

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

**Efeito da irrigação com efluente de esgoto tratado em propriedades químicas
de um Latossolo cultivado com cana-de-açúcar**

Rafael Marques Pereira Leal

Dissertação apresentada para obtenção do título de
Mestre em Agronomia. Área de concentração: Solos e
Nutrição de Plantas

Piracicaba

2007

Livros Grátis

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.

Rafael Marques Pereira Leal
Engenheiro Agrônomo

**Efeito da irrigação com efluente de esgoto tratado em propriedades químicas de um
Latossolo cultivado com cana-de-açúcar**

Orientador:
Prof. Dr. ADOLPHO JOSÉ MELFI

**Dissertação apresentada para obtenção do título de
Mestre em Agronomia. Área de concentração: Solos e
Nutrição de Plantas**

Piracicaba

2007

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

Leal, Rafael Marques Pereira

Efeito da irrigação com efluente de esgoto tratado em propriedades químicas de um Latossolo cultivado com cana-de-açúcar / Rafael Marques Pereira Leal. - - Piracicaba, 2007.

109 p. : il.

Dissertação (Mestrado) - - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, 2007.
Bibliografia.

1. Cana-de-açúcar 2. Efluentes 3. Esgotos sanitários – Uso agrícola 4. Irrigação localizada 5. Química do solo 6. Reuso da água 7. Solo salino-sódico I. Título

CDD 633.61

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

DEDICATÓRIA

A potência e magnificência do amor, da verdade, da beleza e da justiça que ao longo de qualquer época, local ou cultura subjazem-se a qualquer religiosidade que se julgue autêntica e a qualquer ética que se julgue responsável.

Os quais se personificam e se eternizam nestes entes que são de minha mais elevada estima e apreço:

Paula Fabiane Martins e família

Família Leal

Família Brzeska

Família Van Malsen

A vocês dedico e ofereço este e qualquer esforço pessoal.

AGRADECIMENTOS

Expresso aqui minha gratidão a todos aqueles cuja contribuição direta ou indireta foi de fundamental importância à realização do presente trabalho e indispensável ao contínuo aprendizado e amadurecimento pessoal e profissional.

Ao Prof Adolpho José Melfi, pela orientação, oportunidade e confiança.

A Profa Célia Regina Montes pela participação, auxílio e envolvimento nas diversas etapas deste trabalho.

A Profa Sonia Stefano pelo auxílio direto nas análises estatísticas.

Aos funcionários do Departamento de Solos e Nutrição de Plantas, em especial ao técnico Luiz Silva pelo auxílio nas análises laboratoriais de química de solo, à técnica do laboratório de Plantas, Lurdes Gonzáles, pela contribuição direta nas análises de solução de solo no ICP e ao James, pelo auxílio nos trabalhos de campo.

Ao Departamento de Solos e ao CNPq pela oportunidade e concessão de bolsa de estudo.

A todos os colegas, funcionários (Sérgio, Clotilde e Paulo) e demais membros do Núcleo de Pesquisa em Geoquímica e Geofísica da Litosfera (Nupegel).

Ao colega Adriel Fonseca pelas valiosas sugestões, críticas e colocações em diversos momentos.

Aos colegas e amigos de trabalho Uwe, Sandra, Bruno, Lise, Nathália, Kátia, Thomas e Roberta. Agradeço em especial a Lilian pelo auxílio direto em grande parte das análises laboratoriais.

Aos companheiros de sala com a qual convivi e compartilhei momentos de inestimável valor, Lílian, Débora e Rafael Silva. Obrigado pela paciência, pelo convívio, bom humor e as inúmeras discussões técnicas ou não.

A turma do vôlei (Baiano, Gicka, Luiz, Rafael,...) pelos muitos momentos de intenso convívio e saudável prática esportiva.

“Eleger nossas finalidades, implica integrá-las profundamente em nossos espíritos, jamais esquecer-las, jamais renunciar a elas, mesmo se perdermos a esperança de constatar sua realização. Sabemos que nossas finalidades não vão inevitavelmente triunfar, e que a marcha da história não é moral. Devemos visualizar seu insucesso possível e até mesmo provável. Justamente porque a incerteza sobre o real é fundamental, é que somos conduzidos a lutar por nossas finalidades. A ecologia da ação não nos convida à inação, mas ao desafio que reconhece seus riscos, e à estratégia que permite modificar a ação empreendida”.

Edgar Morin

“O caos nunca é simplesmente caótico. Ele se mostra generativo e autocriativo. Abre espaço para a organização e a constituição de ordens cada vez mais elegantes e portadoras de sentido. O caos nunca é absoluto e a ordem, jamais estável”.

Leonardo Boff

“Que a incerteza e o caos inspirem nossos esforços na construção e criação de um mundo sustentável, democrático, igualitário e diverso”.

SUMÁRIO

RESUMO	7
ABSTRACT	8
LISTA DE ILUSTRAÇÕES	9
LISTA DE TABELAS	10
1 INTRODUÇÃO	12
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	14
2.1 Recursos hídricos e seu manejo	14
2.2 Reuso da água e uso de efluentes de esgoto tratado	15
2.3 Disposição de efluentes no agrossistema	16
2.4 Impacto da disposição de efluentes nas características químicas do solo	17
2.5 Cultura da cana-de-açúcar	19
2.6 Considerações relevantes a respeito da prática de reuso	22
3 MATERIAL E MÉTODOS	25
3.1 Localização da área	25
3.2 Características físicas da área	26
3.3 Tratos culturais	26
3.4 Delineamento experimental e condução do experimento	27
3.5 Coletas de amostras: solo, solução, efluente e cana-de-açúcar	29
3.6 Análises de solo, efluente e cana-de-açúcar	30
3.7 Análises estatísticas	32
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	33
4.1 Caracterização inicial do solo face à instalação do experimento	33
4.2 Caracterização química do efluente de esgoto utilizado na irrigação	35
4.3 Efeito da irrigação com efluente na produtividade da cultura	42
4.4 Absorção e extração de nutrientes pela cana-de-açúcar	44
4.5 Efeito da irrigação com efluente de esgoto na química do solo	48
4.6 Efeito da irrigação com efluente de esgoto na química da solução de solo	78
5 CONCLUSÕES	99
REFERÊNCIAS	100
ANEXO	106

RESUMO

Efeito da irrigação com efluente de esgoto tratado em propriedades químicas de um Latossolo cultivado com cana-de-açúcar

Já há muito tempo, a irrigação de cultivos agrícolas é praticada e considerada uma alternativa interessante e útil à disposição dos efluentes gerados pelas estações de tratamento de esgoto doméstico. Como qualquer outro resíduo, o uso agrícola implica em algumas vantagens, tais como o fornecimento contínuo de umidade e de determinados nutrientes, mas também desvantagens, ocasionando a adição de sais e de possíveis patógenos e contaminantes orgânicos. Apesar da utilização de efluente de esgoto tratado ser parte integrante da gestão hídrica em muitos países, até o presente momento não se conhece nenhum outro estudo onde se utilizou e avaliou os efeitos do mesmo na irrigação da cultura da cana-de-açúcar em condições tropicais. Para este fim, amostras de solo foram coletadas e analisadas em 3 diferentes épocas. A irrigação se estendeu por aproximadamente 16 meses. O arranjo experimental foi o de blocos com parcelas subdivididas no tempo, com 5 tratamentos e 4 repetições. Os tratamentos empregados foram: (i) Controle sem aplicação de nitrogênio (N) mineral e sem irrigação; (ii) T100 a T200, 50% da dose de N recomendada via fertilização mineral e irrigação com, respectivamente, 100, 125, 150 e 200% da demanda hídrica da cultura. A produtividade foi, por ocasião do primeiro corte, positivamente influenciada pela irrigação com efluente secundário de esgoto tratado (ESET). Alterações na nutrição da cultura da cana foram pouco evidentes (teores foliares, colmo e caldo). O ESET ocasionou ligeira amenização tanto da acidez ativa (pH) quanto potencial (H+Al). Os efeitos mais pronunciados da irrigação ocorreram para os parâmetros indicadores da sodicidade/salinidade do solo, com incrementos significativos nas concentrações de sódio (Na) trocável, Na solúvel, percentual de sódio trocável (PST) e condutividade elétrica da solução do solo (CE). Estes aumentos, por sua vez, estão relacionados aos elevados teores de Na do efluente em associação com as baixas concentrações de cálcio (Ca) e magnésio (Mg), relação expressa pelos valores de razão de adsorção de sódio (RAS) do efluente. Alterações nas concentrações dos demais cátions também ocorreram, entretanto, foram menos características. As perspectivas quanto à utilização do ESET na irrigação da cana-de-açúcar são bastante promissoras, haja vista a crescente importância da cultura e a predominância do cultivo em condições de sequeiro. Entretanto, a manutenção da produtividade da cultura em patamares elevados implicará, necessariamente, a adoção de práticas específicas de manejo a fim de superar as limitações impostas pelos incrementos dos indicadores de salinidade e sodicidade do sistema solo-planta.

Palavras-chave: Reuso agrícola; Cana-de-açúcar; Química de solo; Efluente de esgoto tratado

ABSTRACT

Effects of treated sewage effluent irrigation on chemical properties of an Oxisol cultivated with sugarcane

Since long ago agricultural irrigation has been practiced and considered as an interesting and beneficial alternative to the disposal of domestic sewage effluent. As all other residues, agricultural use implies both advantages, supplying crops continuously with water and some needed nutrients, and also disadvantages, through addition of salts and possible pathogens and organic contaminants. Although domestic sewage effluent is part of an integrated water management on many countries, none similar research is known involving sugarcane irrigation in tropical conditions. Three soil sampling campaigns were conducted. Soil samples were analyzed for quantifying acidity and exchangeable cations. Irrigation was applied for approximately 16 months. The experimental design was composed of a complete block, with five treatments and four replicates. Applied treatments where: (i) Control-no irrigation and no mineral-N applied; (ii) T100-T200, addition of 50% of the recommended mineral-N fertilization and irrigation with 100%, 125%, 150% and 200% of the crop water demand, respectively. Plant yield was positively affected by secondary-treated sewage effluent (STSE) irrigation. A small amelioration of the actual and potential soil acidity was observed for the highest dose of irrigation. The dominant effect of irrigation corresponded to increased concentrations of salinity-sodicity indicators, such as exchangeable sodium (Na), soluble Na, sodium saturation (ESP) and electrical conductivity of soil solution (EC). These increments are related to high Na concentrations for the applied effluent together with low calcium (Ca) and magnesium (Mg), relation expressed and defined by sodium adsorption ratio (SAR). Changes for other exchangeable cations also occurred, although not as clear and defined as for Na. Perspectives for STSE irrigation for sugarcane are promising, considering the growing importance of sugarcane crop and the very low cultivated area that is actually irrigated in the São Paulo State. However, the maintenance of crop productivity at high levels will necessarily imply the adoption of specific management practices suitable for ameliorating the limitations imposed by increasing salinity-sodicity parameters of the soil-plant system.

Key-words: Sugarcane; Soil chemistry; Treated sewage effluent; Wastewater irrigation

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Vista aérea das lagoas de estabilização para tratamento do esgoto de Lins	25
Figura 2 - Área experimental (Lins –SP).....	28
Figura 3 - Lâminas mensais de precipitação pluvial e de irrigação aplicadas durante a duração do experimento (início dia e término dia).....	40
Figura 4 - Efeito dos diferentes tratamentos na produtividade da cana-de-açúcar (1º corte)..	42
Figura 5 - Concentração de macronutrientes (Ca, Mg, P, K e Na) no colmo da cana-de-açúcar em função dos tratamentos empregados.....	45
Figura 6 - Concentração de macronutrientes (Ca, Mg, K, P e Na) na folha de cana-de-açúcar em função dos tratamentos empregados.....	46
Figura 7 - Concentração de macronutrientes (Ca, Mg, K, P e Na) no caldo da cana (1º corte)...	48

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Caracterização química e física inicial do solo na instalação do experimento	34
Tabela 2 - Resultados das análises químicas do ESET e comparação com valores de referência disponíveis na literatura especializada	36
Tabela 3 - Classificação quanto á qualidade de uso da água de irrigação por superfície, adaptado de Pescod (1992)	37
Tabela 4 - Classificação da qualidade do efluente utilizado segundo os critérios de referência estabelecidos em Pescod (1992)	38
Tabela 5 - Aporte médio de nutrientes ocorrido durante o período experimental.....	41
Tabela 6 - Extração de Nutrientes pelo Colmo	44
Tabela 7 - Efeito da irrigação com efluente no pH CaCl_2 do solo	49
Tabela 8 - Efeito da irrigação com efluente nas concentrações de H + Al do solo	52
Tabela 9 - Efeito da irrigação com efluente nas concentrações de Al trocável do solo	54
Tabela 10 - Efeito da irrigação com efluente nas concentrações de Ca trocável do solo.....	57
Tabela 11 - Efeito da irrigação com efluente nas concentrações de Mg trocável do solo.....	59
Tabela 12 - Efeito da irrigação com efluente nas concentrações de K trocável do solo	62
Tabela 13 - Efeito da irrigação com efluente nas concentrações de Na trocável do solo	65
Tabela 14 - Efeito da irrigação com efluente no percentual de sódio trocável (PST) do solo	68
Tabela 15 - Efeito da irrigação com efluente na porcentagem de argila dispersa em água (ADA) do solo.....	71

Tabela 16 - Efeito da irrigação com efluente na saturação de bases (V%) do solo.....	74
Tabela 17 - Efeito da irrigação com efluente na CTC do solo	76
Tabela 18 - Efeito da irrigação com efluente no pH da solução do solo.....	79
Tabela 19 - Efeito da irrigação com efluente na concentração de Alumínio da solução do solo (extrato de saturação).....	81
Tabela 20 - Efeito da irrigação com efluente na condutividade elétrica (CE) da solução do solo.	83
Tabela 21 - Efeito da irrigação com efluente na concentração de Cálcio na solução do solo (extrato de saturação).....	86
Tabela 22 - Efeito da irrigação com efluente na concentração de Magnésio na solução do solo (extrato de saturação).....	89
Tabela 23 - Efeito da irrigação com efluente na concentração de Sódio na solução do solo (extrato de saturação).....	91
Tabela 24 - Efeito da irrigação com efluente na concentração de Potássio na solução do solo (extrato de saturação).....	94
Tabela 25 - Efeito da irrigação com efluente na RAS (razão de adsorção de sódio) da solução do solo (extrato de saturação).....	97
Tabela 26 - Coeficientes de correlação entre alguns dos parâmetros analisados	109

1 INTRODUÇÃO

Entre a diversidade de problemas que desafiam a humanidade neste século 21- aquecimento global, destruição das florestas tropicais, excesso de pesca nos oceanos; a escassez de água doce é, seguramente, uma das questões mais prioritárias, sobretudo nos países em desenvolvimento (MONTAIGNE, 2002).

A escala e o ritmo dos impactos humanos sobre os sistemas de água doce se aceleraram ao longo do último meio século. O contínuo crescimento da demanda mundial de alimentos, associada à escassez crescente de terras apropriadas para a agricultura, tem, por sua vez, aumentado o consumo e a demanda de água nas atividades agrícolas. Atualmente, a agricultura é responsável por cerca de 70 % do consumo de água, enquanto a indústria responde por 22% e as cidades e municípios representam uma fração de 8 % (POSTEL; VICKERS, 2004).

Mais recentemente, o adensamento populacional nos centros urbanos tem sido responsável por um aumento crescente da demanda por água de boa qualidade para fins de abastecimento público. A opinião pública tem, cada vez mais, pressionado e influenciado um número crescente de municípios brasileiros a tratar adequadamente seus resíduos. Como consequência, estações de tratamento de esgotos, em especial sistemas biológicos, tal como as lagoas de estabilização, dada sua simplicidade, baixo custo de operação e manutenção, tem sido contínua e amplamente adotados em muitas cidades de pequeno a médio porte Brasil afora.

Face à problemática da competição pelo uso da água e a seriedade da eminente falta de água doce, o reuso de águas residuárias, em diferentes atividades humanas, tem se tornado uma alternativa cada vez mais desejável.

O aproveitamento agrícola do efluente de esgoto tratado gerado pelo sistema de lagoas de estabilização, além de preservar a qualidade dos recursos hídricos, evitando a disposição nos cursos d'água e os respectivos riscos de eutroficação, acarreta um conjunto de benefícios, tais como o fornecimento de nutrientes aos cultivos agrícolas e a economia de água de boa qualidade, sendo, portanto, uma alternativa econômica e ambientalmente interessante.

Apesar dos potenciais benefícios, naturalmente não é uma prática isenta de riscos, haja vista que a presença de alguns constituintes, tais como o sódio (Na), metais pesados, organismos patogênicos e contaminantes orgânicos, podem ocasionar prejuízos significativos ao sistema solo, comprometendo a viabilidade da prática do reuso agrícola.

Tendo em vista a capacidade filtrante do solo, a utilização de efluentes na irrigação de culturas constitui-se uma tecnologia simples e de baixo custo para o tratamento terciário do esgoto. Desde que bem planejada e monitorada, tem se mostrado benéfica (FONSECA, 2001).

Apesar da grande potencialidade e de ser prática comum em muitos países, como por exemplo, Israel, Austrália e Jordânia, sua utilização no Brasil ainda é muito insipiente, carecendo o país de tradição na reciclagem destes resíduos e de um volume adequado de informações e conhecimento a respeito dos efeitos da disposição destes resíduos no sistema agrícola (FONSECA, 2001).

Até o presente momento, não se conhece nenhum outro estudo onde se utilizou e avaliou os efeitos da irrigação com efluente secundário de esgoto tratado (ESET) na cultura da cana-de-açúcar. Considerando-se que a agroindústria brasileira é uma das mais produtivas e competitivas do mundo, e que grande parte das áreas de cultivo são de sequeiro, a irrigação da cultura é bastante promissora, particularmente no Estado de São Paulo, detentor de aproximadamente 60% de toda produção nacional (AGRIANUAL, 2006).

Assim, dentre o conjunto de estudos que estão sendo conduzidos no campo experimental de Lins, os objetivos do presente trabalho foram: (i) monitorar a qualidade do efluente e solução do solo quanto à condutividade elétrica (CE), pH, razão de adsorção de sódio (RAS) e quanto às concentrações dos cátions Na, cálcio (Ca), potássio (K), magnésio (Mg) e alumínio (Al); (ii) monitorar o pH do solo, a acidez potencial (H+Al), os teores dos cátions Na, K, Ca, Mg e Al trocáveis no solo; (iii) determinar a máxima lâmina de irrigação com efluente que não acarrete em prejuízos ao solo e a produtividade da cana-de-açúcar.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Recursos hídricos e seu manejo

Diferentemente de outros importantes recursos naturais, tais como o petróleo e os minérios, os recursos hídricos não possuem substitutos para grande maioria de seus usos (POSTEL et al., 1996).

A Agenda 21 (1996), importante documento que encerra um amplo somatório dos esforços mundiais pelo desenvolvimento sustentável, no seu capítulo 18, referente ao manejo, utilização e preservação dos recursos hídricos, ressalta alguns dos desafios fundamentais a respeito da questão hídrica:

- Assegurar que haja um adequado balanço entre a oferta de água à população humana e suas atividades, garantindo, igualmente, a manutenção das funções hidrológicas, biológicas e químicas dos ecossistemas, adaptando as atividades e necessidades humanas aos limites naturais.
- Basear o manejo dos recursos hídricos na percepção da água como integrante do ecossistema, ou seja, como um recurso natural, bem econômico e social, cuja quantidade e qualidade determinam a natureza de sua utilização.

Das intenções e afirmações contidas no documento transparece alguns dos desafios a serem enfrentados pela comunidade científica internacional no desenvolvimento, transferência, adaptação e difusão de fontes alternativas de abastecimento de água e de tecnologias de baixo custo através da pesquisa aplicada inovadora.

Oki e Kanae (2006) ressaltam a importância fundamental do desenvolvimento de estratégias eficientes a fim de se incrementar continuamente a comunicação entre os especialistas do setor hídrico e os responsáveis pela tomada de decisão, garantindo que o conhecimento técnico gerado possa, efetivamente, se traduzir em políticas e ações concretas na solução dos principais problemas hídricos, promovendo simultaneamente uma maior sintonia entre os conhecimentos gerados e as reais necessidades de cada comunidade como um todo.

2.2 Reuso da água e uso de efluentes de esgoto tratado

No passado, as águas residuárias eram dispostas rotineiramente nos cursos d'água, sem maiores preocupações a respeito dos riscos à saúde humana e ao ambiente (FEIGIN et al., 1991).

Entretanto, através do contínuo crescimento populacional, da industrialização e da urbanização ocorridas ao longo do século XX, muitas regiões atingiram condições de escassez de recursos hídricos, o que, em conjunto com a limitada capacidade assimilativa do ambiente (FEIGIN et al., 1991), tornou a disposição nos corpos d'água uma prática inadequada.

Segundo Halliwell et al. (2001), a disposição de águas residuárias nos corpos d'água apresenta alguns benefícios, dentre eles a manutenção de fluxos ambientais adequados com maior volume de água disponível aos consumidores a jusante dos rios. Entretanto, a disposição nestes ecossistemas de resíduos ricos em nutrientes, especialmente em nitrogênio (N) e fósforo (P), pode acelerar o processo de eutroficação das águas e contribuir para floração de algas tóxicas azuis-verdes (DORICH et al., 1984). Deste modo, a alternativa de utilização de efluentes no solo tem ganhado crescente popularidade.

Segundo Bouwer (2000), o reuso da água tem adquirido importância crescente principalmente em razão de:

- a disposição dos efluentes de esgoto nas águas de superfície tem se tornado continuamente mais custosa e limitada, visto as exigências cada vez maiores quanto aos padrões de qualidade de efluente para proteção da qualidade dos corpos receptores;
- as águas residuárias geralmente são um recurso valioso que pode ser usado em inúmeros propósitos, tais como irrigação de cultivos, irrigação urbana, usos industriais (resfriamento e processamento), melhorias ambientais (pântanos, refúgios de vida selvagem, habitats ripários, lagos urbanos), combate ao fogo, controle de poeira, descargas de banheiro.

Feigin et al. (1991) considera a utilização de efluentes na irrigação de cultivos agrícolas e parques como o propósito mais razoável e mais praticável do reuso.

A aplicação de efluentes na agricultura é prática comum em muitos países, inclusive fazendo parte do planejamento e gestão dos recursos hídricos, como por exemplo, na Austrália, Arábia Saudita e Israel (PESCOD, 1992).

No Brasil, a prática de reciclagem dos resíduos gerados ainda é bastante insipiente e pouco pesquisada, em particular com relação aos efluentes de esgoto tratado. O país ainda carece de suficiente número de informações técnico-científicas a respeito da diversidade e magnitude dos efeitos da disposição de efluentes nos ambientes tropicais (FONSECA, 2001).

2.3 Disposição de efluentes no agrossistema

A irrigação de culturas com efluente de esgoto tratado pode ser parte ativa do sistema de tratamento, onde o solo e as plantas atuam como “filtro vivo”, absorvendo e retendo poluentes e organismos patogênicos presentes nos resíduos e nas águas residuárias. A aplicação através da irrigação completa a seqüência de tratamentos visando à redução do nível de microorganismos e de vários compostos orgânicos e inorgânicos para níveis aceitáveis (FEIGIN et al., 1991).

De acordo com Bouwer e Idelovitch (1987) a utilização de efluente de esgoto tratado na agricultura é uma alternativa popular e atraente, em função das seguintes razões:

- a. Onde se fizer necessário à irrigação de culturas, as águas residuárias podem suplementar os recursos hídricos primários;
- b. A agricultura irrigada requer grandes volumes de água, representando grande parte da demanda total de água em muitas situações;
- c. A agricultura pode se beneficiar não apenas da água, mas também, dentro de certos limites, de outros recursos presentes, tais como matéria orgânica e nutrientes minerais, em particular N e P;
- d. A irrigação é relativamente flexível quanto à qualidade da água requerida - algumas culturas podem ser irrigadas com água de baixa qualidade sem maiores riscos e alguns problemas de qualidade da água podem ser superados através de práticas adequadas de manejo agrícola.

De qualquer modo, a irrigação de culturas com efluente de esgoto tratado implica numa série de alterações no sistema solo, sejam estas químicas (matéria orgânica, salinidade, sodicidade, cátions trocáveis), físicas (dispersão de argilas e condutividade hidráulica) ou biológicas (natureza, composição e função da microbiota) (FONSECA et al., 2007).

Segundo Bond (1998), a prática de irrigação com efluente de esgoto tratado implica numa minuciosa consideração de algumas importantes questões relacionadas à sustentabilidade do

recurso solo, mais especificamente: lixiviação de NO_3^- , manejo dos sais, e os efeitos da crescente sodicidade no uso presente e futuro da terra.

A irrigação de cultivos agrícolas foi uma das muitas tecnologias que resultaram em incrementos consideráveis na oferta mundial de alimentos ao longo da Revolução Verde, sendo que os 16% das terras agrícolas mundiais irrigadas respondem por cerca de 40% do total da produção mundial de alimentos (TILMAN et al., 2002). Dada a importância da irrigação, é de se esperar que a adoção de cultivos e tecnologias mais eficientes no uso de água, associado a investimentos maciços em prevenção da poluição, terão importância crescente a fim de amenizar a pressão e apropriação humana dos recursos hídricos disponíveis (TILMAN et al., 2002; POSTEL et al., 1996). Neste contexto, o reuso agrícola emerge como uma prática indispensável, seja a fim de se estabelecer um uso mais eficiente dos recursos hídricos, seja a fim de garantir a segurança e incremento da produção mundial de alimentos.

2.4 Impacto da disposição de efluentes nas características químicas do solo

2.4.1 Acidez ativa e potencial

De acordo com Bouwer e Idelovitch (1987), o pH da água de irrigação, que indica sua acidez ou alcalinidade, não deve ter efeito significativo sobre o pH do solo na zona radicular em função de seu poder tampão. Entretanto, diversos trabalhos na literatura científica relatam ligeiros acréscimos (menor que uma unidade) nos valores de pH para solos irrigados com efluente de esgoto tratado (FONSECA, 2001; JOHNS; MCCONCHIE, 1994).

Esse ligeiro aumento de pH do solo, em razão da utilização de efluente de esgoto tratado, tem sido atribuído aos seguintes fatores: 1) ao alto pH do efluente (STEWART, 1990); 2) à adição de cátions trocáveis e de ânions oriundos do efluente (FALKINER; SMITH, 1997); 3) ao aumento do processo de desnitrificação do NO_3^- (FRIEDEL et al., 2000); 4) à adição de resíduos orgânicos, consumindo prótons através da descarboxilação de ânions orgânicos e desaminação dos aminoácidos (YAN et al., 1996).

Segundo Fonseca (2001) a associação dos fatores acima citados com a baixa capacidade de troca catiônica (CTC) - característica de solos tropicais - além do aporte de alcalinidade pelo efluente, contribuem para o aumento nos valores de pH das amostras de solo. No entanto, tais

alterações de pH são de pequena magnitude, sem maior significância prática ou reflexo na disponibilidade de nutrientes (SPEIR et al., 1999).

2.4.2 Cátions trocáveis (Ca, Mg, K e Na)

A irrigação com efluente de esgoto tratado por longos períodos tem resultado em ligeiro incremento nos teores de Ca^{2+} (QUIN; WOODS, 1978). John e McConchie (1994) relatam aumentos nos teores de Ca trocável em solos sob cultivo de bananeira irrigados com efluente secundário de esgoto tratado. Fonseca (2001), trabalhando com plantas de milho envasadas, relata aumento nos teores de Ca trocável nas unidades experimentais adequadamente fertilizadas e irrigadas com ESET.

Com relação ao Mg, os resultados obtidos pela comunidade científica tem sido contraditórios. Falkiner e Smith (1997) obtiveram aumento nos teores de Mg pela disposição de efluentes no solo. Já Fonseca (2001, 2005) e Johns e McConchie (1994), não obtiveram alterações nos teores de Mg trocável em razão da irrigação com efluente. Outros trabalhos, por sua vez, relatam decréscimos nas concentrações de Mg (WANG et al., 2003).

