partir da evaporação do tanque Classe A parece ser mais sensato que o cálculo pelos tensiômetros. Neste experimento, a irrigação baseada na ETc levou ao aporte de até 163,48 kg ha⁻¹ de N (Tabela 9), quantidade bem mais próxima da fertilização recomendada para a cultura no estado de São Paulo, e 86,6 kg ha⁻¹ superior à exportação de N pelos colmos, na primeira soca, e 54,7 kg ha⁻¹ na segunda (Tabela 12).

Na situação climática de Piracicaba, ocorre excedente hídrico no solo durante 6 meses do ano (SENTELHAS et al. 1999), o que não exigiria lâmina excedente de irrigação para lavagem de sais, como em regiões semi-áridas que fazem uso de águas salinas para a irrigação. Estes resultados permitem considerar adequada a lâmina de 100% da ETc calculada com base no Kc de Doorenbos e Pruitt (1977), mas com a sugestão de que sejam testadas doses de fertilizantes maiores que a utilizada neste experimento.

4.12 Qualidade industrial

Foi estatisticamente significativa ($P < 0,05$) uma pequena redução do teor de sólidos solúveis totais no caldo da cana com a irrigação, apenas na 1ª soca. Este comportamento é esperado, e decorre do maior vigor das plantas irrigadas.

A diferença observada (Figura 27), no entanto, não pode ser considerada prejudicial frente ao ganho produtivo obtido e o Brix do caldo permaneceu, em média, igual ou acima de 18 °Bx, valor considerado satisfatório (MARQUES et al., 2001).

Figura 27 - Sólidos solúveis totais no caldo da cana-de-açúcar irrigado com EETE na 1ª soca

Os outros parâmetros tecnológicos não foram significativamente alterados pela irrigação, sendo considerados de distribuição normal pelo teste de Shapiro-Wilk. Assim, o açúcar recuperável total por tonelada de cana não se alterou significativamente, e pode ser considerado satisfatório o aumento da produtividade da cultura.

Tabela 19 - Atributos qualitativos da cana-de-açúcar nos três ciclos estudados (médias±desvio padrão)

Variável	Cana-planta	1ª soca	2ª soca
PBU (g kg ⁻¹)	278,4±16,32	263,66±10,32	268,88±7,88
Fibra	12,0±0,65	11,42±0,41	11,63±0,31
SST (° Brix)	20,0±0,62	18,24±0,69	18,8±0,46
pol (% do caldo)	18,4±0,67	16,09±0,81	17,09±0,54
pol (% da cana)	15,6±0,53	13,76±0,67	14,56±0,45
Pureza	92,2±1,4	88,21±1,43	90,89±1,03
ARC ¹	0,41±0,04	0,53±0,04	0,45±0,03
ATR ²	152,4±4,93	135,88±6,11	142,79±4,1
Produtividade	104,5±18,02	142,33±22,55	127,7±17,36

⁽¹⁾ARC: açúcares redutores da cana; ⁽²⁾ATR: açúcares totais recuperáveis;

Os atributos qualitativos apresentados na Tabela 19 foram utilizados para avaliação do estágio de maturação da cana-de-açúcar. Segundo Marques et al., 2001, valores inferiores a 18,0%; 15,3% e 85,0% para Brix, Pol da cana e pureza, respectivamente, e superior a 1,0% para ARC indicam que a cultura está imatura para colheita. Os resultados da Tabela 19 demonstram que a cultura não atendeu apenas ao

parâmetro mínimo de Pol da cana apresentado acima. Para a época de colheita no início de julho, a qualidade tecnológica da cana pode ser considerada satisfatória na cana-planta, mas com Pol da cana abaixo do desejável nas duas socas, sem efeito estatisticamente significativo da irrigação com EETE.

Choudhary et al. (2004) observaram que redução no açúcar da cana já no primeiro ano de irrigação com água salina ($1,43 \text{ dS m}^{-1}$), mas essa salinidade é maior que a observada no efluente utilizado neste experimento (Tabela 9).

Na 2ª soca, as variáveis tecnológicas da cana não foram significativamente alteradas pela irrigação com EETE, no entanto, pela diferença de produtividade entre os tratamentos, foi significativo o aumento no ATR por área (Figura 28).

