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

**Efeito da irrigação com efluente de esgoto rico em sódio em
propriedades químicas e físico-hídricas de um Argissolo e
produtividade de capim Tifton 85 no município de Lins**

Aijânio Gomes de Brito Silva

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

**Piracicaba
2013**

Aijânio Gomes de Brito Silva
Engenheiro Agrônomo

Efeito da irrigação com efluente de esgoto rico em sódio em propriedades químicas e físico-hídricas de um Argissolo e produtividade de capim Tifton 85 no município de Lins

versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011

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

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

Piracicaba
2013

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

Silva, Aijânio Gomes de Brito

Efeito da irrigação com efluente de esgoto rico em sódio em propriedades químicas e físico-hídricas de um Argissolo e produtividade de capim Tifton 85 no município de Lins / Aijânio Gomes de Brito Silva. - - versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011. - - Piracicaba, 2013.

83 p: il.

Dissertação (Mestrado) - - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", 2013.

1. Água de reuso 2. Argila dispersa em água 3. Capim tifton 4. Efluentes
5. Irrigação 6. Propriedades do solo 7. Salinidade 8. Sodicidade I. Título

CDD 631.4
S586e

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

DEDICATÓRIA

*Às minhas irmãs **Janaína** e **Taína** e aos meus irmãos **Clébio**, **Diego** e **Jhonny** pela amizade, incentivo, companheirismo e pela presença constante, mesmo estando distantes fisicamente e à Mulher que desde a minha concepção sempre esteve presente oferecendo todas as coisas boas que estavam ao seu alcance, Mulher esta que mesmo diante das dificuldades não desistiu... seguiu. Mulher que, na medida do possível, procurou mostrar o lado bom e ruim das coisas, deixando as escolhas por minha conta. Mulher que até hoje está presente na minha vida me orientando nessa caminhada e, “agora”, mais feliz por a conquista desta etapa.*

*Portanto, aos meus irmãos e à Mulher - minha MÃE, **Voneide Gomes de Brito**,*

dedico.

*Aos meus queridos avós, **Emiliano de Brito Neto** (in memoriam) e **Inez Gomes de Brito**,*

ofereço.

AGRADECIMENTOS

À Deus pelo dom da vida e pela luz que nos oferece a cada dia para seguirmos caminhando.

Ao Professor Dr. Adolpho José Melfi e à Profa. Dra. Célia Regina Montes pela oportunidade de fazer parte do grupo de trabalho, orientação, confiança, paciência, presença em trabalhos de campo, humildade e por serem bons exemplos de pessoa e conduta profissional.

À Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” e em especial ao Programa de Pós-Graduação em Solos e Nutrição de Plantas.

Ao CNPq pela concessão da bolsa de estudos e à FAPESP pelo auxílio financeiro do projeto.

À SABESP-Lins pela concessão da área experimental.

Ao Prof. Dr. Álvaro Pires da Silva pelo apoio em parte das análises do meu trabalho.

Ao Dr. Getulio Coutinho Figueiredo pela disponibilidade e ensinamentos, sobretudo, na área de Física do Solo.

Aos professores: Dr. Carlos Tadeu dos Santos Dias e à Dra. Sonia Maria de Stefano Piedade pelas orientações em parte das análises estatísticas.

Ao Prof. Paulo Leonel Libardi pela a oportunidade de cursar a disciplina de Dinâmica da Água no Solo como aluno ouvinte.

Ao funcionário James Aparecido Mateus pela responsabilidade na condução do experimento de campo e auxílio, juntamente com os ajudantes de campo Srs. José, Expedito e Arnaldo, nas coletas de dados e nos períodos de amostragens.

Aos técnicos e funcionários da ESALQ: Jair Ferrer da Silva pelas orientações durante a realização de análises no Lab. de Física do Solo, Reginaldo N. Nogueira, Luiz A. Silva Junior e José Roberto S. Santos pelo auxílio em pequenas etapas do meu trabalho e, a Sra Marta Campos pelo auxílio em tarefas ligadas à secretaria de Pós-Graduação em Solos e Nutrição de Plantas.

Aos funcionários do Nupegel Nancy do Amaral e Paulo Sebastião pelo suporte dado em tarefas realizadas neste núcleo e pelo convívio durante o mestrado.

Aos amigos do Nupegel: Roberta Clemente Santin pelos ensinamentos no início do meu trabalho e pela ajuda em trabalhos de campo, Julius Blum pela ajuda em parte das amostragens de solo em Lins, Cristina Aparício pela correção de alguns trechos deste trabalho, Débora e Osvaldo pela amizade.

Ao técnico Gustavo Gobet Baldi pela disponibilidade, paciência e ajuda durante parte as análises laboratoriais e também a Alexandra pelo suporte.

Às estagiárias: Eduarda, Daiane, Ana Carolina e Amanda pela ajuda nas análises laboratoriais e organização de material de campo.

Ao Adriano C. L. de Carvalho, a Dra. Tamara Maria Gomes e ao Prof. Dr. Yves Lucas pelo tempo disponibilizado.

Ao amigo Marinaldo Ferreira Pinto e ao departamento de Engenharia de Biossistemas pelo apoio na realização de teste de uniformidade de irrigação da área experimental de Lins.

À funcionária Meire Ferrari (Embrapa Meio Ambiente), ao Prof. Dr. Plínio Camargo (CENA) e a Profa. Dra. Sonia Dechen (IAC) pela realização do complemento de algumas análises.

Ao amigo Aliedson Sampaio e ao Prof. Dr. Carlos Guilherme Silveira Pedreira pela presteza no empréstimo de fertilizante em uma das adubações do experimento.

Aos amigos: Guilherme de C. Franco, Willian Pereira, Rafael B. Baptista, Guilherme de S. Hipólito, José Marcos Leite e Juliano T. S. Marcelino pela convivência, ajuda e amizade. A estes últimos três, agradeço também pelo ótimo acolhimento durante os meus primeiros meses em Piracicaba. Ao José Marcos agradeço também pela amizade desde os tempos de Rural e pelo constante incentivo durante a minha vida acadêmica... Obrigado Zé!

À minha amiga e namorada Camila Fernanda Duarte pelo companheirismo, paciência e incentivo durante a realização do meu trabalho.

Aos amigos Ruralinos: Fabrício Giori, Thiago Tonieto, Hermes de Almeida e João Paulo pela amizade e conversas nas missas de Domingo; German Bonilla, Elenilson Franco, Robson Mauri pela amizade.

Aos meus amigos de Pós-Graduação: Carla Bastos, Beatriz Nastaro, Roger Corrales, Laura Salazar, Jacqueline Lima, Edison Mome Filho, Sâmala Silva, Raul Toma, Osvaldo Guedes Filho, Sueli Rodrigues, Cristiano Picolla, Fábio César, Diogo Eberhardt, .

À Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro pela formação acadêmica e pessoal, não esquecendo o ditado: “*A Rural é uma MãE mesmo!*” o qual simplesmente traduz a essência desta Instituição.

As funcionárias da área de Informação Científica da biblioteca da ESALQ Eliana Maria Garcia e Silvia Maria Zinsly pelos ajustes desse trabalho às normas de elaboração de dissertação, além do profissionalismo e bom senso.

TENTE.

SUMÁRIO

RESUMO.....	11
ABSTRACT	13
LISTA DE FIGURAS	15
LISTA DE TABELAS.....	19
LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS	21
1 INTRODUÇÃO.....	23
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	27
2.1 Disponibilidade de água e uso de efluente de estação de tratamento de esgoto (EETE)	27
2.2 Sodicidade e dispersão de argilas	29
2.3 Alterações em propriedades químicas e físico-hídricas do solo.....	33
2.4 Usos de efluente de estação de tratamento de esgoto em pastagem.....	34
3 MATERIAL E MÉTODOS.....	37
3.1 Área de Estudo.....	37
3.2 Condução do experimento ao longo do tempo	38
3.3 Coleta de amostras e análises de propriedades químicas do solo.....	44
3.4 Análises de propriedades físico-hídricas do solo	44
3.4.1 Densidade dos sólidos (ρ_s).....	44
3.4.2 Argila dispersa em água (ADA)	45
3.4.3 Condutividade hidráulica do solo saturado (K_{sat}) e curvas de retenção da água no solo (CRs).....	45
3.4.4 Porosidade do solo (ϵ) e distribuição do tamanho dos poros.....	46
3.4.5 Densidade do solo (ρ)	47
3.5 Produtividade de massa seca (MS) e acumulação de N (N-MS), K (K-MS) e Na (Na-MS) ..	48
3.6 Análises estatísticas	50
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	51
4.1 Efeitos da irrigação em propriedades químicas do solo	51
4.2 Efeitos da irrigação nas propriedades físico-hídricas do solo	56
4.2.1 Densidade do solo (ρ).....	56
4.2.2 Densidade dos sólidos (ρ_s).....	56
4.2.3 Argila dispersa em água (ADA)	57
4.2.4 Condutividade hidráulica do solo saturado (K_{sat}).....	58
4.2.5 Curvas de retenção da água no solo (CRs).....	59

4.2.6 Distribuição do tamanho dos poros e porosidade do solo (ε).....	63
4.3 Produtividade de massa seca (MS) e acumulação de N (N-MS), K (K-MS) e Na (Na-MS). .	67
5 CONCLUSÕES	73
REFERÊNCIAS	75

RESUMO

Efeito da irrigação com efluente de esgoto rico em sódio em propriedades químicas e físico-hídricas de um Argissolo e produtividade de capim Tifton 85 no município de Lins

O uso de efluente de estação de tratamento de esgoto (EETE) na agricultura irrigada pode ser uma estratégia alternativa de fornecimento de água e nutrientes para culturas agrícolas. Entretanto se realizado por longos períodos pode adicionar grandes quantidades de sódio ao solo o que poderia levar a degradação de suas propriedades e impacto em aspectos agronômicos de capim Tifton 85. Esse trabalho consistiu de dois objetivos: i) avaliar os efeitos da irrigação com efluente rico em sódio durante mais de oito anos em propriedades químicas e físico-hídricas de um Argissolo Vermelho. Para isso foram estabelecidos três tratamentos avaliados nas profundidades de 0,05-0,15 (P1), 0,25-0,35 (P2) e 0,70-0,80 m (P3): SI – cultivo de capim sem adubação e sem irrigação; A100 – cultivo irrigado com água de abastecimento sódica e adubado com 520,0 kg ha⁻¹ ano⁻¹ de nitrogênio; E66 – cultivo irrigado com EETE e adubado com 343,2 kg ha⁻¹ ano⁻¹ de nitrogênio. Foram determinados: pH do solo (em água e CaCl₂), condutividade elétrica do extrato aquoso do solo (CE_{1:1}), concentração de sódio (Na⁺), potássio (K⁺), cálcio (Ca²⁺), magnésio (Mg²⁺), alumínio (Al³⁺), carbono (C) e nitrogênio (N) do solo, com posterior cálculo de soma de bases (SB), capacidade de troca catiônica (CTC), saturação por bases (V) e percentagem de sódio trocável (PST); densidade do solo (ρ), argila dispersa em água (ADA), condutividade hidráulica do solo saturado (K_{sat}), curva de retenção da água no solo (CR), porosidade do solo (ϵ) e distribuição do tamanho dos poros; ii) avaliar os efeitos da irrigação com efluente rico em sódio durante mais de oito anos em aspectos agronômicos de capim Tifton 85. Para alcançar o segundo objetivo foi estabelecido além do SI, A100 e E66, mais quatro tratamentos: A0 – cultivo de capim sem adubação e irrigado com água de abastecimento sódica; E0, E33 e E100 – cultivo de capim irrigado com EETE e adubado com 0, 171,6 e 520,0 kg ha⁻¹ ano⁻¹ de nitrogênio, respectivamente. Foram determinados: produtividade de massa seca estacional (MS-Estacional), anual (MS-Anual) e acumulação estacional e anual de nitrogênio (N-MS), potássio (K-MS) e sódio (Na-MS) no tecido vegetal de capim Tifton 85. Houve alterações nas propriedades químicas e físico-hídricas do solo em função dos tratamentos e profundidades. Na P1 o E66 aumentou a CE_{1:1}, a densidade do solo, o conteúdo de água residual e diminuiu a concentração de Mg²⁺ e conteúdo de água de saturação. Já o A100 reduziu a concentração de K⁺ e Mg²⁺, o conteúdo de água de saturação e aumentou a densidade do solo e o conteúdo de água residual. Na P2 o E66 aumentou o pH-H₂O e a CE_{1:1}, o conteúdo de água de saturação e o conteúdo residual. O A100 aumentou o pH-H₂O, o Na⁺, o PST, a argila dispersa em água, o conteúdo de água de saturação e o conteúdo residual e diminuiu o C e N. Na P3 o E66 aumentou apenas o pH-H₂O e o conteúdo de água residual e reduziu o conteúdo de água de saturação. O A100 aumentou o conteúdo de água de saturação, o conteúdo de água residual e a mesoporosidade. As propriedades do solo da P2 parecem ser as mais afetadas pelos efeitos do sódio decorrentes, principalmente, do uso de irrigação com água sódica. As produtividades de MS e acumulação de N-MS e K-MS foram superiores nos tratamentos E66, E100 e A100 e não foram reduzidas ao longo destes anos. A acumulação de Na-MS foi proporcional à produtividade, mas o capim passou a acumular um pouco menos sódio. Na estação chuvosa a MS de capim representou cerca de 72% da MS-Anual, sendo influenciada fortemente pelo período de estacionalidade.

Palavras-chave: Água de reuso; Capim Tifton 85; Sodicidade e salinidade; Argila dispersa em água; Propriedades do solo

ABSTRACT

Effect of irrigation with sodium rich sewage effluent in chemical, physical and hydraulic properties of an Ultisol and productivity of Tifton 85 Bermudagrass at Lins municipality-SP-Brasil

The use of treated sewage effluent (TSE) in irrigated agriculture can be an alternative strategy to supply water and nutrients to crops. However if applied for long periods of time, it can add large amounts of sodium to the soil, resulting in soil properties degradation and impacts on agronomic aspects Tifton 85 Bermudagrass. The objectives of this work were: i) evaluate the effect of irrigation with sodium rich effluent for more than eight years on chemical, physical and hydraulic properties of an Ultisol. For this were established three treatments (WI - growing grass without fertilization or irrigation ; FW100 - irrigation with sodic fresh water supply and fertilized with 520.0 kg ha⁻¹ year⁻¹ nitrogen; E66 – irrigation with TSE and fertilized with 343.2 kg ha⁻¹ year⁻¹ nitrogen) The effects were evaluated at different depths (D1: 0.5-0.15, D2: 0.25-0.35 and D3: 0.70-0.80 m), determining: soil pH (in water and CaCl₂), soil electrical conductivity of the aqueous extract (EC_{1:1}) sodium concentration (Na⁺), potassium (K⁺), calcium (Ca²⁺), magnesium (Mg²⁺), aluminum (Al³⁺), soil carbon (C) and soil nitrogen (N), with subsequent calculation of sum of bases (SB), cation exchange capacity (CEC), base saturation (V) and exchangeable sodium percentage (ESP); bulk density (ρ), water dispersible clay (WDC), saturated hydraulic conductivity (K_{sat}), soil water retention curve (SWRC), soil porosity (ε) and pore size distribution. Another objective was to evaluate the effect of irrigation with sodium rich effluent for more than eight years on agronomic aspects of Tifton 85 Bermudagrass. In addition to WI, FW100 and E66 treatments were established another four treatments (FW0 - growing grass without fertilizer and irrigated with sodic water supply; E0, E33 and E100 - growing grass irrigated with TSE and fertilized with 0, 171.6 and 520.0 kg ha⁻¹ year⁻¹ nitrogen, respectively) and determined the productivity of seasonal dry matter (Seasonal-DM), annual (Annual-DM) and nitrogen (N-DM), potassium (K-DM) and sodium (Na-DM) seasonal accumulation and annual in the plant tissue of Tifton 85 Bermudagrass. There were changes in chemical, physical and hydraulic soil properties as a function of treatments and depths. In the D1 the E66 treatment increased CE_{1:1}, the bulk density, the residual water content and decreased the concentration of Mg²⁺, water content at saturation. FW100 reduced the concentration of K⁺ and Mg²⁺, the water content at saturation and increased soil bulk density and residual water content. In the D2, the E66 treatment increased pH-H₂O and CE_{1:1}, the water content at saturation and residual water content. The FW100 increased pH-H₂O, Na⁺, ESP, water dispersible clay, the content of water saturation and residual contents and decreased C and N. In the D3 the E66 only increased the pH-H₂O and residual water content and reduced water content saturation. The FW100 increased the water content at saturation point, residual water content and mesoporosity. The soil properties of D2 apparently are more affected than other depths by the effects of sodium, mainly from the use of irrigation water with sodium. The DM, N-DM and, K-DM were higher in the treatments E66, E100 and FW100 and there were not observed reductions over the years. The accumulation Na-DM was proportional to productivity, but the grass began to accumulate less sodium. In the rainy season the grass DM accounted for approximately 72% of Annual-DM, being strongly influenced by seasonality period.

Keywords: Wasterwater; Tifton 85 Bermudagrass; Sodcity and salinity; Water dispersible clay; Soil properties

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1 – Imagem de satélite da área experimental e da estação de tratamento de esgoto Lins-SP em 28 de junho de 2011. Fonte: Goolge Earth™ Mapping Service. 37
- Figura 2 – Média histórica (1961-1990) de precipitação pluvial e temperaturas mínima, média e máxima para o município de Lins-SP (CEPAGRI, 2012) 38
- Figura 3 – Croqui da área experimental de capim Tifton 85 a partir de agosto de 2011. Avaliações de produtividade de capim Tifton 85 foram realizadas em todos os tratamentos. Avaliações de atributos químicos e propriedades físico-hídricas do solo foram realizadas somente no tratamento SI (quadrados vermelhos), A100 (quadrados azuis) e E66 (quadrados verdes) dos blocos um, dois e três. . As linhas em cinza representam a tubulação do sistema de irrigação formada por canos de PVC (policloreto de polivinila). O tópico “PARCELA” ilustra os componentes de cada parcela experimental. SI - sem irrigação e sem fertilização; A0 – irrigação com água de abastecimento sem fertilização nitrogenada; E0, E33, E66 e E100 - irrigação com EETE e adição de 0, 172,0; 343,2 e 520,0 kg ha⁻¹ ano⁻¹ de N via nitrato de amônio, respectivamente; A100 - irrigação com água de abastecimento e adição de 520,0 kg ha⁻¹ ano⁻¹ de N via nitrato de amônio..... 40
- Figura 4 – Lâminas de irrigação e precipitação mensal nos tratamentos da área experimental de capim Tifton 85 no período de agosto de 2011 a setembro de 2012. SI (precipitação) - sem irrigação e sem fertilização; A0 – irrigação com água de abastecimento sem fertilização nitrogenada; E0, E33, E66 e E100 - irrigação com EETE e adição de 0, 172,0; 343,2 e 520,0 kg ha⁻¹ ano⁻¹ de N via nitrato de amônio, respectivamente; A100 - irrigação com água de abastecimento e adição de 520,0 kg ha⁻¹ ano⁻¹ de N via nitrato de amônio..... 41
- Figura 5 – Curva de retenção de água no solo, θ (ψ_m) com: intervalo de macro (1-30 hPa), meso (30-100 hPa) e microporosidade do solo (100-1500 hPa) com o respectivo raio (r) do menor poro de cada intervalo ($r = 50, 15$ e $< 0,1 \mu m$); ponto limite de criptoporosidade do solo (1500 hPa) e raio do maior poro deste intervalo ($< 0,1 \mu m$); ponto de conteúdo de água disponível - θ_{AD} (340 hPa) para fins de irrigação

da área experimental de capim Tifton 85 e raio do maior poro neste ponto (4,3 μm); saturação relativa (θ/α) em cada intervalo. Adaptado de Libardi (2005).....47

Figura 6 – Procedimento de determinação de K_{sat} e ρ para os tratamentos SI, A100 e E66 nas profundidades P1, P2 e P3. a) amostrador tipo Uhland e anéis volumétricos; b) coleta de amostras indeformadas de solo na P1; c) continuação de abertura de trincheira para coleta nas profundidades P2 e P3; d) e e) identificação e acondicionamento de amostras para armazenamento; f) preparo de amostra indeformada – colocação de tela e anel superior para posterior saturação; g) saturação de conjunto de três amostras indeformadas; h) medidor de H_1 e H_2 colocado dentro do anel superior; i) cronômetro utilizado para determinação de Δt ; j) medidas de K_{sat} em conjunto de três amostras após a saturação ; k) tampa do “medidor K_{sat} ”; l) secagem de amostras indeformadas a 105°C para determinação de ρ ; m) pesagem de amostra indeformada seca; n) e o) medidas de diâmetro interno e altura de anéis, respectivamente; p) descarte de amostras.48