Com relação ao K, os resultados obtidos também tem sido divergentes. Aumentos nos teores de K trocável pela disposição de efluentes no solo foram relatados por Al-Nakshabandi et al. (1997) e Falkiner e Smith (1997). Fonseca (2005), em experimento conduzido por dois anos com capim-Tifton 85, não verificou alterações nos teores de K trocável no solo em razão da irrigação com efluente nas unidades experimentais que foram adequadamente fertilizadas via mineral. Já Karlen et al. (1976) observaram que a aplicação de efluente resultou no aumento do teor de Na e, em consequência, redução dos teores de K.

De acordo com Karler et al. (1976), para os efluentes que possuem uma elevada concentração de Na e baixa de K, sua adequada reciclagem - via solo - requer que se faça uso de adubação suplementar de potássio.

A maioria das culturas apresenta elevada demanda de K, e apesar dos teores do elemento variarem bastante de acordo com as características de cada efluente, dificilmente os teores acrescidos via irrigação serão suficientes no atendimento das demandas nutricionais da cultura, em especial quando os teores no solo são baixos (FEIGIN et al., 1991).

Aumentos nos teores de Na^+ trocável correspondem a uma das alterações mais características da utilização de efluentes de esgoto tratado na agricultura, sendo amplamente

relatados em diferentes sistemas de cultivo (KARLEN et al., 1976; FEIGIN et al., 1991), notadamente em experimentos de longa duração (QUIN; WOODS, 1978; BALKS et al., 1998).

Segundo Feigin et al. (1991), devido ao grande impacto que o íon Na^+ pode ter, seja nas propriedades do solo ou na produtividade das culturas, é fundamental a determinação dos teores do elemento na água a ser utilizada na irrigação. Igualmente importante é o monitoramento dos teores de Na^+ nos locais receptores dos efluentes de esgoto tratado (CAMERON et al., 1997; BOND, 1998).

O aporte e a dinâmica do Na^+ em solos irrigados com efluente depende de uma série de fatores, tais como: (i) concentração do elemento no efluente; (ii) magnitude da absorção pelas plantas; (iii) intensidade do processo de lixiviação que ocorre no sistema solo; (iv) permeabilidade do solo; (v) dinâmica dos outros íons, como cálcio, magnésio, carbonatos e bicarbonatos (SANTOS, 2004).

O estudo e o entendimento dos diversos fatores que interferem na dinâmica e que determinam o efeito do sódio no agroecossistema tem grande relevância prática, constituindo-se numa informação crítica para o correto manejo e condução de qualquer sistema de irrigação com efluentes de esgoto tratado.

Três características principais refletem os riscos de salinização e sodificação do agrossistema: (i) a concentração total de sais na água, o que pode resultar no aumento da salinidade do solo; (ii) as concentrações de certos íons específicos, como Cl^- e Na^+ , que podem ter um efeito tóxico direto ou indireto nas culturas, incluindo desbalanço nutricional; (iii) as concentrações de outros íons (principalmente Na^+ e HCO_3^-), que podem resultar na deterioração da estrutura do solo e conseqüente redução na permeabilidade do mesmo (FEIGIN et al., 1991).

Os efeitos prejudiciais do sódio na estrutura do solo resultam de dois processos relacionados: a expansão e a dispersão das argilas (HALLIWELL, 2001). Entretanto, a magnitude dos impactos negativos do íon na estrutura do solo, bem como as possíveis alterações na porosidade e condutividade hidráulica do solo dependem da quantidade e eficiência das chuvas em promover a lixiviação do elemento (SPEIR et al., 1999).

2.5 Cultura da cana-de-açúcar

Passados cinco séculos de sua introdução no Brasil, a cultura da cana-de-açúcar mantém o status de produto agrícola com a maior safra no país, com uma produção estimada de 423 milhões

de toneladas no ano agrícola 2005/2006, dos quais 359 milhões na região Centro-Sul do país, com especial destaque para o Estado de São Paulo (AGRIANUAL, 2006).

Graças a uma combinação singular de condições climáticas favoráveis, extensão territorial e recursos naturais abundantes, a agroindústria brasileira é uma das mais produtivas e competitivas do mundo.

Com a recente implantação de veículos bicombustíveis no Brasil, as diminuições das reservas mundiais de petróleo e o afloramento das preocupações com as mudanças climáticas em razão da queima de combustíveis fósseis, o etanol tem adquirido importância crescente como fonte de combustíveis e como matéria-prima substitutiva dos hidrocarbonetos fósseis.

Igualmente, projeta-se um significativo aumento da produção e das exportações brasileiras de açúcar, principalmente em razão da esperada queda dos subsídios europeus ao açúcar local, aumentando-se o acesso do produto brasileiro, além do também significativo aumento das demandas por parte da China, que deverá se tornar, gradativamente, o maior importador mundial de açúcar (AGRIANUAL, 2006).

Como consequência, estima-se que nos próximos dez anos a produção brasileira de cana-de-açúcar deverá crescer 100%, atingindo 768 milhões de toneladas na safra 2014/2015, concentrando-se continuamente na Região Centro-Sul do país, com proporção crescente destinada à produção de álcool (AGRIANUAL, 2006).

Com relação à produção agrícola do município de Lins, os principais cultivos são: cana-de-açúcar, milho e hortifrutícolas (PREFEITURA MUNICIPAL DE LINS, 2006). O cultivo da cana-de-açúcar no município abrange uma área plantada de 9470 ha com produção de 740.620 toneladas com produtividade média de 78,206 kg ha⁻¹.

A cana-de-açúcar (*Saccharum* spp.) é uma gramínea perene que perfilha abundantemente na fase inicial do desenvolvimento. É cultivada numa ampla faixa de latitude, sendo considerada uma planta de alta eficiência na conversão de energia radiante em energia química, eficiência esta característica das plantas C₄ (MAGALHÃES, 1987).

A expressão das características varietais é largamente influenciada pelo clima e pelo manejo, ou pelas práticas culturais adotadas (MAGALHÃES, 1987).

Segundo Segarra et al. (1996), as culturas com potencial de receberem efluente de esgoto devem satisfazer todos ou grande parte dos seguintes critérios:

- 1) Alta absorção de N;
- 2) Alto consumo d'água;
- 3) Potencial de uso no processamento quando necessário;
- 4) Potencial de mercado nacional e internacional;
- 5) Retorno econômico relativamente alto.

Levando-se em consideração estes critérios, bem como o papel de destaque do Estado de São Paulo na produção da cultura da cana-de-açúcar, verifica-se que as áreas sob cultivo de cana-de-açúcar possuem elevado potencial para receberem irrigações com efluente de esgoto tratado. Considerando-se o aproveitamento industrial da cultura, a importante geração de divisas com as exportações de açúcar e álcool, sua eficiência fotossintética e conseqüente alta demanda de nutrientes e umidade, observa-se que a cultura atende a maior parte dos critérios estabelecidos por Segarra et al. (1996).

Segundo Magro (2000), o principal fator limitante ao uso generalizado da irrigação na cana-de-açúcar no Brasil corresponde à pequena margem de lucro proporcionada pela cultura face aos baixos preços de comercialização.

De acordo com Cunha et al. (2001), a irrigação da cana-de-açúcar no Estado de São Paulo é prática muito insipiente, realizada por um número muito pequeno de produtores, podendo-se até mesmo estimar que quase toda a cana produzida no Estado seja de sequeiro.

Conforme Matioli (1998), a tradição de cultivo da cultura em condições de sequeiro está fundamentada na percepção da irrigação como sendo economicamente inviável nas condições edafoclimáticas do Estado de São Paulo.

Apesar desta percepção, a tecnologia de irrigação da cana-de-açúcar constitui uma das alternativas que pode contribuir para a “qualidade total” do processo de produção sucro-alcooleiro paulista, desde que análises técnico-científicas estejam disponíveis, demonstrando a viabilidade econômica da prática de irrigação (MATIOLI, 1998).

Matioli et al., 1996 apud Matioli (1998) classifica os benefícios da irrigação da cultura da cana-de-açúcar em “benefício diretos” e “benefícios indiretos”.

Segundo os autores, os benefícios diretos correspondem ao aumento de produtividade agrícola e da longevidade das soqueiras. Já os benefícios indiretos estão relacionados à redução de custos no processo produtivo agrícola, proporcionada pelo aumento da produtividade. Tal redução

de custos ocorre principalmente devido à dispensa de novos arrendamentos, que acarretariam maiores custos à unidade industrial.

Com relação aos benefícios diretos, diversos trabalhos na literatura nacional relatam aumentos de produtividade da cana-de-açúcar em razão da irrigação, dentre eles, Demétrio (1978) e Carretero (1982) obtiveram, respectivamente, aumentos médios de produtividade da ordem de 35,0 ton ha⁻¹ e 16,3 ton ha⁻¹ utilizando-se de irrigação por gotejamento nas condições do Estado de São Paulo.

Soares et al. (2004), em experimento conduzido na região de Goianésia-GO, com irrigação suplementar por aspersão nas variedades SP84-1431 e SP87-344 obtiveram melhor brotação da cana planta, melhor perfilhamento da soqueira e maior produtividade agroindustrial em razão da irrigação, ainda que as variedades responderam distintamente a irrigação.

2.6 Considerações relevantes a respeito da prática de reuso

As considerações a seguir dizem respeito a alguns aspectos da prática de reuso que, possivelmente, necessitam melhor observação e compreensão, devendo ser englobados por pesquisas futuras na área.

A elaboração e a implementação de qualquer projeto de reuso para irrigação de culturas agrícolas não pode limitar-se a considerações de ordem estritamente técnica e ambiental, igualmente importante é que, em todas as etapas do processo decisório, seja ao longo da pesquisa, desenvolvimento ou implementação da prática do reuso agrícola, as necessidades, potencialidades e a realidade sócio-econômica-cultural das comunidades rurais afetadas sejam plenamente compreendidas e consideradas. Ilustrando a importância da questão, Friedler et al. (2006) acrescenta que, irrespectivamente aos aspectos técnico-científicos, a rejeição pública tem o potencial de ocasionar o fracasso da prática de reuso.

Assim, a disseminação e a efetiva transferência de informações e conhecimento ao público devem ser interpretadas como uma das etapas fundamentais para o sucesso da prática. Apesar da complexidade da questão - haja vista a heterogeneidade do público, a diversidade de grupos de interesse, de contextos socioeconômicos e culturais - Friedler et al. (2006) expõe alguns dos fatores que se adequadamente implementados podem contribuir sobremaneira para a plena participação e apoio público: (i) transparência, revelando-se a totalidade dos fatos relacionados aos projetos, sejam estes positivos ou negativos; (ii) linguagem acessível, apresentações e

demonstrações do projeto de modo claro e interessante; (iii) participação democrática em todas as etapas do processo de tomada de decisão.

A título de exemplo, vale mencionar a problemática da escolha das culturas a serem semeadas. É fato que a necessária adoção de critérios técnico-científicos para a escolha dos locais e das culturas adequadas à disposição dos efluentes implica, necessariamente, numa restrição considerável das opções de escolha de culturas para o plantio. Também é fato que os agricultores são grandemente influenciados, quando da escolha das culturas a serem cultivadas, por considerações econômicas a respeito da lucratividade da produção. Assim, a fim de se evitar eventuais conflitos de interesse e mesmo uma rejeição generalizada da irrigação com efluentes por parte dos agricultores, é imprescindível que os mesmos possam contar com uma infra-estrutura de apoio técnico-institucional que efetivamente garanta o acesso ao mercado e uma taxa de retorno econômico mínimo a comunidade afetada.

Um outro ponto chave a se considerar são as emissões de gases de efeito estufa. As lagoas de estabilização podem resultar em emissões deste tipo de gases, em especial de metano. Em particular nas lagoas anaeróbias, tratamento primário do esgoto doméstico, a degradação da matéria orgânica é lenta, com a ocorrência de etapas acidogênicas e metanogênicas, resultando na emissão de gases de hidrogênio, metano e dióxido de carbono (FONSECA et al., 2007). A emissão de gases de efeito estufa por parte das estações de tratamento constitui uma poluição difusa e pouco visível podendo se tornar um grave problema latente. Até o presente momento este aspecto tem sido ainda amplamente negligenciado nos principais trabalhos a respeito das implicações do uso de efluentes de esgoto nos agroecossistemas, seja na literatura nacional ou internacional.

A este respeito, é bastante interessante mencionar o trabalho realizado por van der Steen et al. (2003), no qual, estudando o efeito de cobertura vegetal nas lagoas de estabilização sobre as emissões de gases de efeito estufa e na liberação de compostos odoríferos, os autores concluem que este tipo de cobertura pode diminuir as respectivas emissões pelo fato da mesma atuar como uma barreira física à volatilização destes compostos.

No contexto atual da sociedade, dada a importância da problemática das mudanças climáticas, é de fundamental importância que as emissões sejam criteriosamente estudadas, conhecidas e adequadamente computadas a fim de se garantir, não apenas a viabilidade agrônômica da prática de reuso, mas de modo mais amplo, a sustentabilidade da prática como um

todo. Igualmente, se faz necessário a busca contínua por alternativas que possam, na prática, contribuir para a minimização e mitigação destes problemas.

Segundo Feigin et al. (1991), os efeitos de longo prazo da irrigação com efluente nas propriedades químicas e físicas do solo são um dos aspectos mais críticos aos métodos de tratamento e disposição que envolvem o uso do sistema solo. Agronomicamente, um dos maiores riscos da irrigação com efluentes de esgotos é o desbalanço existente entre o sódio e os demais cátions bivalentes, resultando numa elevada razão de adsorção de sódio (RAS) e risco de sodificação. Toze (2006) acrescenta que o Na e os demais sais são uns dos contaminantes mais difíceis de remover das águas residuárias, haja vista que o único mecanismo eficiente a este fim é através do processo de osmose reversa, o que por sua vez encareceria demasiadamente o tratamento, inviabilizando-o para fins de irrigação de cultivos agrícolas.

Estudos e pesquisas futuras na área necessitarão de um enfoque especial à busca e a disseminação generalizada de práticas de manejo que se mostrarem mais adequadas à preservação da integridade do sistema solo, evitando que a irrigação com águas salino-sódicas comprometa a produtividade agrícola. Estudos futuros também devem se lançar à difícil tarefa de compreender em detalhes o delicado balanço necessário entre RAS e CE das águas de irrigação, aplicação de condicionadores de solo (tal como o gesso), influência da matéria orgânica, necessidade de drenagem para a exportação dos sais adicionados, a fim de referendar, de forma sólida e consistente, a sustentabilidade e a adequação da agricultura como meio de disposição dos efluentes oriundos dos processos de tratamento de esgotos domésticos.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Localização da área

O campo experimental, totalizando uma área de 7500 m², está localizado no município de Lins, Estado de São Paulo, longitude 49°50'W, latitude 22°21'S, altitude média de 440 m, situando-se junto à estação de tratamento de esgotos (ETE) operada pela SABESP (Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo), na Unidade de Negócios do Baixo Tietê e Grande.

O sistema de tratamento de esgotos da cidade é constituído de três lagoas anaeróbias (tratamento primário) seguidas de três lagoas facultativas (tratamento secundário) (Figura 1), onde são produzidos em média cerca de 500 m³ hora⁻¹ de efluente de esgoto tratado. A profundidade útil das lagoas anaeróbias é de 4,00m e o tempo médio de detenção hidráulico é de 5 dias, já as lagoas facultativas possuem uma profundidade útil de 1,90 m com tempo médio de detenção hidráulico de 10 dias (PIVELI; DORIA, 2003).

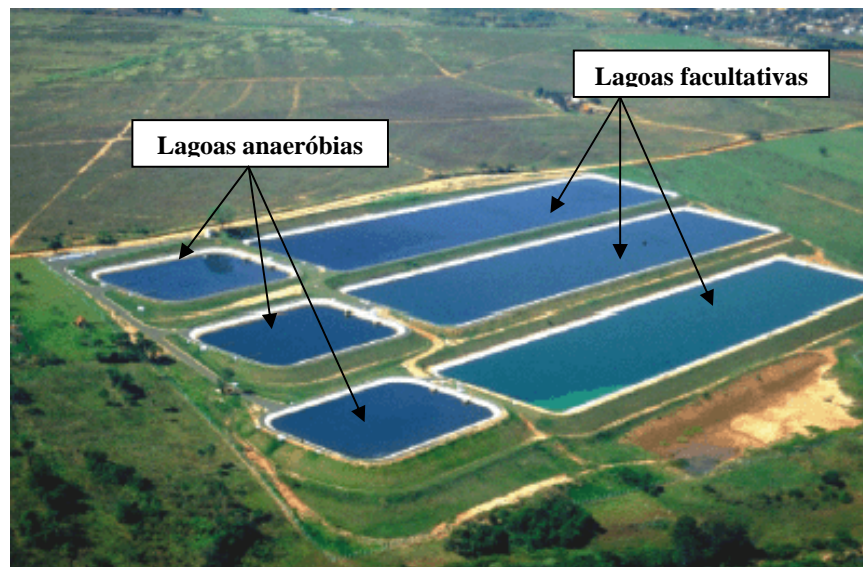


Figura 1 - Vista aérea das lagoas de estabilização para tratamento do esgoto do município de Lins. Lagoas anaeróbias (tratamento primário) seguidas das lagoas facultativas (tratamento secundário)

3.2 Características físicas da área

O clima do local é caracterizado como mesotérmico de inverno seco, com temperaturas médias variando de 18 a 22°C e uma precipitação anual na faixa de 1100 a 1300 mm. Os solos da região se desenvolvem sob sedimentos do Grupo Bauru, com relevo suave e moderadamente ondulado, textura arenosa/média e constituintes argilosos de baixa atividade.

O campo experimental situa-se numa área onde o tipo de solo é relativamente variável, consistindo, segundo Ibrahim (2002), num sistema LATOSSOLO-ARGISSOLO. O solo da área experimental foi classificado como LATOSSOLO VERMELHO Distrófico típico. Os horizontes BA, Bw1, Bw2 apresentam textura franco-arenosa, cor vermelho a vermelho-escuro, estrutura em blocos sub-angulares médios de grau fraco, desfazendo-se facilmente em agregados granulares de grau forte (IBRAHIM, 2002).

Na parte inferior da vertente, o solo é classificado como Argissolo Vermelho distrófico Latossólico, de textura média-argilosa, conduzindo-se experimentos com efluentes de esgoto no cultivo do capim-Bermuda Tifton 85 desde 2003.

3.3 Tratos culturais

A área experimental foi cultivada com cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum*), variedade RB 72454, obtida pelo Instituto de Açúcar e Alcool IAA/Planalsucar.

As principais características agroindustriais da variedade utilizada são apresentadas a seguir: produtividade alta em cana-planta e cana-soca, rendimento agroindustrial alto, exigência em fertilidade do solo baixa, adaptabilidade ampla e estabilidade de produção alta, apresentando potencial médio de brotação da soqueira e, por isso, sua colheita não é recomendada nos meses secos e frios, especialmente em solos argilosos (UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS - UFSCAR, 2002).

O plantio foi realizado em março de 2005 com espaçamento entre linhas de 1,40 m, sendo que, previamente ao plantio, foi aplicado calcário dolomítico seguido do plantio e cultivo de *Crotalaria Juncea* para finalidade de adubação verde.

É oportuno acrescentar que anteriormente ao plantio e início do experimento com cana-de-açúcar, a mesma área já havia sido utilizada num experimento envolvendo irrigação com ESET em ciclos alternados de milho e girassol por 2 anos consecutivos, de 2002 até fevereiro de 2004,

afetando conseqüentemente a variabilidade entre as parcelas experimentais avaliadas no presente estudo.

Com relação à fertilização mineral do experimento por ocasião do plantio e instalação do experimento, foram utilizados 15 kg ha⁻¹ de N (nitrato de amônio), 120 kg ha⁻¹ de P₂O₅ (superfosfato simples) e 80 kg ha⁻¹ K₂O (cloreto de potássio), distribuídos manualmente em cada sulco.

O sistema de irrigação por gotejamento foi instalado após plantio da cana-de-açúcar, com o início da irrigação da cultura no mês de maio de 2005. O manejo da irrigação teve como base o conteúdo de água volumétrica na camada de 0-60 cm, determinado a cada 2 dias através de um conjunto de tensiômetros instalados nas parcelas experimentais. A irrigação era acionada toda vez que a leitura dos tensiômetros indicava um potencial mátrico (Ψ_m) menor que -40 kPa (potencial crítico) o qual correspondeu, através do ajuste a curva característica de retenção de água do solo, a um volume de aproximadamente 60% da capacidade de armazenamento total de água na camada 0-60 cm.

3.4 Delineamento experimental e condução experimento

O arranjo experimental foi o de blocos completos com parcelas subdivididas no tempo, com 5 tratamentos e 4 repetições. Os tratamentos empregados foram: (i) TSI - sem aplicação de N mineral e sem irrigação; (ii) T100 a T200, 50% da dose de N recomendada via fertilização e irrigação com, respectivamente, 100, 125, 150 e 200% da demanda hídrica da cultura. Cada unidade experimental (Figura 2) possuía 40,0 m de comprimento, 7,00 m de largura, com uma área total de 280,00 m², sendo a área útil de 126,00 m², desprezando-se 10 m de cada linha de plantio (bordadura) e mais a primeira e última linha de cada parcela experimental (bordadura).

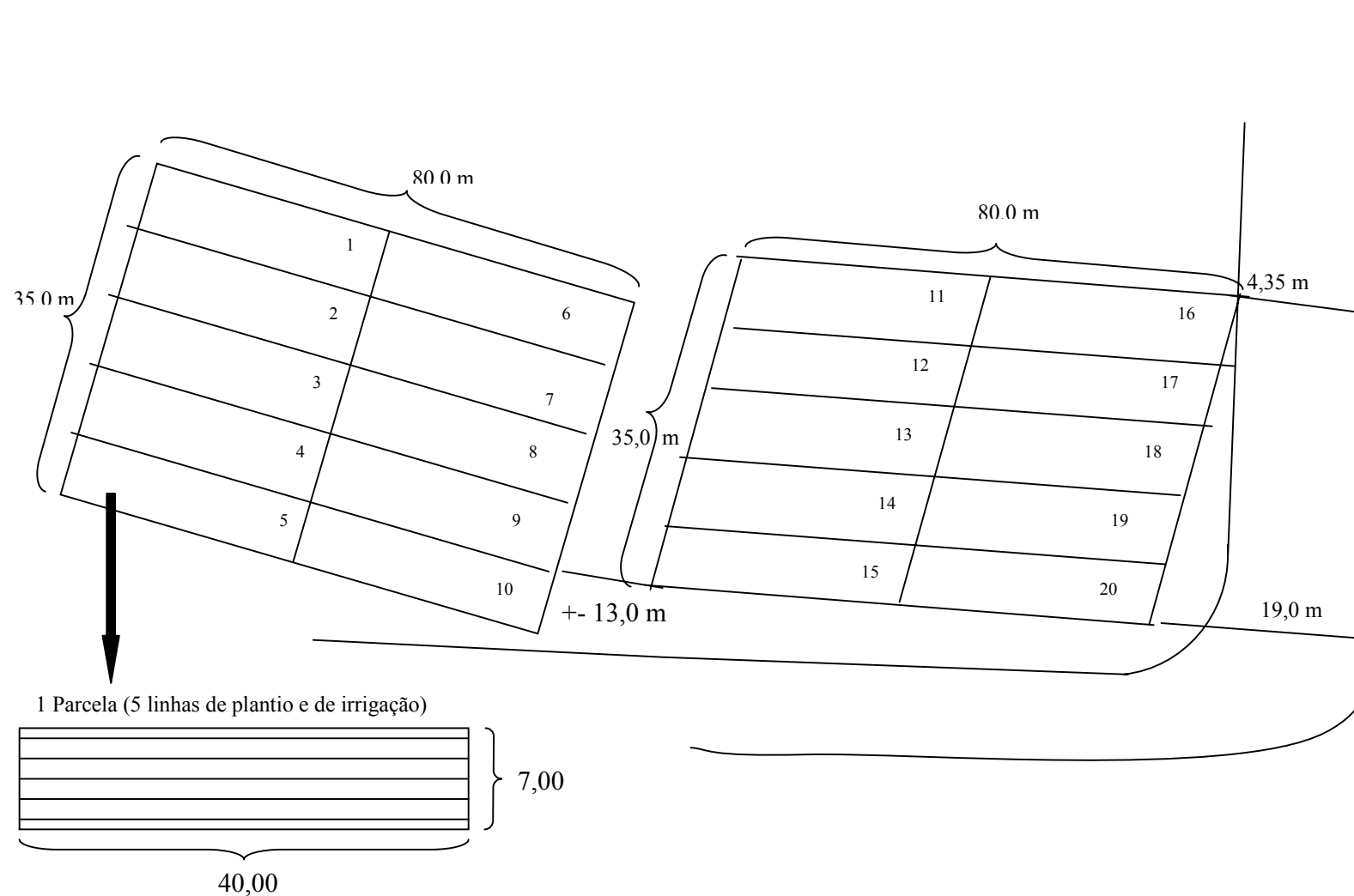


Figura 2 - Área Experimental (Lins –SP): 20 parcelas com cana-de-açúcar (RB72454), das quais 16 foram irrigadas por gotejamento com efluente de esgoto doméstico. Plantio: espaçamento 1,40 m com 18 gemas/m. Adubação de plantio: N (nitrato de amônio) = 15 kg ha^{-1} , P_2O_5 (superfosfato simples) = 120 kg ha^{-1} , K_2O (cloreto de potássio) = 80 kg ha^{-1}

3.5 Coletas de amostras: solo, solução, efluente e cana-de-açúcar

3.5.1 Coletas de solo e solução

Antes da instalação do experimento, foram coletadas amostras de solo para análise física, química e caracterização inicial da área experimental. Após o início do experimento (maio/2005) foram realizadas duas amostragens de solo, a primeira em dezembro de 2005, e a segunda e última no mês de setembro de 2006, sendo esta última correspondente ao momento da colheita da cana-de-açúcar.

As amostras foram coletadas com trado holandês nas profundidades de 0-10, 10-20, 20-40, 40-60, 60-80 e 80-100 cm. Em cada parcela foi retirada uma amostra composta de terra, proveniente de 12 sub-amostras simples para as camadas de 0-10 e 10-20 cm e de 6 sub-amostras simples para as demais camadas. As amostras foram colocadas em sacos plásticos previamente identificados e encaminhadas para preparo e análise.

A solução do solo foi obtida a partir da fração terra fina seca ao ar (TFSA) das mesmas amostras coletadas nas três amostragens de solo realizadas, até a profundidade de 1,0m.

3.5.2 Amostragens do efluente

Amostras de efluente utilizadas na irrigação da cana-de-açúcar foram coletadas mensalmente durante todo o período do experimento. As coletas foram realizadas junto às saídas de efluente para a tubulação do sistema de irrigação. As amostras coletadas foram encaminhadas para o laboratório do Núcleo de Pesquisa em Geoquímica e Geofísica da Litosfera da USP (NUPEGEL/USP) onde foram adequadamente preparadas para as determinações analíticas.

3.5.3 Amostragens da Cana-de-Açúcar

Em dezembro de 2005 e setembro de 2006, no intuito de efetuar a diagnose do estado nutricional da cultura, foram coletadas 25 folhas +3 de plantas dentro da área útil de cada parcela, seguindo os procedimentos apresentados por Malavolta et al. (1997). Foram separados os 20 cm centrais da lâmina foliar, excluindo-se a nervura central. Após o corte, as amostras de folha foram lavadas com água deionizada, armazenadas em sacos de papel previamente identificados e,

posteriormente, encaminhadas para secagem em estufa e moagem. Por ocasião do corte e colheita da cultura foram coletados dez colmos dentro da área útil de cada parcela, formando uma amostra composta para a determinação da extração de nutrientes pelos colmos, após terem sido devidamente trituradas, moídas e secas. Uma sub-amostra de 500 g de colmo foi utilizada para a extração do caldo a fim de quantificar a concentração de nutrientes no mesmo.

3.6 Análises de solo, efluente e da cana-de-açúcar

As análises químicas de solo, solução de solo, efluente e cana-de-açúcar foram realizadas nos laboratórios do Departamento de Solos e Nutrição de Plantas/ ESALQ e do NUPEGEL/ USP. As análises físicas, para determinação da fração argila dispersa em água, foram realizadas na Embrapa Meio Ambiente – Jaguariúna/SP. Quanto às análises de macro e micronutrientes das folhas, colmo e caldo, as mesmas foram realizadas no Laboratório de Tecidos Vegetais do Departamento de Solos e Nutrição de Plantas (Esalq/USP).