No experimento de Lingle; Weidenfeld e Irvine (2000), os parâmetros de qualidade do caldo, como sólidos solúveis totais, Pol e pureza aparente só foram afetados pela qualidade da água de irrigação quando a salinidade superou $1,25 \text{ dS m}^{-1}$. Já a condutividade do caldo aumentou com o aumento da salinidade da água de irrigação. A água mais salina também diminuiu a quantidade de açúcares totais recuperáveis.

Figura 28 - Açúcar Total Recuperável da cana-de-açúcar irrigada com EETE em função da intensidade da irrigação na 2ª soca

5 CONCLUSÕES

Os estudos realizados permitiram concluir que o efluente de estação de tratamento de esgoto (EETE) pode fornecer, nas condições deste experimento, até 163 kg ha⁻¹ de N; 14 kg ha⁻¹ P; 145 kg ha⁻¹ de K; 80 kg ha⁻¹ de Ca; 28 kg ha⁻¹ de Mg; 207 kg ha⁻¹ de S; 0,45 kg ha⁻¹ de B; 0,07 kg ha⁻¹ de Cu; 0,25 kg ha⁻¹ de Fe e 0,18 kg ha⁻¹ de Mn, o que mostra, que além do ganho ambiental, o uso agrícola deste resíduo representa igualmente um ganho econômico.

O EETE é fonte potencial de nutrientes à cultura da cana-de-açúcar, principalmente de N, Ca e S, precisando de complementação mineral de P, K, Mg e micronutrientes. A folha +1 foi mais sensível às alterações de disponibilidade de nutrientes provocadas pelo EETE em ambos os anos estudados, sendo que houve melhorias do estado nutricional para S na primeira e N, Mg e S na segunda soca, devidas à irrigação com EETE, pela interpretação da análise da folha +1.

A presença de elementos no efluente que podem provocar degradação nas propriedades físicas do solo, tal como o sódio; contaminação de águas subterrâneas ou superficiais, tal como nitrogênio e fósforo; ou ainda por serem tóxicos, como cromo e cobre, exige monitoramento constante da área agrícola que recebe este resíduo. Neste trabalho de curto prazo, estes elementos não representaram problemas.

A irrigação com EETE proporcionou aumento do desempenho vegetativo e um ganho de produtividade na cana-de-açúcar estimada em até 19,84 Mg ha⁻¹ na primeira soca e 40,47 Mg ha⁻¹ na segunda. A qualidade industrial da cana-de-açúcar não foi alterada significativamente pela irrigação.

Este trabalho mostrou que a irrigação com EETE é potencialmente exequível e seria uma solução para parte dos problemas de demanda agrícola de água e de poluição dos corpos d'água naturais. Infelizmente ainda não existe legislação que regulamente esta prática no Brasil.

REFERÊNCIAS

- AGUIAR, F.L. Cana-de-açúcar: de gota em gota. In: FNP CONSULTORIA & COMÉRCIO: Agrianual, 2006: **Anuário da Agricultura Brasileira**, São Paulo, 2006. 227-248p.
- AHMAD A.; INAM A.; AHMAD I.; HAYAT S.;AZAM Z.M.,;SAMIULLAH. Response of sugarcane to treated wastewater of oil refinery. **Journal of Environmental Biology**, v. 24, p. 141-146, 2003.
- ALVES JR., J., SILVA, I.J.O.; SANTOS, R.A.;FOLEGATTI, M.V. Potencial de crescimento da agricultura irrigada com o reuso de água. **ITEM**, Brasília n. 61/62, p. 78-80, 2004.
- ANDERSON, D.L.; BOWEN, J.E. **Nutrição de cana-de-açúcar**. Piracicaba: POTAFOS, 1992. 40p.
- AQUINO, A. de. **Funcionamento atual de solos submetidos ao manejo afeto à cultura da cana-de-açúcar**: caracterização para fins de irrigação com efluente de esgoto tratado. Área experimental da Usina Cosan, Piracicaba/SP. 2008. 190 p. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Rio Claro, 2008.
- ASANO, T.;PETTYGROVE, G.S. Using reclaimed municipal wastewater for irrigation. **California Agriculture**, Berkeley, v.41, n. 3/4, p.15-18, 1987.
- AYERS, R.S.; WESTCOT, D.S. **Water quality for agriculture**. Rome: FAO, 1985. 174p. (Irrigation and Drainage Paper 29).
- BASTOS, R.K.X. **Utilização de esgotos tratados em fertirrigação, hidroponia e piscicultura**. Rio de Janeiro: ABES - FINEP, 2003. 267 p.
- BATAGLIA, O.C.; DECHEN, A.R.; SANTOS, W. R. Princípios da diagnose foliar. In: ALVAREZ, V.H.; FONTES, L.E.; FONTES, M.P.F. (Ed.). **O solo nos grandes domínios morfológicos do Brasil e o desenvolvimento sustentável**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo/Universidade Federal de Viçosa, 1996. p. 646-659.
- BEAUCLAIR, E.G.F. de. **Produtividade da cana-de-açúcar em função de alguns macronutrientes presentes no caldo e no solo**. 1994. 98 p. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1994.
- BERGMANN, W. **Nutritional disorders of plants**: development, visual and analytical diagnosis. New York: G. Fisher, 1992. 741 p.
- BERNARDO, S. Manejo da irrigação na cana-de-açúcar. **ITEM**: Irrigação e Tecnologia Moderna, Brasília, v.71/72, p.56-62, 2006.