Figura 7 – Densidade do solo (ρ) para os tratamentos SI, A100 e E66 nas profundidades de 0,05-0,15 m (P1), 0,25-0,35 m (P2) e 0,70-0,80 m (P3). Letras iguais minúsculas (tratamentos dentro de cada profundidade) e maiúsculas (profundidade dentro de cada tratamento) não diferem entre si (Tukey, $p < 0,05$). DMS-tratamento (barras com bolinha) = 0,066042 e a DMS-profundidade (barras com um traço) = 0,069262. $N = 9$. SI - sem irrigação e sem fertilização; E66 - irrigação com EETE e adição de $343,2 \text{ kg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ de N via nitrato de amônio; A100 - irrigação com água de abastecimento e adição de $520,0 \text{ kg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ de N via nitrato de amônio.56

Figura 8 – Argila dispersa em água para os tratamentos SI, A100 e E66 nas profundidades P1, P2 e P3. Letras iguais minúsculas (tratamentos dentro de cada profundidade) e maiúsculas (tratamento entre profundidades) não diferem entre si (Tukey, $p < 0,05$). 28,471076 e a DMS-profundidade (barras com traço) = 26,274562. $N = 9$. SI - sem irrigação e sem fertilização; E66 - irrigação com EETE e adição de $343,2 \text{ kg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ de N via nitrato de amônio; A100 - irrigação com água de abastecimento e adição de $520,0 \text{ kg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ de N via nitrato de amônio.....57

Figura 9 – Condutividade hidráulica do solo saturado (K_{sat}) para os tratamentos SI, A100 e E66 nas profundidades P1, P2 e P3. Letras iguais minúsculas (tratamentos dentro de cada profundidade) e maiúsculas (tratamento entre profundidades) não diferem entre si (Tukey, $p < 0,05$). DMS-tratamento (barras com bolinha) = 0,8586456 e a DMS-profundidade (barras com traço) = 0,4895168. $N = 9$. SI - sem irrigação e sem fertilização; E66 - irrigação com EETE e adição de $343,2 \text{ kg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ de N via nitrato de amônio; A100 - irrigação com água de abastecimento e adição de $520,0 \text{ kg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ de N via nitrato de amônio.....58

Figura 10 – Curvas de retenção da água no solo ajustadas pelo modelo de van Genuchten para os tratamentos SI, A100 e E66 nas profundidades de 0,05-0,15 m (P1); 0,25-0,35 m (P2) e 0,70-0,80 m (P3). SI - sem irrigação e sem fertilização; E66 - irrigação com EETE e adição de $343,2 \text{ kg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ de N via nitrato de amônio; A100 - irrigação com água de abastecimento e adição de $520,0 \text{ kg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ de N via nitrato de amônio. $N = 9$61

Figura 11 – Curvas de retenção da água no solo (conteúdo de água do solo, θ em função do potencial mátrico, ψ_m) ajustadas pelo modelo de van Genuchten e distribuição da porosidade do solo em função do potencial mátrico do solo, determinados pela derivação da equação de ajuste da curva de retenção em relação ao potencial mátrico para os tratamentos SI, A100 e E66 na profundidade de (a, d) 0,05-0,15 m (P1); (b, e) 0,25-0,35 m (P2) e (c, f) 0,70-0,80 m (P3). As linhas verticais tracejadas indicam os limites de macro (azul), meso (verde) e microporosidade (laranja) do solo. A linha cheia (cinza) indica o ponto do conteúdo de água disponível - θ_D (340 hPa) para fins de irrigação. Os pontos em preto representam a CRs média (adaptada de Fonseca, 2005) utilizada para manejo de irrigação da área estudada a partir da época de instalação do experimento em janeiro de 2003. SI - sem irrigação e sem fertilização; E66 - irrigação com EETE e adição de $343,2 \text{ kg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ de N via nitrato de amônio; A100 - irrigação com água de abastecimento e adição de $520,0 \text{ kg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ de N via nitrato de amônio. $N = 9$62

Figura 12 – Amostra indeformada de solo (a) referente ao tratamento A100 na profundidade P3 utilizada em medidas de K_{sat} e ilustrando a presença de raízes (b).64

Figura 13 – Distribuição do volume de sólidos e das classes de poros medidas (primeira coluna da figura) e calculadas (segunda coluna da figura) a partir das curvas de retenção da água no solo para os tratamentos SI, A100 e E66 nas profundidades de 0,05-0,15 m (P1); 0,25-0,35 (P2) e 0,70-0,80 m (P3). SI - sem irrigação e sem fertilização; E66 - irrigação com EETE e adição de 343,2 kg ha⁻¹ ano⁻¹ de N via nitrato de amônio; A100 - irrigação com água de abastecimento e adição de 520,0 kg ha⁻¹ ano⁻¹ de N via nitrato de amônio. N = 9. 66

Figura 14 – Estacionalidade de produção de capim Tifton 85 produzido em intervalos de corte de 60 dias com exceção do corte de setembro de 2011 que foi de 74 dias. As áreas tracejadas representam o período avaliado na estação chuvosa e na seca de 2012. A linha do tratamento SI é descontínua porque ele começou a ser avaliado em setembro de 2011 e houve uma colheita perdida em maio de 2012. 67

Figura 15 – Produtividade de massa seca aérea Estacional (MS-Estacional) de capim Tifton 85 na estação seca (MS-ES) e chuvosa (MS-EC) em função da aplicação de nitrogênio em 2012 nas doses de: 0; 92,4; 184,8 e 280,0 kg ha⁻¹ na estação chuvosa (EC) e 0; 79,2; 158,4 e 240,0 kg ha⁻¹ na seca. O somatório destas representam as doses anuais de 0; 171,6; 343,2 e 520,0 kg ha⁻¹. *Significativo a p < 0,012. ¹e² MS na estação chuvosa e seca de 2003, adaptadas de Fonseca, (2005). 68

Figura 16 – Produtividade de massa seca aérea anual de capim Tifton 85 (MS-Anual) em função da aplicação de nitrogênio em 2011/2012 nas doses anuais de: 0; 171,6; 343,2 e 520,0 kg ha⁻¹. * Significativo a p < 0,014; ** significativo a p < 0,01; ¹MS em 2003 adaptada de Fonseca, (2005). 70

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Sistema de classificação de solos afetados por sais.....	33
Tabela 2 – Tolerância de culturas agrícolas à salinidade do solo (CE_{es} , condutividade elétrica do extrato do solo saturado) e a água de irrigação salina (CE_a , condutividade elétrica da água) ⁽¹⁾	35
Tabela 3 – Características químicas e físicas do solo por ocasião da instalação do experimento, em janeiro de 2003 ⁽¹⁾	39
Tabela 4 – Resultados de análises químicas (média dos anos 2010 e 2011) da água de abastecimento de Lins e do EETE utilizados na irrigação do experimento com capim Tifton 85 e comparação com médias apresentadas em revisões bibliográficas internacionais ⁽¹⁾	42
Tabela 5 – Histórico de fertilização mineral da área experimental referente aos anos de 2003, 2004, 2011 e 2012.....	43
Tabela 6 – Parâmetros químicos para os tratamentos SI, A100 e E66 nas profundidades de 0,05-0,15 m (P1); 0,25-0,35 m (P2) e 0,70-0,80 m (P3).	55
Tabela 6.1 – Parâmetros químicos para os tratamentos SI, A100 e E66 nas profundidades de 0,05-0,15 m (P1); 0,25-0,35 m (P2) e 0,70-0,80 m (P3)	55
Tabela 7 – Resumo estatístico da condutividade hidráulica do solo saturado, após cultivo com capim Tifton 85 por mais de oito anos, submetido aos tratamentos SI, A100 e E66, nas profundidades de solo correspondentes a 0,05-0,15 m (P1); 0,25-0,35 m (P2) e 0,70-0,80 m (P3)	59
Tabela 8 – Parâmetros da curva de retenção da água no solo ajustados ao modelo de van Genuchten para os tratamentos SI, A100 e E66 nas profundidades de 0,05-0,15 m (P1); 0,25-0,35 m (P2) e 0,70-0,80 m (P3).....	60
Tabela 9 – Porosidade do solo medida e calculada através dos parâmetros da curva de retenção para os tratamentos SI, A100 e E66 nas profundidades de 0,05-0,15 m (P1); 0,25-0,35 m (P2) e 0,70-0,80 m (P3).....	65

Tabela 10 – Efeitos da irrigação e de doses de nitrogênio via fertilizante mineral na produtividade Estacional de massa seca (MS-Estacional) e acumulação de N (N-MS), K (K-MS) e Na (Na-MS) na parte aérea de capim Tifton 85 nos anos de 2012 e 2003..... 68

Tabela 11 – Efeitos da irrigação e de doses de nitrogênio via fertilizante mineral na produtividade anual de massa seca (MS-Anual) MS e acumulação de N (NMS), K (KMS) e Na (NaMS) na parte aérea de capim Tifton 85 nos anos de 2012 e 2003 70

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

- A100 – Irrigação com água de abastecimento urbano e adubação com $520 \text{ kg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ de nitrogênio (N).
- ADA – Argila dispersa em água
- CE – Condutividade elétrica
- CE_{1:1} – Condutividade elétrica do extrato aquoso de relação solo:água igual a 1:1
- CRs – Curva de retenção da água no solo
- CTC – Capacidade de troca catiônica
- E66 – Irrigação com efluente de estação de tratamento de esgoto e adubação com $343,2 \text{ kg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ de N.
- EETE – Efluente de estação de tratamento de esgoto
- ICP-OES – sigla em inglês (inductively coupled plasma - optical emission spectrometry) para espectrometria de emissão óptica com plasma de argônio acoplado indutivamente.
- K_{sat} – Condutividade hidráulica em solo saturado
- MOD – Matéria orgânica dissolvida
- Ø – Diâmetro
- PST – Percentagem de sódio trocável
- RAS – Razão de adsorção de sódio
- SB – Soma de bases do complexo de troca (Na, K, Ca e Mg)
- SI – Sem irrigação e sem adubação
- TFSA – Terra fina seca ao ar
- V – Percentagem de saturação por bases
- α – Ângulo de contato
- ε – Porosidade do solo
- θ – Conteúdo de água à base de volume
- θ_{AD} – Conteúdo de água disponível
- θ_r – Conteúdo de água residual
- θ_s – Conteúdo de água
- ρ – Densidade do solo
- ρ_a – Densidade da água
- ρ_s – Densidade dos sólidos
- σ – Coeficiente de tensão superficial para a água
- ψ_m – Potencial mátrico

1 INTRODUÇÃO

O volume de água no planeta Terra é muito grande ($1.332.400.000 \text{ km}^3$) e recobre aproximadamente 71% da sua superfície. Deste volume, 97,5% são de águas salgadas e apenas 2,5% de águas doces (1,72% estão em estado sólido e apenas 0,78% resta de água doce que ainda não é totalmente aproveitada por questões de inviabilidade técnica, econômica e de sustentabilidade ambiental). Atualmente, mesmo com uma série de regiões do mundo sofrendo uma escassez crônica de água, já se utiliza cerca de metade desta que está prontamente disponível e seu uso cresce em mais de duas vezes a taxa do crescimento populacional.

É previsto um aumento de 50% na demanda de água por países em desenvolvimento e 18% por países desenvolvidos. A maior demanda é representada pela agricultura que consome cerca de 70% de toda a água retirada de lagos, rios e aquíferos do mundo. O número já chega a 90% em vários países em desenvolvimento, onde cerca de três quartos das terras irrigadas do mundo estão localizados. Com isso, questões de quantidade e qualidade de água tem se tornado foco de discussões importantes e dominantes em muitos países, visto que estamos diante de uma população mundial de aproximadamente sete bilhões e que apresenta uma alta demanda por água e alimentos.

No Brasil esse quadro é semelhante, pois 83% da água de consumo são utilizados pelo setor agrícola (72% na irrigação e 11% na dessedentação de animais), 10% para uso doméstico e os 7% restantes pelo setor industrial. Como a agricultura irrigada passa por um processo de expansão, surgem preocupações ligadas a esse elevado consumo, às restrições de disponibilidade de água, ao uso de água salobra para a irrigação de culturas agrícolas, além da contaminação de fontes de água causada pela disposição, nos rios e lagos, de 80% de esgotos domésticos e 70% dos efluentes industriais sem nenhum tratamento.

Neste contexto, o tratamento de águas residuárias e o seu posterior uso em atividades humanas seria uma alternativa para economizar água, preservar corpos hídricos e fornecer nutrientes para algumas culturas de interesse agrícola. Diversas pesquisas tem verificado que a irrigação de culturas agrícolas com efluentes de estação de tratamento de esgotos (EETE) pode ser viável. Entretanto devem ser consideradas as especificidades de cada cultura a ser irrigada e as respostas de um dos componentes do ambiente que tem papel fundamental na viabilidade do reuso: o solo.

Solos agrícolas cultivados e irrigados com EETE ou água sódica podem possibilitar, ao longo do tempo e se bem manejados, consideráveis rendimentos de culturas. Por outro

lado, podem ter sua qualidade química, física e biológica afetada à medida que o tempo de aplicação dessa prática aumenta. Em áreas irrigadas com essas duas fontes têm-se observado problemas derivados do acúmulo de sódio como: aumento de percentagem de sódio trocável e argila dispersa em água; redução de porosidade do solo devido ao colapso de poros e aumento de densidade; diminuição de condutividade hidráulica do solo e alterações na capacidade de retenção de água; alterações na biota do solo e na dinâmica de carbono e nitrogênio; além de outros.

Estudos mostram que um bom manejo de solo sob cultivo e irrigado com EETE ou água sódica pode ser feito através da associação de uma cultura tolerante ao sódio e responsiva a adubação com o seu cultivo em uma região onde há estações secas durante o ano e estações com chuvas regulares capazes de provocar a lixiviação do sódio, evitando assim a adoção de medidas como a aplicação de gesso ou outra prática similar.

Resultados obtidos desde janeiro de 2003, em experimento de campo com capim Tifton 85 irrigado com EETE, apontaram evidentes benefícios como: substituição da irrigação com água potável, economia de fertilizantes e aumento de produtividade, sem afetar negativamente a fertilidade do solo e acumulação de nutrientes no capim. Entretanto indicaram que o sistema solo-pastagem poderia não suportar em longo prazo o elevado aporte de sódio proveniente do EETE.

Portanto, com base nestes fatos resolveu-se testar no presente trabalho a hipótese que a irrigação com efluente rico em sódio de um Argissolo Vermelho cultivado com capim Tifton 85 e fertilizado com 66% (343 kg ha^{-1}) da dose anual de N mineral recomendada, por mais de oito anos, afeta propriedades químicas e físico-hídricas do solo interferindo na produtividade e na acumulação de N, K e Na no tecido vegetal. Ressalta-se que a escolha dessa espécie, que vem sendo cultivada com enfoque experimental desde 2003, foi baseada nos seguintes aspectos: poder ser cultivada em uma região onde há uma estação seca durante o ano; poder ser irrigada com EETE dentro das exigências da legislação ambiental brasileira; ter um valor econômico, visto que pode ser utilizada como feno para alimentação animal; ser de ciclo perene, ser tolerante a salinidade e exigente em água; e ser responsiva a adubação nitrogenada.

A partir desta hipótese, objetivou-se verificar os efeitos da irrigação com efluente rico em sódio em propriedades químicas e físico-hídricas do solo e em alguns aspectos agronômicos do capim Tifton 85 por meio da determinação de: i) pH do solo, condutividade elétrica do extrato aquoso do solo ($\text{CE}_{1:1}$), concentração no solo de sódio (Na^+), potássio (K^+), cálcio (Ca^{2+}), magnésio (Mg^{2+}), alumínio (Al^{3+}), carbono (C) e nitrogênio (N) ; ii)

densidade do solo (ρ), argila dispersa em água (ADA), condutividade hidráulica do solo saturado (K_{sat}), curva de retenção da água no solo (CR), porosidade do solo (ϵ) e distribuição dos tamanhos dos poros; iii) produtividade de massa seca e acumulação de nitrogênio (N-MS), potássio (K-MS) e sódio (Na-MS) no tecido vegetal de capim Tifton 85.

Os resultados desse trabalho serão comparados com aqueles obtidos para o primeiro ano de cultivo do capim Tifton 85 (2003) na mesma área experimental

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Disponibilidade de água e uso de efluente de estação de tratamento de esgoto (EETE)

O volume mundial de água é de aproximadamente 1.332.400.000 km³ e abrange cerca de 361.840.000 km² que correspondem a 71% da superfície do planeta Terra (CHARETTE e SMITH, 2010). Segundo Shiklomanov (1999), 97,5% deste volume constituem-se de águas salgadas e apenas 2,5% de águas doces (1,72% está em estado sólido e apenas 0,78% resta de água doce não totalmente aproveitada por questões de inviabilidade técnica, econômica e de sustentabilidade ambiental).

Diante de um volume tão grande de água a ideia que parte das pessoas tem é que ela representa um bem “infinito”, abundante e com uma renovação natural capaz de assegurar sua disponibilidade e sua qualidade. Entretanto essa ideia, a longo prazo, pode ser uma incógnita para muitas regiões do mundo, visto que atualmente os seres humanos já usam cerca da metade da água que está prontamente disponível e a demanda vem crescendo rapidamente de maneira desproporcional ao aumento da população e uma série de regiões do mundo já sofre uma escassez crônica de água.

A cada dia questões de quantidade e qualidade de água tem se tornado foco de discussões importantes e dominantes em muitos países, e, como já mencionado, a demanda por esse recurso é crescente. Estimativa feita pela Organização das Nações Unidas (ONU) para o ano de 2025, prevê que dois terços da população mundial sofrerão com alguma condição de escassez de água e 1,8 bilhão de pessoas viverá em países ou regiões com absoluta escassez de água (FAO, 2007).

Mundialmente, espera-se um aumento de 50% na demanda de água pelos países em desenvolvimento e 18% pelos países desenvolvidos. O uso pela agricultura representa cerca de 70% de toda a água retirada de lagos, rios e aquíferos. O número já chega a 90% em vários países em desenvolvimento, onde cerca de três quartos das terras irrigadas do mundo estão localizados (FAO, 2007).

No Brasil, 83% da água de consumo ocorrem no setor agrícola (72% pela irrigação e 11% dessedentação animal), 10% são utilizados para uso doméstico e os 7% restantes pelo setor industrial (AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS – ANA, 2012). Como a agricultura irrigada passa por um processo de expansão, surgem preocupações com esse elevado consumo, restrições de disponibilidade como o uso de água salobra para a irrigação das culturas, além da contaminação de fontes d'água causada, por exemplo, com a disposição de

resíduos domésticos e industriais nos rios e lagos, tendo em vista que o país lança, sem nenhum tratamento nos rios e lagoas, aproximadamente 80% do esgoto doméstico e 70% dos efluentes industriais (INSTITUTO SOCIOAMBIENTAL – ISA, 2008). Em contrapartida, em Israel cerca de 70% das águas residuais coletadas são tratadas e reutilizadas para irrigação (ANGELAKIS et al., 1999). Portanto, a disponibilidade hídrica é um fator preocupante e precisa ser ampliada ou pelo menos mantida e, para tanto, são necessários investimentos em pesquisa e desenvolvimento tecnológico para exploração viável e racional deste recurso. Uma possível solução para minimizar essas preocupações seria o uso de fontes alternativas de água, como o de EETEs que são produtos líquidos provenientes das diversas atividades humanas (domésticas, industrial etc.) que são tratados em estações específicas de tratamento visando diminuir sua carga poluente, antes de serem dispostos no solo ou em um corpo receptor (rio, lago ou mar). Os efluentes líquidos constituem-se nos maiores poluidores dos corpos de águas e por isto têm sido dedicados muitos esforços para controlar a qualidade dos mesmos (JORDÃO; PESSOA, 2011).

Na disposição de efluente tratado no solo, utiliza-se o sistema solo-planta como “filtro vivo”, absorvendo e retendo poluentes e organismos patogênicos presentes. Esta disposição completa a sequência de tratamentos de águas residuárias para redução dos níveis de microorganismos e de vários componentes orgânicos e inorgânicos a níveis aceitáveis (FEIGIN; RAVINA; SHALHEVET, 1991). Assim como os lodos de esgoto, a sua composição pode variar em função da sua origem, do processo de tratamento e do seu caráter sazonal (BETTIOL; CAMARGO, 2006).