3.6.1 Análises química e física do solo

As amostras coletadas foram secas ao ar e passadas por peneira de malha 2 mm obtendo-se a TFSA para análises química e física. As amostras assim preparadas foram submetidas às determinações de pH e acidez potencial (H+Al), utilizando-se o método proposto por van Raij et al. (2001). Os teores de Na, K, Ca, Mg e Al trocáveis foram determinados conforme Embrapa (1999a).

O pH foi determinado em solução CaCl_2 $0,01 \text{ mol L}^{-1}$. Os elementos Ca, Mg e Al foram extraídos com solução de KCl 1 mol L^{-1} , determinando-se as concentrações dos cátions Ca e Mg através do método instrumental de Espectrofotometria de Absorção Atômica. O Al foi obtido por titulação com solução NaOH $0,025 \text{ mol.L}^{-1}$.

A extração de H +Al (acidez potencial) foi realizada com solução de acetato de cálcio $0,5\text{M}$ a pH 7,0. A concentração de H+Al foi obtida por titulação com solução NaOH $0,025 \text{ mol.L}^{-1}$.

Na extração de Na, K e P utilizou-se a solução Mehlich-1 ($\text{HCl } 0,05 \text{ mol L}^{-1} + \text{H}_2\text{SO}_4$ $0,00125 \text{ mol L}^{-1}$). A determinação das concentrações de Na e K foi realizada através da Fotometria de Emissão em Chama. Já as concentrações de P foram obtidas por Colorimetria.

A fração argila dispersa em água, ADA, que corresponde à fração de partículas do solo com diâmetro inferior a 0,002 mm obtida com a dispersão em água destilada, na ausência de eletrólitos, foi obtida por pipetagem de alíquota da solução solo-água após sedimentação das demais frações.

3.6.2 Análises do efluente

Amostras de ESET foram coletadas antes da entrada na tubulação do sistema de irrigação por aspersão e nos tubos gotejadores e preservadas segundo a metodologia da APHA – AWWA (1999).

Depois de coletadas, as amostras foram mantidas em baixa temperatura (aproximadamente 4°C) e, no laboratório, cada amostra foi dividida em três subamostras: (A) não filtrada; (B) filtrada em microfibras de vidro com poro de 0,45 µm de diâmetro; (C) filtrada em membrana de éster-celulose com poro de 0,22 µm de diâmetro.

Nas subamostras (A) foram determinados os valores de pH, condutividade elétrica (CE), sólidos totais (ST), demanda bioquímica de oxigênio (DBO) e demanda química de oxigênio (DQO), conforme APHA (1994). As subamostras (B) foram preservadas com solução cloreto de mercúrio 30 mmol.L⁻¹ e mantidas em refrigeração até a análise química das concentrações de carbono orgânico dissolvido (COD), mediante o uso do equipamento Shimadzu TOC-5000A. O material particulado retido pela microfibras de vidro no processo de filtragem das subamostras (B) foi destinado à análise das concentrações de carbono total (CT) e nitrogênio total (NT). As subamostras (C) foram preservadas e mantidas de forma similar as subamostras (B), porém, foram destinadas as determinações analíticas de (i) K e Na, por espectrofotometria de emissão em chama (EEC); (ii) Boro (B), Al, Ca, Mg, por espectrometria de emissão óptica com plasma de argônio acoplado indutivamente (ICP-OES); (iii) Cloro (Cl⁻) por cromatografia líquida (CL).

3.6.3 Análises de solução do solo

A metodologia utilizada nas análises de solução do solo consistiu na obtenção dos extratos de saturação das amostras de TFSA, conforme descrito em van Raij et al. (2001). Os

procedimentos de preparo, conservação e determinações analíticas são equivalentes aos anteriormente descritos para as amostragens de efluente.

3.6.4 Análises da cana-de-açúcar

As amostras de tecido foliar foram submetidas a determinações dos teores totais de P, K, Ca, Mg, e Na. As concentrações de P, K, Ca, Mg e Na foram obtidas através de digestão nítrico-perclórica (SARRUGE et al., 1974) e leitura por EEC para K e Na; EAA-chama para Ca e Mg; Colorimetria para P. Os procedimentos para as quantificações analíticas nas amostras de colmo e caldo são semelhantes ao descrito para as amostras de folhas.

3.7 Análises Estatísticas

Os resultados obtidos nas diferentes determinações realizadas foram submetidos à análise de variância segundo o modelo em blocos. As análises estatísticas foram realizadas para cada parâmetro em cada camada de solo e de forma conjunta para as 3 épocas de coleta (para as amostras de solo e solução de solo), ou seja, considerando o tempo (época de avaliação) como subparcela. Para as demais determinações (teores de macronutrientes na folha, caldo e colmo), as análises consistiram na comparação dos tratamentos dentro da mesma época. As variáveis que apresentaram F significativos ($P < 0,05$) foram então submetidas ao teste de Tukey ($P < 0,05$) para comparação das médias. Todas as análises foram realizadas através do emprego do programa SAS - System for Windows 8.2 (SAS INSTITUTE, 1999). Foram realizadas também análises de correlações entre os teores no solo e na solução do solo para algumas variáveis de interesse.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Caracterização inicial do solo face à instalação do experimento

Como citado anteriormente, o solo da área experimental foi classificado como Latossolo Vermelho Distrófico típico (IBRAHIM, 2002). De acordo com Embrapa (1999b) os Latossolos são, caracteristicamente, sistemas em avançado estágio de pedogênese, constituídos de uma mineralogia simples (caolinita, óxidos de ferro e alumínio e quartzo), altamente resistente à alteração. São normalmente solos ácidos, de baixa CTC, baixa saturação por bases, distróficos, típicos de regiões tropicais sujeitas a um intenso intemperismo.

Na tabela 1 são apresentados os principais atributos do solo na área experimental, determinados a fim de se caracterizar o estado químico, físico e físico-químico do solo antes da implantação do experimento.

O solo apresentava acidez média-elevada, altos teores de Ca, baixos teores de Mg, teores médios de K, ocorrência de alumínio em profundidade, presença de Na e saturação crescente do mesmo ao longo do perfil, ocorrência de argila dispersa em água ao longo de todo o perfil, baixas concentrações de CT e NT, baixas concentrações de sais (CE), teores elevados de B, teores médios de micronutrientes, baixa capacidade de troca de cátions (CTC) e baixa saturação de bases (V%).

Muitas das características descritas evidenciam as alterações provocadas pela experimentação anteriormente conduzida na área, em especial a presença de Na trocável, ocorrência de argila dispersa em água e saturação de sódio ao longo de todo perfil (Tabela 1).

Tabela 1 - Caracterização química e física inicial do solo na instalação do experimento

Camadas	pH	H + Al	Al ⁺³	P	Ca ⁺²	Mg ⁺²	K ⁺	Na ⁺	SB	CTCe	CTC	V	m	PST
cm	CaCl ₂	mmol _c kg ⁻¹		mg kg ⁻¹				mmol _c kg ⁻¹					%	
0-10	5,09	15,45	0,92	17,30	12,68	3,48	3,04	0,74	19,94	20,86	35,39	56,34	2,59	2,09
10-20	5,23	14,99	0,81	15,48	13,16	3,57	2,43	1,46	20,62	21,43	35,61	57,90	2,27	4,09
20-40	4,92	15,87	1,83	4,07	10,25	3,57	1,78	2,51	18,11	19,94	33,98	53,29	5,38	7,38
40-60	4,55	21,78	4,01	1,05	6,18	2,29	1,25	2,79	12,51	16,52	34,29	36,48	11,69	8,13
60-80	4,47	20,2	5,05	0,77	8,11	2,22	1,19	2,66	14,18	19,23	34,38	41,24	14,68	7,73
80-100	4,44	17,08	5,55	0,88	6,56	2,09	1,23	2,32	12,20	17,75	29,28	41,66	18,95	7,92
	CT	NT	B	Cu	Fe	Mn	Zn	CE	Areia	Silte	Argila	ADA	GDA	Textura
	g kg ⁻¹				mg kg ⁻¹			dS m ⁻¹		g kg ⁻¹			%	
0-10	6,05	0,52	0,65	0,52	21,53	3,02	1,24	0,66	774,5	90,0	135,3	3,14	23,20	Franc Are
10-20	6,39	0,55	0,65	0,68	20,95	2,70	1,52	0,42	775,2	77,7	146,9	4,56	31,04	Franc Are
20-40	5,11	0,43	0,61	0,35	15,48	1,71	0,29	0,21	732,1	75,5	192,2	5,66	29,44	Franc Are
40-60	4,12	0,35	0,39	0,52	10,38	1,16	0,18	0,19	707,5	65,3	227,1	6,54	28,79	Franc Arg Are
60-80	3,48	0,28	0,45	0,44	6,44	1,10	0,14	0,24	701,6	67,1	231,1	6,51	28,16	Franc Arg Are
80-100	2,86	0,23	0,55	0,39	4,60	1,09	0,10	0,18	695,4	80,0	224,4	4,22	18,80	Franc Arg Are

SB (Soma de bases) = Ca + Mg + K + Na

CTCe (Capacidade de troca de cátions efetiva) = SB + Al

CTC (Capacidade de troca de cátions a pH 7) = SB + H + Al

V (Saturação por bases) = SB*100/CTC

m% (Saturação por alumínio) = Al*100/CTC

PST (Percentual de Sódio Trocável) = Na*100/CTC

CT= Carbono Total

NT=Nitrogênio Total

CE = Condutividade Elétrica no Extrato Aquoso

GDA (Grau de Dispersão de Argilas) = ADA*100/Argila Total

Textura = Classificação Textural (Franc Are = Franco Arenosa; Franc Arg Are = Franco Argilo Arenosa)

4.2 Caracterização química do efluente de esgoto utilizado na irrigação

As características do efluente secundário de esgoto tratado (ESET) utilizado na irrigação da cana-de-açúcar ao longo do período experimental são apresentadas na Tabela 2. A fim de se comparar às características do efluente com os valores normalmente verificados para este tipo de resíduo em revisões internacionais especializadas, são apresentados, na mesma tabela, alguns valores de referência descritos em Feigin et al. (1991) e Pescod (1992).

No presente estudo os constituintes do ESET variaram ao longo das estações do ano, em particular durante o verão, estação das chuvas na Região Noroeste do Estado de São Paulo (Tabela 2). As alterações principais ocorreram nas concentrações de Ca, K e Na, as quais foram maiores na época do inverno. Fonseca (2005), irrigando capim-Tifton durante dois anos num experimento conduzido com ESET proveniente da mesma estação de tratamento de esgotos, igualmente relata uma variação das concentrações dos constituintes químicos conforme a época do ano. Esta variação é atribuída aos efeitos de diluição ocasionados pelas chuvas de verão. As concentrações de Na, B e Cl, bem como os valores de pH encontram-se dentro das faixas de variação normalmente verificadas nas revisões internacionais (Tabela 2). As concentrações médias de CE, Ca, Mg e K encontram-se abaixo dos valores de referência (Tabela 2). Já as concentrações de RAS se encontram acima da faixa de valores apresentada.

Tabela 2 - Resultados das análises químicas do ESET e comparação com valores de referência disponíveis na literatura especializada

Constituintes	Efluente					Valores de Referência	Fonte
	Primavera	Verão	Outono	Inverno	Média		
pH	7,69	7,96	7,53	7,69	7,71	6,5 a 8,4	Pescod (1992)
CE (dS m ⁻¹)	0,79	0,90	0,90	0,79	0,84	1,0 a 3,1	Pescod (1992)
Ca (mg L ⁻¹)	7,63	6,54	7,63	8,21	7,50	20 a 120	Feigin et al. (1991)
Mg (mg L ⁻¹)	1,17	1,99	2,17	1,75	1,77	10 a 50	Feigin et al. (1991)
K (mg L ⁻¹)	13,38	10,77	11,19	14,01	12,33	10 a 40	Feigin et al. (1991)
Na (mg L ⁻¹)	129,82	110,74	108,90	134,68	121,03	50 a 250	Feigin et al. (1991)
Al (mg L ⁻¹)	0,005	0,013	0,007	0,009	0,009	-	-
B (mg L ⁻¹)	0,093	0,096	0,17	0,23	0,14	0 a 1	Feigin et al. (1991)
Cl (mg L ⁻¹)	58,09	66,48	66,55	74,32	66,36	40 a 200	Feigin et al. (1991)
RAS (mmol L ⁻¹) ^{0,5}	11,57	9,73	8,94	11,12	10,34	4,5 a 7,9	Feigin et al. (1991)

A Tabela 3 apresenta uma classificação adaptada de Pescod (1992) quanto à qualidade e restrição de uso da água de irrigação na agricultura, baseada em grande parte nos parâmetros de salinidade, sodicidade e toxicidade de alguns íons. Apesar da classificação aqui oferecida ser bastante generalista, pois não leva em consideração parâmetros igualmente importantes na definição da qualidade e adequação da água de irrigação, tais como as condições climáticas locais, natureza química e física do solo, cultivos agrícolas empregados e sua tolerância ao estresse salino, além do conjunto das práticas de manejo adotadas (PESCOD, 1992), ela ainda assim é útil na medida em que fornece uma idéia sobre a adequação do uso do efluente na irrigação.

Tabela 3 - Classificação quanto á qualidade de uso da água de irrigação por superfície, adaptado de Pescod (1992)

Possíveis limitantes a irrigação	Grau de Restrição de Uso		
	Nenhum	Leve a Moderado	Severo
Salinidade			
CE (dS m ⁻¹)	< 0,7	0,7 a 3,0	> 3,0
Infiltração			
RAS = 0 a 3 e CE	> 0,7	0,7 a 2,0	< 0,2
3 a 6	> 1,2	1,2 a 0,3	< 0,3
6 a 12	> 1,9	1,9 a 0,5	< 0,5
12 a 20	> 2,9	2,9 a 1,3	< 1,3
20 a 40	> 5,0	5,0 a 2,9	< 2,9
Toxicidade específica			
Aspersão - Na mg L ⁻¹	< 69	> 69	
Irrigação de Superfície - RAS	< 3,0	3 a 9	> 9,0
Cl (mg L ⁻¹)			
Irrigação de Superfície	< 142	142 a 355	> 355
B (mg L ⁻¹)	< 0,7	0,7 a 3,0	> 3,0
pH	Faixa Normal 6,5 a 8,4		

Comparando-se os resultados das análises químicas do efluente com os parâmetros de qualidade considerados na Tabela 3 efetuou-se a classificação do ESET quanto a sua adequação a irrigação da cultura da cana-de-açúcar (Tabela 4).

A cana-de-açúcar pertence, a fim de caracterizar sua resposta a qualidade da água de irrigação, ao grupo das culturas moderadamente sensíveis a salinidade e semi-tolerantes aos teores de Na trocável (PESCOD, 1992).

Tabela 4 - Classificação da qualidade do efluente utilizado segundo os critérios de referência estabelecidos em Pescod (1992)

Parâmetro	Efluente			
	Primavera	Verão	Outono	Inverno
Salinidade CE (dS m ⁻¹)	L-M	L-M	L-M	L-M
Infiltração RAS e CE	L-M	L-M	L-M	L-M
Toxicidade específica				
Na	L-M	L-M	L-M	L-M
Irrigação de Superfície - RAS	SV	SV	SV	SV
Cl (mg L ⁻¹)	SR	SR	SR	SR
B (mg L ⁻¹)	SR	SR	SR	SR
pH	N	N	N	N

L-M: Grau de restrição Leve a Moderado

SR: Sem restrição

SV: Grau de Restrição Severo

N: Valores dentro da faixa de variação normal

Com relação ao parâmetro salinidade o ESET apresentou grau de restrição bastante próximo ao limite inferior da classe de restrição leve-moderado em todas as estações do ano. É importante acrescentar que valores moderados de CE, da ordem de 0,7 a 3,0 dS m⁻¹, ainda permitem que se atinja o máximo potencial produtivo, desde que mantido os devidos cuidados quanto aos limites toleráveis pela cultura (PESCOD, 1992).

Os efeitos da irrigação com efluente nas taxas de infiltração e na permeabilidade do solo dependem diretamente das concentrações relativas dos íons Na⁺, Ca⁺² e Mg⁺², agregados e expressos pela RAS (razão de adsorção de sódio) em conjunto com a concentração salina, expressa, por sua vez, através da CE (condutividade elétrica). Para um dado valor de RAS, quanto maior a CE da água de irrigação menor será o efeito negativo na permeabilidade do solo. No presente estudo, o grau de restrição da água de irrigação quanto à infiltração situou-se, em geral, na faixa de restrição leve à moderada, em razão dos valores intermediários de RAS e de CE.

Quanto às concentrações de Na, os elevados teores presentes no efluente situam-no na faixa de restrição variando entre moderado a severo. Conforme observado por Fonseca (2005), do ponto de vista agrônomo, esta característica em conjunto com alta RAS, baixa CE e baixa

relação Ca:Mg, comuns nesta classe de resíduos, constituem-se num dos principais limitantes à viabilidade de seu uso no sistema solo.

As concentrações dos íons Cl e B situaram-se bem abaixo das médias mundiais, não apresentando qualquer grau de restrição ao uso agrícola deste efluente, fator este bastante desejável.

Os valores de pH, ligeiramente alcalinos em todas as estações do ano, situam-se dentro da faixa de variação considerada normal. Valores anormais de pH (<6,5 e > 8,4) para a água de irrigação, resultariam na prática, em pouco ou nenhum efeito prejudicial ao sistema solo, podendo representar entretanto, em razão de sua corrosividade, sério risco a integridade dos equipamentos utilizados na irrigação, fazendo-se necessário, portanto, monitorá-lo e eventualmente, caso se faça necessário, corrigi-lo (PESCOD, 1992).

A precipitação pluvial, bem como as lâminas de irrigação com ESET aplicadas nos diferentes tratamentos durante todo o período experimental são apresentadas na Figura 3.

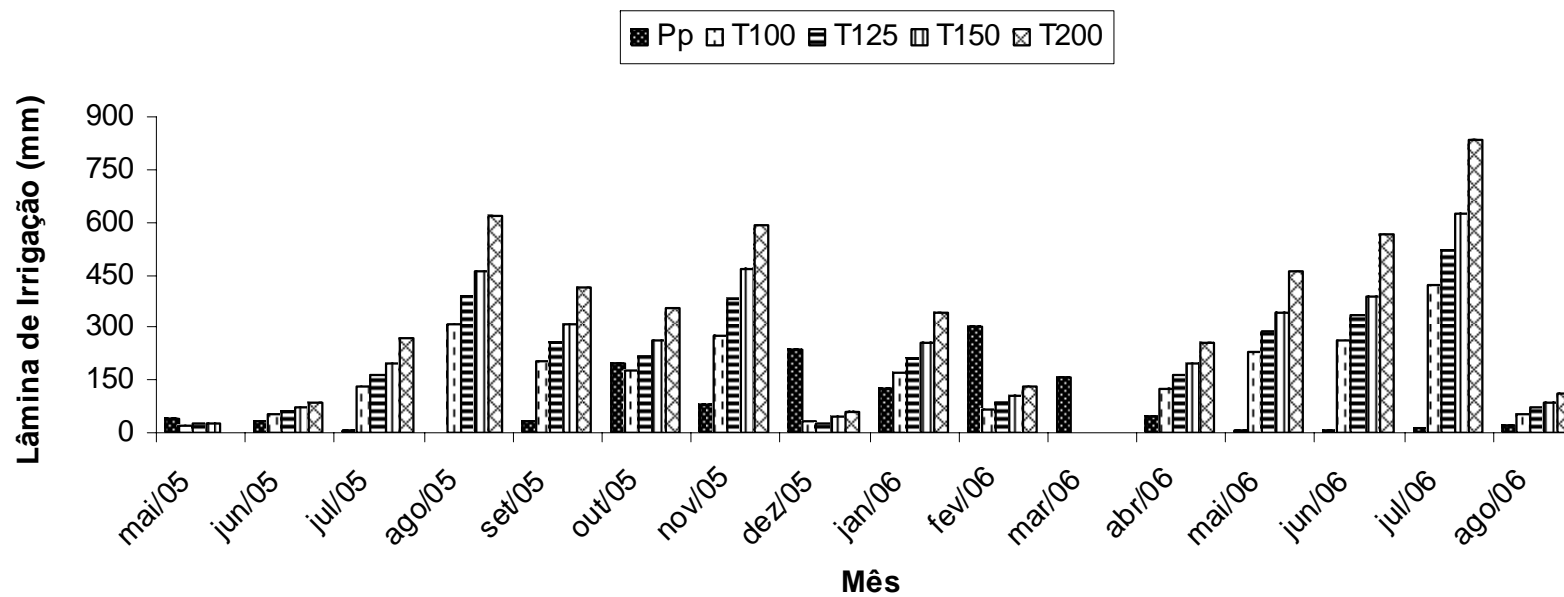


Figura 3 – Lâminas mensais de precipitação pluvial e de irrigação aplicadas durante a duração do experimento (início dia 18/05/2005 e término dia 10/08/2006). Pp: precipitação pluvial, T100: Irrigação com ESET, 100% da umidade ideal; T125, T150 e T200: Irrigação com ESET, 25, 50 e 100% a mais da umidade ideal

Ao longo da duração do período de irrigação com ESET a precipitação pluvial foi da ordem de 1290 mm, estando dentro da faixa de valores normalmente obtidas na estação experimental para precipitação anual, de 1100 a 1300 mm. Mesmo considerando as chuvas no período, o volume de irrigação aplicado foi bastante significativo, uma vez que o tratamento T100, considerado como a lâmina de irrigação adequada às necessidades da cultura, resultou num volume irrigado de 2520 mm. Muito provavelmente este elevado volume de irrigação aplicado está associado às temperaturas elevadas que ocorrem na região, bem como a baixa capacidade de retenção de água do solo local, visto seu baixo conteúdo de matéria orgânica e textura média (ver Tabela 1).

Os tratamentos empregados corresponderam a proporções crescentes de irrigação com ESET, assim, naturalmente, os diferentes volumes aplicados resultaram num aporte de nutrientes proporcionalmente crescentes e consideravelmente distintos (Tabela 5).

Tabela 5 - Aporte médio de nutrientes ocorrido durante o período experimental

Constituinte	Tratamentos			
	T100	T125	T150	T200
	kg ha⁻¹			
Ca	189,35	239,21	287,4	381,97
Mg	44,68	56,45	67,83	90,14
K	311,29	393,26	472,53	627,87
Na	3055,68	3860,28	4638,32	6163,18
B	0,22	0,28	0,34	0,45
Al	3,53	4,46	5,36	7,13

T100: 50% N mineral + irrigação com efluente secundário de esgoto tratado na dose 100%

T125: 50% N mineral + irrigação com efluente secundário de esgoto tratado na dose 125%

T150: 50% N mineral + irrigação com efluente secundário de esgoto tratado na dose 150%

T200: 50% N mineral + irrigação com efluente secundário de esgoto tratado na dose 200%

A irrigação com efluente, além de ser fonte de umidade permanentemente disponível a cultura, resulta numa adição considerável dos principais nutrientes essenciais ao pleno desenvolvimento vegetal, Ca, Mg e K, entretanto, ao mesmo tempo, também representa adições ao sistema solo-planta de elementos indesejáveis, tal como o Na (Tabela 5), o que pode, por sua

vez, comprometer a integridade das propriedades do solo, bem como a estabilidade do rendimento dos cultivos no longo prazo. Embora não tenha sido aqui abordado, os efluentes de esgoto domésticos também possuem uma alcalinidade geralmente maior do que outras fontes de água de irrigação, onde a adição dos íons HCO_3^- e CO_3^{2-} pode potencializar os efeitos adversos do Na em razão da formação de precipitados contendo Ca e Mg (FEIGIN et al., 1991).

4.3 Efeito da Irrigação com efluente na produtividade da cultura

A produtividade média obtida para os diferentes tratamentos no primeiro corte variou significativamente (Figura 4). Nos tratamentos que receberam irrigação com ESET a produtividade foi expressiva, diferindo consideravelmente da obtida no tratamento sem irrigação e sem adubação nitrogenada (TSI) (Figura 4), exceção feita ao tratamento T125, equivalente ao tratamento TSI a 5% de probabilidade.

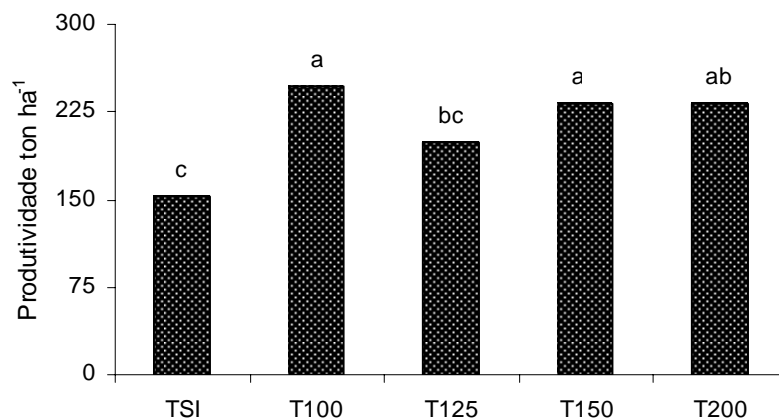


Figura 4 - Efeito dos diferentes tratamentos na produtividade da cana-de-açúcar (1º corte). Médias seguidas da mesma letra não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey a 5%

As elevadas produtividades obtidas nos tratamentos com irrigação de efluente doméstico devem-se a associação positiva de diferentes práticas de manejo adotadas: (i) adubação mineral; (ii) baixa incidência de pragas, doenças e competição com plantas daninhas; (iii) irrigação.

Segundo estimativa do Instituto FNP, a produtividade média brasileira na safra 05/06 de cana de ano de 1º corte e de ano e meio, como a variedade aqui empregada, foi de aproximadamente 107,50 ton ha⁻¹ (AGRIANUAL, 2006). Considerando-se este dado, é razoável afirmar que, muito provavelmente, grande parte das elevadas produtividades obtidas nos

tratamentos irrigados estão relacionadas ao contínuo fornecimento de umidade, propiciando condições ideais ao pleno crescimento vegetativo.

A histórica tradição canavieira brasileira aliada ao clima favorável, baixo custo e ampla disponibilidade de terra e de mão-de-obra, respondem pelo cultivo extensivo de sequeiro predominante em todas as regiões produtoras do país, colhendo-se de 6 a 8 cortes e com uma produtividade média na faixa de 75 a 90 ton ha⁻¹ na Região Centro-Sul (AGUIAR, 2006).

Considerando-se o potencial biológico da cana e condições ideais de cultivo, através de uma combinação otimizada de diversos fatores produtivos, tais como adubação, irrigação e resistência varietal, poderiam-se obter produtividades potenciais bastante elevadas, de até 345 ton ha⁻¹ (AGUIAR, 2006).

Em experimento com cana irrigada por gotejo subterrâneo, realizado pela empresa Netafim e conduzido na Usina São Martinho, no município de Pradópolis-SP, Aguiar (2006) relata aumento na longevidade da cultura e produtividade média de 155 ton ha⁻¹ ao longo de 8 cortes.

Os resultados obtidos até o presente momento, confirmam e evidenciam as considerações de Aguiar (2006) a respeito das perspectivas e possibilidades futuras da fertirrigação para a agroindústria canavieira, particularmente em regiões de terras caras e de elevada competitividade, tal qual o Estado de São Paulo, enfatizando ainda o enorme potencial dos sistemas de irrigação que na prática se mostrarem mais eficientes e econômicos, tal como o gotejo subterrâneo.

Entretanto, apesar da expressiva produtividade obtida neste primeiro momento, é necessário enfatizar que apenas o monitoramento num prazo maior poderá fornecer informações mais consistentes a respeito da capacidade do sistema solo-planta em se manter viável e produtivo, face ao incremento dos parâmetros relacionados à salinidade/sodicidade do solo pela contínua utilização do ESET.

Ademais, é razoável se esperar que, a menos que práticas de manejo da salinidade/sodicidade do solo sejam efetivamente implementadas, a produtividade não se sustentará em patamares tão elevados ao longo dos próximos ciclos produtivos.

4.4 Absorção e extração de nutrientes pela cana-de-açúcar

4.4.1 Colmo

No intuito de se comparar às extrações de nutrientes através da colheita de colmos obtidas no presente estudo com os valores de referência disponíveis para a cultura da cana, são apresentados, Tabela 6 e Figura 5, as respectivas quantificações dos teores de nutriente no colmo seguidas dos valores orientadores descritos na literatura técnico-científica.