BITTENCOURT, V.C.; PAIXÃO, A.C.S.; ALMEIDA, M.J.; BEAUCLAIR, E.G.F. Diagnose nutricional da Cana-de-Açúcar através da análise do caldo. **STAB – Açúcar, Álcool e subprodutos**, Piracicaba, v. 11, n 2, p 12-17, nov/dez, 1992.

BOHN, H.L.; MCNEAL, B.L.; O'CONNOR G.A. **Soil chemistry**. 3rd ed. New York: John Wiley, 2001. 303 p.

BOLAN, N.S.; HEDLEY, M.J.; WHITE, R.E. Processes of soil acidification during nitrogen cycling with emphasis on legume based pastures. **Plant and Soil**, Dordrecht, v.134, p.53-63, 1991.

BOND, W.J. Effluent irrigation – an environmental challenge for soil science. **Australian Journal of Soil Research**, Melbourne, v.36, n. 4, p.543-555, 1998.

BREMMER, J.M. Sources of nitrous oxide in soils. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, Dordrecht, v. 49, n. 1/3, p. 7-16, 1997.

CALCINO, D.V. **Australian sugarcane nutritional manual**. Indooroopilly: SRDC/BSES, 1994. 60 p.

CANTARELLA, H.; TRIVELIN, P.C.O.; VITTI, A.C. Nitrogênio e enxofre na cultura da cana-de-açúcar. In: SIMPÓSIO SOBRE NITROGÊNIO E ENXOFRE NA AGRICULTURA BRASILEIRA, 2006. Piracicaba. **Anais...** Piracicaba: IPNI, 2007. p. 355-412.

CARLIN, S.D.; SILVA, M. de A.; ROSSETTO, R. Parâmetros biométricos e produtividade da cana-de-açúcar após tombamento dos colmos. **Bragantia**, Campinas, v. 67, n. 4, p. 845-853, 2008.

CHOUDHARY, O.P.; JOSAN, A.S.; BAJWA, M.S.; KAPUR, M.L. Effect of sustained sodic and saline-sodic irrigation and application of gypsum and farmyard manure on yield and quality of sugarcane under semi-arid conditions. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 87, n. 2/3, p. 103-116, 2004.

COALE, F.J.; SANCHEZ, C.A.; IZUNO, F.T.; BPTTCHER, A.B. Nutrient accumulation and removal by sugarcane grown on everglades histossols. **Agronomy Journal**, Madison, v. 85, p. 310-315, 1993.

COLETI, J.T.; CASAGRANDE, J.C.; STUPIELLO, J.J.; RIBEIRO, L.D. OLIVEIRA, G.R. de. Remoção de macronutrientes pela cana-planta e cana-soca, em Argissolo, variedades RB 835486 e SP813259. **STAB – Açúcar, Álcool e subprodutos**, Piracicaba, v.24, n.5, p.32-36, 2006.

CONSECANA-SP – Conselho dos produtores de cana-de-açúcar, açúcar e álcool do Estado de São Paulo. **Manual de instruções**. 5 ed. Piracicaba, 2006. 112p.