Se o EETE for utilizado na agricultura como fonte alternativa de água, a sua disposição em corpos d’água será minimizada, a água de irrigação substituída, grandes quantidades poderão estar disponíveis para outros usos, durante o ano todo e haverá benefícios econômicos devido à presença de nutrientes e matéria orgânica (MO) no efluente (ORON, 1996). Esse uso contribuirá para o fornecimento, através do solo, de nutrientes e matéria orgânica para uma determinada cultura de interesse. À medida que isso ocorre, o solo precisará ter a sua “saúde” preservada, ou seja, deverá apresentar capacidade para funcionar como um sistema vivo, dentro dos limites do ecossistema e de seu uso, para sustentar a produtividade e a atividade biológica, para promover a qualidade do ar e da água dos ambientes, contribuindo para a conservação da diversidade vegetal, animal e saúde humana (DORAN, SAFLEY, 1997; CARTER, 2000).

Em termos legislativos de reuso de água, no Brasil tem-se a Resolução CNRH n° 54 de 2005 que estabelece modalidades, diretrizes e critérios gerais para a prática de reuso direto

não potável de água potável e a Resolução CNRH nº 121 de 2010 que estabelece diretrizes e critérios para a prática de reuso direto não potável de água na modalidade agrícola e florestal. Enquanto a Resolução CONAMA nº 357 de 2005 dispõe sobre a classificação e diretrizes ambientais para o enquadramento dos corpos de água superficiais, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes.

Há também o manual de instruções para o uso seguro de esgotos, excretas e águas cinza (*Guidelines for the safe use of wastewater, excreta and greywaters*) (World Health Organization – WHO, 2006) o qual é recomendado pela Organização Mundial da Saúde como embasamento para as políticas nacionais e regionais de utilização de esgotos tratados na agricultura.

Essas regulamentações são importantes para adequar as práticas de reuso que já ocorrem e geralmente são baseadas na proteção à saúde pública e ao ambiente (RODRIGUES, 2005). Estas representam um passo à frente dado pelo Brasil visto que há países que utilizam água de reuso, porém as regulamentações são menos restritivas (NOGUEIRA, 2008).

2.2 Sodicidade e dispersão de argilas

Segundo Levy e Assouline (2011), a estabilidade estrutural e propriedades hidráulicas do solo podem ser afetadas pela expansão e dispersão de argila, desagregação do solo através de hidratação ou impacto de gotas de água de alta energia cinética (*e.g.* chuva e/ou irrigação por aspersão). A irrigação com EETE pode aumentar a expansão e de dispersão de argila em comparação com a irrigação com água potável devido, em geral, a sua maior razão de adsorção de sódio (RAS, Eq. 1) e presença de matéria orgânica dissolvida no efluente. Condições sódicas, especialmente na ausência de eletrólitos (QUIRK; SCHOFIELD, 1955), tornam as argilas do solo mais sensíveis à expansão e dispersão (SHAINBERG; LETEY, 1984), as quais, por sua vez afetam adversamente as propriedades hidráulicas do solo, ou seja, a curva de retenção de água e a condutividade hidráulica (BRESLER; MCNEAL; CARTER, 1982; RUSSO, 2005). Além disso, há evidências de que na presença de substâncias húmicas dissolvidas, a dispersão da argila pode aumentar sendo necessária uma maior concentração de eletrólitos na solução do solo para manter as argilas num estado floculado (DURGIN; CHANEY, 1984; FRENKEL; FEY; LEVY, 1992; GU; DONER, 1993; TARCHITZKY; CHEN; BANIN, 1993; TARCHITZKY et al., 1999). Tarchitzky et al. (1999) atribuíram este efeito à interação de moléculas orgânicas carregadas negativamente com as arestas carregadas

positivamente da argila, o que evita a interação face-aresta de partículas de argila responsáveis pela floculação.

Os efeitos adversos da MOD sobre as propriedades hidráulicas do solo (*e.g.* redução da condutividade hidráulica do solo devido a diminuição de tamanho de poros do solo) dependem da sua concentração, do pH da solução e do tipo de cátion trocável (TARCHITZKY; CHEN; BANIN, 1993; TARCHITZKY et al., 1999). Também tem sido sugerido que a presença de MOD no EETE poderia ter um efeito adicional indireto sobre o solo, através do seu efeito sobre a RAS (HALLIWELL; BARLOW; NASH, 2001; LEVY, ASSOULINE, 2011). Estes autores sugeriram que a RAS efetiva do EETE é normalmente maior do que a calculada com base na concentração total de cátions na solução. O aumento da RAS efetiva pode ocorrer através da formação de complexos entre Ca^{2+} e Mg^{2+} e os ligantes orgânicos presentes no EETE (METZGER; YARON; MINGELGRIN, 1983; LEVY, ASSOULINE, 2011). A diferença entre a RAS normalmente calculada e a efetiva pode chegar a 48%, devido à grande afinidade dos cátions bivalentes de ligantes orgânicos (FOTOVAT; NAIDU; OADES, 1996; HALLIWELL; BARLOW; NASH, 2001; LEVY, ASSOULINE, 2011).

$$\text{RAS} = \frac{\text{Na}^+}{\sqrt{\frac{\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}}{2}}} \rightarrow (\text{mmol L}^{-1})^{1/2}, \quad (1)$$

Sendo:

Na^+ - sódio trocável (mmol L^{-1})

Ca^{2+} - cálcio (mmol L^{-1})

Mg^{2+} - magnésio trocável (mmol L^{-1})

Gonçalves et al. (2007) ao realizarem um trabalho sobre condutividade hidráulica de um solo cultivado com milho e girassol e irrigado com efluente, na ausência de manejo adequado, tal como a aplicação de gesso agrícola (AHMAD et al., 2006), verificaram degradação das propriedades físicas desse solo em consequência da dispersão das argilas causadas por elevados teores de sódio na água de abastecimento e no efluente aplicado. Solos afetados por sodificação apresentam dificuldade de infiltração e de drenagem (GONÇALVES et al., 2005).

A curva de retenção de água é uma propriedade hidráulica do solo fundamental, que descreve a relação entre o conteúdo de água e o potencial mátrico (BROOKS, COREY, 1964; VAN GENUCHTEN, 1980; ASSOULINE; TESSIER; BRUAND, 1998). Além disso, a função de condutividade hidráulica pode ser obtida a partir da curva de retenção da água (MUALEM, 1986; ASSOULINE, 2001). A expressão sugerida por van Genuchten (1980) para a curva de retenção de água, $\theta(\Psi_m)$, é a seguinte:

$$\theta = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{(1 + (\alpha \Psi_m)^n)^m} \rightarrow (\text{m}^3 \text{ m}^{-3}), \quad (2)$$

sendo:

θ - conteúdo de água volumétrico ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$)

θ_r - conteúdo de água volumétrico residual ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$)

θ_s - conteúdo de água volumétrico na saturação ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$)

Ψ_m - potencial mátrico no solo (hPa)

α - parâmetro empírico da equação (hPa^{-1})

m, n - parâmetros empíricos da equação (adimensionais)

Lima; Grismer; Nielsen (1990), citados por Levy e Assouline (2011), estudando os efeitos da salinidade e sodicidade na curva de retenção de água verificaram que alterações nos valores dos parâmetros α e n da equação de van Genuchten estavam relacionadas com a RAS da solução do solo. À medida que a RAS aumenta, α diminui e n aumenta. A diminuição de α corresponde a um aumento do valor de entrada de ar no solo, indicando diminuição dos poros grandes. O aumento de n representa redução da distribuição do tamanho de poros.

Coppola et al. (2004) estudando o efeito da interação entre solo e EETE no sistema solo-água-solutos de cinco solos representativos da região Sul da Sardenha, verificaram que a utilização de EETE provocou alteração na distribuição do tamanho dos poros no solo, transformando-os em poros menores e consequentemente reduzindo a retenção de água e condutividade hidráulica.

Os efeitos da salinidade e sodicidade nas propriedades hidráulicas e processos de fluxo do solo tem sido estudados extensivamente (BRESLER; MCNEAL; CARTER, 1982; SHAINBERG, LETEY, 1984; MALIK; MUSTAFA; LETEY, 1992; LEVY; GOLDSTEIN; MAMEDOV, 2005; RUSSO, 2005; GONÇALVES et al., 2007; LEVY; ASSOULINE, 2011). Desde 1950, tem sido aceito que o valor 15 para a percentagem de sódio trocável (PST, Eq. 3) separa solos sódicos de não-sódicos (RICHARDS, 1954) (Tabela 1). Nos últimos anos,

numerosos estudos e em particular os de Shainberg e Letey (1984) e Mace e Amrhein (2001) citados por Levy e Assouline (2011) mostraram que a expansão interna e a obstrução de poros pode ocorrer em valores de RAS da solução do solo entre 5 e 8, valores estes que caracterizam o intervalo de RAS encontrado em efluentes de EETE, visto que a faixa de concentração normal é de 4,5 a 7,5 (mmol L⁻¹)^{1/2} segundo Feigin; Ravina; Shalhevet (1991). Mace e Amrhein (2001) demonstraram que o impacto de tais valores de RAS na condutividade hidráulica de um solo calcário esmectítico aumenta com a diminuição da concentração de eletrólito da solução. Estes resultados indicam que a partir de meras informações sobre sodicidade e salinidade do efluente a ser utilizado para irrigação, pode-se ter noção se a condutividade hidráulica do solo será ou não prejudicada, especialmente durante as chuvas.

$$PST = \frac{Na^+}{CTC} \times 100 \rightarrow (\%) \quad (3)$$

Sendo:

Na⁺ - sódio trocável (mmol_c kg⁻¹)

CTC - capacidade de troca catiônica (mmol_c kg⁻¹)

Segundo Korndörfer (2006), a presença de Na em solos tropicais e em locais de elevada precipitação é normalmente muito baixa, entretanto em regiões áridas e semi-áridas, o Na pode representar 25% ou mais dos cátions trocáveis o que chega a ser problema para as plantas cultivadas.

O sódio é considerado um elemento benéfico para algumas espécies de plantas e é absorvido na forma iônica. Em tecidos vegetais as concentrações de Na variam de 0,013 a 35,1 g kg⁻¹ na massa seca e de 0,16 a 167,8 g kg⁻¹ nas cinzas. Plantas halófitas como *Atriplex versicaria*, *Atriplex nummularia* e *Suaeda marítima* são muito ricas em sódio, ao contrário, plantas como milho (*Zea mayz*), girassol (*Helianthus annuus*), abacate (*Persea americana* Mill), citros (*Citrus* spp.) apresentam baixa resistência a esse elemento. Ele pode atuar no processo de regeneração do fosfoenolpiruvato em plantas de metabolismo C4 e CAM, balanço osmótico e iônico, podendo em alguns casos, substituir parcialmente elementos essenciais (GREENWAY; MUNNS, 1980; TAIZ; ZEIGER 2004; KORNDÖRFER, 2006). Na nutrição mineral de plantas o seu principal papel é substituir o K em determinadas funções fisiológicas (metabólicas e osmóticas) e em proporções de até 95% do K presente no substrato de determinadas espécies (MARSCHNER, 1995; KORNDÖRFER, 2006).

Alguns parâmetros são utilizados para a classificação de solos afetados por sais: condutividade elétrica do extrato de saturação (CE a 25 °C), PST, RAS do extrato de saturação e pH do solo (RICHARDS, 1954). Baseado nestes parâmetros, os solos podem ser classificados como salinos, sódicos e salino-sódicos (Tabela 1). A classificação de Richards (1954) é a mais adotada mundialmente, inclusive pelo Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (EMBRAPA, 2006).

Tabela 1 – Sistema de classificação de solos afetados por sais

Classificação	CE _{es}	PST	RAS	pH
	dS m ⁻¹		%	
Salino	≥ 4,0	< 15	< 13	< 8,5
Sódico	< 4,0	≥ 15	≥ 13	≥ 8,5
Salino-sódico	≥ 4,0	≥ 15	≥ 13	≥ 8,5

Fonte: adaptado de Richards (1954).

2.3 Alterações em propriedades químicas e físico-hídricas do solo

O uso de águas residuais tratadas para a irrigação, como uso de EETE, vem crescendo em resposta a redução na disponibilidade de água potável e isso pode acarretar problemas ao solo como a degradação da estabilidade estrutural e de propriedades físico-hídricas associadas. Esses riscos podem estar relacionados à característica do efluente (matéria orgânica em suspensão, sólidos solúveis, razão de adsorção de sódio e salinidade do EETE). Os sólidos suspensos e a matéria orgânica dissolvida (MOD) no efluente dependem da qualidade da água do esgoto bruto e o seu grau de tratamento. Por outro lado, a carga de sal no EETE é semelhante ao do esgoto bruto, uma vez que não é afetada pelo tratamento, podendo atingir, por exemplo, como foi observado em Israel, um nível duas vezes maior que o da sua água de origem (FEIGIN; RAVINA; SHALHEVET, 1991).

Em estudos conduzidos desde 2003 com EETE do município de Lins, vários autores verificaram altas concentrações de sódio na água de abastecimento urbano e no efluente, utilizado para a irrigação (FONSECA, 2001; SANTOS, 2004; FONSECA, 2005; GONÇALVES et al., 2007, SANTIN, 2012). Essa alta concentração de Na⁺ na água de irrigação pode provocar o acúmulo deste elemento no solo e segundo Veloso (1991), trazer eventuais deteriorações na sua estrutura, alterando o sistema de poros e contribuindo para alterações na infiltração e condutividade hidráulica.

Fonseca (2001) avaliando o potencial de uso e o impacto da utilização EETE de Lins como fonte de N e água, concluiu que o uso desta água residual é eficiente em substituir

totalmente a água de irrigação, porém parcialmente a fertilização nitrogenada e não nutre adequadamente plantas de milho na ausência total de fertilizantes minerais. Todavia, tanto o teor de Na nas amostras de terra, quanto o acúmulo pelas plantas de milho foram maiores no tratamento com EETE devido, provavelmente, a água de abastecimento que gerou o esgoto ter alto teor de sódio.

Santos (2004) verificou os possíveis efeitos da irrigação por seis meses com efluente em algumas propriedades químicas e físicas de um Argissolo Vermelho cultivado com capim Tifton 85 no município de Lins/SP. Ele chegou às seguintes conclusões: i) tanto o efluente quanto a água apresentaram altos valores de RAS, porém, os menores valores foram observados para o efluente; ii) após irrigação com água e efluente houve aumento de Al e acidificação do solo e da solução do solo; iii) tanto a água, quanto o efluente ocasionaram aumento do teor de Na no solo, devido à elevada concentração desse elemento nestas duas substâncias; iv) a dispersão de argilas ocorreu em toda a área e o aumento com o tempo foi mais pronunciado em superfície, o que está de acordo com o maior aumento do PST e da RAS da solução do solo; v) o efluente foi eficiente em suprir o capim Tifton 85 com água, não resultando em prejuízo de produtividade de massa seca em relação ao tratamento de irrigação com água; e vi) se for considerado um possível problema de salinização do solo, o uso anual de efluente de esgoto apresenta grau de restrição “baixo a moderado”.

2.4 Usos de efluente de estação de tratamento de esgoto em pastagem

Para capins Bermuda (como é o caso do capim Tifton 85), a salinidade da água de irrigação não deve representar risco à produtividade, uma vez que, para um rendimento máximo (100%) a condutividade elétrica da água não deve ultrapassar $4,6 \text{ dS m}^{-1}$ (Tabela 2) e normalmente, para efluentes de estação de tratamento de esgoto seus valores estão entre 1,0 e $3,1 \text{ dS m}^{-1}$ (PESCOD, 1992). Nesse sentido, capins Bermuda são considerados tolerantes à salinidade (MAAS, 1985). Já em termos de outras culturas de interesse comercial como milho, feijão e cana-de-açúcar, água e efluente com composição similar a de Lins podem ocasionar problemas devido à salinidade.

Segundo Fonseca (2005), após dois anos de irrigação, o EETE pode substituir eficientemente a água de irrigação em sistema de produção de feno com capim Tifton 85 proporcionando benefícios econômicos e aumento de qualidade. Ainda, o EETE pode atuar como amenizador da acidez do solo. A magnitude de resposta do capim ao EETE, bem como da economia de fertilizante mineral nitrogenado (FMN) é dependente da precipitação pluvial

e da lâmina de irrigação empregada. A substituição da água pelo EETE, na irrigação do capim, pode levar à economia de 32,2 a 81,0% na dose de fertilizante mineral nitrogenado necessária à obtenção de altos rendimentos, sem ocasionar alterações negativas no conteúdo de nutrientes nas plantas e na fertilidade do solo. Se os nutrientes presentes no EETE não forem computados no manejo da fertilização da pastagem, podem ocorrer incrementos no rendimento de MS e no acúmulo de elementos (inclusive de sódio), promovendo aumento de qualidade da forragem sem ocasionar efeitos deletérios no ambiente. Ainda segundo aquele autor, as altas concentrações de sódio na água (utilizada no tratamento controle), bem como no EETE indicam que o sistema solo-pastagem não suportará o elevado aporte deste elemento e pode ser necessário o uso de condicionador de solo. O aporte de nutrientes no sistema, associado à manutenção de tensão hídrica adequada ao capim pode promover mineralização da matéria orgânica do solo, reduzindo os estoques de carbono e nitrogênio. Ao que parece, a irrigação com EETE doméstico não proporcionará, em curto e médio prazo, excesso de boro e de metais pesados no sistema solo-pastagem.

Tabela 2 – Tolerância de culturas agrícolas à salinidade do solo (CE_{es} , condutividade elétrica do extrato do solo saturado) e a água de irrigação salina (CE_a , condutividade elétrica da água) ⁽¹⁾

Espécie	Potencial produtivo ⁽²⁾					
	100%		50%		0% (máximo) ⁽³⁾	
	CE_{es}	CE_a	CE_{es}	CE_a	CE_{es}	CE_a
	dS m ⁻¹					
Capim Tifton (<i>Cynodon dactylon</i>) ⁽⁴⁾	6,9	4,6	15,0	9,8	23,0	15,0
Soja (<i>Glycine max</i>)	5,0	3,3	7,5	5,0	10,0	6,7
Milho (<i>Zea Mays</i>)	1,7	1,1	5,9	3,9	10,0	6,7
Cana-de-acúcar (<i>Saccharum officinarum</i>)	1,7	1,1	10,0	6,8	19,0	12,0
Feijão (<i>Phaseolus vulgaris</i>)	1,0	0,7	3,6	2,4	6,3	4,2

⁽¹⁾ Adaptado de Maas e Hoffman (1977) e Maas (1984). Estes dados servem apenas como um guia para as tolerâncias relativas entre culturas. Tolerâncias absolutas variam com as condições edafoclimáticas e práticas culturais. Em solos gipsíticos, as plantas podem tolerar aproximadamente 2 dS m⁻¹ a mais do que indicado (CE_{es}), mas a salinidade da água (CE_a) permanecerá como está. ⁽²⁾ Salinidade média da zona radicular medida como condutividade elétrica do extrato do solo saturado (dS m⁻¹ a 25°C). ⁽³⁾ Potencial de rendimento nulo ou CE_{es} máximo indica a salinidade teórica do solo na qual não há crescimento das plantas. ⁽⁴⁾ Tolerância média de diversas variedades. Capim Bermuda “Suwannee” e “Coastal” são cerca de 20 % mais tolerantes, enquanto “Common” e “Greenfield” são cerca de 20 % menos tolerantes.

Nogueira (2008) avaliando os efeitos da irrigação com esgoto tratado na dinâmica do carbono (C) e nitrogênio (N) e na atividade microbiana de um solo sob pastagem, verificou que o uso de esgoto com 171,6 kg ha⁻¹ ano⁻¹ de N interfere menos nos estoques de C e produz biomassa equivalente aos demais tratamentos, porém a estrutura física do solo é afetada pela água de irrigação e o C orgânico fica desprotegido. O capim e o esgoto (forma de entrada de C pelas raízes e irrigação, respectivamente) não compensarão, no longo prazo, as perdas do

sistema. Na aplicação de EETE com $520 \text{ kg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ de N a necessidade do capim é suprida e o N do sistema é mantido ou aumentado possibilitando, portanto, a sustentabilidade produtiva e ambiental.