Tabela 6 - Extração de Nutrientes pelo Colmo

Constituintes	Tratamentos kg ton colmo ⁻¹					Valores de referência (kg ton colmo ⁻¹) Demattê 2005
	TSI	T100	T125	T150	T200	
Ca	0,33 b	0,50 a	0,36 ab	0,41 ab	0,43 ab	0,5 a 0,67
Mg	0,52 a	0,65 a	0,65 a	0,65 a	0,67 a	0,33 a 0,51
K	6,69 a	7,39 a	7,46 a	6,88 a	6,63 a	0,99 a 1,49
Na	3,82 a	1,85 b	2,04 b	2,29ab	2,47 ab	-
P	0,57 a	0,61 a	0,63 a	0,68 a	0,70 a	0,08 a 0,30

TSI: sem irrigação e sem aporte de N via fertilização mineral

T100: 50% N mineral + irrigação com efluente secundário de esgoto tratado na dose 100%

T125: 50% N mineral + irrigação com efluente secundário de esgoto tratado na dose 125%

T150: 50% N mineral + irrigação com efluente secundário de esgoto tratado na dose 150%

T200: 50% N mineral + irrigação com efluente secundário de esgoto tratado na dose 200%

Letras iguais maiúsculas ou minúsculas nas linhas não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey (P<0,05).

Os tratamentos empregados não ocasionaram alterações significativas nos teores de Mg, P e Na no colmo. Na totalidade dos tratamentos, as extrações de Mg e P pelo colmo estiveram acima dos valores de referência relatados na literatura técnico-científica. Já os valores de K estiveram, apesar de semelhantes em todos os tratamentos, bastante acima do que seria esperado.

Ocorreram alterações significativas nas concentrações de Ca no colmo, com teores mais elevados no T100 do que no TSI, sem irrigação. Comparando-se os tratamentos irrigados com ESET, T100 a T200, não ocorrem diferenças entre os mesmos. As extrações de Ca, ao contrário do ocorrido para Mg e P, estiveram abaixo dos valores geralmente relatados nos trabalhos da literatura especializada.

A cultura da cana-de-açúcar é grande extratora de nutrientes do solo. As quantidades extraídas naturalmente vão depender de diversos fatores, dentre eles, em especial: solos, variedades e condições climáticas (DEMATTE, 2005).

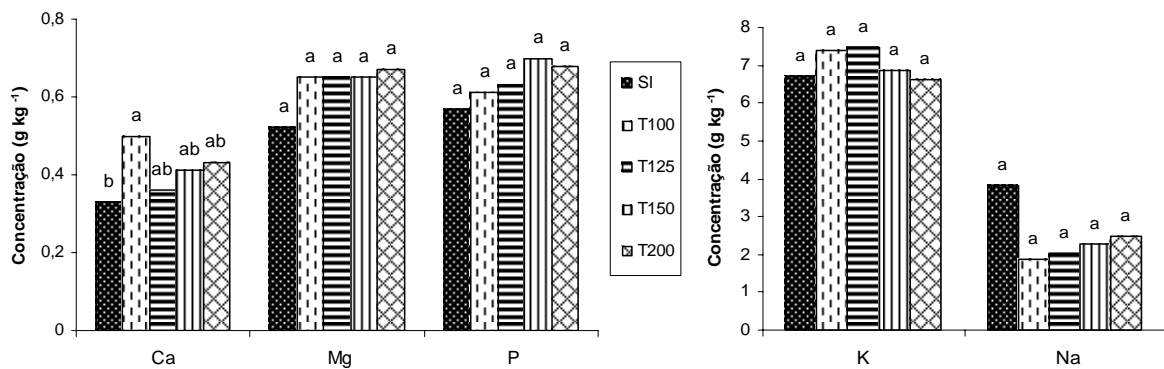


Figura 5 - Concentração de macronutrientes (Ca, Mg, P, K e Na) no colmo da cana-de-açúcar em função dos tratamentos empregados. Para cada elemento, médias seguidas das mesmas letras não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5%

4.4.2 Teores Foliare

Os tratamentos empregados não alteraram os teores foliares de Ca, Mg e P em nenhuma das duas amostragens realizadas (Figura 6). Os teores foliares dos respectivos cátions encontram-se dentro da faixa de variação de teores considerados adequados para a nutrição da cultura da cana-de-açúcar, descritos por van Raij et al. (1996). Diferentemente dos demais cátions, os teores foliares de K, nos tratamentos que receberam aporte de efluente, foram ligeiramente superiores na segunda coleta de folhas quando comparados com a primeira (Figura 6). Tal efeito, apesar de não significativo, provavelmente está relacionado ao contínuo aporte de K via efluente, efeito igualmente relatado por Chiba (2005) em experimentação conduzida num Argissolo cultivado com cana e submetido a aplicações de diferentes doses de lodo de esgoto.

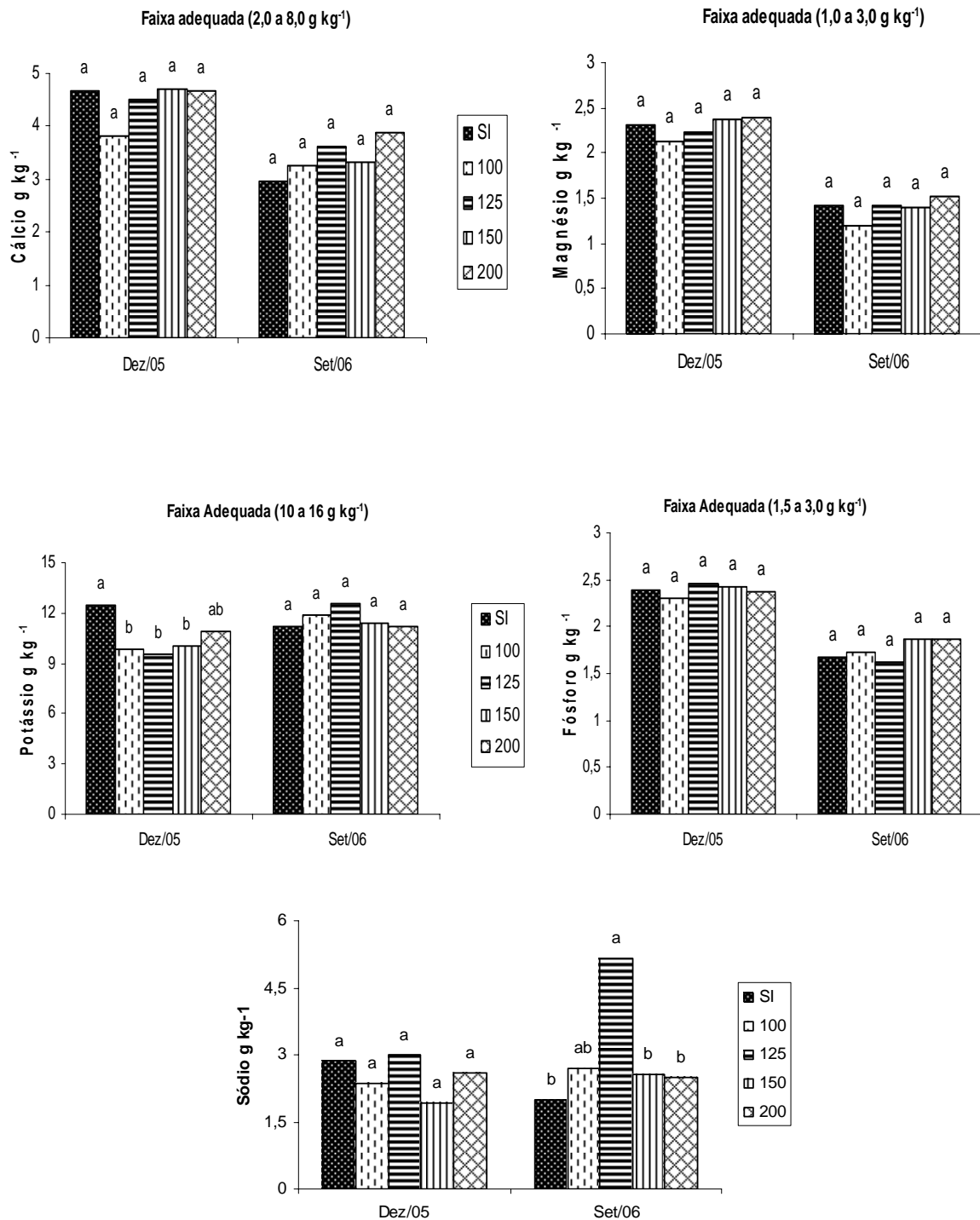


Figura 6 - Concentração de macronutrientes (Ca, Mg, K, P e Na) na folha de cana-de-açúcar em função dos tratamentos empregados. Amostragens em 2 períodos distintos. Para cada elemento, médias seguidas das mesmas letras não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5%

Com relação aos teores foliares de Na, igualmente, os tratamentos empregados resultaram em pequenas alterações, ocasionando diferenças significativas apenas para o T125 na segunda coleta de folhas (Figura 6). O T125 teve um comportamento bastante diferenciado, inclusive quando comparado com os demais tratamentos que receberam volumes ainda maiores de irrigação com efluente. Porém, os demais tratamentos irrigados não resultaram em alterações estatisticamente significativas nos teores foliares de Na quando comparados ao tratamento sem irrigação (Figura 6). Considerando que os tratamentos T100 a T200 receberam, ao longo de todo o experimento, aportes de Na da ordem de 3 a 6 toneladas por hectare, é bastante evidente o fato de que a cultura é muito eficiente na absorção seletiva e manutenção de um equilíbrio adequado da concentração de cátions em seus tecidos. Assim, apesar dos teores significativamente mais elevados de Na solúvel nos tratamentos onde se aplicou ESET (ver Tabela 23 no item 4.6.2) a cultura da cana foi, fisiologicamente, eficiente na exclusão do mesmo.

4.4.3 Teores no Caldo

Alterações em razão dos tratamentos empregados somente ocorreram para os elementos Ca e P (Figura 7). Quanto aos teores de Ca, os tratamentos com irrigação de efluente não diferiram entre si, entretanto, estes mesmos tratamentos apresentaram teores de Ca significativamente mais elevados do que o TSI onde não se irrigou com ESET. As únicas diferenças significativas para o P se deram entre os tratamentos TSI e T200, com teores mais elevados de P neste último (Figura 7). A respeito dos teores de P no caldo, é interessante colocar que, em todos os tratamentos empregados, as concentrações estiveram dentro do considerado adequado para uma boa clarificação do caldo ($131 \text{ mg L}^{-1} \text{ P}$) (HUGOT, 1977 apud CHIBA, 2005) e/ou para a fermentação alcoólica ($100 \text{ mg L}^{-1} \text{ P}$) (AMORIN, 1985 apud CHIBA, 2005).

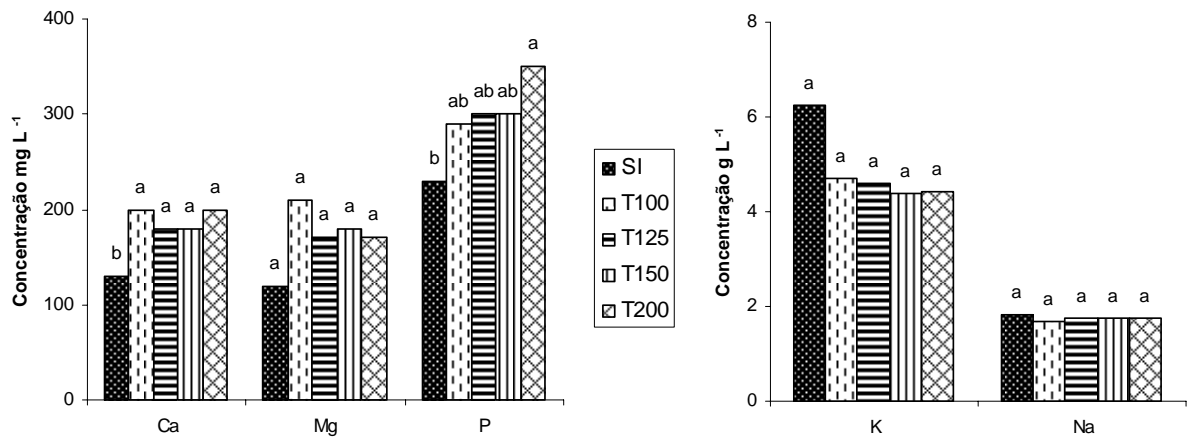


Figura 7 - Concentração de macronutrientes (Ca, Mg, P, K e Na) no caldo da cana de 1º corte. Para cada elemento, médias seguidas das mesmas letras não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5%

4.5 Efeito da irrigação com efluente de esgoto na química do solo

4.5.1 Acidez do solo

Os tratamentos aplicados resultaram em diferenças no pH do solo apenas nas camadas 40-60 e 80-100 cm (Tabela 7). Nestas camadas as variações de pH ocorreram exclusivamente entre o tratamento com o maior volume de efluente aplicado, T200, e o tratamento sem aporte de efluente, TSI, resultando, respectivamente, em maiores e menores valores de pH.

Houve diferenças nos valores de pH com relação às épocas de amostragem (Tabela 7). Os valores de pH foram significativamente maiores por conta da última amostragem de solo, quando em comparação com a segunda amostragem, exceto para a camada 40-60 cm (Tabela 7). Até a camada de 20-40 cm os valores de pH da última amostragem foram maiores do que os valores obtidos na amostragem inicial, sendo que, a partir de então, os valores da última amostragem foram próximos aos da amostragem inicial, apesar de superiores aos da segunda coleta (Tabela 7). Nas camadas 60-80 e 80-100 cm ocorreu uma ligeira acidificação por ocasião da segunda coleta seguida, posteriormente, de uma ligeira alcalinização (Tabela 7).

Tabela 7 - Efeito da irrigação com efluente no pH CaCl₂ do solo

(continua)

Tratamento	Época de Amostragem			Média
	Fev/05	Dez/05	Set/06	
Camada 0-10 cm (CV= 5,86 %)				
TSI	4,96	4,67	4,56	4,73^a
T100	4,97	4,97	5,55	5,16^a
T125	5,15	5,21	5,70	5,35^a
T150	4,78	4,85	5,51	5,04^a
T200	5,58	5,38	5,81	5,59^a
Média	5,08^B	5,01^B	5,42^A	
Camada 10-20 cm (CV= 4,73%)				
TSI	5,09	4,85	5,03	4,99^a
T100	5,18	5,07	5,63	5,29^a
T125	5,25	4,94	5,48	5,22^a
T150	4,98	4,95	5,52	5,15^a
T200	5,67	5,43	5,77	5,62^a
Média	5,23^B	5,04^B	5,48^A	
Camada 20-40 cm (CV = 5,18%)				
TSI	4,62	4,65	4,51	4,59^a
T100	5,02	4,85	5,45	5,10^a
T125	4,61	4,95	4,89	4,81^a
T150	4,76	4,85	5,45	5,02^a
T200	5,58	5,3	5,30	5,39^a
Média	4,91^B	4,92^B	5,12^A	
Camada 40-60 cm (CV= 4,90%)				
TSI	4,35	4,17	3,98	4,16^b
T100	4,53	4,45	4,60	4,52^{ab}
T125	4,46	4,24	4,34	4,34^{ab}
T150	4,57	4,35	4,70	4,54^{ab}
T200	4,84	4,71	4,79	4,78^a
Média	4,55^A	4,38^A	4,48^A	
Camada 60-80 cm (CV= 4,31%)				
TSI	4,30	4,1	4,18	4,19^a
T100	4,35	4,3	4,51	4,38^a
T125	4,37	4,25	4,33	4,31^a
T150	4,49	4,39	4,66	4,51^a
T200	4,87	4,40	4,80	4,69^a
Média	4,47^A	4,28^B	4,49^A	

Tabela 7 - Efeito da irrigação com efluente no pH CaCl₂ do solo

Tratamento	Época de Amostragem			Média
	Fev/05	Dez/05	Set/06	
Camada 80-100 cm (CV= 3,87%)				
TSI	4,27	4,02	3,96	4,08^b
T100	4,30	4,32	4,37	4,33^{ab}
T125	4,45	4,27	4,41	4,37^{ab}
T150	4,45	4,40	4,64	4,49^{ab}
T200	4,73	4,47	4,83	4,67^a
Média	4,44^A	4,29^B	4,44^A	

TSI: sem irrigação e sem aporte de N via fertilização mineral

T100: 50% N mineral + irrigação com efluente secundário de esgoto tratado na dose 100%

T125: 50% N mineral + irrigação com efluente secundário de esgoto tratado na dose 125%

T150: 50% N mineral + irrigação com efluente secundário de esgoto tratado na dose 150%

T200: 50% N mineral + irrigação com efluente secundário de esgoto tratado na dose 200%

Letras iguais maiúsculas ou minúsculas nas linhas e nas colunas não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey (P<0,05).

Dentre os resultados obtidos na literatura, Smith et al. (1996) em experimento de longa duração na Austrália, monitorando duas distintas áreas que receberem irrigação com efluente secundário de esgoto municipal por 4 e 17 anos, obtiveram aumentos estatisticamente significativos do pH do solo em ambos os locais, relacionando este fato, em especial, com o pH alcalino apresentado pelo efluente utilizado na irrigação (7,0 - 10,2).

Fonseca (2005) apresenta os diversos fatores responsáveis por aumentos de pequena magnitude no pH de solos ácidos em razão da irrigação com ESET, atribuindo estes aumentos a: (i) alcalinidade do efluente; (ii) adição de cátions trocáveis e de ânions presentes na composição química do resíduo; (iii) alterações na dinâmica da ciclagem de N, adicionando íons OH⁻ no sistema solo devido a desnitrificação e/ou redução de nitrato.

Gloaguen et al. (2007), estudando a química de solo e de solução num experimento com milho e girassol conduzido na mesma área experimental e com efluente proveniente da mesma estação de tratamento de esgoto, obteve aumentos de pH da ordem de 0,5-1,0 tanto em superfície quanto em sub-superfície após 1 ano de experimento.

É importante acrescentar que as alterações de pH aqui obtidas foram de pequena magnitude, traduzindo-se em pouca ou nenhuma significância agrônômica quanto a disponibilização de nutrientes aos cultivos agrícolas. A este respeito, portanto, a calagem permanece como a melhor e mais adequada prática de correção da acidez do solo, contribuindo

sobremaneira aos aumentos de produtividade e dos rendimentos agrícolas nos solos tropicais ácidos e de baixa fertilidade natural.

Por fim é importante aqui se fazer uma ressalva. As comparações entre o controle (TSI) e os tratamentos irrigados foram, em certa medida, prejudicadas pela não aplicação de nitrogênio nas parcelas sem irrigação, o que, por sua vez, ocorreu na intenção de se estudar futuramente a microbiota original nestas parcelas controle. Apesar desta não ser a situação ideal, haja vista que a adubação nitrogenada acidifica o solo através da liberação de quatro prótons H^+ para cada mol de NH_4^+ oxidado a NO_3^- , acredita-se que mesmo se a adubação nitrogenada tivesse sido realizada no controle, ainda assim os padrões de resposta seriam os mesmos, apenas a magnitude do processo poderia se alterar, resultando em diferenças mais pronunciadas entre o TSI e os tratamentos com aplicação de efluente.

Com relação à acidez potencial (H+Al), houve diferenças entre os tratamentos empregados nas camadas 20-40, 40-60 e 80-100 cm (Tabela 8). Nestas camadas o tratamento TSI apresentou as concentrações mais elevadas de H+Al, enquanto que o T200 apresentou as menores concentrações de H+Al (Tabela 8), atribuindo-se estas diferenças a relação direta e inversamente proporcional existente entre pH e acidez potencial. Dessa forma, as diferenças nos valores de pH entre os tratamentos nestas camadas são responsáveis pela maior ou menor neutralização da acidez potencial.

Considerando as épocas de amostragem apenas na camada 0-10 cm não houve variações ao longo do tempo. Em geral, os valores de H+Al aumentaram aos 9 meses após o plantio - segunda amostragem - posteriormente diminuindo por conta da última amostragem (Tabela 8). Estas alterações estão certamente relacionadas às mudanças relatadas anteriormente para os valores de pH entre as épocas de amostragem, sendo, portanto, o efeito alcalinizador do efluente o responsável pela neutralização dos teores de H+Al.

Tabela 8 – Efeito da irrigação com efluente nas concentrações de H + Al do solo

(continua)

Tratamento	Época de Amostragem			Média
	Fev/05	Dez/05	Set/06	
	mmol _c kg ⁻¹			
Camada 0-10 cm (CV= 18,74%)				
TSI	17,25	17,50	20,10	18,28^a
T100	15,35	16,70	14,50	15,51^a
T125	14,70	14,55	13,70	14,31^a
T150	15,80	14,85	13,55	14,73^a
T200	14,15	13,90	13,50	13,85^a
Média	15,45^A	15,5^A	15,07^A	
Camada 10-20 cm (CV= 16,08%)				
TSI	19,80	17,30	17,60	18,23^a
T100	13,55	18,05	13,10	14,90^a
T125	16,75	17,10	15,10	16,31^a
T150	15,35	15,55	13,30	14,73^a
T200	9,50	13,80	12,25	11,85^a
Média	14,99^{AB}	16,36^A	14,27^B	
Camada 20-40 cm (CV= 19,05%)				
TSI	19,65	20,85	22,80	21,1^a
T100	15,75	23,30	14,00	17,68^{abc}
T125	18,55	18,20	19,95	18,90^{ab}
T150	15,10	15,65	14,75	15,16^{bc}
T200	10,30	14,30	13,25	12,61^c
Média	15,87^B	18,46^A	16,95^{AB}	
Camada 40-60 cm (CV = 13,68%)				
TSI	25,60	21,90	18,25	21,91^{ab}
T100	20,60	25,70	14,90	20,4^{ab}
T125	25,00	26,40	17,25	22,88^a
T150	22,45	18,45	15,15	18,68^{ab}
T200	15,45	19,25	15,70	16,8^b
Média	21,82^A	22,34^A	16,25^B	
Camada 60-80 cm (CV = 16,38%)				
TSI	22,25	19,05	20,40	20,56^a
T100	16,90	19,55	14,90	17,11^a
T125	24,10	14,45	14,80	17,78^a
T150	19,20	13,60	16,05	16,28^a
T200	18,55	14,90	12,50	15,31^a
Média	20,2^A	16,31^B	15,73^B	

Tabela 8 – Efeito da irrigação com efluente nas concentrações de H + Al do solo

(conclusão)

Tratamento	Época de Amostragem			Média
	Fev/05	Dez/05	Set/06	
Camada 80-100 cm (CV = 16,98%)				
TSI	18,45	25,40	21,15	21,66^a
T100	16,20	24,90	15,20	18,76^{ab}
T125	18,25	22,70	16,70	19,21^{ab}
T150	17,40	22,70	14,10	18,06^{ab}
T200	15,10	20,70	13,00	16,26^b
Média	17,08^B	23,28^A	16,03^B	

TSI: sem irrigação e sem aporte de N via fertilização mineral

T100: 50% N mineral + irrigação com efluente secundário de esgoto tratado na dose 100%

T125: 50% N mineral + irrigação com efluente secundário de esgoto tratado na dose 125%

T150: 50% N mineral + irrigação com efluente secundário de esgoto tratado na dose 150%

T200: 50% N mineral + irrigação com efluente secundário de esgoto tratado na dose 200%

Letras iguais maiúsculas ou minúsculas nas linhas e nas colunas não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey (P<0,05).

Quanto às concentrações de Al trocável no solo ocorreram efeitos dos tratamentos nas camadas 20-40, 40-60 e 80-100 cm (Tabela 9). Nestas camadas, de maneira semelhante ao que foi anteriormente relatado para os valores de acidez potencial, a alteração mais pronunciada ocorreu entre o tratamento TSI e o tratamento com o maior volume aplicado de efluente, T200, obtendo-se, respectivamente, maiores e menores valores de Al trocável (Tabela 9).

Com relação às épocas de amostragem ocorreram efeitos nas concentrações de Al trocável somente em profundidade, nas camadas 60-80 e 80-100 cm. Em ambas os teores de Al trocável da última amostragem foram significativamente menores do que os valores obtidos na primeira amostragem (Tabela 9).

Apesar da relação inversamente proporcional entre pH e atividade de Al^{+3} , pequenas alterações nos valores de pH podem resultar em variações expressivas na atividade do Al. Estas variações são, provavelmente, parte da explicação para as altos coeficientes de variação obtidos. Igualmente importante para esta variação foi, sem dúvida, a relativa subjetividade quanto ao ponto de virada do indicador no momento da titulação do Al trocável com a solução de NaOH 0,025 mol L⁻¹, visto que as leituras nem sempre foram realizadas pela mesma pessoa.

Tabela 9 - Efeito da irrigação com efluente nas concentrações de Al trocável do solo

(continua)

Tratamento	Época de Amostragem			Média
	Fev/05	Dez/05	Set/06	
	mmol _c kg ⁻¹			
Camada 0-10 cm (CV= 29,19%)				
TSI	1,00	0,77	1,25	1,00^a
T100	1,20	1,00	0,77	0,99^a
T125	1,00	0,97	0,70	0,89^a
T150	0,87	0,92	0,77	0,85^a
T200	0,52	0,72	0,62	0,62^a
Média	0,91^A	0,87^A	0,82^A	
Camada 10-20 cm (CV = 33,46%)				
TSI	0,57	0,85	1,07	0,83^a
T100	0,70	0,92	0,97	0,86^a
T125	0,90	1,52	0,97	1,13^a
T150	0,85	0,92	0,67	0,81^a
T200	1,05	0,77	0,77	0,86^a
Média	0,81^A	0,99^A	0,89^A	
Camada 20-40 cm (CV = 41,33%)				
TSI	1,87	1,67	2,76	2,10^{ab}
T100	1,17	1,57	0,92	1,22^b
T125	3,82	1,72	3,45	2,99^a
T150	2,20	1,82	1,07	1,69^{ab}
T200	0,87	1,05	1,07	0,99^b
Média	1,83^A	1,56^A	2,12^A	
Camada 40-60 cm (CV = 37,52%)				
TSI	6,10	4,80	6,30	5,73^a
T100	3,77	3,87	2,30	3,31^{ab}
T125	4,55	5,67	4,30	4,84^{ab}
T150	3,80	4,02	1,95	3,25^{ab}
T200	1,85	1,77	1,35	1,65^b
Média	4,01^A	4,02^A	3,24^A	
Camada 60-80 cm (CV= 41,83%)				
TSI	6,95	5,92	5,95	6,27^a
T100	5,30	5,22	2,77	4,43^a
T125	5,12	6,27	4,22	5,20^a
T150	5,10	3,42	1,72	3,41^a
T200	2,77	2,77	1,15	2,23^a
Média	5,04^A	4,72^A	3,16^B	

Tabela 9 - Efeito da irrigação com efluente nas concentrações de Al trocável do solo

Tratamento	Época de Amostragem			Média
	Fev/05	Dez/05	Set/06	
mmol _c kg ⁻¹				
Camada 80-100 cm (CV = 23,91%)				
TSI	7,95	6,50	7,97	7,47^a
T100	5,90	4,57	3,30	4,59^{ab}
T125	5,27	4,57	4,27	4,70^{ab}
T150	5,32	3,17	1,62	3,37^b
T200	3,30	3,12	1,05	2,49^b
Média	5,54^A	4,38^B	3,64^B	

TSI: sem irrigação e sem aporte de N via fertilização mineral

T100: 50% N mineral + irrigação com efluente secundário de esgoto tratado na dose 100%

T125: 50% N mineral + irrigação com efluente secundário de esgoto tratado na dose 125%

T150: 50% N mineral + irrigação com efluente secundário de esgoto tratado na dose 150%

T200: 50% N mineral + irrigação com efluente secundário de esgoto tratado na dose 200%

Letras iguais maiúsculas ou minúsculas nas linhas e nas colunas não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey (P<0,05).

4.5.2 Cálcio, Magnésio e Potássio

Quanto aos teores de Ca trocável ocorreram diferenças entre os tratamentos nas camadas 0-10, 20-40 e 40-60 cm (Tabela 10). Nestas camadas, as diferenças consistiram num acúmulo significativamente maior de Ca trocável no tratamento T200 quando comparado ao tratamento TSI (Tabela 10). Tomando-se a última amostragem isoladamente, verificam-se, em geral, teores de Ca trocável mais elevados em todos os tratamentos que receberam irrigação com ESET em comparação ao tratamento TSI sem irrigação, sendo razoável esperar que estas diferenças se acentuem no longo prazo.