CORAUCCI, B.F.; CHERNICHARO, C.A.L.; NETO, C.O.A.; NOUR, E.A.; ANDREOLI, F.N.; SOUZA, H.N.; MONTEGGIA, L.O.; VON SPERLING, M.; LUCAS, M.F.; AISSE, M.M.; FIGUEIREDO, R.F. de F.; STEFANUTTI, R. Tecnologia do tratamento de águas residuárias no solo: infiltração rápida, irrigação e escoamento superficial. In: José Roberto Campos (Coord.). **Tratamento de esgotos sanitários por processo anaeróbio e disposição controlada no solo**. Rio de Janeiro: ABES, 1999. p. 357- 408.

CORDELL, D.; DRANGERT, J.O. WHITE, S. The story of phosphorus: Global food security and food for thought. **Global Environmental Change**, v.19 p.292–305, 2009.

CURI, N. (Coord.). **Vocabulário de ciência do solo**. Campinas: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1993. 90p.

DA FONSECA, A.F.; MELFI, A.J.; MONTES, C.R. Maize growth and changes in soil fertility after irrigation with treated sewage effluent. Part I plant dry matter yield and soil nitrogen and phosphorus availability. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v. 36, n. 13, p. 1965-1981, 2005.

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

DA FONSECA, A.F.; HERPIN, U.; DIAS, C.T. dos S.; MELFI, A.J. Nitrogen forms, pH and total carbon in a soil incubated with treated sewage effluent. **Brazilian Archives of Biology and Technology**, Curitiba, v. 50, n. 5, p. 743-752, 2007 b.

DA FONSECA, A.F.; MELFI, A.J.; MONTEIRO, F.A.; MONTES, C.R.; ALMEIDA, V.V. de; HERPIN, U. Treated sewage effluent as a source of water and nitrogen for Tifton 85 bermudagrass. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 87, n. 3, p. 328-336, 2007. c

DA FONSECA, A.F. **Viabilidade agrônômico-ambiental da disposição de efluente de esgoto tratado em um sistema solo-pastagem**. 2005. 174p. (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2005.

DOORENBOS, J.; PRUITT, W.O. **Guidelines for predicting crop water requirements**. Rome: FAO, 1977. 179p. (Irrigation and Drainage Paper, 24).

EATON, A.D.; CLESCERI, L.S.; GREENBERG, A.E. (Ed.) **Standard methods for the examination of water and wastewater**. 19th ed. Baltimore: United Book Press, 1995. 1325 p.

EMBRAPA. **Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes**. Brasília: Comunicação para Transferência de Tecnologia, 1999. 370 p.

EPSTEIN, E.; BLOOM, A.J. **Mineral nutrition of plants: Principles and perspectives**. 2nd ed. Sunderland: Sinauer, 2005. 225 p.

FALKINER, R.A.; POLGLASE, P.J. Transport of phosphorus through soil in an effluent-irrigated tree plantation. **Australian Journal of Soil Research**, Melbourne, v. 35, n. 2, p. 385-397, 1997.

FAO. **FAO's Information System on Water and Agriculture**. 2010. Disponível em: <<http://www.fao.org/nr/water/aquastat/countries/brazil/index.stm>>. Acesso em: 21 abril 2010.

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

FERRIMAN A. British Medical Journal readers choose the 'sanitary revolution' as greatest medical advance since 1840. **British Medical Journal**, London, v. 334, n. 7585, p. 111, 2007.

FIRME, L.P. **Efeito da irrigação com efluente de esgoto tratado no sistema solo-planta em Latossolo cultivado com cana-de-açúcar**. 2007. 109p. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2007.

FNP CONSULTORIA & COMÉRCIO. Cana-de-açúcar. In _____. **Agrianual 2009: anuário da agricultura brasileira**. São Paulo, 2009. p.235-25L8.

FOX, R.L.; HUE, N.V.; PARRA, A.J. A turbidimetric method for determining phosphate-extractable sulfates in tropical soils. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v.18, n. 4, p.343-357, 1987.

GALLO, R.; ALVAREZ, R.; ABRAMIDES, E. Amostragem em cana de açúcar para fins de análise foliar. **Bragantia**, Campinas, v. 21, n. único, p. 899-921, 1962.