No entanto, em estudo de Singh (1999) com *Paspalum dilatatum* Schum, *Pennisetum glaucum* L., *Pennisetum purpureum* Schum. e *Brachiaria mutica* Stapf., foi obtido 65 a 86% do total de massa seca de raízes na profundidade de 0-20 cm e de 14 a 35% na profundidade de 20-60 cm quando não houve aplicação de nitrogênio. Já com a aplicação de 50 a 150 kg ha^{-1} de N na superfície do solo, houve aumento na proporção de raízes na camada superficial do solo (82 a 95%) em comparação à camada mais profunda (5 a 18%), sendo esse um indicativo de manutenção e/ou aumento de carbono do solo.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Área de Estudo

A área de estudo encontra-se localizada no município de Lins, SP (49°50'W; 22°21'S e 440m), junto à estação de tratamento de esgoto (ETE) da SABESP (Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo). A ETE é formada por um conjunto de lagoas de estabilização, do tipo australiano (Figura 1). A totalidade do esgoto gerado pelo município (71.432 habitantes segundo o IBGE (2010)), é tratada por esta ETE, que é composta por seis lagoas, sendo três anaeróbias (tratamento primário) e três facultativas (tratamento secundário) com capacidade de 55.522 m³ e 23.227 m³, respectivamente. O primeiro conjunto de lagoas, que se encontra em cota mais elevada, fornece o efluente que é aplicado na área experimental através de um sistema de irrigação por aspersão. O efluente gerado pelos outros dois conjuntos é lançado no Córrego do Campestre.

Figura 1 – Imagem de satélite da área experimental e da estação de tratamento de esgoto Lins-SP em 28 de junho de 2011. Fonte: Goolge Earth™ Mapping Service.

O clima da região é tropical chuvoso, do tipo Aw, de acordo com a classificação de Köppen-Geiger, apresentando inverno seco, mês mais frio com temperatura média superior a 18°C e mês mais seco com precipitação inferior a 60 mm. A temperatura média varia entre 18

e 22° C, e a precipitação anual entre 1100 e 1300 mm (Figura 2). A precipitação medida no período deste estudo é apresentada na figura 2.

Figura 2 – Média histórica (1961-1990) de precipitação pluvial e temperaturas mínima, média e máxima para o município de Lins-SP (CEPAGRI, 2012)

3.2 Condução do experimento ao longo do tempo

Em 15 de janeiro de 2003, o experimento com cultivo de capim Tifton 85 em sistema de produção irrigado, adubado ou não com nitrogênio (via nitrato de amônio) e recebendo uma adubação básica, comum a todos os tratamentos, com fósforo (via superfosfato simples) e potássio (via cloreto de potássio) foi instalado em um Argissolo Vermelho Distrófico latossólico (EMBRAPA, 2006), de textura média-arenosa nos horizontes superiores (0-0,4 m) e média-argilosa nos horizontes inferiores (0,4-1,0 m) cujas características físicas e químicas são apresentadas na Tabela 3.

Antes da instalação do experimento, em setembro de 2001, foi aplicado ao solo aproximadamente 2,0 Mg ha⁻¹ de calcário dolomítico (30,8% de CaO e 19,8% de MgO), a fim de elevar a saturação por bases a 60% na camada de 0-0,2 m (WERNER et al., 1996) e em janeiro de 2002 foi realizado o plantio das mudas de capim Tifton 85, iniciando-se assim o cultivo.

O delineamento experimental foi o de blocos aleatorizados, com quatro repetições em esquema de parcelas subdivididas no tempo (períodos do ano) ou no espaço (profundidades).

Inicialmente, em 2003, foram empregados cinco tratamentos ao cultivo de capim Tifton 85: A100 - irrigação com água de abastecimento sódica e adubação com 520 kg ha⁻¹ ano⁻¹ de nitrogênio; E0, E33, E66 e E100 - irrigação com EETE e adubação com 0; 171,6; 343,2 e 520 kg ha⁻¹ ano⁻¹ de nitrogênio, respectivamente. Entretanto esse número de tratamentos passou por três ligeiras modificações até a realização do presente estudo.

Tabela 3 – Características químicas e físicas do solo por ocasião da instalação do experimento, em janeiro de 2003 ⁽¹⁾

Prof.	pH		CE ⁽²⁾	Na	K	Ca	Mg	Al	H+Al	S
m	H ₂ O	CACl ₂	dS m ⁻¹				mmol _c kg ⁻¹			
0-10	5,65	4,9	0,07	ND ⁽³⁾	1,45	10,26	5,61	1	15,17	17,32
10-20	5,36	4,56	0,08	ND	0,79	10,54	5,97	1,8	16,97	17,30
20-40	5,06	4,32	0,07	ND	0,53	7,36	5,52	4,1	17,47	13,41
40-60	5,03	4,04	0,04	ND	0,43	3,79	2,72	8,5	22,67	6,94
60-80	5,03	4,2	0,02	ND	0,45	5,71	4,34	6,8	24,57	10,50
80-100	4,91	4,18	0,06	ND	0,76	3,9	4,71	5,7	17,97	9,37

Prof.	CTC	V	CT ⁽⁴⁾	P	Areia	Silte	Argila	ADA ⁽⁵⁾	GFA ⁽⁶⁾
m	mmol _c kg ⁻¹	%	g kg ⁻¹	mg kg ⁻¹		g kg ⁻¹			%
0-10	32,49	53,31	5,97	6,23	740	60	200	21	89,5
10-20	34,27	50,48	5,84	1,35	740	40	220	19	91,4
20-40	30,88	43,43	5,68	1,57	720	60	220	20	90,9
40-60	29,61	23,44	5,28	0,71	660	80	260	22	91,5
60-80	35,07	29,94	4,26	0,71	680	40	280	0	100
80-100	27,34	34,27	3,04	0,44	640	80	280	0	100

Tensão (kPa)										
Prof.	0	0,98	1,96	3,92	5,88	9,81	32,36	78,45	98,07	147,1
m	Conteúdo de água (m ³ m ⁻³)									
0-20	0,389	0,343	0,33	0,304	0,283	0,257	0,213	0,181	0,156	0,151
20-40	0,436	0,358	0,333	0,297	0,279	0,247	0,210	0,195	0,151	0,137
40-60	0,419	0,351	0,334	0,307	0,289	0,26	0,218	0,182	0,172	0,163
Média	0,415	0,351	0,332	0,303	0,284	0,255	0,214	0,186	0,160	0,150

⁽¹⁾ Adaptado de Fonseca (2005). ⁽²⁾ Condutividade elétrica no extrato aquoso 1:1 (m:v), conforme Camargo et al. (1986). ⁽³⁾ Elemento químico não detectado. ⁽⁴⁾ Carbono total. ⁽⁵⁾ Argila dispersa em água. ⁽⁶⁾ Grau de floculação das argilas.

Em 2004, foi acrescentado aleatoriamente em cada bloco o tratamento SI - sem irrigação e sem adubações nitrogenada e básica (adubação fosfatada e potássica). Isto foi realizado devido à necessidade de um tratamento controle e possibilitado pelo fato de haver ao lado da área experimental o cultivo de capim Tifton 85 recebendo o mesmo manejo em termos de cortes bimestrais.

Em 2010, o tratamento SI foi substituído pelo A0 - irrigação com água sódica de abastecimento urbano, sem adubação nitrogenada e com adubação básica.

Em 26 de agosto de 2011, início deste estudo, foi inserido um novo tratamento SI ao experimento que passou a ser formado por sete tratamentos (SI, A0, A100, E0, E33, E66 e E100). Esta alteração foi realizada a fim de se ter um novo tratamento controle (sem irrigação e sem adubações) e para isso foi utilizado área cultivada com capim Tifton 85 da extremidade de cada bloco (Figura 3).

Para as avaliações químicas e físico-hídricas realizadas no presente estudo utilizou-se os tratamentos SI, A100 e E66, sendo os dois últimos selecionados a partir dos resultados obtidos por Santos (2004) e Fonseca (2005). Estes dois tratamentos estão relacionados as produtividades mais elevadas e similares com doses diferentes de nitrogênio. Para as avaliações agrônômicas utilizou-se os sete tratamentos.

Figura 3 – Croqui da área experimental de capim Tifton 85 a partir de agosto de 2011. Avaliações de produtividade de capim Tifton 85 foram realizadas em todos os tratamentos. Avaliações de atributos químicos e propriedades físico-hídricas do solo foram realizadas somente no tratamento SI (quadrados vermelhos), A100 (quadrados azuis) e E66 (quadrados verdes) dos blocos um, dois e três. . As linhas em cinza representam a tubulação do sistema de irrigação formada por canos de PVC (policloreto de polivinila). O tópico “PARCELA” ilustra os componentes de cada parcela experimental. SI - sem irrigação e sem fertilização; A0 – irrigação com água de abastecimento sem fertilização nitrogenada; E0, E33, E66 e E100 - irrigação com EETE e adição de 0, 172,0; 343,2 e 520,0 kg ha⁻¹ ano⁻¹ de N via nitrato de amônio, respectivamente; A100 - irrigação com água de abastecimento e adição de 520,0 kg ha⁻¹ ano⁻¹ de N via nitrato de amônio.

As parcelas experimentais são distanciadas 10 m entre si, a área total de cada parcela é de 100 m² (10 x 10 m) sendo destes 63,30 m² de bordaduras (interna, 12,57 m² + externa, 49,73 m² e área de 1 m² destinada a bateria de tensiômetros) e 36,70 m² de área útil (Figura 3).

O sistema de irrigação por aspersão convencional, instalado desde janeiro de 2003, tem um aspersor no centro de cada parcela a uma altura de 0,9 m da superfície do solo, raio útil teórico de 2,0 a 5,5 m, pressão e vazão de serviço de 300 kPa e 0,63 m³ h⁻¹, respectivamente. Em janeiro de 2012 as vazões foram medidas em todos os aspersores e a média aritmética foi de $0,8879 \pm 0,0159$ m³ h⁻¹ (número de aspersores: 24 e desvio padrão: 0,0779 m³ h⁻¹). No cálculo da lâmina de irrigação foi considerada a vazão média dos aspersores pertencentes a cada tratamento irrigado.

O manejo da irrigação foi realizado a cada dois dias baseado no potencial matricial crítico do solo para a cultura (-34 kPa = -340 hPa), na camada de 0 a 0,6 m e por meio da leitura dos tensiômetros de um dos quatro blocos (por motivo de praticidade, apenas os tensiômetros de um dos blocos eram verificados a cada dois dias e a ordem de leitura era do bloco 1 ao bloco 4). As lâminas de irrigação e precipitação foram quantificadas para o período de setembro de 2011 a setembro de 2012 (Figura 4).

Figura 4 – Lâminas de irrigação e precipitação mensal nos tratamentos da área experimental de capim Tifton 85 no período de agosto de 2011 a setembro de 2012. SI (precipitação) - sem irrigação e sem fertilização; A0 – irrigação com água de abastecimento sem fertilização nitrogenada; E0, E33, E66 e E100 - irrigação com EETE e adição de 0, 172,0; 343,2 e 520,0 kg ha⁻¹ ano⁻¹ de N via nitrato de amônio, respectivamente; A100 - irrigação com água de abastecimento e adição de 520,0 kg ha⁻¹ ano⁻¹ de N via nitrato de amônio.

A concentração média de sódio na água e no EETE em 2010 e 2011 foi de 87,5 e 105,2 mg L⁻¹, respectivamente (Tabela 4) e são inferiores (120,79 e 145,79 mg L⁻¹, FONSECA, 2005) a concentração média dos anos de 2003 e 2004.

Os tratos culturais consistiram de cortes bimestrais do capim, adubações (Tabela 5) e três aplicações de herbicida seletivo (na forma de concentrado emulsionável) e sistêmico do grupo químico do Ácido Piridiniloxialcanóico nos dias 27 de abril e 07 de novembro de 2011 e 17 de abril de 2012.

Tabela 4 – Resultados de análises químicas (média dos anos 2010 e 2011) da água de abastecimento de Lins e do EETE utilizados na irrigação do experimento com capim Tifton 85 e comparação com médias apresentadas em revisões bibliográficas internacionais ⁽¹⁾

Constituinte	Água	Efluente	Concentração normal ⁽²⁾	Referência
	mg L ⁻¹			
pH	8,98 ± 1,1	8,21 ± 0,94	7,8 a 8,1	Feigin; Ravina; Shalhevet (1991)
CE (dS m ⁻¹)	0,291 ± 0,1	0,765 ± 0,1	1,0 a 3,1	Pescod (1992)
RAS (mmol L ⁻¹) _{1/2}	14,35 ± 5,40	8,24 ± 2,13	4,5 a 7,5	Feigin; Ravina; Shalhevet (1991)
CID ³	30,5 ± 16,5	84,6 ± 12,4	-	-
COD ⁴	1,006 ± 0,4	13,82 ± 7,5	30 a 60	Bouwer; Chaney (1974)
N-NH ₄ ⁺	0,049 ± 0,0	10,3 ± 13,2	1 a 40	Feigin; Ravina; Shalhevet (1991)
N-NO ₃ ⁻	0,904 ± 0,7	0,115 ± 0,1	0 a 10	Feigin; Ravina; Shalhevet (1991)
N-NO ₂ ⁻	0,030 ± 0,0	0,160 ± 0,4	0,02	Pescod (1992)
P-H ₂ PO ₄ ⁻	0,403 ± 0,8	2,547 ± 2,2	4,2 a 9,7	Bouwer; Chaney (1974)
K	0,80 ± 0,27	9,13 ± 2,85	10 a 40	Feigin; Ravina; Shalhevet (1991)
Na	87,5 ± 16,1	105,2 ± 27,14	50 a 250	Feigin; Ravina; Shalhevet (1991)
Ca	2,015 ± 0,6	8,076 ± 2,2	20 a 120	Feigin; Ravina; Shalhevet (1991)
Mg	0,477 ± 0,1	2,542 ± 0,5	10 a 50	Feigin; Ravina; Shalhevet (1991)
S	13,32 ± 7,3	36,5 ± 17,9	62 ⁽⁵⁾	Asano; Pettygrove (1987)
B	0,037 ± 0,0	0,047 ± 0,0	0 a 1	Feigin; Ravina; Shalhevet (1991)
Cu	< LD ⁽⁶⁾	0,494 ± 1,0	0,040 ⁽⁵⁾	Feigin; Ravina; Shalhevet (1991)
Fe	0,009 ± 0,0	0,119 ± 0,1	0,330 ⁽⁵⁾	Pescod (1992)
Mn	< LD ⁽⁶⁾	< LD ⁽⁶⁾	0,200 a 0,700	Pescod (1992)
Zn	0,011 ± 0,0	0,019 ± 0,0	0,040 ⁽⁵⁾	Feigin; Ravina; Shalhevet (1991)
Si	18,36 ± 6,1	16,16 ± 3,7	-	-
Ni	0,002 ± 0,0	0,004 ± 0,0	0,007 ⁽⁵⁾	Feigin; Ravina; Shalhevet (1991)
Al	0,071 ± 0,1	0,038 ± 0,1	-	-
Cd	0,005 ± 0,0	0,007 ± 0,0	< 0,002 ⁽⁵⁾	Asano; Pettygrove (1987)
Cr	0,010 ± 0,0	0,009 ± 0,0	< 0,020 ⁽⁵⁾	Asano; Pettygrove (1987)
Pb	0,010 ± 0,0	0,017 ± 0,0	< 0,050 ⁽⁵⁾	Asano; Pettygrove (1987)

⁽¹⁾ Adaptado de Santin (2012). ⁽²⁾ Faixa de concentração considerada normal para os constituintes do EETE, de acordo com as referências apresentadas nesta tabela. ⁽³⁾ Carbono inorgânico dissolvido. ⁽⁴⁾ Carbono orgânico dissolvido. ⁽⁵⁾ Valor de referência, uma vez que este constituinte não tem sido rotineiramente analisado nas amostras de EETE. ⁽⁶⁾ Limite de detecção.

Tabela 5 – Histórico de fertilização mineral da área experimental referente aos anos de 2003, 2004, 2011 e 2012

Cortes do capim	Data do corte	Data da fertilização	Fertilizante		
			N ⁽¹⁾	P ₂ O ₅	K ₂ O
			kg ha ⁻¹		
2003 (1º ano) ⁽²⁾					
Instalação	15/01/2003	18/01/2003	60	100	40
1 (1º)	15/03/2003	18/03/2003	60	-	40
2 (2º)	15/05/2003	18/05/2003	120	-	100
3 (3º)	18/07/2003	21/07/2003	100	50	75
4 (4º)	15/09/2003	18/09/2003	80	-	80
5 (5º)	13/11/2003	16/11/2003	100	-	80
Total			520	150	415
2004 (2º ano) ⁽²⁾					
1 (6º)	14/01/2004	17/01/2004	120	50	95
2 (7º)	16/03/2004	19/03/2004	120	-	80
3 (8º)	16/05/2004	19/05/2004	80	-	60
4 (9º)	13/07/2004	16/07/2004	80	50	60
5 (10º)	13/09/2004	16/09/2004	60	-	60
6 (11º)	15/11/2004	18/11/2004	60	-	60
Total			520	100	415
2011 (9º ano)					
1 (48º)	15/01/2011	18/01/2011	100	50	80
2 (49º)	15/03/2011	18/03/2011	100	-	80
3 (50º)	15/05/2011	18/05/2011	80	-	60
4 (51º)	15/07/2011	18/07/2011	60	50	40
5 (52º)	29/09/2011	02/10/2011	80	-	60
6 (53º) ⁽³⁾	25/11/2011	28/11/2011	100	-	80
Total			520	100	400
2012 (10º ano)					
1 (54)	26/01/2012	29/01/2012	100	50	80
2 (55º)	25/03/2012	28/03/2012	100	-	80
3 (56º)	25/05/2012	28/05/2012	80	-	60
4 (57º)	26/07/2012	29/07/2012	60	50	40
5 (58º) ⁽⁴⁾	27/09/2012	30/09/2012	80	-	64
6 (59º)	25/11/2012	28/11/2012	100	-	80
Total			520	100	404

⁽¹⁾ Dose máxima de nitrogênio (520,0 kg ha⁻¹ ano⁻¹) aplicada durante o ano via nitrato de amônio nos tratamentos A100 e E100. Os tratamentos A0, E0, E33 e E66 receberam 0, 0, 172,0 e 343,2 kg ha⁻¹ ano⁻¹ de N via nitrato de amônio, respectivamente. ⁽²⁾ Histórico de fertilização referente aos anos 2003 e 2004, adaptado de Fonseca (2005). ⁽³⁾ Primeira e ⁽⁴⁾ última amostragem de capim, totalizando seis no período de estudo. A0 e A100 – irrigação com água de abastecimento; E0, E33, E66 e E100 - irrigação com EETE.

3.3 Coleta de amostras e análises de propriedades químicas do solo

Uma amostra de solo por profundidade foi coletada, moída, passada em peneira de 2 mm para obtenção de TFSA. As profundidades de coleta de 0,05-0,15 (P1), 0,25-0,35 (P2) e de 0,70-0,80 m (P3) foram selecionadas por apresentarem maiores alterações químicas e físicas em estudos anteriores realizadas na área experimental (Santos, 2004; Fonseca, 2005). Um total de 27 amostras de solo foram coletadas correspondendo a três blocos, três tratamentos e três profundidades.

O pH foi determinado por potenciometria, em água (1:2,5) e solução de CaCl_2 0,01 mol L^{-1} (VAN RAIJ et al., 2001). A condutividade elétrica do extrato aquoso (CAMARGO et al., 2009) foi determinada em extrato 1:1(m:v) pela leitura em condutivímetro digital. Os teores de Na e K foram determinados em extratos de TFSA obtidos com solução de Mehlich-1 (HCl 0,05 mol L^{-1} + H_2SO_4 0,0125 mol L^{-1}), mediante leitura por fotometria de chama. O Ca, Mg e Al foram extraídos com solução de KCl 1,0 mol L^{-1} . O teores de Ca e Mg foram obtidas mediante leitura por espectrometria de emissão óptica com plasma de argônio acoplado indutivamente (ICP-OES) e os de Al trocável por titulação com solução padronizada de NaOH 0,025 mol L^{-1} . Os teores de H+Al foram determinados por titulação com solução padronizada de NaOH 0,025 mol L^{-1} de extratos de TFSA obtidos com solução de $\text{Ca}(\text{CH}_3\text{-COO})_2$ 0,5 mol L^{-1} a pH 7,0. A PST foi obtida a partir dos teores de Na e CTC do solo. As concentrações de carbono total e nitrogênio total do solo foram determinadas por combustão a seco (NELSON; SOMMERS, 1996) a partir de amostras de TFSA que foram moídas e passadas em peneira de malha de 0,15 mm.

3.4 Análises de propriedades físico-hídricas do solo

3.4.1 Densidade dos sólidos (ρ_s)

A densidade dos sólidos ou das partículas do solo (Eq. 4) foi determinada pelo método do picnômetro a gás hélio. Foram processados aproximadamente oito gramas de terra fina seca em estufa (TFSE) de cada uma das 27 amostras referentes aos tratamentos SI, A100 e E66 nas três profundidades estudadas.

$$\rho = \frac{m_s}{V_s} \rightarrow (\text{kg m}^{-3}) \quad (4)$$

3.4.2 Argila dispersa em água (ADA)

As determinações de ADA foram realizadas para as 27 amostras de solo pelo método da Pipeta, segundo Camargo et al. (2009).