Houve efeitos das épocas de amostragem quanto às concentrações de Ca trocável no complexo de troca (Tabela 10). Comparando-se a segunda e a terceira amostragem ocorreram: (i) camadas superficiais (0-40 cm) → decréscimos significativos nos teores de Ca por conta da última amostragem; (ii) camadas sub-superficiais (40-100 cm) → acréscimos nos teores de Ca na última amostragem, apesar de estatisticamente não significativos.

Com o objetivo de efetuar o balanço entre as entradas e saídas do elemento no sistema efluente-solo-planta, considerou-se o aporte médio de Ca pela irrigação com ESET, a extração de Ca por tonelada de colmo normalmente relatada na literatura, entre 0,5-0,67 kg (DEMATTÊ, 2005) foram obtidos de 189 até 381 kg Ca ha⁻¹ como entrada do elemento pelo sistema efluente, e

uma saída (considerando o limite superior da faixa de valores de extração), pela produção de colmos, de 102 a 165 kg Ca ha⁻¹.

Por estes dados pode-se afirmar que o efluente correspondeu a uma fonte significativa de Ca a cana-de-açúcar, implicando, em todos os tratamentos irrigados, adições do nutriente em quantidades consideravelmente maiores do que a extração pela produção de colmos.

Esta explicação também se mostra adequada a fim de justificar os acréscimos em profundidade nos teores de Ca trocável (> 40 cm) ocorridos por conta da última amostragem.

Apesar da maior afinidade de troca do Ca no complexo trocável, o excesso de Na no sistema provavelmente resultou na lixiviação e deslocamento do elemento para as camadas mais profundas.

Falkiner e Smith (1997) relatam, após 4 anos de irrigação de uma cultura florestal de *Pinus radiata*, aumentos nas concentrações de Ca trocável pela irrigação com efluente, com um aporte médio anual de Ca via efluente de 230 kg ha⁻¹

Em acordo com o aqui exposto, Gloaguen et al. (2007), irrigando milho e girassol com ESET em experimento na mesma área, obteve, passados 24 meses da irrigação, diminuição nas concentrações de Ca trocável na profundidade de 5 cm de solo e acréscimo na profundidade de 100 cm.

Tabela 10 - Efeito da irrigação com efluente nas concentrações de Ca trocável do solo

(continua)

Tratamento	Época de Amostragem			Média
	Fev/05	Dez/05	Set/06	
	mmol _c kg ⁻¹			
Camada 0-10 cm (CV = 15,65%)				
TSI	11,40	11,81	9,08	10,76^b
T100	12,17	13,55	10,61	12,11^{ab}
T125	11,27	11,92	11,42	11,53^{ab}
T150	11,80	13,12	11,30	12,07^{ab}
T200	16,80	15,57	12,19	14,85^a
Média	12,68^A	13,19^A	10,92^B	
Camada 10-20 cm (CV = 12,41%)				
TSI	13,27	13,95	11,83	13,01^a
T100	11,82	14,31	10,28	12,13^a
T125	11,87	11,77	10,06	11,23^a
T150	11,90	11,36	10,72	11,32^a
T200	16,92	13,76	11,90	14,19^a
Média	13,15^A	13,03^A	10,95^B	
Camada 20-40 cm (CV = 22,85%)				
TSI	7,15	8,16	5,09	6,80^b
T100	12,22	9,70	8,69	10,20^{ab}
T125	8,72	10,15	6,79	8,55^{ab}
T150	9,55	10,82	8,59	9,65^{ab}
T200	13,57	11,67	8,07	11,10^a
Média	10,24^A	10,10^A	7,44^B	
Camada 40-60 cm (CV = 24,88%)				
TSI	3,90	4,30	2,58	3,59^b
T100	5,59	6,06	6,00	5,88^{ab}
T125	6,45	5,29	5,51	5,75^{ab}
T150	6,16	5,84	7,33	6,44^{ab}
T200	8,81	7,36	6,86	7,67^a
Média	6,18^A	5,77^A	5,65^A	
Camada 60-80 cm (CV = 31,93%)				
TSI	6,41	3,06	2,33	3,93^a
T100	7,78	4,80	7,31	6,63^a
T125	11,12	3,92	4,27	6,43^a
T150	5,13	5,02	7,11	5,75^a
T200	9,35	3,92	5,02	6,09^a
Média	7,96^A	4,14^B	5,21^B	

Tabela 10 - Efeito da irrigação com efluente nas concentrações de Ca trocável do solo

Tratamento	Época de Amostragem			Média
	Fev/05	Dez/05	Set/06	
mmol _c kg ⁻¹				
Camada 80-100 cm (CV = 24,59%)				
TSI	7,56	3,02	1,98	4,18^a
T100	7,02	5,13	5,24	5,79^a
T125	6,82	5,32	4,52	5,55^a
T150	5,10	4,69	4,82	4,87^a
T200	6,36	4,51	3,21	4,69^a
Média	6,57^A	4,53^B	3,95^B	

TSI: sem irrigação e sem aporte de N via fertilização mineral

T100: 50% N mineral + irrigação com efluente secundário de esgoto tratado na dose 100%

T125: 50% N mineral + irrigação com efluente secundário de esgoto tratado na dose 125%

T150: 50% N mineral + irrigação com efluente secundário de esgoto tratado na dose 150%

T200: 50% N mineral + irrigação com efluente secundário de esgoto tratado na dose 200%

Letras iguais maiúsculas ou minúsculas nas linhas e nas colunas não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey (P<0,05)

Os tratamentos empregados resultaram em alterações nos teores de Mg trocável somente na camada 40-60 cm (Tabela 11). Nesta camada o tratamento T200 resultou em maior acúmulo do nutriente quando em comparação com as concentrações obtidas no tratamento TSI (Tabela 11). Este aumento pode ser explicado pelo considerável aporte de Mg via efluente ocorrido ao longo do experimento no tratamento T200, 90 kg ha⁻¹. Apesar das diferenças estatisticamente significativas terem ocorrido apenas na camada 40-60 cm, a explicação anteriormente dada é sustentada pelas concentrações mais elevadas de Mg trocável para o tratamento T200 em todas as camadas estudadas (Tabela 11).

Os resultados descritos na literatura internacional quanto aos efeitos da irrigação com ESET nos teores de Mg trocável são bastante divergentes. São descritos decréscimos (WANG et al., 2003), incrementos (FALKINER; SMITH, 1997), bem como ausência de alterações (Fonseca, 2005). Normalmente, os sistemas de baixo e alto nível de produção resultam, respectivamente, em aumento e diminuição das concentrações de Mg trocável (FONSECA, 2005).

As baixas concentrações de Mg presentes no efluente (ver Tabela 2) resultaram num aporte variando de 44 a 90 kg de Mg⁺² (Tabela 5) ao longo do experimento para os tratamentos com irrigação. Muito provavelmente este aporte adicional foi compensado pelo maior desenvolvimento das plantas nos tratamentos com efluente, não acarretando, ao final, em alterações dos teores de Mg, exceção feita a já descrita alteração na camada 40-60 cm.

Tabela 11 - Efeito da irrigação com efluente nas concentrações de Mg trocável do solo

(continua)

Tratamento	Época de Amostragem			Média
	Fev/05	Dez/05	Set/06	
	mmol_c kg⁻¹			
Camada 0-10 cm (CV = 23,06%)				
TSI	2,55	4,49	3,50	3,51^a
T100	3,02	6,23	3,84	4,36^a
T125	4,02	6,02	5,24	5,09^a
T150	2,87	5,11	4,26	4,08^a
T200	4,95	7,56	4,99	5,83^a
Média	3,48^C	5,88^A	4,36^B	
Camada 10-20 cm (CV = 25,21%)				
TSI	2,85	5,41	3,71	3,99^a
T100	3,15	5,80	3,35	4,10^a
T125	4,17	6,73	4,37	5,09^a
T150	3,12	4,85	3,56	3,84^a
T200	4,60	7,01	4,85	5,48^a
Média	3,57^B	5,96^A	3,96^B	
Camada 20-40 cm (CV = 25,63%)				
TSI	2,47	4,86	2,68	3,33^a
T100	3,77	5,38	3,31	4,15^a
T125	3,35	6,67	3,49	4,50^a
T150	3,22	5,31	3,68	4,07^a
T200	5,02	6,57	3,82	5,13^a
Média	3,56^B	5,75^A	3,39^B	
Camada 40-60 cm (CV = 25,49%)				
TSI	1,35	3,04	1,27	1,88^b
T100	1,85	3,76	2,04	2,55^{ab}
T125	2,22	3,07	2,17	2,48^{ab}
T150	2,42	4,19	2,72	3,11^{ab}
T200	3,65	5,18	2,93	3,92^a
Média	2,29^B	3,84^A	2,22^B	
Camada 60-80 cm (CV = 31,41%)				
TSI	1,70	2,61	1,62	1,97^a
T100	2,22	3,18	1,47	2,29^a
T125	2,90	3,50	1,93	2,77^a
T150	1,47	3,36	2,54	2,45^a
T200	2,75	3,34	3,13	3,07^a
Média	2,2^B	3,19^A	2,13^B	

Tabela 11 - Efeito da irrigação com efluente nas concentrações de Mg trocável do solo

(conclusão)

Tratamento	Época de Amostragem			Média
	Fev/05	Dez/05	Set/06	
Camada 80-100 cm (CV = 39,73%)				
TSI	1,95	1,46	0,46	1,29^a
T100	1,50	2,84	1,30	1,88^a
T125	2,42	3,48	1,42	2,44^a
T150	1,85	3,39	2,24	2,49^a
T200	2,70	3,18	2,96	2,94^a
Média	2,08^B	2,87^A	1,67^B	

TSI: sem irrigação e sem aporte de N via fertilização mineral

T100: 50% N mineral + irrigação com efluente secundário de esgoto tratado na dose 100%

T125: 50% N mineral + irrigação com efluente secundário de esgoto tratado na dose 125%

T150: 50% N mineral + irrigação com efluente secundário de esgoto tratado na dose 150%

T200: 50% N mineral + irrigação com efluente secundário de esgoto tratado na dose 200%

Letras iguais maiúsculas ou minúsculas nas linhas e nas colunas não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey (P<0,05).

Ocorreram diferenças significativas para as épocas de amostragem em todas as camadas consideradas (Tabela 11). De início, as concentrações de Mg se elevaram, posteriormente, entre a segunda amostragem e o final do experimento, as concentrações de Mg trocável diminuíram significativamente em todas as camadas analisadas (Tabela 11), fato este relacionado à elevada produtividade resultando, portanto, em considerável extração do nutriente pela cultura.

Do ponto de vista prático se faz necessário mencionar que apesar da irrigação com ESET contribuir para amenizar a acidez do solo, esta prática não necessariamente implica em acréscimos nas concentrações de Ca e Mg trocáveis no solo, não substituindo, portanto, a calagem, historicamente considerada como a principal e mais adequada fonte de Ca e Mg aos cultivos agrícolas.

Ademais, ao que parece, o fornecimento de Ca e Mg aos cultivos via calagem adquire uma importância particular no caso dos agrossistemas irrigados com ESET, na medida em que o aporte de cátions divalentes contribui na manutenção de um balanço adequado de cátions no sistema solo, diminuindo os efeitos deletérios do Na e garantindo a integridade física da estrutura do solo.

Os diferentes tratamentos resultaram em alterações nas concentrações de K trocável nas camadas 0-10, 10-20 e 40-60 cm (Tabela 12). Apesar do aporte considerável de K via efluente, entre 311 a 627 kg ha⁻¹ (Tabela 5), o mesmo não resultou em incremento nas concentrações de K nos tratamentos irrigados com efluente. Por exemplo, considerando-se as camadas mais

superficiais, os tratamentos T150 (0-10 cm) e T200 (10-20 cm) apresentaram concentrações de K trocável significativamente inferiores as do tratamento TSI, sem aporte algum de K via efluente (Tabela 12). É bastante provável que a elevação da saturação em sódio no solo (Tabelas 13 e 14) em razão do elevado aporte de Na via efluente esteja diretamente envolvida nas variações encontradas para o K, promovendo e favorecendo, em maior ou menor grau, o deslocamento do K do complexo de troca.

Corroborando com o aqui exposto, Fonseca (2005) observa que os trabalhos na literatura, quanto aos efeitos da irrigação com efluente nas concentrações de K trocável, tem sido contraditórios, dificultando sobremaneira o entendimento da dinâmica do elemento no sistema efluente-solo-planta.

Com relação às épocas de amostragem ocorreram diferenças significativas em todas as camadas consideradas (Tabela 12). Comparando-se a primeira com a última amostragem, com exceção da camada 60-80 cm, houve decréscimos significativos nos teores de K. Considerando-se que a absorção de K pela cultura da cana-de-açúcar é tão elevada quanto à de N (DEMATTÊ, 2005), certamente esta absorção foi responsável pelos decréscimos ocorridos ao longo do experimento.

A importância e magnitude das absorções de K pela cana, torna particularmente importante à análise do balanço entre adições e exportações no sistema efluente-cana-de-açúcar (adições-exportações).

Assim, considerando-se que os ESET caracteristicamente apresentam concentrações de Na consideravelmente mais elevadas que de K, muito provavelmente, do ponto de vista agrônomo, fazer-se-á indispensável à suplementação potássica mineral, a fim de se preservar um balanço equilibrado entre ambos os elementos, garantindo uma adequada nutrição e produtividade da cultura.

Tabela 12 - Efeito da irrigação com efluente nas concentrações de K trocável do solo

(continua)

Tratamento	Época de Amostragem			Média
	Fev/05	Dez/05	Set/06	
	mmol _c kg ⁻¹			
Camada 0-10 cm (CV = 23,77%)				
TSI	3,37	2,34	2,34	2,68^a
T100	3,80	1,71	1,57	2,36^{ab}
T125	2,38	1,69	2,02	2,03^{ab}
T150	2,45	1,42	1,79	1,88^b
T200	3,19	1,42	2,03	2,21^{ab}
Média	3,03^A	1,71^B	1,95^B	
Camada 10-20 cm (CV = 18,03%)				
TSI	2,47	1,18	1,11	1,58^a
T100	2,83	0,90	0,70	1,47^{ab}
T125	2,05	0,61	0,82	1,16^b
T150	2,37	0,82	0,87	1,35^{ab}
T200	2,42	0,83	0,81	1,35^{ab}
Média	2,42^A	0,86^B	0,86^B	
Camada 20-40 cm (CV = 20,05%)				
TSI	1,63	0,56	0,62	0,93^a
T100	1,52	0,46	0,52	0,83^a
T125	2,20	0,44	0,66	1,10^a
T150	1,73	0,44	0,57	0,91^a
T200	1,80	0,79	0,65	1,08^a
Média	1,77^A	0,53^B	0,60^B	
Camada 40-60 cm (CV = 34,38%)				
TSI	1,18	0,54	0,76	0,82^{ab}
T100	1,21	0,35	0,66	0,74^b
T125	1,82	0,40	0,85	1,02^a
T150	1,04	0,35	0,74	0,71^b
T200	1,00	0,59	0,98	0,85^{ab}
Média	1,25^A	0,44^C	0,79^B	
Camada 60-80 cm (CV = 35,77%)				
TSI	1,23	0,62	1,06	0,97^a
T100	1,22	0,39	0,83	0,81^a
T125	1,53	0,45	0,86	0,94^a
T150	0,98	0,46	0,83	0,75^a
T200	1,01	0,65	1,16	0,94^a
Média	1,19^A	0,51^B	0,94^A	

Tabela 12 - Efeito da irrigação com efluente nas concentrações de K trocável do solo

(conclusão)

Tratamento	Época de Amostragem			Média
	Fev/05	Dez/05	Set/06	
Camada 80-100 cm (CV = 35,17%)				
TSI	1,12	0,76	0,68	0,85^a
T100	1,41	0,75	0,68	0,94^a
T125	1,54	0,63	0,50	0,89^a
T150	0,93	0,64	0,88	0,81^a
T200	1,15	0,61	1,26	1,00^a
Média	1,23^A	0,67^B	0,8^B	

TSI: sem irrigação e sem aporte de N via fertilização mineral

T100: 50% N mineral + irrigação com efluente secundário de esgoto tratado na dose 100%

T125: 50% N mineral + irrigação com efluente secundário de esgoto tratado na dose 125%

T150: 50% N mineral + irrigação com efluente secundário de esgoto tratado na dose 150%

T200: 50% N mineral + irrigação com efluente secundário de esgoto tratado na dose 200%

Letras iguais maiúsculas ou minúsculas nas linhas e nas colunas não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey (P<0,05).

4.5.3 Salinidade e sodicidade

Os tratamentos aplicados resultaram, na totalidade das camadas estudadas, em alterações significativas nos teores de Na trocável (Tabela 13). Em todas elas, os tratamentos que receberam irrigação com ESET, exceção feita ao T125, resultaram em maior acúmulo de Na no complexo de troca quando comparadas ao tratamento TSI que não recebeu efluente (Tabela 13). Aparentemente o T125 se comportou de maneira diferenciada, uma vez que suas concentrações em Na trocável foram, a partir de 20 cm de profundidade, estatisticamente equivalentes às obtidas no TSI (Tabela 13). Entretanto, este comportamento aparentemente diferente se explica pela experimentação anteriormente realizada na mesma área, onde os tratamentos empregados naquela ocasião foram responsáveis pelas diferenças nas concentrações de Na entre as parcelas do tratamento T125 e os demais tratamentos no início do presente trabalho, uma vez que, na primeira amostragem, as concentrações de Na trocável no tratamento T125 foram consideravelmente menores, em todas as profundidades. Como se utilizou à média das 3 amostragens nas comparações estabelecidas, esta diferença inicial do T125 em relação aos demais tratamentos mascarou o efeito dos incrementos de Na neste tratamento quando comparado com o controle TSI. Entretanto, o efeito do Na no tratamento T125 esteve claramente presente, e é indiscutivelmente confirmado quando da

comparação entre os tratamentos T125 e TSI na última amostragem tomada isoladamente (Tabela 13).

O efeito das épocas de amostragem nas concentrações de Na trocável foi bastante pronunciado (Tabela 13). Ocorreram alterações em todas as épocas analisadas, com acréscimos significativos da primeira para a segunda amostragem e, igualmente, acréscimos estatisticamente diferenciados da segunda para a terceira amostragem (Tabela 13).

Dado que a afinidade dos cátions pelo complexo de troca é diretamente proporcional à valência e inversamente ao respectivo raio iônico (MALAVOLTA, 2006), o Na, em razão de sua baixa valência e alto grau de hidratação, na comparação com os demais cátions trocáveis, é o que apresenta menor afinidade pelo complexo de troca, permanecendo livremente em solução, apresentando, portanto, maior suscetibilidade a lixiviação. A grande mobilidade do Na associada com os elevados aportes do elemento via irrigação com ESET explicam os aumentos obtidos nas concentrações de Na ao longo do experimento, tanto nas camadas superficiais como nas camadas sub-superficiais.

Aumentos nos teores de Na trocável nos sistemas receptores de ESET tem sido ampla e extensamente relatados na literatura internacional em diferentes cultivos, seja no curto ou longo prazo (FONSECA et al., 2007).

Bond (1998) considera os efeitos adversos do incremento da sodicidade no uso presente e futuro da terra como sendo, juntamente com a lixiviação de nitrato e salinidade, os fatores mais importantes e limitantes a viabilidade e sustentabilidade da prática de irrigação com efluente. No futuro, o uso de águas de irrigação com maior sodicidade/salinidade se intensificará, acarretando a necessidade obrigatória de investimentos constantes em pesquisas, desenvolvimento e atualização das estratégias de manejo de solo e de cultivos, a fim de se assegurar a sustentabilidade da prática do reuso (OSTER; SHAINBERG, 2001).

Tabela 13 - Efeito da irrigação com efluente nas concentrações de Na trocável do solo

(continua)

Tratamento	Época de Amostragem			Média
	Fev/05	Dez/05	Set/06	
	mmol _c kg ⁻¹			
Camada 0-10 cm (CV = 21,36%)				
TSI	1,07	0,42	0,40	0,63^b
T100	0,62	3,02	5,95	3,19^a
T125	0,27	2,82	4,62	2,57^a
T150	0,72	3,05	4,60	2,79^a
T200	1,1	3,92	5,45	3,49^a
Média	0,75^C	2,64^B	4,2^A	
Camada 10-20 cm (CV = 26,58%)				
TSI	2,15	1,42	1,10	1,55^c
T100	1,40	3,57	9,52	4,83^a
T125	0,37	3,15	5,62	3,04^b
T150	1,47	3,62	6,40	3,83^{ab}
T200	1,92	4,17	6,82	4,30^{ab}
Média	1,46^C	3,18^B	5,89^A	
Camada 20-40 cm (CV = 23,60%)				
TSI	3,30	2,62	2,27	2,73^b
T100	3,00	3,30	6,95	4,41^a
T125	0,45	3,15	6,10	3,23^b
T150	2,57	3,50	7,40	4,49^a
T200	3,25	4,30	6,12	4,55^a
Média	2,51^C	3,37^B	5,76^A	
Camada 40-60 cm (CV = 13,09%)				
TSI	3,60	3,00	3,55	3,38^{bc}
T100	3,60	3,72	5,10	4,14^{ab}
T125	0,50	2,85	4,85	2,73^c
T150	2,55	4,07	5,42	4,01^{ab}
T200	3,72	4,40	6,42	4,84^a
Média	2,79^C	3,6^B	5,06^A	
Camada 60-80 cm (CV = 18,45%)				
TSI	3,05	2,70	1,65	2,46^b
T100	3,07	3,37	5,02	3,82^a
T125	0,55	3,02	3,60	2,39^b
T150	2,57	3,97	5,72	4,08^a
T200	4,05	4,62	4,67	4,44^a
Média	2,65^C	3,53^B	4,13^A	

Tabela 13 - Efeito da irrigação com efluente nas concentrações de Na trocável do solo

(conclusão)

Tratamento	Época de Amostragem			Média
	Fev/05	Dez/05	Set/06	
	mmol _c kg ⁻¹			
Camada 80-100 cm (CV = 13,22%)				
TSI	2,90	2,72	1,95	2,52^c
T100	3,22	3,85	4,12	3,73^{ab}
T125	0,45	2,77	3,72	2,31^c
T150	1,62	3,32	5,22	3,38^b
T200	3,45	4,07	5,80	4,44^a
Média	2,32^c	3,34^B	4,16^A	

TSI: sem irrigação e sem aporte de N via fertilização mineral

T100: 50% N mineral + irrigação com efluente secundário de esgoto tratado na dose 100%

T125: 50% N mineral + irrigação com efluente secundário de esgoto tratado na dose 125%

T150: 50% N mineral + irrigação com efluente secundário de esgoto tratado na dose 150%

T200: 50% N mineral + irrigação com efluente secundário de esgoto tratado na dose 200%

Letras iguais maiúsculas ou minúsculas nas linhas e nas colunas não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey (P<0,05).

O incremento nos teores de Na trocável no sistema solo, bem como na saturação do complexo de troca (PST) (Tabela 14) representam um risco considerável de deterioração da estrutura física do solo, mais especificamente através da dispersão de argilas e conseqüente desestabilização de agregados, entupimento de poros e decréscimo na permeabilidade do solo (BOND, 1998).

Entretanto, apesar do risco latente representado pelo aumento dos teores de Na e da saturação em sódio pelo complexo de troca, Bond (1998), relata a dificuldade de se prever *a priori* os efeitos do Na do sistema, dada a complexidade da relação existente entre PST, teores em solução e estrutura do solo.

Exemplificando-se a complexidade da questão, Halliwell (2001) afirma que os solos podem apresentar sodicidade e soluções com força iônica semelhante e mesmo assim apresentarem comportamento diverso quanto à dispersão de argilas e permeabilidade. De maneira semelhante, segundo o mesmo autor, um solo com elevada sodicidade não necessariamente irá dispersar, mesmo aplicando-se uma água de irrigação com baixa condutividade elétrica. Dentre as diversas razões para explicar esta variedade de respostas, incluem-se a textura e mineralogia do solo, densidade aparente, pH, agentes cimentantes (óxidos de Fe, Al e matéria orgânica) e estresse mecânico, ambos afetando em maior ou menor intensidade a resposta do sistema solo aos efeitos do Na (BALKS et al., 1998).

Apesar da complexidade da dinâmica do Na no sistema, algumas observações qualitativas podem ser feitas. Enquanto a irrigação com ESET for mantida, é de se esperar que a alta salinidade do efluente compensará a alta razão de adsorção de sódio (SAR) e o conseqüente incremento do PST, evitando ou minimizando a deterioração das propriedades físicas do solo (BOND, 1998).

Fonseca (2005) acrescenta a importância da pluviosidade em auxiliar na lixiviação do Na, contribuindo para a sustentabilidade do sistema como um todo, entretanto é questionável se esta pluviosidade não acarretará, em razão da provável diminuição da condutividade elétrica da solução do solo, uma intensificação do impacto negativo do Na na estrutura do solo. Assim, apesar da irrigação com efluente ter promovido um aumento expressivo de produtividade da cana-de-açúcar em seu primeiro corte, novamente se faz necessário enfatizar que somente estudos e o monitoramento no longo prazo fornecerão informações consistentes quanto à capacidade do sistema em se manter viável e produtivo face aos elevados aportes de Na e aos respectivos riscos associados.

Com relação ao efeito dos tratamentos na saturação do complexo de troca pelo sódio (PST), ocorreram diferenças significativas em todas as camadas analisadas (Tabela 14). As diferenças mais pronunciadas ocorreram quando da comparação dos diferentes tratamentos com o TSI, sem irrigação com efluente (Tabela 14). O T125 apresentou comportamento diferenciado dos demais tratamentos com irrigação com efluente, fato este já mencionado e anteriormente explicado nas discussões referentes ao Na trocável.

No decorrer do experimento as variações no PST foram significativas, manifestando-se em todas as camadas (Tabela 14). Comparando-se a primeira com a última amostragem ocorreram acréscimos significativos na saturação em sódio até 1m de profundidade.

As diferenças entre os tratamentos, bem como os acréscimos entre as épocas, de modo similar ao relatado para o Na trocável, seguramente estão diretamente relacionados a: (i) natureza do resíduo, ou seja, elevadas concentrações do íon Na e elevada razão de adsorção de sódio; (ii) lâminas de irrigação aplicadas, acarretando aportes de Na entre 3055 e 6163 kg ha⁻¹ Na⁺.

Tabela 14 - Efeito da irrigação com efluente no percentual de sódio trocável (PST) do solo
(continua)

Tratamento	Época de Amostragem			Média
	Fev/05	Dez/05	Set/06	
%				
Camada 0-10 cm (CV = 29,68%)				
TSI	3,01	1,16	1,12	1,76^b
T100	1,77	7,50	16,51	8,59^a
T125	0,82	8,41	12,56	7,26^a
T150	2,06	8,09	12,98	7,71^a
T200	2,70	9,38	14,39	8,82^a
Média	2,07^C	6,9^B	11,51^A	
Camada 10-20 cm (CV = 25,75%)				
TSI	5,43	3,63	3,17	4,07^c
T100	4,27	8,55	25,71	12,84^a
T125	1,13	8,03	15,86	8,34^b
T150	4,35	10,03	18,35	10,91^{ab}
T200	5,41	10,67	18,55	11,54^{ab}
Média	4,11^C	8,18^B	16,32^A	
Camada 20-40 cm (CV = 23,06%)				
TSI	9,57	7,13	6,84	7,84^b
T100	8,37	7,89	20,55	12,27^a
T125	1,29	8,23	16,56	8,69^b
T150	8,15	9,83	21,13	13,03^a
T200	9,69	11,46	19,25	13,46^a
Média	7,41^B	8,9^B	16,86^A	
Camada 40-60 cm (CV = 14,35%)				
TSI	10,12	9,16	11,56	10,28^{ab}
T100	11,14	9,59	18,08	12,93^a
T125	1,41	7,65	15,82	8,29^b
T150	7,36	12,37	15,05	11,59^{ab}
T200	11,61	12,08	19,58	14,42^a
Média	8,32^C	10,17^B	16,01^A	
Camada 60-80 cm (CV = 23,10%)				
TSI	8,79	9,68	5,69	8,05^c
T100	10,08	10,79	17,21	12,69^{ab}
T125	1,41	12,53	12,94	8,96^{bc}
T150	7,15	15,01	17,79	13,31^{ab}
T200	11,49	17,05	15,28	14,60^a
Média	7,78^B	13,01^A	13,78^A	

Tabela 14 - Efeito da irrigação com efluente no percentual de sódio trocável (PST) do solo (conclusão)

Tratamento	Época de Amostragem			Média
	Fev/05	Dez/05	Set/06	
	%			
Camada 80-100 cm (CV = 15,77%)				
TSI	9,18	8,23	7,25	8,22^{bc}
T100	11,50	10,66	15,55	12,57^a
T125	1,54	8,02	13,82	7,79^c
T150	5,98	9,56	19,22	11,58^{ab}
T200	12,09	12,50	18,70	14,43^a
Média	8,05^C	9,79^B	14,9^A	

TSI: sem irrigação e sem aporte de N via fertilização mineral

T100: 50% N mineral + irrigação com efluente secundário de esgoto tratado na dose 100%

T125: 50% N mineral + irrigação com efluente secundário de esgoto tratado na dose 125%

T150: 50% N mineral + irrigação com efluente secundário de esgoto tratado na dose 150%

T200: 50% N mineral + irrigação com efluente secundário de esgoto tratado na dose 200%

Letras iguais maiúsculas ou minúsculas nas linhas e nas colunas não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey ($P < 0,05$).