GLOAGUEN, T.V.; FORTI, M.C.; LUCAS, Y; MONTES, C.R.; GONCALVES, R.A.B.; HERPIN, U.; MELFI, A.J. Soil solution chemistry of a brazilian oxisol irrigated with treated sewage effluent. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 88, p. 119-131, 2007.

GOMES, T.M.; MELFI, A.J.; MONTES, C.R.; SILVA, E.; SUNDEFELD JUNIOR, G.C.; DEON, M.D.; PIVELI, R.P. Aporte de nutrientes e estado nutricional da cana-de-açúcar irrigada com efluente de estação de tratamento de esgoto com e sem desinfecção. **Revista DAE**, São Paulo, v. 180, p. 17-23, 2009.

GOMES, J.F.F. **Produção de colmos e exportação de macronutrientes primários por cultivares de cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*)**. 2003. 65 p. (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2003.

HERPIN, U.; GLOAGUEM, T.; DA FONSECA, A.F.; MONTES, C.R.; MENDONÇA, F.C.; PIVELI, R.P.; BRULMANN, G.; FORTI, M.C.; MELFI, A.J. Chemical effects on the soil-plant system in a secondary treated wastewater irrigated coffee plantation - A pilot field study in Brazil. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 1, p. 1-20, 2007.

IBGE. **Pesquisa Nacional de Saneamento Básico**: 2000. Brasília: IBGE, 2002.

ISHIKAWA, S.; ANDO, S.; SAKAIGAICHI, T.; TERAJIMA, Y.; MATSUOKA, M. Effects of high nitrogen application on the dry matter yield, nitrogen content and nitrate-N concentration of sugarcane. **Soil Science and Plant Nutrition**, Tóquio, v. 55, n. 4, p. 485-495, 2009.

JARVIE H.P.; NEAL C.; WITHERS P.J.A. Sewage-effluent phosphorus: A greater risk to river eutrophication than agricultural phosphorus. **Science of the total environment**, Amsterdam, v.360, n. 1/3, p. 246-253, 2006.

KARLEN, D.L.; VITOSH, M.L.; KUNZE, R.J. Irrigation of Corn with Simulated Municipal Sewage Effluent. **Journal of environmental quality**, Madison, v. 5, p. 269-273, 1976.

KHALIL, K.; MARY, B.; RENAULT, P. Nitrous oxide production by nitrification and denitrification in soil aggregates as affected by O₂ concentration. **Soil Biology and Biochemistry**, Oxford, v. 36, n. 4, p. 687-699, 2004.

LEAL, R.M.P. **Efeito da irrigação com efluente de esgoto tratado em propriedades químicas de um Latossolo cultivado com cana-de-açúcar**. 2007. 109p. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2007.

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

LIEBIG, J. von. **Die organische Chemie in ihrer Anwendung auf Agricultur und Physiologie**. Braunschweig: Friedrich Vieweg und Sohn Publ. Co, 1840. 256 p. Disponível em: <<http://www.gutenberg.org/files/4524/4524.txt>>. Acesso em: 18 maio 2009.

LINGLE, S.E.; WEIDENFELD, R.P.; IRVINE, J.E. Sugarcane response to saline irrigation water. **Journal of Plant Nutrition**, New York, v. 23, n. 4, p. 469-486, 2000.

MALAVOLTA, E. **Manual de nutrição mineral de plantas**. Piracicaba: Ceres, 2006. 638p.