3.4.3 Condutividade hidráulica do solo saturado (K_{sat}) e curvas de retenção da água no solo (CRs).

Para cada uma destas duas avaliações foram tomados dois conjuntos de 81 amostras indeformadas de solo (três blocos, três tratamentos, três profundidades, três réplicas), coletadas com amostradores tipo Uhland (UHLAND, 1949) e anéis volumétricos de 50 x 50 mm para determinação de K_{sat} e anéis de 50 x 25 mm para determinação das CRs. Para tanto, foram abertas nove trincheiras (1,0 x 1,0 x 0,8 m) para a coleta de três amostras indeformadas de solo por profundidade (0,05-0,15, 0,25-0,35 e 0,70 e 0,80 m) e para cada avaliação.

Após a coleta, as amostras foram embaladas em filme plástico e papel alumínio, encaminhadas ao laboratório e mantidas em geladeira (temperaturas de 4-7°C) a fim de evitar desenvolvimento de microrganismos até o início das análises.

Antes de começar as medidas, as amostras foram preparadas (realização de “toalete” e colocação de telas de 180 fios cm^{-2} no fundo dos anéis) e submetidas à secagem ao ar livre e posteriormente postas em bandejas plásticas contendo água deionizada a fim de se obter a saturação das amostras por capilaridade durante 48 horas, considerando-se que destas, 24 horas foram para se obter a elevação do nível da lâmina de água até a borda superior da amostra e o tempo restante a fim de que mais bolhas de ar pudessem ser eliminadas (KLUTE, 1986; BALL; HUNTER, 1988).

Os anéis com as amostras destinados as medidas de K_{sat} foram conectados, antes da saturação, a um segundo anel (vazio e de dimensões iguais ao do anel com solo) onde foram marcadas as referências de potencial total por meio de um medidor composto por duas hastes com 1,0 cm de diferença de altura (Figura 6). A K_{sat} foi determinada pelo método de carga decrescente (REYNOLDS; ELRICK, 2002) e obtida como segue:

$$K_{sat} = \frac{L}{\Delta t} \ln \left(\frac{H_1 - h}{H_2 - h} \right) \rightarrow (\text{mm h}^{-1}), \quad (5)$$

em que:

L - comprimento da amostra de solo

H_1 e H_2 - cargas d'água nos tempos t_1 e t_2 , respectivamente

$\Delta t = t_2 - t_1$ - intervalo de tempo para o potencial total diminuir de H_1 para H_2

h - nível de referência

As CRs foram obtidas pelo método de secagem e após a saturação as amostras foram pesadas em balança centesimal – 0,01 g e submetidas, após equilíbrio dinâmico do conteúdo de água, a nove potenciais mátricos (-1, -3, -6 e -10 kPa na mesa de tensão e -30, -100, -300, -500 e -1500 kPa na câmara de pressão (RICHARDS, 1965)). Após estes procedimentos os dados de conteúdo de água em cada potencial foram utilizados para elaboração das curvas ajustadas à equação 2 (VAN GENUCHTEN, 1980):

$$\theta = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{(1 + (\alpha \Psi_m)^n)^m} \rightarrow (\text{m}^3 \text{ m}^{-3}), \quad (2)$$

A partir das CRs, analisou-se a distribuição do tamanho dos poros do solo mediante as curvas diferenciais das curvas de retenção para os tratamentos nas três profundidades, considerando o potencial mátrico ou tensão (τ_i) como variável independente. O raio equivalente dos poros foi calculado a partir dos valores de τ_i (cm de coluna de água ou hPa) pela fórmula da ascensão capilar (Eq. 6 – mesa de tensão e Eq. 7 – câmara de pressão)

$$\tau_i = h_i = \frac{2\sigma \cos \alpha}{\rho_a g r_i} \rightarrow (\text{cm}), \quad (6)$$

$$\tau_i = P_i = \frac{2\sigma \cos \alpha}{r_i} \rightarrow (\text{hPa}), \quad (7)$$

onde h_i e P_i são a altura de água fixada na mesa de tensão e pressão de ar fixada na câmara, respectivamente, com a qual a solução do solo entra em equilíbrio; σ , tensão superficial da água a 25°C (N m⁻¹); α , ângulo de contato que neste caso é zero; ρ_a , densidade da água (kg m⁻³); g , aceleração da gravidade (m s⁻²); r_i é o raio do poro.

3.4.4 Porosidade do solo (ϵ) e distribuição do tamanho dos poros

A porosidade do solo foi classificada em função do raio do poro (KOOREVAAR; MENELIK; DIRKSEN, 1983) onde se denominou de: *i*) macroporos: poros com raio maior

que 50 μm e que são esvaziados a uma tensão de 30 hPa (0,3 m.c.a); *ii*) mesoporos: poros de raio entre 15 e 50 μm , esvaziados em tensões maiores que 30 e até 100 hPa; *iii*) microporos: poros de raio menor que 15 μm , esvaziados em tensões maiores que 100 hPa. Tendo em vista que essa classificação de microporos aborda também os poros com raio inferior a 0,1 μm esvaziados a partir da tensão do ponto de murcha permanente ou 15000 hPa será considerado neste estudo que a partir desta tensão os poros serão denominados de *iv*) criptoporos conforme Klein e Libardi (2002).

As CRs, os pontos de porosidade do solo e o conteúdo de água disponível (340 hPa) do solo serão apresentados conforme figura 5.

Figura 5 – Curva de retenção de água no solo, $\theta(\psi_m)$ com: intervalo de macro (1-30 hPa), meso (30-100 hPa) e microporosidade do solo (100-1500 hPa) com o respectivo raio (r) do menor poro de cada intervalo ($r = 50, 15$ e $< 0,1 \mu\text{m}$); ponto limite de criptoporosidade do solo (1500 hPa) e raio do maior poro deste intervalo ($< 0,1 \mu\text{m}$); ponto de conteúdo de água disponível - θ_{AD} (340 hPa) para fins de irrigação da área experimental de capim Tifton 85 e raio do maior poro neste ponto (4,3 μm); saturação relativa (θ/α) em cada intervalo. Adaptado de Libardi (2005).

3.4.5 Densidade do solo (ρ)

As amostras utilizadas nas medidas de K_{sat} foram secas a 105°C durante um período de 24 horas para a obtenção da massa dos sólidos do solo (m_s) e volume do solo seco (V) que foram utilizados no cálculo da ρ determinada pelo método do anel volumétrico (Figura 6) segundo Blake e Hartge (1986) utilizando-se as equações 8 e 9:

$$V = \frac{\pi d^2}{4} \times h \rightarrow (\text{m}^3) \quad (8)$$

$$\rho = \frac{m_s}{V} \rightarrow (\text{kg m}^{-3}). \quad (9)$$

Figura 6 – Procedimento de determinação de K_{sat} e p para os tratamentos SI, A100 e E66 nas profundidades P1, P2 e P3. a) amostrador tipo Uhland e anéis volumétricos; b) coleta de amostras indeformadas de solo na P1; c) continuação de abertura de trincheira para coleta nas profundidades P2 e P3; d) e e) identificação e acondicionamento de amostras para armazenamento; f) preparo de amostra indeformada – colocação de tela e anel superior para posterior saturação; g) saturação de conjunto de três amostras indeformadas; h) medidor de H_1 e H_2 colocado dentro do anel superior; i) cronômetro utilizado para determinação de Δt ; j) medidas de K_{sat} em conjunto de três amostras após a saturação; k) tampa do “medidor K_{sat} ”; l) secagem de amostras indeformadas a 105°C para determinação de ρ ; m) pesagem de amostra indeformada seca; n) e o) medidas de diâmetro interno e altura de anéis, respectivamente; p) descarte de amostras.

3.5 Produtividade de massa seca (MS) e acumulação de N (N-MS), K (K-MS) e Na (Na-MS)

As amostragens do capim Tifton 85 foram realizadas de novembro de 2011 a setembro de 2012 (Tabela 5). Para a determinação de MS, o capim foi cortado bimestralmente e manualmente a uma altura de 5,0 a 7,0 cm em uma área aleatória de $1,0 \text{ m}^2$ ($1,0 \times 1,0 \text{ m}$) localizada na área útil da parcela com auxílio de um quadro de PVC. Após a amostragem toda a área experimental foi cortada mecanicamente com roçadeira costal. A massa fresca aérea foi acondicionada em sacos plásticos e pesada. Após a pesagem, foram retiradas subamostras, que não foram lavadas, acondicionadas em sacos de papel e transferidas para estufa de ventilação forçada de ar à 65°C , permanecendo por 72 horas (tempo normalmente necessário

para obtenção de massa constante do material) para secagem e posterior determinação da produtividade de MS da parte aérea na estação chuvosa (MS-EC – somatório de produtividades dos bimestres outubro-novembro/2011, dezembro-janeiro/2012, fevereiro-março/2011), estação seca (MS-ES – somatório de produtividades dos bimestres abril-maio/2012, junho-julho/2012 e agosto-setembro/2012) e anual (MS-Anual – somatório dos seis bimestres).

Após a secagem e determinação da produtividade, as amostras foram processadas em moinho tipo Willey com abertura de malha de 0,85 mm armazenadas em frascos plásticos até a realização das análises químicas. Foram determinadas as concentrações de sódio (Na), potássio (K) e nitrogênio (N) segundo a metodologia descrita em Malavolta; Vitti; Oliveira (1997). A determinação das concentrações de Na e K foi realizada mediante digestão nítrico-perclórica e leitura por fotômetro de chama. A de N foi por meio de digestão sulfúrica com sais e catalisadores e leitura pelo método semi-micro-Kjeldahl.

Como mencionado, as subamostras de capim não foram lavadas. Essa decisão foi tomada baseada principalmente no fato delas não estarem sujas no momento da coleta (MALAVOLTA; VITTI; OLIVEIRA, 1997). Considerou-se também que o K presente nas folhas poderia ser facilmente “lavado” quando submetido à lavagem por imersão em água destilada (MORAES; ARENS, 1969 apud GARCIA et al.; 2008) e que a concentração de Na é influenciada pelo método de lavagem (LABANAUSKAS, 1968). Ressalta-se que a concentração de N no tecido vegetal não é influenciada pela lavagem do material (LABANAUSKAS, 1968; HARGROVE; OHKI; WILSON, 1985).

Os resultados de MS e concentrações de N, K e Na no tecido vegetal foram então utilizados na determinação da acumulação destes elementos na parte aérea do capim Tifton 85 (Eq. 10):

$$N_{MS}, Na_{MS} \text{ ou } K_{MS} = MS \times [N], [Na] \text{ ou } [K] \rightarrow (kg \text{ ha}^{-1}), \quad (10)$$

onde N-MS, Na-MS ou K-MS são, respectivamente, N, Na ou K acumulado na MS aérea de capim Tifton 85; [N], [Na] ou [K] concentração destes três elementos na MS.

3.6 Análises estatísticas

Na avaliação de propriedades químicas e físico-hídricas do solo, considerou-se um delineamento em blocos completos aleatorizados com três repetições (blocos um, dois e três), parcelas subdivididas no espaço (três profundidades: 0,05-0,15 (P1); 0,25-0,35 (P2) e 0,70-0,80 m (P3)) com três tratamentos: SI, A100 e E66. Realizou-se a análise de variância dos dados e em caso de F significativo ($p < 0,05$) foi realizado o teste de Tukey.

Os dados de produtividade de MS anual foram submetidos à análise de variância de um delineamento em blocos aleatorizados (DBA) com quatro repetições. Já os de produtividade de MS estacional foram analisados considerando-se um DBA com parcelas subdivididas no tempo (estação chuvosa ou estação seca) sendo considerado como efeito das parcelas os tratamentos (A0, E0, E33, E66, E100 e A100) e efeito das subparcelas as estações. Em casos de F significativo ($p < 0,05$) foi realizado o teste de Tukey. O tratamento SI foi excluído desta análise devido a perda de uma coleta bimestral, impossibilitando, assim, a obtenção completa de dados de produtividade de uma das estações.

Os tratamentos irrigados apenas com efluente de ETE (E0, E33, E66 e E100) também foram analisados separadamente para os resultados de produtividade de MS estacional e anual em função das doses de nitrogênio. Após a observação de F significativo ($p < 0,05$) foram ajustados aos modelos linear e quadrático.

Para os dados de K_{sat} foi feita uma análise descritiva e depois as médias foram log-transformadas ($K_{sat} = \log_{10} (K_{sat} + 1)$) para normalizar a distribuição e homogeneizar as variâncias. Em seguida foram submetidas à análise de variância em esquema de parcela subdividida no espaço (três profundidades) e comparações de médias pelo teste de Tukey quando F foi significativo ($p < 0,05$). No caso de haver interação tratamento vs profundidade, procedeu-se com os desdobramentos.

As curvas de retenção foram ajustadas através de regressão não-linear conforme equação de van Genuchten (1980) e a soma dos erros residuais do ajuste foi utilizada para avaliar as diferenças estatísticas entre elas pelo teste da razão de verossimilhança. As curvas foram agrupadas por profundidade a fim de facilitar a interpretação dos resultados.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Efeitos da irrigação em propriedades químicas do solo

A aplicação dos tratamentos E66 e A100 provocaram alterações em propriedades químicas do solo (Tabela 6 e 6.1).

Acidez

Os tratamentos empregados causaram alterações nos valores de pH em água, mas não tiveram efeito sobre os valores de pH em CaCl_2 , acidez trocável (Al^{3+}) e acidez potencial ($\text{H}+\text{Al}$). Nas profundidades P2 e P3 os valores de pH em água dos tratamentos A100 e E66 foram superiores ao do SI. Fonseca (2005) também verificou isso e atribuiu esses resultados ao pH elevado da água de irrigação e ao poder do EETE em amenizar a acidez do solo.

Entre profundidades, houve maiores valores de pH nas P2 e P3 para os tratamentos A100 e E66. Nesse caso pode está ocorrendo lixiviação de bases trocáveis da profundidade P1, porém, sem provocar grandes alterações de pH na superfície.

$\text{CE}_{1:1}$

Os tratamentos empregados causaram alterações na condutividade elétrica de parte do perfil do solo. Nas profundidades P1 e P2 a concentração de sais do tratamento E66 foi superior a do tratamento SI, enquanto o tratamento A100 não apresentou diferenças. Na profundidade P3 não houve diferenças entre os tratamentos.

Como a amostragem de solo foi realizada no final do mês de agosto - período em que há predomínio das lâminas de irrigação em relação às chuvas, a maior condutividade do tratamento E66 pode ser atribuída a maior quantidade de sais presentes no efluente, à menor extração de sais pelo capim nesta época do ano e a menor lixiviação de sais pelas águas das chuvas.

Entre as profundidades, apenas as concentrações de sais do tratamento A100 foram maiores na camada superficial, porém não diferenciaram das do tratamento E66 em nenhuma das profundidades avaliadas, confirmando os resultados de Ramirez-Fuentes et al. (2002) e Fonseca (2005) que afirmam não haver incremento na condutividade do solo quando se tem irrigação com EETE ou água em condições semelhantes de fertilização.

Os aumentos de condutividade elétrica do solo aqui verificados, também têm sido observados em solos submetidos à irrigação por longos períodos ou em climas áridos e semi-áridos (HAYES; MANCINO; PEPPER, 1990; AL-NAKSHABANDI et al., 1996 apud SANTOS, 2004). Entretanto esses aumentos correspondem a valores de salinidade de até 0,26 dS m⁻¹ que são considerados baixos e não afetam a produtividade de capim Tifton 85 (MAAS; HOFFMAN, 1977; MAAS 1984).

Potássio

As concentrações de K⁺ foram alteradas pelos tratamentos, com exceção das profundidades P2 e P3 (Tabela 6). Na profundidade P1, o tratamento A100 provocou diminuição das concentrações de K⁺ no solo. Os resultados na profundidade P1 são contrários aos de Adekalu e Okunade (2002) e Fonseca (2005) e podem ser explicado pelo fato de: ocorrer alta extração de K⁺ pelo capim submetido a esse tratamento; ocorrer menor fornecimento deste elemento através da água de irrigação e haver prováveis perdas de K trocável por lixiviação, visto que o acúmulo de Na trocável no solo favorece a dessorção de K trocável do complexo de troca. Nas profundidades P2 e P3 os valores de K trocável corroboram os de Feigein, Ravina, Shalhevet, (1991) e os de Fonseca (2005).

Entre as profundidades, as concentrações de K⁺ dos tratamentos SI e E66 foram maiores na superfície e diminuíram com a profundidade. Para o SI isso já era esperado, pois o solo no início do experimento apresentava essa característica. Em relação ao E66, o fato de haver entradas de K trocável via efluente e fertilizantes permitiram essa maior concentração em superfície, mesmo ocorrendo extração pelo capim.

De um modo geral, esses resultados indicam que o uso do tratamento E66 mantém as concentrações de K trocável do solo por ter duas formas de entrada deste elemento, ao passo que o A100 pode continuar provocando diminuição de K⁺ do solo, mesmo mantendo-se a fertilização potássica.

Magnésio

As concentrações de Mg²⁺ foram alteradas pelos tratamentos, com exceção das profundidades P2 e P3. (Tabela 6). Na profundidade P1, os tratamentos A100 e E66 causaram diminuição das concentrações de Mg²⁺ no solo. Assim como para o K trocável, nas profundidades P2 e P3 não foi verificada alterações nas concentrações de Mg²⁺.

Os resultados da profundidade P1 concordam com os de Ramirez-Fuentes et al. (2002) e se devem ao fato destes tratamentos proporcionarem altas produtividades de capim Tifton 85 e, logo, maior extração deste elemento do solo (FONSECA, 2005). Os valores de Mg trocável nesta camada estão na faixa do nível crítico de $4,0 \text{ mmol}_c \text{ kg}^{-1}$ (VAN RAIJ, 1991), porém ainda são muito similares aos valores observados por Fonseca (2005) para estes mesmos tratamentos nos anos de 2003 e 2004. Essa concentração de Mg trocável no solo pode está sendo mantida pela irrigação com água ou efluente. As concentrações de Mg trocável das profundidades P2 e P3 corroboram os resultados de Hayes; Mancino; Pepper (1990) e Fonseca; Melfi, Montes (2005) nos quais também não foram verificados aumentos após o uso de EETE.

Entre as profundidades, as concentrações de Mg^{2+} dos tratamentos A100 e E66 foram iguais, porém as concentrações de Mg^{2+} do tratamento SI foram maiores na superfície e diminuíram com a profundidade, passando de 12,9 na profundidade P1a $5,95 \text{ mmol}_c \text{ kg}^{-1}$ da na P3, respectivamente.

Cálcio, SB, CTC e V

Não ocorreram efeitos da irrigação com E66 ou A100 nas concentrações de Ca^{2+} , SB, CTC e V. Os resultados de Ca trocável concordam com os de Hayes; Mancino; Pepper (1990), nos quais não foi verificado alterações na concentração de Ca trocável pelo o uso de EETE e discordam dos de Fonseca (2005) onde se observou maiores concentrações de Ca trocável do tratamento A100 nas seguintes camadas do solo: 0-0,1, 0,2-0,4 e 0,8-1,0 m.

Nos resultados de SB, CTC e V não foram observadas alterações pelo fato de serem estimadas, além de outros, a partir de Ca^{2+} e $\text{H}+\text{Al}$ que neste estudo estão em maiores proporções e não foram diferentes.

Sódio e PST

Analisando os resultados de Na trocável, observou-se um incremento em função do uso de água sódica e não ocorreu acúmulo nos primeiros 0,15 m para a área tratada com o E66, provavelmente devido à migração de sódio de cima para baixo no perfil. Esses teores de sódio estão bem acima dos encontrados em solos paulistas (VAN RAIJ, 1991) e quando em grandes proporções no complexo de troca de cátions do solo (alta PST) podem ser um problema.

Os resultados de PST mostram que a irrigação com água sódica (A100) causou aumento da percentagem de sódio trocável na profundidade P2, enquanto o uso do tratamento E66, que consiste de efluente com maior concentração de sódio e potássio e menor RAS comparado à água de abastecimento usada na irrigação (Tabela 4), apresenta PST igual ao tratamento SI em todas as profundidades estudadas devido, provavelmente, a dispersão dos dados destes dois tratamentos (Tabela 6.1).

Os cátions trocáveis do solo como potássio, cálcio e magnésio no tratamento E66 são sempre maiores ou iguais aos do A100 em superfície (Tabela 6). Ressalta-se que o sódio e a PST tanto na superfície como na profundidade de 0,70-0,80 m não foram afetados pelo uso dos tratamentos A100 e E66.