Os valores de PST, quando da amostragem final de solo, numa média de todas as camadas avaliadas, foram de: TSI $\rightarrow 5,93 \pm 1,47$; T100 $\rightarrow 18,93 \pm 1,52$; T125 $\rightarrow 14,59 \pm 0,69$; T150 $\rightarrow 17,42 \pm 1,20$; T200 $\rightarrow 17,62 \pm 0,90$.

O laboratório de salinidade dos EUA (1954) estabelece valores de PST $> 15\%$ como indicadores de possíveis efeitos prejudiciais à estrutura de solo, enquanto McIntrye (1979), para solos australianos propõe valores de PST $\geq 5\%$ como mais apropriados. Faz-se necessário esclarecer que, conforme relatado por Sumner (1993) tal diferença se explica face à considerável variação da concentração eletrolítica da água utilizada nestes estudos, $3-10 \text{ mmol}_c \text{ L}^{-1}$ e $< 0,7 \text{ mmol}_c \text{ L}^{-1}$ para os estudos americanos e australianos, respectivamente.

Ilustrando a complexidade da questão, mesmo solos com PST $< 1\%$ podem apresentar efeitos prejudiciais associados a sodicidade, dependendo das propriedades do solo e da CE da água de irrigação (HALLIWELL et al., 2001).

A fim de se detalhar os efeitos dos teores de PST, acrescenta-se que a expansão das argilas não deve ocorrer a menos que os valores de PST excedam 25-30%, enquanto que a dispersão de argilas e a consequente redução da condutividade hidráulica pode ocorrer mesmo em valores de PST próximos a zero desde que a água de irrigação aplicada possua valores de CE baixos. (BALKS et al, 1998).

A este respeito, Halliwell et al. (2001), em sua detalhada revisão sobre os efeitos do sódio nas propriedades físicas do solo, acrescenta que o processo de dispersão e redução na condutividade hidráulica, passível de ocorrer mesmo com baixas saturações de sódio, é em grande parte irreversível face à ruptura desproporcional da estrutura dos minerais de argila, enquanto que, por outro lado, a expansão pode ser revertida através da utilização de água de irrigação com valores de CE acima do valor crítico de coagulação ou, também, através da redução do PST pela adição de cátions divalentes.

Independentemente da adoção de qualquer dos valores críticos de PST acima descritos verifica-se que, por ocasião da amostragem final, as parcelas submetidas à irrigação com ESET, na totalidade das lâminas empregadas, apresentavam valores de PST considerados acima dos níveis críticos (Tabela 14). Considerando-se este fato, é natural que ao longo do tempo, a fim de se manter a viabilidade agronômica do sistema efluente-solo-planta, se faça necessário lançar mão de estratégias de manejo para contornar ou minimizar este problema.

A este respeito, Surapaneni e Olsson (2002) relatam que as linhas de ação geralmente objetivam a substituição do sódio trocável por outros cátions divalentes, como Ca^{+2} e Mg^{+2} . Dentre as diversas estratégias de manejo consideradas, este mesmo autor considera a aplicação de gesso com uma das mais recomendáveis, face ao baixo custo e ampla disponibilidade deste insumo.

Certamente, do ponto de vista prático, estratégias como esta deverão ser consideradas e aplicadas a fim de se minimizar possíveis efeitos negativos a qualidade do solo e estabilidade da produtividade dos cultivos, garantindo em última análise a sustentabilidade da prática de reuso.

A porcentagem de argila dispersa em água foi influenciada pela irrigação com ESET, com concentrações significativamente maiores nas camadas 10-20, 20-40 e 80-100 cm para ao menos um dos tratamentos irrigados quando comparados com o tratamento controle TSI (Tabela 15). Considerando-se apenas os tratamentos com aplicação de efluente, T100 a T200, as diferenças na magnitude da dispersão de argilas, em razão das lâminas crescentes de irrigação, foram insignificantes (Tabela 15). Com exceção da camada 60-80 cm, ocorreram incrementos significativos na porcentagem de argila dispersa em água no decorrer do experimento (Tabela 15).

Ademais, em especial nas camadas superficiais, até 40 cm de profundidade, boas correlações foram obtidas entre os parâmetros Na trocável, PST e RAS com os dados de ADA (vide Tabela 26 em anexo).

Tabela 15 – Efeito da irrigação com efluente na porcentagem de argila dispersa em água (ADA) do solo

(continua)

Tratamento	Época de Amostragem			Média
	Fev/05	Dez/05	Set/06	
	%			
Camada 0-10 cm (CV = 22,46%)				
TSI	3,22	4,37	3,85	3,81^a
T100	3,08	5,55	7,68	5,44^a
T125	3,22	5,67	6,40	5,10^a
T150	3,18	5,16	7,10	5,15^a
T200	3,02	6,71	6,70	5,48^a
Média	3,14^B	5,49^A	6,35^A	
Camada 10-20 cm (CV = 21,65%)				
TSI	4,58	4,33	5,31	4,74^b
T100	4,34	5,49	10,62	6,82^a
T125	4,76	4,47	6,60	5,28^{ab}
T150	4,04	5,55	7,64	5,74^{ab}
T200	5,08	6,21	8,30	6,53^{ab}
Média	4,56^B	5,21^B	7,69^A	
Camada 20-40 cm (CV = 14,32%)				
TSI	5,59	6,27	6,83	6,23^{bc}
T100	6,01	5,44	10,39	7,28^{abc}
T125	4,9	5,33	7,27	5,83^c
T150	5,88	6,83	10,55	7,75^{ab}
T200	5,91	7,51	11,05	8,16^a
Média	5,66^B	6,28^B	9,22^A	
Camada 40-60 cm (CV = 14,59%)				
TSI	5,99	7,08	6,77	6,61^a
T100	6,51	7,32	9,25	7,69^a
T125	5,6	5,97	7,54	6,37^a
T150	6,92	6,29	6,42	6,54^a
T200	7,68	7,01	6,79	7,16^a
Média	6,54^B	6,73^{AB}	7,35^A	
Camada 60-80 cm (CV = 23,53%)				
TSI	6,35	6,38	3,21	5,31^a
T100	6,29	6,5	6,01	6,27^a
T125	6,13	6,71	5,95	6,26^a
T150	6,49	5,37	5,44	5,77^a
T200	7,32	2,63	9,52	6,49^a
Média	6,52^A	5,52^A	6,03^A	

Tabela 15 – Efeito da irrigação com efluente na porcentagem de argila dispersa em água (ADA) do solo

Tratamento	Época de Amostragem			Média
	Fev/05	Dez/05	Set/06	
(conclusão)				
%				
Camada 80-100 cm (CV = 38,73%)				
TSI	3,47	1,69	4,77	3,31^b
T100	6,1	2,28	8,85	5,74^{ab}
T125	2,95	2,00	6,91	3,95^{ab}
T150	3,36	1,83	9,22	4,80^{ab}
T200	5,21	5,42	9,92	6,85^a
Média	4,22^B	2,64^C	7,93^A	

TSI: sem irrigação e sem aporte de N via fertilização mineral

T100: 50% N mineral + irrigação com efluente secundário de esgoto tratado na dose 100%

T125: 50% N mineral + irrigação com efluente secundário de esgoto tratado na dose 125%

T150: 50% N mineral + irrigação com efluente secundário de esgoto tratado na dose 150%

T200: 50% N mineral + irrigação com efluente secundário de esgoto tratado na dose 200%

Letras iguais maiúsculas ou minúsculas nas linhas e nas colunas não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey (P<0,05).

O incremento na dispersão de argilas ao longo do tempo pode ser explicado pelo aumento nos parâmetros indicadores de sodicidade no sistema solo, tais como Na trocável (Tabela 13), PST (Tabela 14) e RAS (Tabela 25). Esta afirmação é igualmente reforçada pelas correlações positivas entre os resultados de ADA e dos parâmetros de sodicidade mencionados anteriormente.

A dispersão de argilas, através da degradação estrutural do solo, pode ocasionar efeitos deletérios não apenas no sistema solo-planta, pelo encrostamento superficial, entupimento de poros e redução nas taxas de infiltração, mas igualmente acarretar prejuízos no ambiente como um todo, haja vista o possível incremento do escoamento superficial de poluentes (PANAYIOTOPOULOS et al., 2004).

A dispersão de argilas pode se manifestar sob uma ampla faixa de variação nos valores de PST, desde que a concentração eletrolítica total esteja abaixo da concentração crítica de floculação. Nestas condições, a espessura da dupla camada difusa aumenta, enquanto as forças atrativas entre as partículas de argila diminuem, levando a dispersão. A obstrução dos macroporos (responsáveis pela drenagem) pelas partículas de argila dispersa pode, por sua vez, diminuir a circulação de água e ar, bem como a penetração radicular (MENNEER et al., 2001).

Conforme já mencionado anteriormente na discussão dos resultados de Na trocável e PST, a relação sódio-estrutura do solo é bastante peculiar, uma vez que uma variedade de fatores

interfere diretamente na magnitude desta interação, como por exemplo, pH, salinidade (CE), material orgânico e tipos de argila, ditando conjuntamente o comportamento individual de cada tipo de solo (TILMAN; SURAPANENI, 2002).

De qualquer forma, entretanto, as características químicas do solo serão inevitavelmente alteradas pela disposição de um efluente rico em sódio, aumentando a susceptibilidade do mesmo a dispersão. Esta maior susceptibilidade, por sua vez, limita a versatilidade do uso da terra. Esta versatilidade é um indicador chave da qualidade do solo, sendo que a irrigação contínua com águas marginais irá, invariavelmente, restringir as opções de uso da terra para os agricultores e os demais envolvidos na produção agrícola (TILMAN; SURAPANENI, 2002).

Assim sendo, dada a relevância agrônomo-ambiental do processo de dispersão de argilas, o contínuo monitoramento das mudanças na qualidade física do solo em razão da disposição de ESET assume uma importância crítica a continuidade e a sustentabilidade da prática. Igualmente importante e necessário são as estratégias de manejo que possam, efetivamente, minimizar os efeitos restritivos da irrigação com ESET nas taxas de infiltração e que possibilitem a manutenção de um balanço mínimo adequado de cátions flocculantes no solo. Tais estratégias serão fundamentais na manutenção da qualidade e viabilidade do sistema resíduo-solo-planta.

Com relação ao efeito dos tratamentos na saturação de bases do solo ocorrem alterações significativas nas camadas 20-40, 40-60, 60-80 e 80-100 cm (Tabela 16). Nestas camadas as alterações mais pronunciadas ocorreram entre os extremos TSI e T200, ou seja, entre o tratamento sem irrigação e aquele que recebeu o maior volume de irrigação (Tabela 16).

Tabela 16 – Efeito da irrigação com efluente na saturação de bases (V%) do solo

(continua)

Tratamento	Época de Amostragem			Média
	Fev/05	Dez/05	Set/06	
	%			
Camada 0-10 cm (CV = 10,06%)				
TSI	51,92	52,49	43,24	49,21^a
T100	57,4	60,14	60,29	59,28^a
T125	55,1	63,32	62,81	60,41^a
T150	53,15	60,22	61,74	58,37^a
T200	63,97	66,76	64,60	65,11^a
Média	56,3^A	60,58^A	58,53^A	
Camada 10-20 cm (CV = 9,72%)				
TSI	51,77	56,18	50,45	52,80^a
T100	59,00	57,84	64,35	60,40^a
T125	52,92	56,64	57,58	55,71^a
T150	55,15	57,13	61,94	58,07^a
T200	71,92	64,74	66,72	67,79^a
Média	58,15^A	58,5^A	60,2^A	
Camada 20-40 cm (CV = 14,68%)				
TSI	42,82	43,60	32,21	39,54^b
T100	56,90	44,55	57,89	53,11^{ab}
T125	44,10	51,86	45,44	47,13^{ab}
T150	53,30	55,78	57,86	55,65^{ab}
T200	68,22	62,42	58,41	63,02^a
Média	53,06^A	51,64^A	50,36^A	
Camada 40-60 cm (CV = 14,01%)				
TSI	28,20	32,96	31,11	30,75^b
T100	38,12	34,68	48,75	40,51^{ab}
T125	31,05	31,50	42,97	35,17^b
T150	35,52	43,89	51,86	43,76^{ab}
T200	52,27	47,51	52,52	50,77^a
Média	37,03^B	38,11^B	45,44^A	
Camada 60-80 cm (CV = 20,14%)				
TSI	35,37	32,00	25,54	30,97^b
T100	46,10	37,34	49,89	44,45^{ab}
T125	40,27	46,52	41,77	42,86^{ab}
T150	34,58	48,14	50,27	44,33^{ab}
T200	48,20	45,64	52,80	48,88^a
Média	40,91^A	41,92^A	44,05^A	

Tabela 16 – Efeito da irrigação com efluente na saturação de bases (V%) do solo

Tratamento	Época de Amostragem			Média
	Fev/05	Dez/05	Set/06	
%				
Camada 80-100 cm (CV = 17,49%)				
TSI	42,47	24,04	19,47	28,67^b
T100	45,14	34,90	42,89	40,98^{ab}
T125	38,07	34,53	37,29	36,63^{ab}
T150	35,25	34,62	48,37	39,41^{ab}
T200	47,47	37,08	50,49	45,02^a
Média	41,68^A	33,03^B	39,70^A	

TSI: sem irrigação e sem aporte de N via fertilização mineral

T100: 50% N mineral + irrigação com efluente secundário de esgoto tratado na dose 100%

T125: 50% N mineral + irrigação com efluente secundário de esgoto tratado na dose 125%

T150: 50% N mineral + irrigação com efluente secundário de esgoto tratado na dose 150%

T200: 50% N mineral + irrigação com efluente secundário de esgoto tratado na dose 200%

Letras iguais maiúsculas ou minúsculas nas linhas e nas colunas não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey (P<0,05).

O elevado volume de efluente aplicado no tratamento T200, conforme discutido anteriormente nas diferentes sessões de forma individual, atua como amenizador da acidez do solo, implicando também no aporte de diferentes elementos, em especial Na. Assim, as alterações na saturação de bases ocorreram, principalmente, em razão da redução da acidez potencial (Tabela 8), e dos acréscimos nas concentrações de Ca e Na trocável (Tabelas 10 e 13) no tratamento T200.

Na comparação entre as épocas de amostragem, alterações da saturação de bases ocorreram apenas nas camadas 40-60 e 80-100 cm (Tabela 16).

van Raij et al. (1996) recomenda que a calagem na cultura da cana objetive elevar a saturação de bases a 60%. Considerando a média obtida de 62,50% nos tratamentos T100 a T200, camada 0-20 cm, a saturação da camada superficial por conta da última amostragem se encontra bem próxima do que é considerado adequado no planejamento e manejo da adubação da cultura da cana-de-açúcar.

As alterações na capacidade de troca catiônica do solo (CTC) foram de pequena magnitude, com diferenças significativas entre os tratamentos empregados somente na camada 0-10 cm (Tabela 17). Considerando as épocas de amostragem, alterações significativas ocorreram em todas as camadas estudadas, entretanto, os valores do início e fim do experimento foram bem próximos (Tabela 17).

Tabela 17 - Efeito da irrigação com efluente na CTC do solo

(continua)

Tratamento	Época de Amostragem			Média
	Fev/05	Dez/05	Set/06	
	mmol_c kg⁻¹			
Camada 0-10 cm (CV = 9,73%)				
TSI	35,64	36,58	35,42	35,88^{ab}
T100	34,94	41,22	36,48	37,55^{ab}
T125	32,61	37,01	37,03	35,55^b
T150	33,60	37,57	35,52	35,56^b
T200	40,18	42,38	38,18	40,25^a
Média	35,39^B	38,95^A	36,52^{AB}	
Camada 10-20 cm (CV= 7,09%)				
TSI	40,53	39,28	35,36	38,39^a
T100	32,72	42,63	36,96	37,44^a
T125	35,24	39,37	35,99	36,87^a
T150	34,27	36,22	34,86	35,12^a
T200	35,34	39,58	36,65	37,19^a
Média	35,62^B	39,41^A	35,96^B	
Camada 20-40 cm (CV = 8,57%)				
TSI	34,18	37,06	33,49	34,91^a
T100	36,28	42,15	33,48	37,30^a
T125	33,27	38,61	36,99	36,29^a
T150	32,18	35,72	35,00	34,30^a
T200	33,99	37,64	31,93	34,52^a
Média	33,98^B	38,23^A	34,17^B	
Camada 40-60 cm (CV = 8,21%)				
TSI	35,60	32,79	26,42	31,61^a
T100	32,65	39,60	28,70	33,65^a
T125	35,99	38,01	30,63	34,88^a
T150	34,61	32,91	31,38	32,97^a
T200	32,64	36,77	32,91	34,11^a
Média	34,29^A	36,01^A	30,01^B	
Camada 60-80 cm (CV= 10,10%)				
TSI	34,64	28,04	27,07	29,92^a
T100	31,25	31,29	29,55	30,70^a
T125	40,18	25,35	25,47	30,33^a
T150	29,37	26,42	32,27	29,36^a
T200	35,70	27,44	26,51	29,88^a
Média	34,23^A	27,71^B	28,17^B	

Tabela 17 - Efeito da irrigação com efluente na CTC do solo

Tratamento	Época de Amostragem			Média
	Fev/05	Dez/05	Set/06	
Camada 80-100 cm (CV = 10,21%)				
TSI	31,98	33,37	26,24	30,53^a
T100	29,34	37,48	26,55	31,12^a
T125	29,49	34,91	26,89	30,43^a
T150	26,86	34,75	27,28	29,63^a
T200	28,85	33,08	26,25	29,39^a
Média	29,31^B	34,71^A	26,64^C	

TSI: sem irrigação e sem aporte de N via fertilização mineral

T100: 50% N mineral + irrigação com efluente secundário de esgoto tratado na dose 100%

T125: 50% N mineral + irrigação com efluente secundário de esgoto tratado na dose 125%

T150: 50% N mineral + irrigação com efluente secundário de esgoto tratado na dose 150%

T200: 50% N mineral + irrigação com efluente secundário de esgoto tratado na dose 200%

Letras iguais maiúsculas ou minúsculas nas linhas e nas colunas não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey (P<0,05).

É bastante oportuno acrescentar aqui alguns resultados obtidos por Gloaguen (2006). Ao longo de 2 anos de irrigação com ESET não ocorreram alterações significativas na CTC, entretanto, a partir de então, observaram-se valores mais altos, correlacionados com as variações de sódio. Assim, a sodicidade resultante da irrigação estaria contribuindo para o aumento da CTC devido ao aumento da superfície específica promovido pela abertura do complexo de troca pelo sódio, ou seja, expansão e desestruturação dos microagregados. Apesar das alterações pouco significativas até o presente momento, é bastante provável que ao longo do tempo o mesmo processo se manifeste, visto se tratar da mesma área experimental.

Mesmo não fazendo parte dos objetivos deste trabalho é também importante acrescentar aqui algumas colocações a respeito da matéria orgânica. No mesmo trabalho, Gloaguen (2006) relata, após 2 anos de irrigação e cultivo, importante decréscimo nos teores de matéria orgânica no perfil do solo, igualmente ocorrendo decréscimo nas concentrações de carbono orgânico dissolvido ao longo do tempo. Fonseca et al. (2007), em extensa revisão a respeito da utilização de ESET na agricultura, descreve alguns outros trabalhos que obtiverem resultados semelhantes, além das razões associadas a tal fato. Considerando que a matéria orgânica é a principal responsável pela CTC dos solos (VAN RAIJ et al., 1991), se torna bastante evidente a importância desta problemática acima exposta, visto que alterações na matéria orgânica do solo por conta da

irrigação com ESET necessariamente resultarão em implicações na capacidade de troca catiônica do solo.

4.6 Efeito da irrigação com efluente de esgoto na química da solução de solo

4.6.1 pH, Al e condutividade elétrica (CE)

Os tratamentos empregados pouco alteraram os valores de pH da solução obtida pela metodologia da pasta de saturação, com efeitos significativos apenas nas camadas 0-10 e 80-100 cm (Tabela 18). Mesmo nestas camadas, as alterações foram sutis, menores que uma unidade de medida. A mesma afirmação pode ser estendida aos efeitos das épocas de amostragem, com alterações de pequena magnitude nas camadas 10-20 e 20-40 cm (Tabela 18).

A composição da solução do solo reflete, prontamente, o complexo balanço existente entre os diversos compartimentos do solo (biótico, líquido, sólido e gasoso), que interagem contínua e intensamente entre si (WOLT, 1993). As freqüentes alterações que ocorrem nas condições dos diversos componentes naturalmente influenciarão a constituição da fração solução do solo.

Deste modo, dentre os fatores que podem ter influenciado no aumento ou diminuição do pH da solução, não obstante as pequenas diferenças aqui verificadas, pode-se inferir que os decréscimos de pH são explicados, ao menos parcialmente, pela maior atividade microbiana na ciclagem de nutrientes, liberando prótons (H^+), assim como pela lixiviação de íons pelas chuvas e pela irrigação, igualmente acidificando o solo. Os decréscimos nos valores de pH estariam, por sua vez, em maior ou menor grau, relacionados ao significativo aporte de HCO_3^- via efluente, neutralizando os íons H^+ .

Além dos fatores acima descritos, Fonseca (2005) acrescenta o fato de que solos com baixa CTC e conseqüente baixo poder tampão são sensivelmente mais susceptíveis a alterações de pH.

A pequena magnitude das alterações obtidas no parâmetro pH solução de solo não implica em qualquer importância ou significância prática.

Tabela 18 – Efeito da irrigação com efluente no pH da solução do solo

(continua)

Tratamento	Época de Amostragem			Média
	Fev/05	Dez/05	Set/06	
Camada 0-10 cm (CV = 4,84%)				
TSI	7,08	7,30	6,58	6,98^b
T100	7,00	7,42	7,85	7,42^{ab}
T125	7,48	7,31	7,60	7,46^{ab}
T150	7,31	7,37	7,30	7,32^{ab}
T200	7,84	7,76	7,51	7,70^a
Média	7,34^A	7,43^A	7,36^A	
Camada 10-20 cm (CV = 3,88%)				
TSI	7,01	7,69	6,82	7,17^a
T100	7,17	7,34	7,41	7,30^a
T125	6,81	7,24	7,49	7,18^a
T150	6,94	7,12	7,41	7,15^a
T200	7,93	7,69	7,75	7,79^a
Média	7,17^B	7,41^A	7,37^{AB}	
Camada 20-40 cm (CV = 3,38%)				
TSI	7,69	7,20	7,25	7,38^a
T100	7,68	7,34	7,44	7,48^a
T125	7,64	7,22	7,17	7,34^a
T150	7,72	7,44	7,38	7,51^a
T200	7,72	7,40	7,37	7,49^a
Média	7,69^A	7,32^B	7,32^B	
Camada 40-60 cm (CV = 5,41%)				
TSI	7,00	6,76	6,56	6,77^a
T100	7,23	7,20	6,88	7,10^a
T125	7,32	6,65	7,12	7,03^a
T150	6,93	7,21	7,31	7,15^a
T200	7,35	7,42	7,11	7,29^a
Média	7,16^A	7,04^A	6,99^A	
Camada 60-80 cm (CV = 8,11%)				
TSI	6,11	7,10	6,52	6,57^a
T100	6,74	7,10	6,91	6,91^a
T125	6,49	6,79	7,36	6,88^a
T150	6,75	7,15	7,31	7,07^a
T200	7,39	6,47	7,22	7,02^a
Média	6,69^A	6,92^A	7,06^A	

Tabela 18 – Efeito da irrigação com efluente no pH da solução do solo

Tratamento	Época de Amostragem			Média
	Fev/05	Dez/05	Set/06	
Camada 80-100 cm (CV = 5,37%)				
TSI	7,47	7,05	7,00	7,17^a
T100	6,65	6,58	6,69	6,64^{ab}
T125	5,98	6,33	6,64	6,31^b
T150	6,51	7,01	6,63	6,71^{ab}
T200	6,80	6,92	6,79	6,83^{ab}
Média	6,68^A	6,77^A	6,75^A	

TSI: sem irrigação e sem aporte de N via fertilização mineral

T100: 50% N mineral + irrigação com efluente secundário de esgoto tratado na dose 100%

T125: 50% N mineral + irrigação com efluente secundário de esgoto tratado na dose 125%

T150: 50% N mineral + irrigação com efluente secundário de esgoto tratado na dose 150%

T200: 50% N mineral + irrigação com efluente secundário de esgoto tratado na dose 200%

Letras iguais maiúsculas ou minúsculas nas linhas e nas colunas não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey (P<0,05).

As alterações nas concentrações de Al solúvel em razão dos tratamentos empregados foram inexpressivas (Tabela 19). Quanto às épocas de amostragem, em geral, as concentrações de alumínio solúvel foram mais elevadas por ocasião da coleta final (Tabela 19). As concentrações mais elevadas de Al em solução nos tratamentos T100 a T200 na última amostragem em comparação com as demais contrariam o que seria esperado, haja vista que o efeito alcalinizador do efluente de esgoto (ver discussão item 4.5.1) implica, necessariamente, na redução dos teores e na neutralização dos íons Al^{+3} em atividade na solução do solo, e não em aumento como aqui obtido.

Este fato em associação com a baixa ($r < 0,70$) ou mesmo ausência de correlação obtida entre os parâmetros Al solúvel com Al trocável, pH do solo e da solução do solo (Tabela 26), bem como os elevados coeficientes de variação para as concentrações de Al em solução em todas as camadas consideradas (Tabela 19), sinalizam a inadequação dos extratos de saturação nas determinações do comportamento do Al em solução. Essa limitação certamente está relacionada à insuficiência do tempo de equilíbrio empregado para que o Al, dada sua maior valência, se solubilize inteiramente e atinja assim o pleno equilíbrio entre as concentrações nas fases sólida e solúvel. Fonseca (2005) relata a mesma dificuldade para os estudos de Al em solução através do emprego desta mesma metodologia.