- MALAVOLTA, E. **Nutrição mineral e adubação da cana-de-açúcar**. São Paulo: Ultrafertil, 1982. 80p.
- MALAVOLTA, E.; VITTI, G.C.; OLIVEIRA, S.A. **Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações**. 2.ed. Piracicaba: Potafos, 1997. 319p.
- MANCINO, C.F.; PEPPER, I.L. Irrigation of turfgrass with secondary sewage effluent: soil quality. **Agronomy Journal**, Madison, v.84, n. 4, p.650-654, 1992.
- MARQUES, M.O.; MARQUES, T.A.; TASSO JÚNIOR, L.C. **Tecnologia do açúcar: produção e industrialização da cana-de-açúcar**. Jaboticabal: FUNEP, 2001. 166 p.
- MEURER, E.J. **Fundamentos de química do solo**. 2. ed. Porto Alegre: Genesis, 2004. 290p.
- MOREIRA, F.M.S.; SIQUEIRA, J.O. **Microbiologia e bioquímica do solo**. 2. ed. Lavras: Editora UFLA, 2006. 729 p.
- MOURA, M.V.P. da S.; FARIAS, C.H. de A.; AZEVEDO, C.A.V. de; DANTAS NETO, J.; AZEVEDO, H.M. de; PORDEUS, R.V. Doses de adubação nitrogenada e potássica em cobertura na cultura da cana-de-açúcar, primeira soca, com e sem irrigação. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 29, n. 4, p. 753-760, 2005.
- MUNSON, R.D.; NELSON, W.L. Principles and practices in plant analysis. In: WALSH, L. M.; BEATON, J. D. (Ed.). **Soil testing and plant analysis**. Madison: Soil Science Society of America, 1973. chap. 15, p. 223-248.
- NELSON, D.W.; SOMMERS, L.E. Total carbon, organic carbon, and organic matter. In: SPARKS, D.L. (Ed.). **Methods of soil analysis: chemical methods**. pt. 3. Madison: Soil Science Society of America/American Society of Agronomy, 1996. p.961-1010.
- NOGUEIRA, S.F. **Efeitos da irrigação com esgoto tratado e fertilização nitrogenada na ciclagem de carbono e nitrogênio e no metabolismo microbiano de um solo cultivado com capim-Bermuda Tifton 85**. 2008. 138 p. Tese (Doutorado – Programa de Pós-Graduação em Ciências. Área de Concentração: Química na Agricultura e no Ambiente) – Centro de Energia Nuclear na Agricultura da Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2008.
- NOGUEIRA, S.F.; PAULA, A.M. de; PEREIRA, FARIAS, B.F.F.; FONSECA, A.F. da; MONTES, C. R.; CARDOSO, E.J.B.N.; VICTÓRIA, R.L. Efeito do tempo de irrigação com esgoto tratado no metabolismo microbiano de um solo cultivado com capim-Bermuda Tifton 85. In: SIMPÓSIO DE RECURSOS HÍDRICOS DO NORDESTE, 9., 2008, Salvador. **Anais...** Salvador: ABRH, 2008. 1 CD-ROM
- OLIVEIRA, E.C.A. de. **Dinâmica de nutrientes na cana-de-açúcar em sistema irrigado de produção**. 2008. 73 p. Dissertação (Mestrado em Agronomia – Ciência do Solo) – Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife, 2008.

ORLANDO FILHO, J. **Nutrição e adubação da cana-de-açúcar no Brasil**. Piracicaba, 1983. 369p. (coleção Planalsucar).

ORLANDO FILHO, J.; ZAMBELLO JR., E. Influência da adubação N-P-K nas quantidades tecnológicas da cana-planta, variedade CB41-76. **Brasil Açucareiro**, Rio de Janeiro, v.96, n.3, p.37-44, 1980.

PEREIRA, B.F.F. **Alterações químicas no sistema solo-planta irrigado com efluente de esgoto tratado no cultivo dos citros**. 2009. 163 p. Tese (Doutorado em Ciências. Área de Concentração: Solos e Nutrição de Plantas) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2009.

PESCOD, M.B. **Wastewater treatment and use in agriculture**. Rome: Food and Agriculture Organization, 1992. 125p. (Irrigation and Drainage Paper, 47).

PHILLIPS, I.R.; SHEEHAN, K.J. Importance of surface charge characteristics when selecting soils for wastewater reuse. **Australian Journal of Soil Research**, Melbourne, v. 43, n. 8, p. 915-927, 2005.

PIMENTEL-GOMES, F.; GARCIA, C.H. **Estatística aplicada a experimentos agrônômicos e florestais**: exposição com exemplos e orientações para uso de aplicativos. Piracicaba: Undação de Estudos Agrários Luiz de Queiroz, 2002. 309 p. (Biblioteca de Ciências Agrárias Luiz de Queiroz, 11).

PIVELI, R.P. ; MELFI, A.J. ; MONTES, C.R. ; GOMES, T.M. Uma Reflexão Sobre a Qualidade e Uso de Esgoto Tratado por Lagoas de Estabilização na Agricultura: Caso de Lins/SP. **Revista DAE**, São Paulo, v. 177, p. 63-70, 2008.