Carbono e Nitrogênio

Os resultados de carbono e nitrogênio do tratamento A100 mostram que houve diminuição destes elementos do solo na profundidade P2 em relação ao tratamento SI (Tabela 6.1). Nogueira (2008) também verificou diminuição de C e N (apresentados como estoque de C e N) no tratamento A100, e atribuiu isso ao aumento de atividade microbiana e consequente perda de C e N para a atmosfera, como resultado da maior presença de água no sistema e desestruturação de complexos organominerais em função dos processos de sodificação (elevada RAS apresentada pela água de irrigação, Tabela 4) e consequente disponibilização do C protegido fisicamente, resultando em sua mineralização e/ou lixiviação de carbono orgânico dissolvido. Na irrigação com EETE isso também pode ocorrer. Porém, essas perdas são um pouco menores devido às entradas de C orgânico lábil no sistema.

As concentrações de C e N dos tratamentos A100 e E66 nas profundidades P1 e P2 não foram alteradas e corroboram os resultados, de curto prazo, obtidos por Fonseca (2005), Fonseca; Melfi; Montes (2005) que também não observaram alterações na concentração de C e N. Esses resultados não eram os esperados, visto que os estudos de Nogueira (2008) indicavam que as saídas de C e N dos tratamentos A100 e E66, superariam as suas entradas e a produção de capim seria mantida pela utilização do C e N do solo.

Tabela 6 – Parâmetros químicos para os tratamentos SI, A100 e E66 nas profundidades de 0,05-0,15 m (P1); 0,25-0,35 m (P2) e 0,70-0,80 m (P3).

	pH		CE _{1:1} ⁽²⁾	Na	K	Ca	Mg	Al
Tratamento	H2O	CaCl2	dS m ⁻¹	mmolc kg ⁻¹				
Profundidade de 0,05-0,15 m								
SI	5,67 aA ⁽¹⁾	4,64 aA	0,12 bA	0,28 aA	2,44 aA	17,25 aA	12,90 aA	3,98 aB
A100	5,81 aB	5,03 aAB	0,24abA	7,35 aA	0,39 bA	14,46 aA	3,31bA	1,56 aA
E66	6,04 aB	4,91 aAB	0,26 aA	3,62 aA	1,62 aA	15,45 aA	5,08 bA	2,68 aA
Profundidade de 0,25-0,35 m								
SI	5,58 bA	4,56 aA	0,08 bA	0,31 bA	0,63 aB	10,13 aA	8,97 aAB	8,02 aAB
A100	6,57 aA	5,14 aA	0,14 abAB	11,89 aA	0,25 aA	10,98 aA	5,46 aA	0,84 aA
E66	6,69 aA	5,21 aA	0,24 aA	9,68 abA	0,29 aB	13,63 aA	4,45 aA	0,69 aA
Profundidade de 0,70-0,80 m								
SI	5,53 bA	4,25 aA	0,07 aA	0,54 aA	0,45 aB	6,75 aA	5,95 aB	12,47 aA
A100	6,23 abAB	4,66 aB	0,08 aB	6,33 aA	0,22 aA	6,36 aA	5,36 aA	5,00 aA
E66	6,43 aAB	4,62 aB	0,18 aA	8,70 aA	0,25 aB	5,26 aA	3,92 aA	4,55 aA
Média	6,06	4,78	0,16	5,41	0,73	11,14	6,16	4,42
CV _{trat} (%)	8,07	9,61	45,25	114,88	31,13	95,22	74,69	162,18
CV _{prof} (%)	3,47	3,75	28,45	80,05	66,46	52,58	37,22	74,17

⁽¹⁾ Letras iguais minúsculas (tratamentos dentro de cada profundidade) e maiúsculas (profundidade dentro de cada tratamento) não diferem entre si (Tukey, $p < 0,05$) ⁽²⁾ Condutividade elétrica no extrato aquoso 1:1 (m:v); conforme Camargo et al. (2009). SI - sem irrigação e sem fertilização; E66 - irrigação com EETE e adição de 343,2 kg ha⁻¹ ano⁻¹ de N via nitrato de amônio; A100 - irrigação com água de abastecimento e adição de 520,0 kg ha⁻¹ ano⁻¹ de N via nitrato de amônio.

Tabela 6.1 – Parâmetros químicos para os tratamentos SI, A100 e E66 nas profundidades de 0,05-0,15 m (P1); 0,25-0,35 m (P2) e 0,70-0,80 m (P3)

	H+Al ⁽²⁾	SB ⁽³⁾	CTC ⁽⁴⁾	V ⁽⁵⁾	PST ⁽⁶⁾	C ⁽⁷⁾	N ⁽⁸⁾
Tratamento	mmol _c kg ⁻¹		%		g kg ⁻¹		
Profundidade de 0,05-0,15 m							
SI	21,04 aA ⁽¹⁾	32,86 aA	53,90 aA	57,44 aA	0,59 aA	5,62 aA	0,37 aB
A100	15,47 aA	25,52 aA	40,99 aA	61,99 aA	17,75 aA	2,81 aA	0,09 aA
E66	16,35 aA	25,77 aA	42,12 aA	60,79 aA	8,45 aA	4,52 aA	0,27 aA
Profundidade de 0,25-0,35 m							
SI	18,29 aA	20,04 aAB	38,34 aAB	52,16 aA	0,77 bA	11,77aA	0,92 aA
A100	14,03 aA	28,58 aA	42,62 aA	66,85 aA	29,15 aA	3,30 bA	0,15 bA
E66	14,68 aA	28,05 aA	42,74 aA	65,64 aA	22,61 abA	5,17abA	0,35 abA
Profundidade de 0,70-0,80 m							
SI	19,23 aA	13,68 aB	32,91 aB	40,94 aA	1,58 aA	5,92 aA	0,39 aB
A100	13,12 aA	18,26 aA	31,38 aA	58,09 aA	20,30 aA	5,42 aA	0,35 aA
E66	14,81 aA	18,12 aA	32,94 aA	53,70 aA	24,81 aA	5,90 aA	0,42 aA
Média	16,34	23,43	39,77	57,51	14,00	5,60	0,37
CV _{trat} (%)	29,90	54,51	21,74	33,26	117,27	73,02	92,27
CV _{prof} (%)	22,66	33,60	22,42	16,10	77,62	51,38	63,58

⁽¹⁾ Letras iguais minúsculas (tratamentos dentro de cada profundidade) e maiúsculas (profundidade dentro de cada tratamento) não diferem entre si (Tukey, $p < 0,05$) ⁽²⁾ Acidez potencial. ⁽³⁾ Soma das bases. ⁽⁴⁾ Capacidade de troca iônica. ⁽⁵⁾ Saturação por bases. ⁽⁶⁾ Percentagem de sódio trocável. ⁽⁷⁾ Carbono total do solo. ⁽⁸⁾ Nitrogênio total do solo. SI - sem irrigação e sem fertilização; E66 - irrigação com EETE e adição de 343,2 kg ha⁻¹ ano⁻¹ de N via nitrato de amônio; A100 - irrigação com água de abastecimento e adição de 520,0 kg ha⁻¹ ano⁻¹ de N via nitrato de amônio.

4.2 Efeitos da irrigação nas propriedades físico-hídricas do solo

4.2.1 Densidade do solo (ρ)

Os efeitos dos tratamentos A100 e E66 na densidade do solo (Figura 7) são dependentes da profundidade. Verificou-se que o aumento na camada superficial do solo está ligado ao uso de irrigação com água ou EETE e corrobora outros resultados em que a simples hidratação ou o impacto das gotas de água da chuva e irrigação de alta energia cinética desagrega o solo podendo até promover modificações na morfologia de horizontes superficiais tornando a sua consistência muito dura (SANTOS; RIBEIRO, 2000). O solo com o tratamento controle (SI) tem diferentes densidades no perfil do solo sendo maior na profundidade de 0,15-0,35 m. Isso mostra que os efeitos dos tratamentos A100 e E66 não são os causadores desse aumento de densidade nessa profundidade.

Figura 7 – Densidade do solo (ρ) para os tratamentos SI, A100 e E66 nas profundidades de 0,05-0,15 m (P1), 0,25-0,35 m (P2) e 0,70-0,80 m (P3). Letras iguais minúsculas (tratamentos dentro de cada profundidade) e maiúsculas (profundidade dentro de cada tratamento) não diferem entre si (Tukey, $p < 0,05$). DMS-tratamento (barras com bolinha) = 0,066042 e a DMS-profundidade (barras com um traço) = 0,069262. N = 9. SI - sem irrigação e sem fertilização; E66 - irrigação com EETE e adição de 343,2 kg ha⁻¹ ano⁻¹ de N via nitrato de amônio; A100 - irrigação com água de abastecimento e adição de 520,0 kg ha⁻¹ ano⁻¹ de N via nitrato de amônio.

4.2.2 Densidade dos sólidos (ρ_s)

Houve apenas diferenças entre as profundidades. Na Profundidade P1 o valor de ρ_s foi de 2,63 e é menor que nas profundidades P2 e P3, cujo valor foi de 2,65. Essa pequena diferença não era esperada visto que se trata de uma propriedade física do solo que é estável e apresenta geralmente valores em torno de 2,65 já que esse valor representa a densidade média

de constituintes minerais predominantes nos solos como quartzo, feldspatos e silicatos de alumínio.

4.2.3 Argila dispersa em água (ADA)

A argila dispersa em água entre os tratamentos não foi alterada nas profundidades 0,05-0,15 m e 0,70-0,80 m, mas na camada de 0,25-0,35 m a do A100 foi maior que a do SI. Tendo em vista que nessa profundidade o uso de irrigação com água elevou os teores de sódio e PST mantendo cátions trocáveis como cálcio e magnésio iguais entre esses tratamentos, o aumento de ADA que está ocorrendo era esperado e vai ao encontro, em parte, à hipótese deste trabalho. Gloaguen (2005) encontrou correlação positiva entre argila dispersa em água e sódio o que lhe permitiu confirmar a ocorrência dos processos de dispersão e expansão devido à presença de sódio trocável.

A ADA aumentou até a profundidade de 0,25-0,35 m nos tratamentos com irrigação em relação ao SI e também até a camada de 0,70-0,80 m para o E66. Esses resultados diferem um pouco de outros que verificaram aumento da dispersão de argilas nos tratamentos irrigados com água ou efluente (GLOAGUEN, 2005) ou só efluente (BLUM et al., 2012) em relação ao controle até aproximadamente 1 m, embora o solo estudado por esse autores tenha sido um Latossolo, enquanto o deste trabalho foi um Argissolo.

Figura 8 – Argila dispersa em água para os tratamentos SI, A100 e E66 nas profundidades P1, P2 e P3. Letras iguais minúsculas (tratamentos dentro de cada profundidade) e maiúsculas (tratamento entre profundidades) não diferem entre si (Tukey, $p < 0,05$). 28,471076 e a DMS-profundidade (barras com traço) = 26,274562. N = 9. SI - sem irrigação e sem fertilização; E66 - irrigação com EETE e adição de 343,2 kg ha⁻¹ ano⁻¹ de N via nitrato de amônio; A100 - irrigação com água de abastecimento e adição de 520,0 kg ha⁻¹ ano⁻¹ de N via nitrato de amônio.

4.2.4 Condutividade hidráulica do solo saturado (K_{sat})

A condutividade hidráulica do solo, cultivado há mais de oito anos com capim Tifton 85 e submetido aos tratamentos A100 e E66, não foi alterada em relação ao SI (Figura 9). Entretanto, ao longo do perfil de solo, a K_{sat} diminuiu, sendo isso mais pronunciado entre 0,25 e 0,35 m, provavelmente devido ao adensamento desta camada por se tratar de um horizonte BA que está logo acima de um Bt (IBRAHIM, 2002) ou à persistência de compactação decorrente de preparos convencionais do solo períodos antes da implantação dos experimentos, ratificada pelos valores de densidade (ρ) (Figura 7). Esses resultados diferem dos de Gonçalves et al. (2007), que observaram redução de K_{sat} comparada ao SI, ao utilizarem a mesma estratégia de irrigação do presente trabalho. Isso possivelmente se deveu à rotação de culturas (leguminosa e gramínea) no experimento conduzido pelos autores citados.

Figura 9 – Condutividade hidráulica do solo saturado (K_{sat}) para os tratamentos SI, A100 e E66 nas profundidades P1, P2 e P3. Letras iguais minúsculas (tratamentos dentro de cada profundidade) e maiúsculas (tratamento entre profundidades) não diferem entre si (Tukey, $p < 0,05$). DMS-tratamento (barras com bolinha) = 0,8586456 e a DMS-profundidade (barras com traço) = 0,4895168. $N = 9$. SI - sem irrigação e sem fertilização; E66 - irrigação com EETE e adição de 343,2 kg $ha^{-1} ano^{-1}$ de N via nitrato de amônio; A100 - irrigação com água de abastecimento e adição de 520,0 kg $ha^{-1} ano^{-1}$ de N via nitrato de amônio.

Como já visto, a p nos tratamentos A100 e E66 na P1 aumentou 9,2 %; na P2 diminuiu 2,4 % e na P3 se manteve igual ao SI (Figura 7). Todavia, a magnitude dessas diferenças não induziu efeitos significativos ($p > 0,05$) sobre a K_{sat} nas profundidades de solo correspondentes (Figura 9), mesmo tendo em vista que alterações de ρ influem na macroporosidade, fundamental para a condução de água (SILVA; KATO 1997; GLOAGUEN, 2005). Nesse sentido, Jarvis e Messing (1995) demonstraram a relevância da

continuidade de poros em relação à sua distribuição de tamanhos no controle do movimento de água no solo, o que pode ser atribuído aos resultados de Ksat do presente estudo.

A alta variabilidade de Ksat, ratificada pelos valores do coeficiente de variação (CV), entre 104,51 e 302,21% (Tabela 7) é corroborada pelos resultados de Ruiz e Utset (1999), que verificaram um CV de 120,5 %; Warrick e Nielsen (1980), de 420 %; Mallants et al. (1996), de 599, 322 e 879 % para as profundidades de solo iguais a 0,1, 0,5 e 0,9 m, respectivamente, e Gonçalves et al. (2007), com CV de 32 a 112 % entre 0,125 e 0,875 m de profundidade.

Portanto, a condutividade hidráulica do solo saturado não é alterada após oito anos de aplicação de água de abastecimento sódica e EETE, mesmo diante de modificações em parâmetros como a condutividade elétrica, nos teores de sódio, percentagem de sódio trocável, carbono orgânico, densidade do solo e argila dispersa em água.

Tabela 7 – Resumo estatístico da condutividade hidráulica do solo saturado, após cultivo com capim Tifton 85 por mais de oito anos, submetido aos tratamentos SI, A100 e E66, nas profundidades de solo correspondentes a 0,05-0,15 m (P1); 0,25-0,35 m (P2) e 0,70-0,80 m (P3)

Tratamento	Mínimo	Máximo	Mediana	Média	Desvio Padrão	CV (1)
----- mm h ⁻¹ -----						%
Profundidade de 0,05-0,15 m						
SI	0,83	253,99	43,74	88,35	101,53	121,64
A100	1,32	52,90	6,56	17,06	19,85	116,30
E66	0,00	70,82	21,51	24,07	25,16	104,51
Profundidade de 0,25-0,35 m						
SI	0,07	5,20	0,76	1,30	1,69	130,64
A100	0,00	17,46	0,08	4,84	7,48	154,36
E66	0,00	33,35	0,25	4,07	12,31	302,21
Profundidade de 0,70-0,80 m						
SI	0,16	28,49	3,59	6,25	8,79	140,55
A100	0,10	151,12	4,15	25,16	54,68	217,34
E66	0,03	9,90	0,38	2,17	3,81	175,65

SI - sem irrigação e sem fertilização; E66 - irrigação com EETE e adição de 343,2 kg ha⁻¹ ano⁻¹ de N via nitrato de amônio; A100 - irrigação com água de abastecimento e adição de 520,0 kg ha⁻¹ ano⁻¹ de N via nitrato de amônio. N = 9.

4.2.5 Curvas de retenção da água no solo (CRs)

As curvas de retenção da água no solo para as profundidades P1, P2 e P3 estão apresentadas nas figuras 10 e 11 e os valores dos parâmetros correspondentes ao melhor ajuste do modelo em cada profundidade na Tabela 8.

Considerando apenas os parâmetros das curvas verificou-se que o uso de irrigação com água ou efluente modificou a retenção de água no solo. Os valores de conteúdo de água de saturação (θ_s) ao longo do perfil do A100 e E66 não seguiram a mesma tendência em relação ao SI. Na profundidade de 0,05-0,15 m eles foram menores indicando uma menor capacidade de armazenamento de água no solo quando está saturado; na profundidade 0,25-0,35 m eles foram maiores indicando que há uma maior porosidade e logo uma maior retenção e, na profundidade 0,70-0,80 m onde o A100 e E66 se diferenciaram do SI sendo maior e menor, respectivamente.

Tabela 8 – Parâmetros da curva de retenção da água no solo ajustados ao modelo de van Genuchten para os tratamentos SI, A100 e E66 nas profundidades de 0,05-0,15 m (P1); 0,25-0,35 m (P2) e 0,70-0,80 m (P3)

Profundidade	θ_s	θ_r	α	n	m	r^2
m	$m^3 m^{-3}$		hPa^{-1}	-	-	-
Profundidade de 0,05-0,15 m						
SI	0,49953	0,09251	0,04396	1,31722	0,24083	0,94563**
A100	0,47114	0,10951	0,02046	1,55237	0,35583	0,96460*
E66	0,47796	0,11520	0,02473	1,48106	0,32481	0,94993*
Profundidade de 0,25-0,35 m						
SI	0,39980	0,12646	0,01073	1,43974	0,30543	0,90150**
A100	0,44173	0,13660	0,02237	1,49141	0,32949	0,91971*
E66	0,44741	0,12907	0,02916	1,40012	0,28578	0,90977*
Profundidade de 0,70-0,80 m						
SI	0,47652	0,12937	0,03729	1,34744	0,25785	0,93106*
A100	0,51231	0,15680	0,02543	1,81968	0,45045	0,97180*
E66	0,46954	0,17122	0,02513	1,50189	0,33417	0,97102*

θ_s : conteúdo de água de saturação; θ_r : conteúdo de água residual; α , n e m: parâmetros empíricos do modelo; r^2 : coeficiente de determinação. * e **: todos os parâmetros da equação são significativos, $p < 0,01$ e $p < 0,05$, respectivamente. SI - sem irrigação e sem fertilização; E66 - irrigação com EETE e adição de $343,2 \text{ kg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ de N via nitrato de amônio; A100 - irrigação com água de abastecimento e adição de $520,0 \text{ kg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ de N via nitrato de amônio. N = 9.

Isso mostra que na maior parte do perfil o A100 retém mais água que o SI, enquanto que o E66 não. Especificamente na camada de 0,25-0,35 m o fato do A100 apresentar maior porosidade que o SI vai em direção contrária aos resultados de sódio, PST e ADA visto que estes foram significativamente maiores (Tukey, $p < 0,05$) e assim esperava-se que essa camada fosse afetada com o aumento da densidade e consequentemente diminuição de porosidade e redução na capacidade de armazenamento de água. Na camada 0,05-0,15 m como houve uma maior densidade (Tukey, $p < 0,05$) nos tratamentos A100 e E66 os resultados de porosidade estão inversamente correlacionados.

Em relação ao conteúdo de água residual (θ_r), pode-se notar que ao longo do perfil ocorreu aumento nos tratamentos A100 e E66 em relação ao SI.

Figura 10 – Curvas de retenção da água no solo ajustadas pelo modelo de van Genuchten para os tratamentos SI, A100 e E66 nas profundidades de 0,05-0,15 m (P1); 0,25-0,35 m (P2) e 0,70-0,80 m (P3). SI - sem irrigação e sem fertilização; E66 - irrigação com EETE e adição de 343,2 kg ha⁻¹ ano⁻¹ de N via nitrato de amônio; A100 - irrigação com água de abastecimento e adição de 520,0 kg ha⁻¹ ano⁻¹ de N via nitrato de amônio. N = 9.

Figura 11 – Curvas de retenção da água no solo (conteúdo de água do solo, θ em função do potencial mátrico, ψ_m) ajustadas pelo modelo de van Genuchten e distribuição da porosidade do solo em função do potencial mátrico do solo, determinados pela derivação da equação de ajuste da curva de retenção em relação ao potencial mátrico para os tratamentos SI, A100 e E66 na profundidade de (a, d) 0,05-0,15 m (P1); (b, e) 0,25-0,35 m (P2) e (c, f) 0,70-0,80 m (P3). As linhas verticais tracejadas indicam os limites de macro (azul), meso (verde) e microporosidade (laranja) do solo. A linha cheia (cinza) indica o ponto do conteúdo de água disponível - θ_D (340 hPa) para fins de irrigação. Os pontos em preto representam a CRs média (adaptada de Fonseca, 2005) utilizada para manejo de irrigação da área estudada a partir da época de instalação do experimento em janeiro de 2003. SI - sem irrigação e sem fertilização; E66 - irrigação com EETE e adição de 343,2 kg ha⁻¹ ano⁻¹ de N via nitrato de amônio; A100 - irrigação com água de abastecimento e adição de 520,0 kg ha⁻¹ ano⁻¹ de N via nitrato de amônio. N = 9.