Tabela 19 - Efeito da irrigação com efluente na concentração de Alumínio da solução do solo (extrato de saturação)

(continua)

Tratamento	Época de Amostragem			
	Fev/05	Dez/05	Set/06	Média
	$\mu\text{mol L}^{-1}$			
Camada 0-10 cm (CV= 168,63%)				
TSI	1,22	8,07	4,21	4,50^b
T100	4,10	22,49	192,05	72,88^a
T125	0,93	7,83	100,91	36,56^{ab}
T150	0,18	15,68	53,19	23,02^{ab}
T200	0,68	4,17	76,75	27,20^{ab}
Média	1,42^B	11,65^B	85,42^A	
Camada 10-20 cm (CV= 87,21%)				
TSI	9,34	40,84	5,63	18,60^a
T100	8,73	14,80	57,05	26,86^a
T125	10,28	6,27	77,54	31,36^a
T150	8,87	7,87	71,21	29,32^a
T200	11,34	8,35	119,79	46,49^a
Média	9,71^B	15,63^B	66,24^A	
Camada 20-40 cm (CV = 121,53%)				
TSI	20,09	27,31	5,79	17,73^a
T100	20,67	11,64	86,77	39,69^a
T125	3,85	1,28	19,23	8,12^a
T150	48,74	2,76	30,05	27,18^a
T200	30,09	4,19	69,55	34,61^a
Média	24,69^{AB}	9,44^B	42,28^A	
Camada 40-60 cm (CV =176,14 %)				
TSI	8,62	16,95	3,44	9,67^a
T100	12,38	5,98	15,48	11,28^a
T125	2,78	1,15	0,65	1,53^a
T150	4,26	2,75	4,09	3,70^a
T200	39,35	11,24	34,00	28,20^a
Média	13,48^A	7,61^A	11,53^A	
Camada 60-80 cm (CV = 156,66%)				
TSI	1,18	4,20	3,01	2,80^a
T100	4,61	5,92	12,46	7,66^a
T125	0,47	1,63	0,67	0,92^a
T150	1,13	1,59	2,37	1,70^a
T200	2,24	1,20	11,71	5,05^a
Média	1,93^A	2,91^A	6,04^A	

Tabela 19 - Efeito da irrigação com efluente na concentração de Alumínio da solução do solo (extrato de saturação)

Tratamento	Época de Amostragem			Média
	Fev/05	Dez/05	Set/06	
Camada 80-100 cm (CV = 130,32%)				
TSI	0,91	1,42	3,54	1,96^a
T100	0,38	3,28	0,95	1,54^a
T125	0,53	0,31	3,87	1,57^a
T150	1,45	0,43	0,98	0,95^a
T200	0,68	1,85	2,94	1,82^a
Média	0,79^B	1,46^{AB}	2,46^A	

TSI: sem irrigação e sem aporte de N via fertilização mineral

T100: 50% N mineral + irrigação com efluente secundário de esgoto tratado na dose 100%

T125: 50% N mineral + irrigação com efluente secundário de esgoto tratado na dose 125%

T150: 50% N mineral + irrigação com efluente secundário de esgoto tratado na dose 150%

T200: 50% N mineral + irrigação com efluente secundário de esgoto tratado na dose 200%

Letras iguais maiúsculas ou minúsculas nas linhas e nas colunas não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey ($P < 0,05$).

Com exceção da camada 40-60 cm, os tratamentos aplicados ocasionaram alterações significativas na concentração de sais solúveis (CE) ao longo do perfil do solo (Tabela 20). As diferenças mais evidentes se dão quando da comparação dos tratamentos que receberam aporte de efluente (T100 a T200) com o TSI, sem irrigação (Tabela 20). Considerando-se apenas os tratamentos com irrigação, as diferenças no aporte de sais solúveis, por conta das crescentes lâminas de irrigação, não resultaram em alterações na salinidade (Tabela 20).

Tabela 20 - Efeito da irrigação com efluente na condutividade elétrica (CE) da solução do solo
(continua)

Tratamento	Época de Amostragem			Média
	Fev/05	Dez/05	Set/06	
dS m⁻¹				
Camada 0-10 cm (CV = 38,19%)				
TSI	0,63	0,24	0,27	0,38^b
T100	0,65	0,59	0,42	0,55^{ab}
T125	0,62	0,66	0,58	0,62^{ab}
T150	0,48	0,54	0,48	0,50^{ab}
T200	0,94	0,89	0,46	0,76^a
Média	0,66^A	0,58^{AB}	0,44^B	
Camada 10-20 cm (CV = 20,15%)				
TSI	0,54	0,23	0,23	0,33^b
T100	0,51	0,68	0,27	0,48^{ab}
T125	0,40	0,67	0,43	0,50^a
T150	0,33	0,61	0,41	0,45^{ab}
T200	0,30	0,88	0,56	0,58^a
Média	0,41^B	0,61^A	0,38^B	
Camada 20-40 cm (CV = 43,06%)				
TSI	0,26	0,29	0,43	0,32^b
T100	0,24	0,81	0,79	0,61^a
T125	0,24	0,63	0,64	0,50^{ab}
T150	0,12	0,63	0,65	0,46^{ab}
T200	0,18	0,67	0,65	0,50^{ab}
Média	0,2^B	0,6^A	0,63^A	
Camada 40-60 cm (CV = 30,13%)				
TSI	0,27	0,40	0,14	0,27^a
T100	0,13	0,34	0,51	0,32^a
T125	0,20	0,37	0,48	0,35^a
T150	0,15	0,38	0,47	0,33^a
T200	0,17	0,37	0,47	0,33^a
Média	0,18^B	0,37^A	0,41^A	
Camada 60-80 cm (CV = 23,38%)				
TSI	0,15	0,18	0,17	0,16^b
T100	0,12	0,43	0,44	0,33^{ab}
T125	0,20	0,44	0,44	0,36^a
T150	0,31	0,41	0,41	0,37^a
T200	0,43	0,32	0,46	0,40^a
Média	0,24^B	0,35^A	0,38^A	

Tabela 20 - Efeito da irrigação com efluente na condutividade elétrica da solução do solo
(conclusão)

Tratamento	Época de Amostragem			Média
	Fev/05	Dez/05	Set/06	
Camada 80-100 cm (CV = 40,16%)				
TSI	0,20	0,19	0,16	0,18^b
T100	0,16	0,37	0,57	0,36^a
T125	0,18	0,29	0,41	0,29^{ab}
T150	0,20	0,43	0,43	0,35^a
T200	0,17	0,32	0,42	0,30^{ab}
Média	0,18^B	0,32^A	0,39^A	

TSI: sem irrigação e sem aporte de N via fertilização mineral

T100: 50% N mineral + irrigação com efluente secundário de esgoto tratado na dose 100%

T125: 50% N mineral + irrigação com efluente secundário de esgoto tratado na dose 125%

T150: 50% N mineral + irrigação com efluente secundário de esgoto tratado na dose 150%

T200: 50% N mineral + irrigação com efluente secundário de esgoto tratado na dose 200%

Letras iguais maiúsculas ou minúsculas nas linhas e nas colunas não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey (P<0,05).

Quanto às épocas de amostragem, ocorreram diferenças significativas na totalidade das camadas analisadas (Tabela 20). Por ocasião da última amostragem, em superfície, nota-se uma redução significativa da salinidade, em relação à primeira amostragem até 10 cm e em relação à segunda amostragem entre 10 e 20 cm. Em todas as demais camadas, no decorrer do experimento, ocorreram aumentos na salinidade do solo (Tabela 20). A respeito da redução da salinidade na última amostragem, em superfície, tal fato se deve a necessidade de estresse hídrico por parte da cultura da cana a fim de acumular açúcares antes da colheita. A última coleta de solo ocorreu em conjunto com a colheita da cana, a qual, por sua vez, foi precedida de um período de corte na irrigação de 40 dias. Este período sem irrigação, bem como a precipitação pluvial de 90 mm ocorrida neste período, resultaram na redução e lixiviação de sais e conseqüente diminuição da salinidade em superfície. Em profundidade, os aumentos na salinidade estão associados, em grande parte, a adição de sais via efluente, em especial de Na⁺.

A fim de melhor compreender as implicações práticas destas alterações para a cultura da cana-de-açúcar, observa-se que os tratamentos que receberam irrigação com ESET apresentaram, considerando-se a totalidade das camadas analisadas, uma CE média de 0,51 dS m⁻¹, com valores oscilando na faixa de 0,29-0,89. Nelson e Ham (2000), explorando o comportamento de campo de variedades de cana a condições salinas e sódicas em solos australianos, obteve uma correlação negativa entre a produtividade das variedades de cana e a CE (extrato de saturação 1:5) do solo,

relatando um decréscimo de aproximadamente 14% na produtividade para cada acréscimo unitário na CE da solução do solo, e uma redução de cerca de 10% na produtividade de campo para uma CE média de $0,9 \text{ dS m}^{-1}$ entre 0-0,77 m de profundidade.

Segundo divisão estabelecida por Maas (1984) a respeito da relativa tolerância das culturas agrícolas à salinidade verifica-se que, no grupo das culturas moderadamente sensíveis à salinidade, a qual a cana-de-açúcar se encaixa (NELSON; HAM, 2000), valores de condutividade elétricas (CE) do extrato de saturação abaixo de $1,0 \text{ dS m}^{-1}$ não devem ocasionar efeitos negativos no rendimento deste grupo de culturas.

Desse modo, as alterações na salinidade do solo até o presente momento, são de pouca significância prática, traduzindo-se em nenhuma (MAAS, 1984) ou apenas ligeiras (NELSON; HAM, 2000) perdas de produtividade.

4.6.2 Cátions trocáveis (Ca, Mg, K e Na) e RAS

Alterações nos teores de Ca em solução, em razão dos tratamentos empregados, ocorreram somente nas camadas 40-60 e 80-100 cm (Tabela 21). Nestas camadas, as diferenças corresponderam a uma maior concentração de Ca solúvel no tratamento T125 em comparação com os demais. Concentrações mais elevadas de Ca solúvel no tratamento T125 também ocorreram para as demais camadas a partir de 10-20 cm, apesar de não serem significativas (Tabela 21). Os tratamentos que receberam efluente não provocaram alterações nas concentrações de Ca solúvel, visto que, na totalidade das camadas, apesar das concentrações geralmente menores no TSI, sem efluente, as diferenças não apresentaram significância estatística (Tabela 21).

Tabela 21 - Efeito da irrigação com efluente na concentração de Cálcio na solução do solo (extrato de saturação)

(continua)

Tratamento	Época de Amostragem				Média
	Fev/05	Dez/05	Set/06		
	$\mu\text{mol L}^{-1}$				
Camada 0-10 cm (CV= 97,96%)					
TSI	865,37	337,61	419,13		540,70^a
T100	1104,98	360,26	199,08		554,77^a
T125	1096,07	555,29	290,23		647,19^a
T150	725,16	331,63	147,53		401,44^a
T200	2218,50	488,78	193,04		966,77^a
Média	1202,01^A	414,71^B	249,80^B		
Camada 10-20 cm (CV= 54,14%)					
TSI	510,75	266,33	446,63		407,90^a
T100	829,56	459,58	169,22		486,12^a
T125	957,24	428,39	186,11		523,91^a
T150	659,38	376,08	196,70		410,72^a
T200	716,43	489,15	254,61		486,73^a
Média	734,67^A	403,91^B	250,65^B		
Camada 20-40 cm (CV = 45,48%)					
TSI	130,51	121,2	158,83		136,85^a
T100	169,80	226,52	145,38		180,57^a
T125	347,10	393,01	174,74		304,95^a
T150	105,60	205,78	134,89		148,76^a
T200	330,24	300,78	145,00		258,67^a
Média	216,65^{AB}	249,46^A	151,77^B		
Camada 40-60 cm (CV = 56,81%)					
TSI	77,84	93,57	50,70		74,04^b
T100	73,81	131,58	72,24		92,54^b
T125	212,84	208,28	78,64		166,59^a
T150	78,99	118,06	70,29		89,11^b
T200	143,96	103,37	110,21		119,18^{ab}
Média	117,49^{AB}	130,97^A	76,42^B		
Camada 60-80 cm (CV = 59,09%)					
TSI	76,13	52,63	110,36		79,71^a
T100	80,48	107,03	48,22		78,58^a
T125	217,32	113,35	102,21		144,29^a
T150	72,67	126,74	81,37		93,59^a
T200	128,48	97,45	118,21		114,71^a
Média	115,02^A	99,44^A	92,07^A		

Tabela 21 - Efeito da irrigação com efluente na concentração de Cálcio na solução do solo (extrato de saturação)

Tratamento	Época de Amostragem			Média
	Fev/05	Dez/05	Set/06	
$\mu\text{mol L}^{-1}$				
Camada 80-100 cm (CV = 58,21%)				
TSI	81,96	68,38	44,52	64,95^b
T100	66,26	96,24	68,92	77,14^b
T125	223,12	95,60	70,71	129,81^a
T150	68,77	62,51	63,10	64,79^b
T200	69,88	91,73	61,45	74,35^b
Média	102,00^A	82,89^{AB}	61,74^B	

TSI: sem irrigação e sem aporte de N via fertilização mineral

T100: 50% N mineral + irrigação com efluente secundário de esgoto tratado na dose 100%

T125: 50% N mineral + irrigação com efluente secundário de esgoto tratado na dose 125%

T150: 50% N mineral + irrigação com efluente secundário de esgoto tratado na dose 150%

T200: 50% N mineral + irrigação com efluente secundário de esgoto tratado na dose 200%

Letras iguais maiúsculas ou minúsculas nas linhas e nas colunas não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey ($P < 0,05$).

Ao longo do experimento as concentrações de Ca no extrato de saturação diminuíram, com diferenças não significativas entre amostragens apenas para a camada 60-80 cm (Tabela 21). Estas alterações muito provavelmente estão associadas à redução estatisticamente significativa ocorrida nos teores de Ca trocável quando da última amostragem, exceção feita à camada 40-60 cm (Tabela 21).

Reduções ao longo do tempo nos teores de Ca solúvel no extrato de saturação são igualmente relatadas no trabalho de Santos (2004), atribuindo-os a redução dos teores do elemento no complexo de troca do solo.

Gloaguen et al. (2007), monitorando a solução do solo através de lisímetros ao longo de dois anos com cultivos alternados de milho e girassol, relata pequenas variações nos teores de Ca em solução ao longo dos ciclos de cultivo, sem alterações significativas ao longo do tempo.

Fonseca (2005) relata baixa correlação entre os teores de Ca em solução e trocável, considerando os extratos de saturação pouco representativos nas determinações deste elemento, uma vez que o período de uma noite disponível ao equilíbrio solo-solução, empregado na metodologia, provavelmente não é suficiente para que o Ca atinja o equilíbrio solo-solução em razão do mesmo ser mais firmemente retido no complexo de troca.

Alterações nas concentrações de Mg no extrato de saturação ocorreram apenas em profundidade, nas camadas 60-80 e 80-100 cm (Tabela 22). Nestas mesmas, as diferenças

consistiram em concentrações de Mg solúvel significativamente maiores no tratamento T125 que, da mesma forma que o Ca, também foram maiores nas demais camadas a partir de 10-20 cm, mesmo não sendo estas variações estatisticamente significativas (Tabela 22).

Com relação às épocas de amostragem ocorreram decréscimos significativos nos teores de Mg, com exceção das camadas 40-60 e 60-80 cm, camadas estas onde também ocorreram reduções nos teores de Mg solúvel, não sendo, porém, estatisticamente diferentes das demais épocas (Tabela 22).

Gloaguen et al. (2007), em experimento já citado anteriormente, monitorando as concentrações de Mg em solução, através do uso de lisímetros instalados na área experimental, igualmente obteve decréscimos contínuos nos teores de Mg solúvel ao longo dos 2 anos de estudo.

Tabela 22 - Efeito da irrigação com efluente na concentração de Magnésio na solução do solo (extrato de saturação)

(continua)

Tratamento	Época de Amostragem			Média
	Fev/05	Dez/05	Set/06	
	$\mu\text{mol L}^{-1}$			
Camada 0-10 cm (CV = 154,27%)				
TSI	595,45	239,05	285,43	373,31^a
T100	885,77	269,83	63,70	406,43^a
T125	1189,41	491,28	173,62	618,10^a
T150	576,59	193,09	62,81	277,50^a
T200	2623,95	393,67	106,59	1041,40^a
Média	1174,23^A	317,38^B	138,43^B	
Camada 10-20 cm (CV = 77,59%)				
TSI	371,99	120,23	216,13	236,12^a
T100	689,12	282,67	46,90	339,56^a
T125	1055,75	372,79	65,58	498,04^a
T150	580,37	183,70	44,72	269,60^a
T200	752,44	368,26	108,06	409,59^a
Média	689,93^A	265,53^B	96,28^B	
Camada 20-40 cm (CV = 81,32%)				
TSI	35,88	42,72	65,44	48,01^a
T100	93,70	137,65	54,81	95,39^a
T125	286,14	328,17	91,74	235,35^a
T150	48,23	118,05	36,07	67,45^a
T200	271,42	204,23	48,05	174,57^a
Média	147,07^A	166,16^A	59,22^B	
Camada 40-60 cm (CV = 107,69%)				
TSI	8,47	16,36	20,07	14,97^a
T100	4,77	51,72	18,11	24,87^a
T125	124,53	120,21	17,04	87,26^a
T150	27,29	43,25	22,77	31,10^a
T200	85,50	35,97	28,09	49,85^a
Média	50,11^A	53,50^A	21,22^A	
Camada 60-80 cm (CV = 94,16%)				
TSI	7,27	11,09	48,25	22,20^{ab}
T100	5,19	36,79	10,94	17,64^b
T125	102,40	40,12	32,04	58,19^a
T150	19,81	27,04	15,73	20,86^{ab}
T200	42,97	20,86	34,61	32,81^{ab}
Média	35,53^A	27,18^A	28,31^A	

Tabela 22 - Efeito da irrigação com efluente na concentração de Magnésio na solução do solo (extrato de saturação)

Tratamento	Época de Amostragem			Média
	Fev/05	Dez/05	Set/06	
Camada 80-100 cm (CV = 99,86%)				
TSI	14,44	10,29	7,81	10,85^b
T100	9,75	31,99	17,31	19,68^b
T125	140,52	40,49	18,39	66,47^a
T150	17,74	20,66	15,45	17,95^b
T200	34,43	21,95	14,74	23,71^b
Média	43,38^A	25,08^{AB}	14,74^B	

TSI: sem irrigação e sem aporte de N via fertilização mineral

T100: 50% N mineral + irrigação com efluente secundário de esgoto tratado na dose 100%

T125: 50% N mineral + irrigação com efluente secundário de esgoto tratado na dose 125%

T150: 50% N mineral + irrigação com efluente secundário de esgoto tratado na dose 150%

T200: 50% N mineral + irrigação com efluente secundário de esgoto tratado na dose 200%

Letras iguais maiúsculas ou minúsculas nas linhas e nas colunas não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey (P<0,05).

As concentrações de Na solúvel, da mesma forma que as concentrações de Na trocável, foram alteradas pelos tratamentos empregados em todas as camadas estudadas (Tabela 23). Em geral, os tratamentos que receberam aporte de efluente, independentemente da lâmina de irrigação, ocasionaram incrementos significativos nos teores de Na em solução. Os acréscimos generalizados ao longo de todo o perfil estão associados, claramente, ao elevado aporte de Na via efluente nos tratamentos T100 a T200, bem como a elevada mobilidade do elemento na matriz do solo (Tabela 23). Comparando-se apenas os tratamentos irrigados, T100 a T200, diferenças significativas ocorreram somente nas camadas 10-20 e 60-80 cm (Tabela 23).

Tabela 23 - Efeito da irrigação com efluente na concentração de Sódio na solução do solo (extrato de saturação)

(continua)

Tratamento	Época de Amostragem			Média
	Fev/05	Dez/05	Set/06	
mmol L⁻¹				
Camada 0-10 cm (CV = 31,91%)				
TSI	1,36	0,52	0,51	0,80^b
T100	0,75	4,62	5,48	3,62^a
T125	0,19	4,66	4,58	3,14^a
T150	0,70	4,92	3,70	3,11^a
T200	0,69	6,72	4,45	3,95^a
Média	0,74^B	4,29^A	3,74^A	
Camada 10-20 cm (CV = 34,51%)				
TSI	2,37	1,60	1,40	1,79^c
T100	1,65	5,72	3,73	3,70^{ab}
T125	0,30	5,12	3,47	2,96^{bc}
T150	1,49	5,04	3,26	3,26^{bc}
T200	1,19	6,82	7,11	5,04^a
Média	1,40^C	4,86^A	3,79^B	
Camada 20-40 cm (CV = 23,12%)				
TSI	1,95	1,90	1,93	1,93^b
T100	1,89	4,37	6,06	4,11^a
T125	0,34	5,19	5,89	3,81^a
T150	1,22	5,05	5,64	3,97^a
T200	1,56	4,60	6,61	4,26^a
Média	1,39^C	4,22^B	5,23^A	
Camada 40-60 cm (CV = 15,16%)				
TSI	1,70	1,79	1,22	1,57^b
T100	1,43	3,46	4,46	3,12^a
T125	0,35	3,67	3,75	2,59^a
T150	1,50	3,99	4,84	3,44^a
T200	1,92	3,17	4,57	3,22^a
Média	1,38^A	3,22^B	3,77^A	
Camada 60-80 cm (CV = 22,56%)				
TSI	1,71	1,99	1,21	1,64^c
T100	1,29	3,68	4,29	3,09^a
T125	0,44	3,16	3,26	2,29^b
T150	1,46	3,61	3,60	2,89^a
T200	1,72	2,92	4,71	3,12^a
Média	1,32^B	3,07^A	3,41^A	

Tabela 23 - Efeito da irrigação com efluente na concentração de Sódio na solução do solo (extrato de saturação)

Tratamento	Época de Amostragem			Média
	Fev/05	Dez/05	Set/06	
mmol L ⁻¹				
Camada 80-100 cm (CV = 25,20%)				
TSI	1,75	1,92	1,27	1,65^b
T100	1,54	3,57	3,86	2,99^a
T125	0,59	2,87	3,36	2,27^{ab}
T150	1,58	2,73	4,00	2,77^a
T200	1,67	3,07	3,77	2,84^a
Média	1,43^B	2,83^A	3,25^A	

TSI: sem irrigação e sem aporte de N via fertilização mineral

T100: 50% N mineral + irrigação com efluente secundário de esgoto tratado na dose 100%

T125: 50% N mineral + irrigação com efluente secundário de esgoto tratado na dose 125%

T150: 50% N mineral + irrigação com efluente secundário de esgoto tratado na dose 150%

T200: 50% N mineral + irrigação com efluente secundário de esgoto tratado na dose 200%

Letras iguais maiúsculas ou minúsculas nas linhas e nas colunas não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey (P<0,05).

O comportamento do íon Na⁺ na solução do solo está relacionado, em grande parte, ao impacto do balanço evaporação-precipitação, bem como a magnitude dos processos de adsorção-dessorção atuantes no complexo de troca do solo (GLOAGUEN et al., 2007).

Confirmando os resultados aqui verificados, Gloaguen et al. (2007), estudando a dinâmica da solução de um solo irrigado com ESET, obteve aumentos e concentrações expressivas de Na solúvel em profundidades de até 2 m, associando estes aumentos do sódio ao longo do perfil a uma maior possibilidade de ocorrência de efeitos deletérios ao sistema solo-planta em sub-superfície.

Quanto aos efeitos das épocas de amostragem, ocorreram incrementos nos teores de Na solúvel ao longo do experimento (Tabela 23). Os acréscimos por conta da última amostragem foram, quando comparados com o início do experimento, significativos em todas as camadas consideradas. É interessante acrescentar que, apesar de nem sempre estatisticamente significativos, comparando-se a terceira com a segunda amostragem, até 20 cm ocorreram decréscimos nos teores em solução, enquanto que abaixo de 20 cm, os teores mantiveram-se mais elevados (Tabela 23). É bastante provável que esta redução em superfície esteja associada ao corte da irrigação ocorrido antes da última amostragem em razão do estresse hídrico requerido pela cultura da cana, diminuindo-se portanto o aporte de Na via efluente ao longo deste período, além

da precipitação de 90 mm que certamente contribuiu para a lixiviação de parte deste Na em superfície.

Os tratamentos empregados não resultaram em alterações nas concentrações de K solúvel em nenhuma das camadas consideradas (Tabela 24). Igualmente, para as épocas de amostragem, as diferenças foram desprezíveis, com uma pequena diminuição nos teores em profundidade (camadas 60-80 e 80-100 cm) no momento da última amostragem (Tabela 24).

Fonseca (2005) detalha os principais fatores que podem interferir e afetar negativamente a representatividade dos valores obtidos em solução pela metodologia dos extratos de saturação. O autor coloca que o fato dos cátions monovalentes, tal como o K e o Na, atingirem um equilíbrio dinâmico mais rápido com a fase sólida torna a metodologia, não obstante limitações de outra natureza associadas à mesma, mais adequada ao estudo destes elementos mais móveis. Neste mesmo estudo, dando maior consistência a esta colocação, o autor relata que, dentre os cátions Al^{+3} , Ca^{+2} , Mg^{+2} e K^{+} , melhores correlações destes com os teores trocáveis foram obtidas para este último elemento nas diferentes camadas de solo consideradas.

Neste trabalho, ao contrário do que se poderia esperar, os extratos de saturação não foram eficientes no estudo do K em solução, visto os elevados coeficientes de variação (CV) obtidos para o elemento (Tabela 24), o maior dentre os cátions aqui considerados, bem como em razão da ausência de correlação entre os teores de K trocável e em solução (vide Tabela 26 em anexo).

Tabela 24 - Efeito da irrigação com efluente na concentração de Potássio na solução do solo (extrato de saturação)

(continua)

Tratamento	Época de Amostragem			Média
	Fev/05	Dez/05	Set/06	
mmol L⁻¹				
Camada 0-10 cm (CV = 70,27%)				
TSI	0,97	1,08	1,87	1,31^a
T100	1,15	1,54	0,22	0,97^a
T125	0,80	0,93	1,79	1,17^a
T150	0,83	0,50	1,96	1,10^a
T200	0,77	1,40	0,87	1,01^a
Média	0,90^A	1,09^A	1,34^A	
Camada 10-20 cm (CV = 108,34%)				
TSI	0,59	0,65	0,97	0,74^a
T100	0,79	0,58	0,56	0,64^a
T125	0,63	0,27	0,25	0,38^a
T150	0,53	0,27	0,76	0,52^a
T200	0,47	1,51	0,90	0,96^a
Média	0,60^A	0,66^A	0,69^A	
Camada 20-40 cm (CV = 138,42%)				
TSI	0,20	0,52	2,17	0,96^a
T100	0,38	1,66	2,60	1,55^a
T125	1,06	1,08	0,69	0,94^a
T150	0,11	0,83	0,05	0,33^a
T200	0,14	1,83	1,30	1,09^a
Média	0,38^A	1,18^A	1,36^A	
Camada 40-60 cm (CV = 180,75%)				
TSI	1,17	1,40	0,04	0,87^a
T100	0,07	0,58	2,64	1,10^a
T125	1,65	0,42	0,07	0,71^a
T150	0,09	0,92	0,07	0,36^a
T200	0,09	0,83	0,08	0,33^a
Média	0,61^A	0,83^A	0,58^A	
Camada 60-80 cm (CV = 139,82%)				
TSI	0,08	0,17	0,25	0,17^a
T100	0,07	1,44	0,05	0,52^a
T125	1,19	1,66	0,99	1,28^a
T150	2,49	0,22	0,10	0,94^a
T200	2,44	3,52	0,11	2,02^a
Média	1,25^{AB}	1,40^A	0,30^B	

Tabela 24 - Efeito da irrigação com efluente na concentração de Potássio na solução do solo (extrato de saturação)

Tratamento	Época de Amostragem			Média
	Fev/05	Dez/05	Set/06	
mmol L⁻¹				
Camada 80-100 cm (CV = 164,05%)				
TSI	1,63	0,14	0,19	0,65^a
T100	0,81	0,31	1,31	0,81^a
T125	1,55	0,19	0,27	0,67^a
T150	1,57	0,37	0,07	0,67^a
T200	0,07	0,06	0,08	0,07^a
Média	1,13^A	0,21^B	0,38^{AB}	

TSI: sem irrigação e sem aporte de N via fertilização mineral

T100: 50% N mineral + irrigação com efluente secundário de esgoto tratado na dose 100%

T125: 50% N mineral + irrigação com efluente secundário de esgoto tratado na dose 125%

T150: 50% N mineral + irrigação com efluente secundário de esgoto tratado na dose 150%

T200: 50% N mineral + irrigação com efluente secundário de esgoto tratado na dose 200%

Letras iguais maiúsculas ou minúsculas nas linhas e nas colunas não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey (P<0,05).

A solução do solo, por sua própria natureza, apresenta uma grande variabilidade no espaço-tempo, cujas alterações nas concentrações dos íons se dão em curto prazo como resultado da diversidade de processos atuantes e determinantes das concentrações de cátions em solução.

Ademais, as plantas não apenas absorvem grandes quantidades de K, mas também são altamente eficientes neste processo. O K é o elemento extraído em maiores quantidades pela cultura da cana (ROSOLEM, 2005).