PRADO, R. de M.; PANCELLI, M.A. Nutrição nitrogenada em soqueiras e a qualidade tecnológica da cana-de-açúcar. **STAB – Açúcar, Alcool e subprodutos**, Piracicaba, v. 25, p. 6-8, 2006.

PRADO, R. de M.; PANCELLI, M.A. Resposta de soqueiras de cana-de-açúcar à aplicação de nitrogênio em sistema de colheita sem queima. **Bragantia**, Campinas, v. 67, n. 4, p. 951-959, 2008.

PRASAD, U.K.; VERMA, B.K.; PRASAD, T.N. Effect of irrigation and nitrogen on sugarcane (*Saccharum officinarum*), and sugar yield, water-use efficiency, soil-moisture depletion and nitrogen uptake in calcareous soil. **Indian journal of Agricultural Sciences**, New Delhi, v. 60, n. 6, p. 396-401, 1990.

RAIJ, B. Van; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J.A.; FURLANI, A.M.C. **Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo**. 2.ed. Campinas: Instituto Agrônômico, 1996. 285p. (Boletim técnico 100).

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

ROBERTS, T.L. World Reserves and Production of Potash. In: YAMADA, T.; ROBERTS T. L. (Ed.). **Potássio na Agricultura Brasileira**. Piracicaba: POTAFOS, 2005. 841p.

SAMUELS, G. **Foliar diagnosis for sugarcane**. Chicago: Adams Press, 1969. 362 p.

SANTANA, M.J. de; CARVALHO, J. de A.; SOUZA, K.J. de; SOUSA, A.M.G. de; VASCONCELOS, C.L.; ANDRADE, L.A. de B. Efeitos da salinidade da água de irrigação na brotação e desenvolvimento inicial da cana-de-açúcar (*Saccharum spp*) e em solos com diferentes níveis texturais. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 31, n. 5, p. 1470-1476, 2007.

SANTOS, E.R.F. ; PEREIRA, B.F.F. ; SCHAAF, M. ; HERPIN, U. ; NOGUEIRA, S.F.; DEON, M.D. ; MELFI, A.J. ; MONTES, C.R. Desenvolvimento da laranjeira 'Valencia' irrigada com esgoto doméstico tratado. In: WORKSHOP USO E REUSO DE ÁGUAS RESIDUÁRIAS, 3., 2009, São Paulo. **Anais...** São Paulo: IEA; NUPEGEL, 2009. 1 CD-ROM

SAS INSTITUTE INC. **SAS/STAT – procedure guide for personal computers, version 6.12**. Cary, NC: SAS Institute, 1999. 1028p.

SCHABENBERGER, O.; PIERCE, F.J. **Contemporary statistical models for the plant and soil sciences**. Boca Raton: CRC Press, 2002. 738 p.

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

SENTELHAS, P.C.; PEREIRA, A.R.; MARIN, F.R.; ANGELOCCI, L.R.; ALFONSI, R.R.; CARAMORI, P.H.; SWART, S. **BHBRASIL - Balanços hídricos climatológicos de 500 localidades brasileiras**. Piracicaba: ESALQ/USP, 1999. 1 CD-ROM

SCHROEDER, B.L.; WOOD, R.A.; MEYER, J.H. Foliar analysis in the South African sugar industry for diagnostic and nutrient trend purposes. In Barrow N.J. (Ed.). **Plant nutrition - from genetic engineering to field practice**. Dordrecht: Kluwer, 1993. p. 299-302.

SILVA, A.B. da ; DANTAS NETO, J. ; FARIAS, C.H. de A.; AZEVEDO, C.A.V. de. Rendimento e qualidade da cana-de-açúcar irrigada sob adubações de nitrogênio e potássio em cobertura. **Caatinga**, Mossoró, v. 22, n. 3, p. 236-241, 2009

SIMÕES, M.S.; ROCHA, J.V.; LAMPARELLI, R.A.C. Indicadores de crescimento e produtividade da cana-de-açúcar. **Scientia agricola**, Piracicaba, v.62, n.1, p.23-30, 2005.

SINGH, P.N.; MOHAN, S.C. water-use and yield response of sugarcane under different irrigation schedules and nitrogen levels in a subtropical region. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 26, n. 4, p. 253-264, 1994.