4.2.6 Distribuição do tamanho dos poros e porosidade do solo (ϵ)

Os resultados de distribuição do tamanho dos poros do solo mostraram que na profundidade P1 os tratamentos A100 e E66 apresentaram, respectivamente, maior proporção de poros com raio de 60 e 70 μm e o SI poros com raio de 200 μm . Nessa camada superior, tanto o efluente como a água provocaram a redução do tamanho dos poros do solo tornando-o menos susceptível a perdas bruscas de água. Por outro lado significa dizer que no intervalo de macroporosidade, o solo desses tratamentos sofre uma menor variação no conteúdo de água por unidade de potencial de água que o SI, ou seja, após uma chuva o SI tende a ser aerado mais rapidamente (Figura 11).

Na profundidade P2, ao contrário da P1, predomina a abundância de mesoporos com raios de 35 μm no tratamento SI e de macroporos de 70 e 100 μm nos tratamentos A100 e E66, respectivamente. Isso mostra que nessa profundidade a irrigação contribui para o aumento do tamanho dos poros em relação ao SI (Figura 11).

Na profundidade P3 a maior proporção é de macroporos com raio de 150, 60 e 80 μm no tratamento SI, A100 e E66, respectivamente (Figura 11).

Sort e Alcañiz (1999) verificaram aumento de microporos pequenos ($r < 25 \mu\text{m}$) após aplicação de lodo de esgoto e atribuíram isso as contribuições de matéria orgânica e partículas finas ($\emptyset < 20 \mu\text{m}$) do lodo. Ocorreu também aumento na proporção de microporos grandes ($r > 25 \mu\text{m}$) que pode ser associada ao fato do lodo contribuir para a formação de macroagregados (KLADIVKO; NELSON, 1979; PAGLIAI; GUIDI, 1981; CLAPP et al., 1986; apud SORT; ALCANIZ, 1999) de modo que aumente o número de poros desse tamanho (normalmente com $r > 50 \mu\text{m}$) dentro do agregado e também ao fato da incorporação de um material de densidade baixa, tal como o lodo provoca o surgimento de vazios, espaços irregulares medidos como microporos grandes. O aumento destes microporos possibilita a aeração e a drenagem da água da chuva ou irrigação (KLADIVKO; NELSON, 1979, apud SORT; ALCANIZ, 1999) e reduz o risco de erosão do solo (SORT; ALCANIZ, 1996; apud SORT; ALCANIZ, 1999).

Pode-se perceber que o efeito da irrigação com água ou efluente em relação ao SI é diferente em cada profundidade e contribui para redução ou aumento do tamanho de poros do solo, mas mantendo em maior proporção tamanho de poros na faixa de 60 a 100 μm (Figura 11).

Os resultados de porosidade que são apresentados na Tabela 9 e Figura 13 correspondem aos valores medidos (obtenção após a determinação do conteúdo de água do solo em cada tensão aplicada ao solo) e estimados através dos parâmetros da curva de retenção de água no solo.

Baseado apenas nos valores medidos, os resultados de porosidade mostram que os tratamentos E66 e A100 nas profundidades P1 e P2, não provocaram alterações na porosidade do solo. Na P3, o tratamento A100 apresentou mesoporosidade e porosidade total maiores que o SI e E66. Essa diferença deve estar relacionada a uma variabilidade local ocorrida em um dos blocos experimentais no qual foi verificado uma maior presença de raízes de capim (Figura 12) que favoreceram a formação de uma quantidade de mesoporos maior que no SI e E66.

Figura 12 – Amostra indeformada de solo (a) referente ao tratamento A100 na profundidade P3 utilizada em medidas de Ksat e ilustrando a presença de raízes (b).

Em termos gerais, os tratamentos apresentaram uma maior e menor porosidade na profundidade P1 e P2, respectivamente. Isso mostra uma correlação negativa com a argila dispersa em água e a densidade do solo. Como em profundidade o SI apresentou menor macroporosidade e porosidade total na P2, as reduções de porosidade ocorridas nesta camada, para os tratamentos A100 ou E66, estão relacionadas a uma característica do próprio solo.

Se considerar-se que um solo ideal possui uma porosidade total igual a 50% ($0,5 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$) sendo ocupada meio a meio pela água e ar (KIEHL, 1979), percebe-se que a porosidade total para os três tratamentos nas profundidades P1 e P3 está bem próxima (valores variando de 47,6 a 51,8%) desta que é considerada ideal.

Tabela 9 – Porosidade do solo medida e calculada através dos parâmetros da curva de retenção para os tratamentos SI, A100 e E66 nas profundidades de 0,05-0,15 m (P1); 0,25-0,35 m (P2) e 0,70-0,80 m (P3)

Tratamento	Macroporosidade ⁽²⁾		Mesoporosidade ⁽²⁾		Microporosidade ⁽²⁾		Criptoporosidade ⁽²⁾		Porosidade Total	
	Medida	Estimada	Medida	Estimada	Medida	Estimada	Medida	Estimada	Medida	Estimada
Profundidade de 0,05-0,15 m										
SI	0,0810 aA ⁽¹⁾	0,0787 ⁽⁴⁾	0,0819 aA	0,0819	0,1863 aA	0,1945	0,1527 aA	0,1444	0,5019 aA	0,4995
A100	0,0693 aA	0,0462	0,0907 aB	0,0953	0,2013 aA	0,2048	0,1276 aB	0,1248	0,4890 aA	0,4711
E66	0,0704 aA	0,0540	0,0871 aA	0,0911	0,1979 aA	0,1965	0,1382 aA	0,1363	0,4937 aA	0,4780
Profundidade de 0,25-0,35 m										
SI	0,0331 aC	0,0145	0,0493 aA	0,0411	0,1691 aAB	0,1884	0,1619 aA	0,1557	0,4133 aB	0,3998
A100	0,0414 aB	0,0411	0,0923 aB	0,0756	0,1620 aB	0,1709	0,1540 aA	0,1541	0,4498 aB	0,4417
E66	0,0421 aB	0,0505	0,0953 aA	0,0720	0,1498 aB	0,1679	0,1627 aB	0,1570	0,4499 aB	0,4474
Profundidade de 0,70-0,80 m										
SI	0,0572 aB	0,0626	0,0949 bA	0,0735	0,1616 aB	0,1725	0,1653 aA	0,1679	0,4791 bA	0,4765
A100	0,0583 aAB	0,0687	0,1650 aA	0,1334	0,1416 aC	0,1507	0,1526 aA	0,1595	0,5176 aA	0,5123
E66	0,0464 aB	0,0462	0,0912 bA	0,0778	0,1499 aB	0,1592	0,1888 aC	0,1864	0,4763 bAB	0,4695
Média	0,0555	0,0514	0,0942	0,0824	0,1688	0,1784	0,1560	0,1540	0,4745	0,4662
CV _{trat} (%) ³	30,86		57,02		13,07		29,76		6,59	
CV _{prof} (%) ³	35,71		29,30		10,43		13,42		6,54	

¹ Letras minúsculas iguais na coluna por profundidade e maiúsculas iguais na coluna entre profundidades na coluna não diferem (Tukey, $p < 0,05$). ² Classificação dos poros do solo em termos de raio do poro conforme Koorevaar; Menelik; Dirksen (1983) onde macroporosidade, mesoporosidade, microporosidade e criptoporosidade é a porosidade formada por poros com raio maior que 50 μm ; entre 50 e 15 μm ; menor que 15 e até 1 μm e; menor que 1 μm , respectivamente. ³ coeficientes de variação para os tratamentos e profundidades, respectivamente. ⁽⁴⁾ Valores calculados através dos parâmetros da curva de retenção de água no solo. SI - sem irrigação e sem fertilização; E66 - irrigação com ETE e adição de 343,2 kg ha⁻¹ ano⁻¹ de N via nitrato de amônio; A100 - irrigação com água de abastecimento e adição de 520,0 kg ha⁻¹ ano⁻¹ de N via nitrato de amônio. N = 9.

Figura 13 – Distribuição do volume de sólidos e das classes de poros medidas (primeira coluna da figura) e calculadas (segunda coluna da figura) a partir das curvas de retenção da água no solo para os tratamentos SI, A100 e E66 nas profundidades de 0,05-0,15 m (P1); 0,25-0,35 (P2) e 0,70-0,80 m (P3). SI - sem irrigação e sem fertilização; E66 - irrigação com EETE e adição de $343,2 \text{ kg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ de N via nitrato de amônio; A100 - irrigação com água de abastecimento e adição de $520,0 \text{ kg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ de N via nitrato de amônio. N = 9.

4.3 Produtividade de massa seca (MS) e acumulação de N (N-MS), K (K-MS) e Na (Na-MS).

Tendo-se em vista que nesse trabalho objetivamos, em parte, verificar se as produtividades de capim dos tratamentos A100 e E66 são afetadas pelas possíveis alterações químicas e físico-hídricas do solo ao longo de anos de irrigação com água e efluente, serão abordados com maior ênfase os três tratamentos de interesse (SI, A100 e E66) embora os outros sejam também apresentados.

O uso de irrigação com EETE ou água associado com o de altas doses de nitrogênio ao longo de mais de oito anos continuam proporcionando altos incrementos de massa seca de capim (Tabelas 10 e 11 e Figuras 15 e 16) e acumulação de N na parte aérea de capim Tifton 85.

Entre as estações, as produtividades de MS durante a estação seca (ES) representam aproximadamente 28% da MS-Anual e foram menores que na estação chuvosa (EC) devido ao período de estacionalidade de produção do capim Tifton 85 (Figura 14). Conforme Rassini (2004) nas pastagens irrigadas esse período está entre 65 e 70 dias durante o ano, onde, mesmo satisfazendo as necessidades hídricas da planta forrageira, não há produção de matéria seca. Quando se trata de pastagens tropicais em condições de sequeiro esse período pode ser de até 150 dias (ROLIM, 1994). Quanto a MS do período seco, Alvim et al. (1999) verificaram que ela equivale a 23% de uma MS-Anual de 23,1 Mg ha⁻¹ em Tifton 85 não irrigado e adubado com 600 kg ha⁻¹ ano⁻¹ de N.

Figura 14 – Estacionalidade de produção de capim Tifton 85 produzido em intervalos de corte de 60 dias com exceção do corte de setembro de 2011 que foi de 74 dias. As áreas tracejadas representam o período avaliado na estação chuvosa e na seca de 2012. A linha do tratamento SI é descontínua porque ele começou a ser avaliado em setembro de 2011 e houve uma colheita perdida em maio de 2012.

Tabela 10 – Efeitos da irrigação e de doses de nitrogênio via fertilizante mineral na produtividade Estacional de massa seca (MS-Estacional) e acumulação de N (N-MS), K (K-MS) e Na (Na-MS) na parte aérea de capim Tifton 85 nos anos de 2012 e 2003.

área de capim: 1000 m² nos anos de 2012 e 2003.								
	MS		N-MS		K-MS		Na-MS	
	2012	2003 ⁽¹⁾	2012	2003	2012	2003	2012	2003
Tratamento	Mg ha ⁻¹		kg ha ⁻¹					
Estação Chuvosa								
SI ³	9,12 ⁽²⁾	SD ⁽⁴⁾	110,2	SD	181,89	SD	1,86	SD
A0	9,01 cA	SD	112,83 cA	SD	188,38 dA	SD	6,46 dA	SD
E0	10,35 cA	12,629	152,51 bcA	125,91	232,97 cdA	177,91	6,99 dA	13,03
E33	17,76 bA	20,129	225,57 bA	217,69	404,85 bcA	294,51	28,51 cA	23,29
E66	26,94 aA	22,241	380,39 aA	269,24	613,18 aA	354,90	39,48 bA	33,81
E100	27,20 aA	25,541	400,38 aA	332,39	623,10 aA	363,38	43,95 abA	40,29
A100	25,18 aA	22,817	346,47 aA	237,28	541,37 abA	317,37	51,55 aA	33,16
Estação Seca								
SI	1,96	SD	26,82	SD	34,77	SD	0,58	SD
A0	4,36 bB	SD	61,81 bA	SD	87,99 aA	SD	2,71 aA	SD
E0	5,06 abB	7,221	76,96 bB	149,10	95,66 aB	160,38	2,37 aA	12,19
E33	7,52 abB	8,231	132,48 abB	161,22	171,04 aB	181,04	8,21 aB	13,63
E66	10,27 aB	10,189	207,36 aB	172,77	244,33 aB	193,99	7,24 aB	16,00
E100	8,51 abB	12,279	203,33 aB	204,40	215,16 aB	229,96	6,35 aB	17,54
A100	9,90 aB	10,093	221,80 aB	196,84	235,97 aB	209,00	10,15 aB	13,45
Média	13,5	15,137	210,15	206,7	304,50	248,2	17,83	21,6
CVtrat (%) ⁽⁵⁾	20,78	SD	26,53	SD	32,93	SD	17,77	SD
CVest (%) ⁽⁵⁾	16,11	SD	17,13	SD	24,55	SD	26,58	SD

¹ Adaptado de Fonseca (2005). ² Letras minúsculas iguais por estação na coluna e maiúsculas iguais entre estações na coluna não diferem (Tukey, $p < 0,05$). ³ Tratamento excluído da análise devido a perda de coleta bimestral. ⁴ Sem dados para estes tratamentos. ⁵ Coeficientes de variação para os tratamentos (trat) e estações (est), respectivamente. SI - sem irrigação e sem fertilização; A0 - irrigação com água de abastecimento sem fertilização nitrogenada; E0, E33, E66 e E100 - irrigação com EETE e adição de 0, 172,0; 343,2 e 520,0 kg ha⁻¹ ano⁻¹ de N via nitrato de amônio, respectivamente; A100 - irrigação com água de abastecimento e adição de 520,0 kg ha⁻¹ ano⁻¹ de N via nitrato de amônio.

Figura 15 – Produtividade de massa seca aérea Estacional (MS-Estacional) de capim Tifton 85 na estação seca (MS-ES) e chuvosa (MS-EC) em função da aplicação de nitrogênio em 2012 nas doses de: 0; 92,4; 184,8 e 280,0 kg ha⁻¹ na estação chuvosa (EC) e 0; 79,2; 158,4 e 240,0 kg ha⁻¹ na seca. O somatório destas representam as doses anuais de 0; 171,6; 343,2 e 520,0 kg ha⁻¹. *Significativo a $p < 0,012$. ^{1e2} MS na estação chuvosa e seca de 2003, adaptadas de Fonseca, (2005).

Dentro de cada estação o efeito dos tratamentos foi distinto (Tabela 10 e Figura 15). As produtividades de MS-ES foram iguais entre os tratamentos irrigados com efluente e diferentes entre os irrigados com água. Já entre o A100 e E66 elas foram iguais entre si e superiores a do A0 (tratamento irrigado com água e sem fertilização nitrogenada). As produtividades de MS-EC dos tratamentos irrigados com efluente ou com água foram dependentes do fornecimento de N.

Na estação seca os resultados demonstram que, apesar de pequenas, as diferenças foram determinadas pelo uso de nitrogênio e ressaltam a influência do período de estacionalidade na limitação de produtividade de pastagens mesmo em condições edáficas favoráveis. Cabe salientar que a MS-ES do E66 foi igual ou superior aos tratamentos irrigados com água e isso se deve ao uso de EETE associado a uma dose adequada de N.

Na estação chuvosa, considerando apenas os tratamentos irrigados com EETE, observou-se incremento quadrático de MS-EC em resposta ao aumento da dose de N (Figura 15), porém, matematicamente, a MS-EC máxima só será obtida na dose anual de aproximadamente 552 kg ha^{-1} não estando, portanto, compreendida no intervalo testado.

Nogueira et al. (2013) observaram que na estação seca e chuvosa de 2006 as produtividades de MS-Estacional foram, respectivamente, de 18 e $25 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ semestre}^{-1}$ para o E66 e de 15 e $26 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ semestre}^{-1}$ para o A100. Isso equivale a produtividades de 43 e $41 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ para o E66 e A100, respectivamente. No entanto é válido ressaltar que na estação seca desse ano as chuvas ocorridas somam em torno de 1000 mm ano^{-1} enquanto na de 2012 somam 700 mm ano^{-1} . Seria óbvio afirmar que isso não tem relação com uma produtividade inferior visto que se trata de sistema irrigado. Todavia na época seca a irrigação é mais frequente e faz com que a concentração de eletrólitos no solo, principalmente de sódio, aumentem e reduzam o potencial hídrico da solução do solo pela diminuição do potencial osmótico e, conseqüentemente a água fica retida com mais força e o capim passa a ter maiores gastos energéticos para absorção de água e nutrientes. Logo, a produção de massa seca tende a diminuir. Já no período chuvoso o sódio presente no solo pode ser lixiviado por processos naturais de drenagem como a chuva e ter seus efeitos minimizados, conforme mostrou Blum et al. (2012). Portanto, as pequenas alterações que ocorrem em decorrência da presença do sódio

neste tipo de solo do experimento e para regiões onde há um bom período chuvoso parecem ser minimizadas ou eliminadas temporariamente pelas chuvas.

Tabela 11 – Efeitos da irrigação e de doses de nitrogênio via fertilizante mineral na produtividade anual de massa seca (MS-Anual) MS e acumulação de N (NMS), K (KMS) e Na (NaMS) na parte aérea de capim Tifton 85 nos anos de 2012 e 2003

área de capim: 100 m² nos anos de 2012 e 2003								
	MS		N-MS		K-MS		Na-MS	
	2012	2003 ⁽¹⁾	2012	2003	2012	2003	2012	2003
Tratamento	Mg ha ⁻¹		kg ha ⁻¹					
	Anual							
SI ⁽³⁾	11,08	SD ⁽⁴⁾	137,02	SD	216,76	SD	2,44	SD
A0	13,37 c ⁽²⁾	SD	174,64 c	SD	276,37 b	SD	9,17 d	SD
E0	15,41 c	19,85	229,47 bc	275,01	328,63 b	338,29	9,36 d	25,22
E33	25,27 b	28,36	358,04 b	378,91	575,89 ab	475,55	36,71 c	36,92
E66	37,21 a	32,43	587,75 a	442,01	857,51 a	548,89	46,71 bc	49,81
E100	35,71 a	37,82	603,70 a	536,79	838,26 a	593,34	50,30 b	57,83
A100	35,08 a	32,91	568,27 a	434,12	777,34 a	526,37	61,69 a	46,61
Média	27,01	30,27	420,31	413,4	609,00	496,5	35,66	43,3
CV (%)	14,7	SD	18,76	SD	23,28	SD	12,56	SD

⁽¹⁾Adaptado de Fonseca, 2005. ⁽²⁾Letras minúsculas iguais na coluna não diferem (Tukey, $p < 0,05$).

⁽³⁾Tratamento excluído da análise devido a perda de coleta bimestral. ⁽⁴⁾Sem dados para estes tratamentos. SI - sem irrigação e sem fertilização; A0 - irrigação com água de abastecimento sem fertilização nitrogenada; E0, E33, E66 e E100 - irrigação com EETE e adição de 0, 172,0; 343,2 e 520,0 kg ha⁻¹ ano⁻¹ de N via nitrato de amônio, respectivamente; A100 - irrigação com água de abastecimento e adição de 520,0 kg ha⁻¹ ano⁻¹ de N via nitrato de amônio.

Figura 16 – Produtividade de massa seca aérea anual de capim Tifton 85 (MS-Anual) em função da aplicação de nitrogênio em 2011/2012 nas doses anuais de: 0; 171,6; 343,2 e 520,0 kg ha⁻¹. * Significativo a $p < 0,014$; ** significativo a $p < 0,01$; ¹MS em 2003 adaptada de Fonseca, (2005).

As produtividades de MS-Anual foram diferentes entre os tratamentos irrigados com EETE e entre os irrigados com água (Tabela 11 e figura 16). Houve maiores MS-Anual no E66, E100 e A100. Isso já era indicado em trabalhos anteriores (FONSECA et al., 2007; NOGUEIRA et al., 2013; SANTIN, 2012). Todavia essas previsões apontavam que o uso de irrigação com EETE e água ao longo dos anos provocaria uma

redução de produtividade mesmo em tratamentos como o E66, tido como agronomicamente mais eficiente em termos de uso de N.