Assim, a elevada variação nas concentrações de K em solução, bem como a hipotética inadequação da pasta de saturação nesta quantificação, poderia ser atribuída aos fatores: (i) dinamismo, complexidade e elevada variabilidade próprias do sistema solução do solo; (ii) limitações relacionadas à natureza do método utilizado, detalhadas e adequadamente discutidas por Fonseca (2005); (iii) elevada e rápida absorção e translocação do K pelas plantas em geral e em especial para a cana (ROSOLEM, 2005).

Esta somatória de fatores, independente da importância relativa de cada fator mencionado, seguramente prejudicou o valor das determinações e a aplicabilidade de qualquer interpretação. Por fim vale mencionar que a planta, em razão de sua fisiologia, independente da grande variabilidade na disponibilidade individual dos cátions em solução, tenderá sempre a manter um balanço satisfatório de cátions nos seus tecidos, deduzindo-se daí que o eventual excesso de

suprimento de determinado cátion será compensando por uma menor absorção de outras espécies catiônicas.

Efeitos dos tratamentos nos valores de razão de adsorção de sódio (RAS) ocorreram em todas as camadas estudadas (Tabela 25). Nestas camadas a irrigação com efluente proporcionou incrementos significativos nos valores de RAS na comparação com o TSI sem irrigação. (Tabela 25). Estas alterações estão diretamente relacionadas aos acréscimos generalizados ocorridos ao longo de todo o perfil nos teores de Na solúvel (Tabela 23) e a pouca ou nenhuma alteração nas concentrações em solução dos cátions divalentes, Ca^{+2} e Mg^{+2} (Tabelas 21 e 22), alterações estas que, por sua vez, são resultado do desbalanço entre as concentrações dos respectivos íons no ESET.

Com relação às épocas de amostragem ocorreram alterações significativas nos valores de RAS em todas as camadas consideradas, com aumentos generalizados ao longo do experimento (Tabela 25). Com o tempo, a absorção radicular e a adsorção pelo complexo de troca ocasionaram reduções nas concentrações em solução dos cátions Ca e Mg, enquanto que, simultaneamente, a grande mobilidade do Na e suas elevadas concentrações no efluente resultaram em incrementos nos seus teores em solução, afetando significativamente os valores de RAS. Na amostragem final, os valores de RAS calculados para as profundidades a partir de 20 cm, foram maiores que em superfície e próximos ao valor médio de RAS calculado para o efluente (10,34), evidenciando o impacto do sódio no sistema solo.

Gloaguen et al. (2007) igualmente obteve aumentos nos valores de RAS em sub-superfície. O conjunto das alterações obtidas nos parâmetros Na trocável, Na solúvel, percentual de sódio trocável (PST) e RAS atestam os riscos de sodicidade ao sistema solo.

Ademais, o baixo conteúdo de matéria orgânica e a conseqüente baixa capacidade de troca de cátions bastante comuns nos solos tropicais, podem acelerar o processo de sodificação, potencializando prejuízos a física do solo, taxas de infiltração e estabilidade das produções agrícolas (GLOAGUEN et al., 2007).

Tabela 25 - Efeito da irrigação com efluente na RAS (razão de adsorção de sódio) da solução do solo (extrato de saturação)

(continua)

Tratamento	Época de Amostragem			Média
	Fev/05	Dez/05	Set/06	
	(mmol L ⁻¹) ^{0,5}			
Camada 0-10 cm (CV = 38,22%)				
TSI	1,18	0,73	0,62	0,84^c
T100	0,54	6,04	10,97	5,85^a
T125	0,13	4,93	7,52	4,19^b
T150	0,68	7,13	8,03	5,28^{ab}
T200	0,49	8,03	8,13	5,55^{ab}
Média	0,60^C	5,37^B	7,05^A	
Camada 10-20 cm (CV = 30,46%)				
TSI	2,51	2,68	2,30	2,50^b
T100	1,72	6,75	7,87	5,45^a
T125	0,28	5,92	7,36	4,52^{ab}
T150	1,52	6,95	6,56	5,01^{ab}
T200	1,27	8,27	12,05	7,20^a
Média	1,46^B	6,11^A	7,23^A	
Camada 20-40 cm (CV = 24,43%)				
TSI	4,83	4,82	5,81	5,15^b
T100	3,88	7,52	14,00	8,47^a
T125	0,51	6,78	12,35	6,55^{ab}
T150	3,49	9,08	13,78	8,78^a
T200	3,33	7,67	15,84	8,95^a
Média	3,21^C	7,17^B	12,36^A	
Camada 40-60 cm (CV = 32,81%)				
TSI	6,17	5,85	6,92	6,31^b
T100	5,25	8,19	14,99	9,48^a
T125	0,64	6,69	13,79	7,04^b
T150	5,12	10,23	16,64	10,66^a
T200	5,34	8,83	13,12	9,10^a
Média	4,50^C	7,96^B	13,09^A	
Camada 60-80 cm (CV = 32,36%)				
TSI	6,27	7,88	7,62	7,26^{bc}
T100	4,57	9,98	17,75	10,77^a
T125	0,83	8,14	9,34	6,10^c
T150	5,10	9,52	11,84	8,82^{ab}
T200	4,63	8,68	12,49	8,60^{abc}
Média	4,28^C	8,84^B	11,81^A	

Tabela 25 - Efeito da irrigação com efluente na RAS (razão de adsorção de sódio) da solução do solo (extrato de saturação)

(conclusão)

Tratamento	Época de Amostragem			Média
	Fev/05	Dez/05	Set/06	
	(mmol L ⁻¹) ^{0,5}			
Camada 80-100 cm (CV = 22,65%)				
TSI	5,66	7,17	5,53	6,12^c
T100	6,19	9,91	13,53	9,88^{ab}
T125	1,10	8,21	11,94	7,08^{bc}
T150	5,67	9,52	14,52	9,90^{ab}
T200	6,42	9,98	14,16	10,19^a
Média	5,01^c	8,96^B	11,94^A	

TSI: sem irrigação e sem aporte de N via fertilização mineral

T100: 50% N mineral + irrigação com efluente secundário de esgoto tratado na dose 100%

T125: 50% N mineral + irrigação com efluente secundário de esgoto tratado na dose 125%

T150: 50% N mineral + irrigação com efluente secundário de esgoto tratado na dose 150%

T200: 50% N mineral + irrigação com efluente secundário de esgoto tratado na dose 200%

Letras iguais maiúsculas ou minúsculas nas linhas e nas colunas não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey (P<0,05).

5. CONCLUSÕES

A utilização de efluente secundário de esgoto tratado na irrigação da cana ocasionou incrementos consideráveis nos diversos parâmetros relacionados a sodicidade/salinidade do sistema solo, tais como: teores de Na trocável, Na solúvel, percentual de sódio trocável, condutividade elétrica da solução do solo. O efluente foi igualmente responsável por aportes consideráveis de determinados nutrientes, como por exemplo Ca e K, cujas alterações no solo, entretanto, não foram tão evidentes quanto as ocorridas nos parâmetros de salinidade/sodicidade. A irrigação com ESET atua diretamente como amenizador da acidez ativa e potencial, entretanto, na prática, a magnitude deste efeito é desprezível, não substituindo a calagem.

Comparando-se apenas os tratamentos que receberam irrigação com efluente, T100-T200, as alterações foram, até o presente momento, pouco diferenciadas, independentemente do parâmetro considerado.

A produtividade da cana foi positivamente afetada nos tratamentos onde a irrigação com efluente foi realizada, principalmente em razão do aporte contínuo de umidade no sistema. O efeito positivo da umidade se confirma pelas alterações de pequena ou nenhuma magnitude na nutrição da cultura no primeiro ciclo.

As perspectivas para irrigação da cana-de-açúcar com efluente de esgoto tratado são bastante promissoras, demandando, entretanto, que todos os riscos envolvidos sejam adequadamente mensurados e que estratégias específicas de manejo sejam aplicadas, objetivando a minimização de possíveis efeitos deletérios à qualidade do solo e à estabilidade da produtividade dos cultivos, garantindo, em última análise, à sustentabilidade da prática do reuso.

Ademais, somente avaliações de longo prazo, assim como a realização de estudos mais detalhados que englobem a totalidade dos parâmetros relacionados à qualidade do solo - como por exemplo, as alterações na estrutura, diversidade e funcionalidade da comunidade microbiana - poderão fundamentar a recomendação e a adoção generalizada do reuso agrícola do ESET.

REFERÊNCIAS

AGENDA 21. **Conferência das Nações Unidas sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento**. Brasília: Senado Federal, 1996. 585 p.

AGUIAR, F.L. Cana-de-açúcar: de gota em gota. In: FNP COSULTORIA & COMÉRCIO. **Agriannual, 2006**: Anuário da Agricultura Brasileira, São Paulo, 2006. p. 227-248.

AL-NAKSHABANDI, G.A.; SAQQAR, M.M.; SHATANAWI, M.R.; FAYYAD, M.; AL-HORANI, H. Some environmental problems associated with the use of treated wastewater for irrigation in Jordan. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v.34, p.81-94, 1997.

AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION (APHA) - AMERICAN WATER WORKS ASSOCIATION (AWWA). Standard methods for the examination for water and wastewater. 20th ed. Washington, 1999. 1220p.

BALKS, M.R.; BOND, W.J.; SMITH, C.J. Effects of sodium accumulation on soil physical properties under an effluent-irrigated plantation. **Australian Journal of Soil Research**, Melbourne, v.36, p.821-830, 1998.

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

BOUWER, H. Integrated water management: emerging issues and challenges. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v.45, p.217-228, 2000.

BOUWER, H.; IDELOVITCH, E. Quality requirements for irrigation with sewage water. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, New York, v. 113, p.516-535, 1987.

CAMERON, K.C.; DI, H.J.; McLAREN, R.G. Is soil an appropriate dumping ground for our wastes? **Australian Journal of Soil Research**, Melbourne, v.35, p.995-1035, 1997.

CARRETERO, M.V. **Utilização do tanque classe “A” para o controle da irrigação por gotejamento em soqueiras de cana-de-açúcar (*Saccharum spp*)**. 1982. 86p. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1982.

CHIBA, M.K. **Uso de lodo de esgoto na cana-de-açúcar como fonte de nitrogênio e fósforo: parâmetros de fertilidade do solo, nutrição da planta e rendimentos da cultura**. 2005. 142p. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2005.

CUNHA, C.A.H.; MACHADO, R.E.; COELHO, R.D. Irrigação da cana-de-açúcar: análise econômica. **STAB – Açúcar, Álcool e Subprodutos**. v.19, n.4, mar./abr. p. 30-34, 2001.

DEMATTÊ, J.L.I. Recuperação e Manutenção da Fertilidade dos Solos. **Informações Agrônômicas. Instituto da Potassa e do Fosfato. Encarte técnico Piracicaba**, Piracicaba, n. 111, p. 1-24, set. 2005.

DEMÉTRIO, V.A. **Efeito da água do solo e temperatura ambiente no rendimento agrícola e industrial da cana-de-açúcar (*Saccharum spp*)**. 1978. 98p. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1978.

DORICH, R.A.; NELSON, D.W.; SOMMERS, L.E. Algal availability of phosphorus in suspended stream sediments of varying particle size. **Journal of Environmental Quality**, Madison, v. 13, p.82-86, 1984.

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

EMBRAPA. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Rio de Janeiro:Centro Nacional de Pesquisa de Solos, 1999b. 412p.

FALKINER, R.A.; SMITH, C.J. Changes in soil chemistry in effluent-irrigated *Pinus radiata* and *Eucalyptus grandis*. **Australian Journal of Soil Research**, Melbourne, v.35, p.131-147, 1997.

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

FNP COSULTORIA & COMÉRCIO. **Agrianual 2006**: Anuário da agricultura brasileira, São Paulo, 2006. p. 261-277.

FRIEDEL, J.K.; LANGER, T.; SIEBE, C.; STAHR, K. Effects of long-term waste water irrigation on soil organic matter, soil microbial biomass and its activities in central Mexico. **Biology and Fertility Soils**, Berlin, v.31, p.414-421, 2000.

FRIEDLER, E.; LAHAV, O.; JIZHAKI, HAGAR.; LAHAV, T. Study of urban population attitudes towards various wastewater reuse options: Israel as a case study. **Journal of Environmental Management**, New York, v. 81, p. 360-370, 2006.

FONSECA, A. F. **Disponibilidade de nitrogênio, alterações nas características químicas do solo e do milho pela aplicação de efluente de esgoto tratado**. 2001. 110p. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2001.

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.

FONSECA, A.F.; HERPIN, U. ; PAULA, A. M. ; VICTORIA, R. L. ; MELFI, A. J. Agricultural Use of Treated Sewage Effluents: Agronomical-Environmental Implications and Perspectives for Brazil. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v.64, 2007. In press.

GLOAGUEN, T.V. **Transferências de espécies químicas através de um solo cultivado com milho e girassol e fertirrigado com efluente de esgoto doméstico**. 2006. 113p. Tese (Doutorado em Geoquímica e Geotectônica) – Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

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

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

IBRAHIM, L. **Caracterização física, química, mineralógica e morfológica de uma seqüência de solos em Lins/SP**. 2002. 86p. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2002.

JOHNS, G.G.; McCONCHIE, D.M. Irrigation of bananas with secondary treated sewage effluent. II. Effect on plant nutrients, additional elements and pesticide residues in plants, soil and leachate using drainage lysimeters. **Australian Journal of Agricultural Research**, Melbourne, v.45, p.1619-1638, 1994b.

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.

MAAS, E.V. Salt tolerance of plants. In: CHRISTIE, B.R. **Handbook of plant science in agriculture**. Boca Raton: CRC Press, 1984. 288p.

MAGALHÃES, A.C.N. Ecofisiologia da cana-de-açúcar: aspectos do metabolismo do carbono na planta. In: CASTRO, P.R.C.; FERREIRA, S.O.; TSUIOSHI, Y. **Ecofisiologia da produção agrícola**. Piracicaba: POTAFOS, 1987.249p.

MAGRO, J.A. Irrigação em cana. **STAB – Açúcar, Álcool e subprodutos**, Piracicaba. v.19, n.1, p. 44-46, set./out., 2000.

MALAVOLTA, E.; VITTI, G.C.; OLIVEIRA, S.A. **Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações**. 2.ed. Piracicaba: Potafos, 1997. 319p.

MALAVOLTA, E. **Manual de nutrição mineral de plantas**. São Paulo: Agronômica CERES, 2006. 631p.

- MATIOLI, C.S. **Irrigação suplementar de cana-de-açúcar (*Saccharum spp*): modelo de análise de decisão para o Estado de São Paulo**. 1998. 122p. Tese (Doutorado em Agronomia) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1998.
- McINTYRE, D.S. Exchangeable sodium, subplasticity and hydraulic conductivity of some Australian soils. **Australian Journal of Soil Research**, Melbourne, v.17, p.115-120, 1979.
- MENNEER, J.C.; McLAY, C.D.A.; LEE, R. Effects of sodium-contaminated wastewater on soil permeability of two New Zealand soils. **Australian Journal of Soil Research**, Melbourne, v.39, p.877-891, 2001.
- MONTAIGNE, F. Água sob pressão. **National Geographic Brasil**, São Paulo. v.29, p. 50-80, 2002.
- NELSON, D.W.; SOMMERS, L.E. Total carbon, organic carbon, and organic matter. In: SPARKS, D.L. **Methods of soil analysis: chemical methods**. Madison: Soil Science Society of America/American Society of Agronomy, 1996. p.961-1010.
- NELSON, P.N.; HAM, G.J. Exploring the response of sugar cane to sodic and saline conditions through natural variation in the field. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 66, p. 245-255, 2000.
- OKI, T.; KANAE, S. Global Hydrological Cycles and World Water Resources. **Science**, Washington, v. 313, p. 1068-1072, 2006.
- OSTER, J.D.; SHAINBERG, I. Soil responses to sodicity and salinity: challenges and opportunities. **Australian Journal of Soil Research**, Melbourne, v. 39, p.1219-1224, 2001.
- PANAYIOTOPOULOS, K.P.; BARBAYIANNIS, N.; PAPTOLIOS, K. Influence of electrolyte concentration, sodium adsorption ratio, and mechanical disturbance on dispersed clay particle size and critical flocculation concentration in Alfisols. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v. 35, p. 1415-1434, 2004.
- PESCOD, M.B Wastewater treatment and use in agriculture. **Irrigation and Drainage Paper**. Rome: FAO, 1992. n 47,125p., 1992.
- PIVELI, R.P., DORIA, M.C Condições Operacionais de Sistema de Tratamento de Esgotos por Lagoas de Estabilização em Lins/SP. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 22., 2003, Joinville. **Anais...** ABES, Joinville, 2003.1CD-ROM.
- POSTEL, S.; VICKERS, A. Incrementando a produtividade hídrica. In: HALWEIL, B.; MASTNY, L. **Estado do mundo, 2004: estado do consumo e o consumo sustentável**. Salvador: Uma Ed, 2004. p.55-78.
- POSTEL, S. L., DAILY, G.C.; EHRLICH, P.R. Human appropriation of renewable fresh water. **Science**, Washington, v.271, p.785-788, 1996.

PREFEITURA MUNICIPAL DE LINS. Disponível em:

<<http://www.lins.sp.gov.br/site/dados%20de%20lins/economia/link%20economia.htm>>. Acesso em: 14 jan. 2006.

QUIN, B.F.; WOODS, P.H. Surface irrigation of pasture with treated sewage effluent. I. Nutrient status of soil and pastures. **New Zealand Journal of Agricultural Research**, Wellington, v.21, p.419-426, 1978.

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

RAIJ, B. van.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J.A.; FURLANI, A.M.C. (Ed.). **Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo**. 2.ed. Campinas: Instituto Agrônomo, 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 Agrônomo, 2001. 285p.

ROSOLEM, C. A. Interação do potássio com outros íons. In: SIMPÓSIO SOBRE POTÁSSIO NA AGRICULTURA BRASILEIRA, 2004, São Pedro. **Anais ...** Piracicaba: Potafos, 2005. p. 239-256.

SANTOS, A.P.R. **Efeito da irrigação com efluente de esgoto tratado, rico em sódio, em propriedades químicas e físicas de um argissolo vermelho distrófico cultivado com capim-Tifton 85**. 2004. 79p. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas)- Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2004.

SARRUGE, J.R.; HAAG, H.P. **Análises químicas em plantas**. Piracicaba: ESALQ, 1974. 55p.

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

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

SMITH, C.J.; HOPMANS, P.; COOK, F.J. Accumulation of Cr, Pb, Cu, Ni, Zn and Cd in soil following irrigation with treated urban effluent in Australia. **Environmental Pollution**, London, v. 94, p. 317-323, 1996.

SOARES, R.A.B.; OLIVEIRA, P.F.M.; CARDOSO, H.R.; VASCONCELOS, A.C.M.; LANDELLE, M.G.A.; ROSENFELD, U. Efeito sobre o desenvolvimento e a produtividade de duas variedades de cana-de-açúcar colhidas em início de safra. **STAB – Açúcar, Álcool e subprodutos**, Piracicaba, v.22, n.4, mar/abr, 2004. p.38-41.

SPEIR, T.W.; VAN SCHAİK, A.P.; KETTLES, H.A.; VICENT, K.W.; CAMPBELL, D.J. Soil and stream-water impacts of sewage effluent irrigation onto steeply sloping land. **Journal of Environmental Quality**, Madison, v. 28, p.1105-1114, 1999.

STEWART, H.T.L.; HOPMANS, P.; FLINN, D.W. Nutrient accumulation in trees and soil following irrigation with municipal effluent in Australia. **Environmental Pollution**, London, v.63, p.155-177, 1990.

SUMNER, M.E. Sodic Soils: New Perspectives. **Australian Journal of Soil Research**, Melbourne, v. 31, p.683-750, 1993.

SURAPANENI, A.; OLSSON, K.A. Sodification under conjunctive water use in the Shepparton Irrigation Region of northern Victoria: a review. **Australian Journal of Experimental Agriculture**, Melbourne, v.42, p.249-263, 2002.

TILMAN, D.; CASSMAN, K.G.; MATSON, P.A.; NAYLOR, R.; POLASKY, S. Agricultural sustainability and intensive production practices. **Nature**, London, v. 418, p. 671-677, 2002.

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

TOZE, S. Reuse of effluent water – benefits and risks. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v.80, p. 147-159, 2006.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS. Disponível em:
<<http://pmgca.dbv.ufscar.br/Infopublica/catalogo>>. Acesso em: 18 jan. 2006.

VAN DER STEEN, N.P.; NAKIBONEKA, P.; MANGALIKA, K.; FERRER, A.V.M.;GIJZEN, H.J. Effect of duckweed cover on greenhouse gas emissions and odour release from waste stabilization ponds. **Water Science and Technology**, Oxford, v. 48, p.341-348, 2003.

YAN, F.; SCHUBERT, S.; MENGEL, K. Soil pH increase due to biological decarboxilation of organic anions. **Soil Biology & Biochemistry**, Oxford, v.28, p.617-624, 1996.

WANG, Z.; CHANG, A.C.; WU, L.; CROWLEY, D. Assessing the soil quality of long-term reclaimed wastewater-irrigated cropland. **Geoderma**, Amsterdam, v.114, p.261-278, 2003.

WOLT, J.D. **Soil solution chemistry**: applications to environmental science and agriculture. New York: John Wiley, 1994. 345 p.

ANEXO

Mediante a análise dos resultados dos coeficientes de correlação entre alguns parâmetros de interesse (Tabela 26) obteve-se:

- a) Ao contrário do que se poderia prever, não ocorreram correlações entre as concentrações de K solúvel e trocável, com exceção da camada 20-40 cm onde, mesmo assim, o coeficiente de correlação foi baixo ($r < 0,7$).
- b) Ausência de correlação solo-solução para o Ca nas camadas 40-60 e 80-100 cm e para Mg nas camadas 0-10, 10-20 e 80-100 cm, e baixa correlação para as demais camadas e ambos os elementos.
- c) Baixa correlação ou ausência de correlação entre os parâmetros Al solúvel com Al trocável e com pH (do solo e da solução no solo).
- d) Boas correlações entre as concentrações em solução e no solo para o Na em todo o perfil.
- e) Em geral, verificam-se boas correlações entre os diversos parâmetros relacionados à salinidade/sodicidade do sistema, tais como Na trocável, Na solúvel, percentual de sódio trocável (PST), razão de adsorção de sódio
- f) Boas correlações entre argila dispersa em água (ADA) e Na trocável, PST, RAS nas camadas superficiais (até 40 cm), e correlações menos intensas entre ADA e os teores de Na em solução.

A respeito da metodologia empregada para os estudos e determinações das concentrações em solução observa-se:

- com base nos coeficientes de variação obtidos para as determinações em solução (apresentados nas tabelas 19,20,21, 22, 23 e 24) e nas correlações aqui apresentadas, conclui-se que os extratos de saturação foram, no presente estudo: (i) eficientes e adequados nas determinações de salinidade (condutividade elétrica) e de Na; (ii) limitados nas quantificações dos cátions divalentes Ca^{+2} e Mg^{+2} ; (iii) inadequados e ineficientes nas quantificações de K e Al em solução.

Fonseca (2005) apresenta e discute detalhadamente as principais limitações da metodologia da pasta de saturação e a sua adequação ou não nos estudos de diferentes elementos em solução. Segundo o autor, os extratos foram bem representativos nos estudos de salinidade, e, quanto aos demais cátions, apesar dos resultados não necessariamente estarem totalmente equivocados, certamente seus valores absolutos não correspondiam às concentrações reais da

solução, haja vista a destruição do arranjo natural da estrutura do solo nas amostras de TFSA destinadas à obtenção dos extratos, e, igualmente, a insuficiência do período de uma noite para que se atinja o equilíbrio entre as concentrações solo-solução, em especial para os cátions de maior valência, tal como o Al.

A grande diferença entre os resultados aqui apresentados e os obtidos por Fonseca (2005) diz respeito às determinações do K solúvel. No trabalho deste último autor, dentre os cátions Al^{+3} , Ca^{+2} , Mg^{+2} e K^{+} , as melhores e mais consistentes correlações se deram nas avaliações do K^{+} . Igualmente, os coeficientes de variação para o K foram os menores em todas as camadas consideradas. Já no presente estudo, os coeficientes de variação foram mais bem mais elevados e correlações com os teores de K não foram observadas. Tal fato, conforme discutido no item 4.6.2 pode estar relacionado ao fato de que o K é o elemento extraído em maiores quantidades pela cultura da cana (ROSOLEM, 2005) apresentando assim uma variabilidade e mobilidade em solução bastante significativa. Entretanto, apenas avaliações no longo prazo poderão fornecer uma informação mais consistente a este respeito, confirmando ou não esta hipótese.

Por fim, ressaltando as colocações de Fonseca (2005) faz-se extremamente necessário o aperfeiçoamento das metodologias para o estudo da solução nas condições locais, a fim de se possibilitar uma melhor e mais confiável caracterização dos elementos em solução. Bastante interessante, especificamente com relação às metodologias laboratoriais, seria o estudo e a condução de experimentos avaliando-se diferentes procedimentos e tempo de armazenamento, assim como diferentes períodos de equilíbrio. Igualmente desejável nos estudos de solução de solo seria a realização de avaliações mais detalhadas a fim de se comparar os resultados fornecidos pelas pastas de saturação e através da metodologia da centrifugação, bem como a integração e associação das quantificações dos elementos em solução com estudos teóricos de modelagem e especiação iônica nos solos sob condições tropicais.

Tabela 26 – Coeficientes de correlação entre alguns dos parâmetros analisados

Parâmetro	Camada (cm)					
	0-10	10-20	20-40	40-60	60-80	80-100
	Ca Trocável					
Ca Solução	0,43**	0,47**	0,59**	0,19 ^{NS}	0,33**	0,13 ^{NS}
	Mg Trocável					
Mg Solução	0,21 ^{NS}	0,24 ^{NS}	0,65**	0,34**	0,37**	0,24 ^{NS}
	K trocável					
K Solução	0,07 ^{NS}	0,01 ^{NS}	0,27*	0,03 ^{NS}	0,12 ^{NS}	0,23 ^{NS}
	Na Trocável					
Na Solução	0,81**	0,55**	0,76**	0,75**	0,70**	0,73**
RAS	0,93**	0,75**	0,83**	0,81**	0,68**	0,80**
ADA	0,77**	0,78**	0,79**	0,37**	0,10 ^{NS}	0,60**
	pH CaCl₂					
pH Solução	0,70**	0,68**	0,58**	0,65**	0,43**	0,10 ^{NS}
Al Trocável	-0,61**	-0,46**	-0,75**	-0,86**	-0,81**	-0,82**
Al Solução	0,26*	0,30*	0,39**	0,26*	0,41**	0,27*
	pH Solução					
Al Trocável	-0,69**	-0,36**	-0,43**	-0,53**	-0,53**	-0,02 ^{NS}
Al Solúvel	0,28*	0,27*	0,28*	0,09 ^{NS}	0,20 ^{NS}	0,10 ^{NS}
	Al trocável					
Al solúvel	-0,16 ^{NS}	-0,20 ^{NS}	-0,36**	-0,30*	-0,32*	-0,24 ^{NS}
	Na Solução					
PST	0,77**	0,51**	0,73**	0,70**	0,69**	0,65**
ADA	0,60**	0,28*	0,63**	0,34**	0,19 ^{NS}	0,38**
	PST					
RAS	0,91**	0,73**	0,86**	0,79**	0,67**	0,75**
ADA	0,77**	0,80**	0,83**	0,44**	-0,02 ^{NS}	0,64**
	RAS					
ADA	0,75**	0,55**	0,79**	0,37**	0,06 ^{NS}	0,49**

NS: Não Significativo. *P<0,05. **P<0,01

Livros Grátis

(<http://www.livrosgratis.com.br>)

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

[Baixar livros de Literatura](#)
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)
[Baixar livros de Matemática](#)
[Baixar livros de Medicina](#)
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)
[Baixar livros de Meteorologia](#)
[Baixar Monografias e TCC](#)
[Baixar livros Multidisciplinar](#)
[Baixar livros de Música](#)
[Baixar livros de Psicologia](#)
[Baixar livros de Química](#)
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)
[Baixar livros de Serviço Social](#)
[Baixar livros de Sociologia](#)
[Baixar livros de Teologia](#)
[Baixar livros de Trabalho](#)
[Baixar livros de Turismo](#)