SIT, V.; POULIN-COSTELLO, M. **Catalog of curves for curve fitting**. Victoria: Ministry of forests, forest science research branch, biometrics information, 1994. 110p. (Biometrics Information Handbook 4)

SMITH, C.J.; BOND, W.J. Losses of nitrogen from an effluent-irrigated plantation. **Australian Journal of Soil Research**, Melbourne, v. 37, n. 2, p. 371-389, 1999.

SMITH, F.W.; LONERAGAN, J.F. Interpretation of plant analysis: concepts and principles. In: REUTER, D. J.; ROBINSON, J. B. (Ed.). **Plant analysis: an interpretation manual**. Collingwood: CSIRO, 1997. chap 1, p. 1-33.

SNYDER, C.S.; BRUULSEMA, T.W.; JENSEN, T.L.; FIXAN, P.E. Review of greenhouse gas emissions from cropping production systems and fertilizer management effects. **Agriculture Ecosystems and Environment**, Amsterdam, v. 133, n. 3/4, p. 247-266, 2009.

SUGIMURA, Y; SUZUKI Y. A high-temperature catalytic oxidation method for the determination of nonvolatile dissolved organic carbon in seawater by direct injection of a liquid sample. **Marine Chemistry**, Amsterdam, v. 24, n. 2, p. 105-131, 1998.

TASSO JÚNIOR, L.C. **Caracterização agrotecnológica de cultivares de cana-de-açúcar (*Sccharum spp.*) na região centro-norte do Estado de São Paulo**. 2007. 167 p. Tese (Doutorado em Agronomia. Área de Concentração: Produção Vegetal) - Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Jaboticabal, 2007.

TANJI, K.K. **Agricultural salinity assessment and management**. New York: ASCE, 1990. 610p. (ASCE Manuals and Reports of Engineering Practices, 71)

THOMAS J.R.; SALINAS F.G.; OERTHER, G.F. Use of saline water for supplemental irrigation of sugarcane. **Agronomy Journal**, Madison, v. 73, n. 6 p. 1011-1017, 1981.

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

TILLMAN, R.W.; SURAPANENI, A. Some soil-related issues in the disposal of effluent on land. **Australian Journal of Experimental Agriculture**, Melbourne, v.42, n. 3, p.225-235, 2002.

TRIVELIN, P.C.O. **Utilização do nitrogênio pela cana-de-açúcar: três casos estudados com uso do traçador ¹⁵N**. 2000. 143 p. Tese (Livre Docência) – Centro de Energia Nuclear na Agricultura, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2000.

TOZE, S. Reuse of effluent water - benefits and risks. **Agricultural water management**, Amsterdam, v. 80, n. 1/3, p. 147-159, 2006.

UCLA: Academic Technology Services, Statistical Consulting Group. **Statistical analyses using SAS**. Disponível em:
< <http://www.ats.ucla.edu/stat/sas/whatstat/whatstat.htm>> acesso em: 25 out 2008.

VALENTE, J.P.S.; PADILHA, P.M.; SILVA, A.M.M. da. Contribution of Botucatu-SP with nutrients (phosphorus and nitrogen) to the eutrophication of the Barra Bonita dam. **Ecletica Quimica**, Marília, v.22, p. 31-48, 1997.

VELOSO, M.E.C.; DUARTE, S.N.; SILVA, I.J.O. Potencial de uso agrícola de águas residuárias na agricultura como suprimento hídrico e nutricional. **Engenharia Rural**, Piracicaba, v. 15, único, p. 79-86, 2004.

VIATOR, R. P.; KOVAR, J.; HALLMARK, W. Gypsum and compost effects on sugarcane root, growth, yield, and plant nutrients. **Agronomy Journal**, Madison, v. 94, p. 1332-1336, 2002.

VON SPERLING, M. **Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgoto**. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental – Universidade Federal de Minas Gerais, 1995. 243p.

WIEDENFELD, R.P. Effects of irrigation and N fertilizer application on sugarcane yield and quality. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 43, n. 2/3, p. 101-108, 1995.

WIEDENFELD, R.P.; ENCISO, J. Sugarcane responses to irrigation and nitrogen in semiarid South Texas. **Agronomy Journal**, Madison, v. 100, n. 3, p. 665-671, 2008.

WHO. **Guidelines for the safe use of wastewater, excreta and greywater**. Genebra: World Health Organization, 2006. v. 2: Wastewater use in agriculture. 196 p.