Os altos rendimentos de MS-Anual parecem estar relacionados, principalmente, a fatores como irrigação e adubação nitrogenada. A interação desses aumenta a disponibilidade de nutrientes para o capim, uma vez que o solo mantido sob baixas tensões de água favorece a eficiência no uso do nitrogênio (MARCELINO et al., 2003) e de outros nutrientes que possam ter sua absorção ditada pela a do N.

Analizando os resultados de produtividade de capim obtidos por Fonseca et al. (2005) no primeiro e segundo ano do experimento (Tabela 11 e Figura 16) verificou-se que os tratamentos E66 e A100 continuam iguais ou superiores. Isso mostra que mesmo diante de algumas alterações nas propriedades físico-hídricas do solo, mostradas anteriormente, o capim Tifton 85 submetido a esses dois tratamentos e, especialmente ao E66, não passou a produzir menos. Já no E0 e E33 observou-se uma diminuição na MS-Anual de 2012 em relação a 2003.

De acordo com o modelo quadrático ao qual os dados de MS-Anual de 2012 foram ajustados, a dose máxima de N para se obter a maior produtividade é de, respectivamente, 461,4 kg ha⁻¹ de N para 35,9 Mg ha⁻¹ de MS. Para o ano de 2003 não se obteve uma dose máxima, visto que as respostas do Tifton 85 permaneceram lineares até a dose de 520 kg ha⁻¹ e concorda com Alvim et al. (1999) que também obtiveram incrementos lineares de MS até uma dose de 600 kg ha⁻¹ em sistema de cultivo não irrigado.

Avaliando as acumulações de N-MS, K-MS e Na-MS entre estações (Tabela 10), verificou-se que elas foram geralmente maiores na estação chuvosa por causa da tendência de produtividade de MS que também foi assim. As exceções são para K-MS no tratamento A0, Na-MS nos tratamentos A0 e E0 e N-MS no A0.

Dentro de cada estação as acumulações de N-MS, K-MS e Na-MS (Tabela 10) foram diferentes entre si, ocorrendo maiores acúmulos pelos tratamentos E66, E100 e A100. Na EC os valores de N-MS, K-MS e Na-MS variaram, respectivamente, de 112,83 a 400,38; 188,38 a 623,10 e 6,46 a 51,55 kg ha⁻¹. Na ES variam de 61,81 a 221,80; 87,99 a 244,33 e 2,71 a 10,15 kg ha⁻¹. Quanto a N-MS, esses resultados diferem dos de Nogueira et al. (2013) que verificaram maiores acumulações de nitrogênio no E66 e E100 na ES e EC de 2005 e 2006. Isso se deve provavelmente a maior quantidade de N adicionado via irrigação com efluente.

As acumulações anuais de N-MS, K-MS e Na-MS (Tabela 11) foram distintas entre tratamentos e maiores no E66, E100 e A100 corroborando os resultados de K-MS e Na-MS obtidos por Fonseca (2005) e sendo contrários aos de N-MS onde o E100 foi superior ao E66 e A100.

Comparando as acumulações de 2012 e 2003 (Tabela 11) verificou-se que as de N-MS e K-MS aumentaram em média 1,7 e 22,7%, respectivamente, enquanto a de Na-MS, para a maioria dos tratamentos, diminuiu ao longo dos anos e representa em média 82,4% das de 2003. Levando-se em conta que as produtividades de MS e a acumulação de N-MS não reduziram, é provável que as plantas de capim em 2012 estejam em consumo de luxo de K (MARSCHNER, 1995), situação essa não confirmada em 2003 por Fonseca (2005). Esse tipo de consumo é comum em plantas irrigadas com EETE e tem sido observado em outros experimentos (FONSECA, 2001; ADEKALU; OKUNADE, 2002; MOHAMMAD; AYAD, 2004).

O tratamento SI foi apresentado nas tabelas 10 e 11, porém não passou por análise estatística como os demais devido à perda de colheita do bimestre de maio de 2012. No entanto, verifica-se que a produtividade de MS por bimestre foi similar a do tratamento A0 e E0 sendo um pouco inferior nos bimestres que constituem a estação seca. O fato das produtividades destes três tratamentos serem semelhantes e os dois irrigados serem adubados com fósforo e potássio (adubação básica) indicam a necessidade de fertilização nitrogenada mineral, mesmo para o tratamento irrigado com efluente.

5 CONCLUSÕES

As produtividades de MS e acumulação de N-MS, K-MS foram superiores nos tratamentos E66, E100 e A100 e não foram reduzidas ao longo destes anos. A Na-MS foi proporcional à produtividade, mas o capim passou a acumular um pouco menos sódio em todos os tratamentos, com exceção do A100. Na estação chuvosa a MS de capim representou cerca de 72% da MS-Anual, sendo fortemente influenciada pelo período de estacionalidade.

O uso de irrigação com efluente rico em sódio para o cultivo de capim Tifton 85 por mais de oito anos num Argissolo Vermelho Distrófico latossólico fertilizado com uma dose de $343 \text{ kg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ de N, causou pequenas alterações nas propriedades químicas e físico-hídricas do solo. Entretanto os teores de sódio não foram alterados a ponto de causar dispersão de argila que ocasionasse reduções da porosidade do solo, aumento da densidade e diminuição da condutividade hidráulica do solo.

As produtividades do capim ao longo dos anos, mesmo diante das pequenas alterações do solo e redução na acumulação sódio, continuam elevadas e a qualidade da forragem não foi afetada, tendo em vista que as concentrações de nitrogênio no tecido vegetal se matem iguais ou superiores as do início do cultivo, contrariando que o sistema solo-pastagem não poderia suportar em longo prazo o elevado aporte de sódio proveniente do EETE.

As avaliações contínuas de produtividade do capim Tifton 85 se mostram como um bom indicador da situação do solo, visto que refletirá os possíveis problemas que venham a ocorrer no solo devido o uso de efluente de estação de tratamento de esgoto.

A irrigação com efluente nas condições adotadas no presente estudo é mais indicada para manter a produção, preservando a qualidade do solo, que a irrigação com água sódica do município de Lins.

REFERÊNCIAS

- ADEKALU, K.O.; OKUNADE, D.A. Effects of pond water and sewage effluent treatments on yield and nutrient uptake of maize (*Zea mays* L.). **Tropical Agriculture**, London, v.79, p.120-124, 2002.
- AHMAD, S.; GHAFOR, A.; QADIR, M; AZIZ, M. A. Amelioration of a calcareous salinesodic soil by gypsum application and different crop rotations. **International Journal of Agriculture & Biology**, Faisalabad, v. 8, p. 142-146, 2006.
- 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."
- ALVIM, M. J.; XAVIER, D. F.; VERNEQUE, R. S.; BOTREL, M. A. Resposta do Tifton 85 a doses de nitrogênio e intervalos de cortes. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.34, p.2345-2352, 1999.
- ANA – Agência Nacional das Águas. **Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil: informe 2012**. Ed. Especial. Brasília, 2012. 215p. Disponível em: <http://arquivos.ana.gov.br/impressao/arquivos/Conjuntura2012.pdf>. Acesso em: 23 fev. 2013.
- ANGELAKIS, A.N.; MARECOS DO MONTE, M.H.F.; BONToux, L.; ASANO, T. The status of wastewater reuse practice in the mediterranean basin: need for guidelines. **Water Research**, Oxford, v.33, p.2201-2217, 1999.
- ASANO, T.; PETTYGROVE, G.S. Using reclaimed municipal wastewater for irrigation. **California Agriculture**, Berkeley, v. 41, n. 3/4, p. 15-18, 1987.
- ASSOULINE, S. A model of soil relative hydraulic conductivity based on water retention curve characteristics. **Water Resources Research**, Washington, v. 37, p. 265–271, 2001.
- ASSOULINE, S.; TESSIER, D.; BRUAND, A. A conceptual model of the soil water retention curve. **Water Resources Research**, Washington, v. 34, p. 223–231, 1998.
- BALL, B.C.; HUNTER, R. **The determination of water release characteristics of soil cores at low suctions**. Geoderma, 43:195-212, 1988.
- BETTIOL, W.; CAMARGO, O.A. A disposição de lodo de esgoto em solo agrícola. In: BETTIOL, W.; CAMARGO, O.A. (Ed). **Impacto Ambiental do Uso Agrícola do Lodo de Esgoto**. Jaguariúna, SP : EMBRAPA Meio Ambiente, 2006. p.25-44.
- BLAKE, G.R.; HARTGE, K.H. 1986. "Bulk density". In: Klute, A. (ed). **Methods of soil analysis**, part 1: Physical and mineralogical methods. Madison, Wisconsin (USA), American Society of Agronomy & Soil Science Society of America; Agronomy Series Number 9, cap. 13: 363 – 376.

BLUM, J.; HERPIN, U.; MELFI, A.J.; MONTES, C.R. Soil properties in a sugarcane plantation after the application of treated sewage effluent and phosphogypsum in Brazil. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v.115, 203– 216. 2012.

BOUWER, H.; CHANEY, R.L. Land treatment of wastewater. **Advances in Agronomy**, New York, v. 26, p. 133-176, 1974.

BRESLER, E., MCNEAL, B.L.; CARTER, D.L. Saline and Sodic Soils: Principles-Dynamics-Modeling. **Springer-Verlag**, Berlin. 236p. 1982.

BROOKS, R.H.; COREY, A.T. Hydraulic properties of porous media. **Hydrology Papers** 3, 27 pp. Colorado State University, Fort Collins. 1964.

CLAPP, C.E.; STARK, S.A.; CLAY, D.E.; LARSON, W.E. Sewage sludge organic matter and soil properties. In: CHEN, Y.; AVNIMELECH, Y. (Eds.), **The Role of Organic Matter in Modern Agriculture**. Martinus Nijhoff, Dordrecht, 1986. p. 209-253.

CAMARGO, O.A.; MONIZ, A.C.; JORGE, J.A.; VALADARES, J.M.A.S. **Métodos de Análise Química, Mineralógica e Física de Solos do Instituto Agronômico de Campinas**. Campinas, Instituto Agronômico, 2009. 77 p. (Boletim técnico, 106, Edição revista e atualizada).

CAMARGO, O.A.; MONIZ, A.C.; JORGE, J.A.; VALADARES, J.M.A.S. **Métodos de análise química, mineralógica e física de solos do Instituto Agronômico de Campinas**. Campinas: Instituto Agronômico, 1986. 94p. (Boletim Técnico, 106).

CARTER, M.R. Organic Matter and Sustainability. In: **Sustainable management of soil organic matter**. Eds. R.M. Rees, B.C. Ball, C.D. Campbell and C.A. Watson. New York. 2000. p. 21-43. 430p.

CEPAGRI - Centro de Pesquisas Meteorológicas e Climáticas Aplicadas à Agricultura. **Clima dos Municípios Paulistas**. Disponível em: http://www.cpa.unicamp.br/outras-informacoes/clima_muni_308.html.> Acesso em: 6 dez. 2012.

CHARETTE, M.A.; SMITH, W.H.F. The Volume of Earth's Ocean. **Oceanography**, Rockville, v.23 n.2. 2010. p 112-114.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE - CONAMA. Resolução no 357 de 17 de março de 2005. Classifica as águas doces, salobras e salinas. **Diário Oficial da União**, Brasília, 18 mar. 2005.

CONSELHO NACIONAL DE RECURSOS HÍDRICOS - CNRH. Resolução no 54, de 28 de novembro de 2005. Estabelece modalidades, diretrizes e critérios gerais para a prática de reúso direto não potável de água, e dá outras providências. **Diário Oficial da União**, Brasília, 09 de março de 2006.

COPPOLA, A.; SANTINI, A.; BOTTI, P.; VACCA, S.; COMEGNA, V. SEVERINO, G. Methodological approach for evaluating the response of soil hydrological behaviour to irrigation with treated municipal wastewater. **Journal of Hydrology**, New Zealand, v. 292, 114–134. 2004.

DORAN, J.W.; SAFLEY, M. Defining and assessing soil health and sustainable productivity. In: **Biological Indicators of Soil Health**. Eds. Pankhurst, C.E., Doube, B.M. and Gupta, V.V.S.R. (eds). CAB International, Wallingford, UK, 1997. pp. 1–28.

DURGIN, P.B.; CHANEY, J.G. Dispersion of kaolinite by dissolved organic matter from Douglas-fir roots. **Canadian Journal of Soil Science**, Ottawa v.64, 445–455. 1984.

EMBRAPA. Centro Nacional e Pesquisa em Solos. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. Brasília: Embrapa-SPI; Rio de Janeiro: Embrapa-Solos, 2006.306 p.

FAO. **Making every drop count: FAO heads UN water initiative**. 14 Feb. 2007, Rome. Disponível em:<<http://www.fao.org/newsroom/en/news/2007/1000494/index.html>>. Acesso em: 20 ago. 2011.

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

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, Piracicaba, 2001.

FONSECA, A. F. **Viabilidade agrônomo-ambiental da disposição de efluente de esgoto tratado em um sistema solo-pastagem**. 2005. 174p. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba, 2005.

FONSECA, A.F., MELFI, A.J., MONTES, C.R. Maize growth and changes in soil fertility after irrigation with treated sewage effluent. II. Soil acidity, exchangeable cations, and sulfur, boron and heavy metals availability. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v.36, p.1983-2003. 2005.

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

FOTOVAT, A.; NAIDU, R.; OADES, J.M. Influence of extraction method on soil solution composition with reference to the chemistry of trace metals in acidic and sodic soils. In: Soil science – raising the profile. **Australian and New Zealand Societies of Soil Science**, Melbourne, v.2, p.83-84. 1996.

FRENKEL, H.; FEY, M.V.; LEVY, G.J. Organic and inorganic anion effects on reference and soil clay critical flocculation concentration. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v56, 1762–1766. 1992.

GARCIA, R.A; CRUSCIOL, C.A.C; CALONEGO, J.C; ROSOLEM, C.A. Potassium cycling in a corn-brachiaria cropping system. **European Journal of Agronomy**, Elsevier, n.28 p. 579–585. 2008.

GLOAGUEN, R.A.B.G. **Efeito da irrigação com efluente de esgoto tratado nas propriedades físico-hídricas de um latossolo**. 2006. 120 p. Tese (Doutorado em Irrigação e Drenagem) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2005.

GONÇALVES, R.A.B.; FOLEGATTI, M. V.; GLOAGUEN, T. V.; LIBARDI, P. L.; MONTES, C. R.; LUCAS, Y. Método alternativo para determinar a condutividade hidráulica em solo irrigado com águas residuárias. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 9, p. 1-5, 2005.

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

GREENWAY, H; MUUNS, R. Mechanisms of salt tolerance in nonhalophytes. **Ann. Rev. Plant. Physiol.** Califórnia. v.31, p.149-190. 1980

GU, B.; DONER, H.E. Dispersion and aggregation of soils as influenced by organic and inorganic polymers. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.57, 709–716. 1993.

HAYES, A.R.; MANCINO, C.F.; PEPPER, I.L. Irrigation of turfgrass with secondary sewage effluent. I. Soil and leachate water quality. **Agronomy Journal**, Madison, v.82, p.939-943, 1990.

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**, Collingwood Victoria, v.39, 1259–1267. 2001.

HARGROVE, W.L; OHKI, K; WILSON, D.O. Influence of washing on elemental analysis of leaves. **Plant and Soil**, Dordrecht, v.88, p. 88-100. 1985.

IBGE. **Sinopse do censo demográfico 2010: população residente, total, urbana total e urbana na sede municipal, em números absolutos e relativos, com indicação da área total e densidade demográfica, segundo as Unidades da Federação e os municípios – 2010**, São Paulo. Disponível em:<http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/populacao/censo2010/tabelas_pdf/Sao_paulo.pdf> Acesso em: 17 fev. 2013.

IBRAHIM, L. **Caracterização física, química, mineralógica e morfológica de uma sequência 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.

INSTITUTO SOCIOAMBIENTAL. **Almanaque Brasil socioambiental 2008**. São Paulo, SP: Instituto Socioambiental, 2008.

JARVIS, N.J.; MESSING, I. Near-saturated hydraulic conductivity in soils of contrasting texture measured by tension infiltrometers. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.59, p.27-34, 1995.

JORDÃO, E.P.; PÊSSOA, C. A. **Tratamento de esgoto doméstico**. 6ª Ed. Rio de Janeiro: ABES, 2011. 969p.

KIEHL, E.J. **Manual de edafologia: Relações solo-planta**. São Paulo: Ceres, 1979. 262 p.

KLADIVKO, E.J.; NELSON, D.W. Changes in soil properties from application of anaerobic sludge. **Journal Water Pollution Control Federation**, Washington, v.51, 325-332. 1979

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

KLUTE, A. Water retention: Laboratory methods. In: KLUTE, A. ed. **Methods of soil analysis: Physical and mineralogical methods**. 2.ed. Madison, American Society of Agronomy; Soil Science Society of America, 1986. p.635-660.

KOOREVAAR, P; MENELIK, G; DIRKSEN, C. **Elements of soil physics**. Development of soil science, Amsterdam, Elsevier, 13, 1983. p. 1-7.

KORNDÖRFER, G. H. Elementos benéficos. In: FERNANDES, M. S. **Nutrição mineral de plantas**. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2006. p. 355-374.

LABANAUSKAS, C.K 1968. Washing citrus leaves for leaf analysis. **California Agriculture**, Riverside, v.22, n.1 p. 12-13.1968

LEVY, G.J; ASSOULINE, S. Physical aspects. Physical aspects. In: LEVY, G.; FINE, P.; BARTAL, A. (Ed.). **Treated wastewater in agriculture: use and impacts on the soil environments and crops**. Wiley-Blackwell, Oxford, 2011. chap. 9, p. 306-327.

LEVY, G.J.; GOLDSTEIN, D.; MAMEDOV, A.I Saturated hydraulic conductivity of semi arid soils: Combined effects of salinity, sodicity and rate of wetting. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.69,653–662. 2005.

LIBARDI, P.L. **Dinâmica da água no solo**. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 2005. 335 p.

LIMA, L.A.; GRISMER, M.E.; NIELSEN, D.R. Salinity effects on Yolo loam hydraulic properties. **Soil Science**, Philadelphia , v.150, 451–458. 1990.

MAAS, E.V.; HOFFMAN, G.J. Crop salt tolerance assessment. **Journal of the Irrigation and Drainage Division**, ASCE, New York, v.103, n.IR2, p.115-134, 1977

MAAS, E.V. **Salt tolerance of plants**. In B.R. Christie (ed.) Handbook of plant science in agriculture. CRC Press, Boca Raton, Florida. 1984.

MAAS, E. V. Crop tolerance to saline sprinkling water. **Plant and Soil**, Dordrecht, v.89, p.273-284, 1985.

MACE, J.E; AMRHEIN, C. Leaching and reclamation of a soil irrigated with moderate SAR waters. **Soil Science Society of America Journal**, Madison 65, 199–204. 2001.

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

MALIK, M., MUSTAFA, M.A.; LETEY, J. Effect of mixed Na/Ca solutions on swelling, dispersion and transient water flow in unsaturated montmorillonitic soils. **Geoderma**, Amsterdam, v.52, 17–28. 1992

MALLANTS, D.; MOHANTY, B.P.; JACQUES, D. FEYEN, J. Spatial variability of hydraulic properties in a multilayered soil profile. **Soil Science.**, Philadelphia, v.161:167-181, 1996.

MARCELINO, K.R.A.; VILELA, L.; LEITE, G.G.; GUERRA, A.F.; DIOGO, J.M.S. Manejo da adubação nitrogenada de tensões hídricas sobre a produção de matéria seca e índice de área foliar de Tifton 85 cultivado no Cerrado. **Revista Brasileira de Zootecnia**, Viçosa, v.32, p.268-275, 2003.

MARSCHNER, H. **Mineral nutrition of higher plants**. San Diego: Academic Press, 1995. p. 889.

METZGER, L.; YARON, B.; MINGELGRIN, U. Soil hydraulic conductivity as affected by physical and chemical-properties of effluents. **Agronomie**, Paris, v. 3, p. 771–777, 1983.

MOHAMMAD, M.J.; AYADI, M. Forage yield and nutrient uptake as influenced bysecondary treated wastewater. **Journal of Plant Nutrition**, New York, v.27, p.351-364, 2004

MORAES, J.A.P.; ARENS, K. Eliminação de potássio pelas folhas em dependência da luz e obscuridade (Nota preliminar). **Ciência Cultural**, 21:728-730, 1969.

MUALEM, Y. Hydraulic conductivity of unsaturated soils: predictions and formulas. In: KLUTE, A. (Ed.). **Methods of Soil Analysis**. Part 1. Physical and mineralogical methods. 2nd. Soil Science Society of America/American Society of Agronomy, Madison, 1986. p.797-823.

NELSON, D.W.; SOMMERS, L.E. Total carbon, organic carbon and organic matter. In: SPARKS, D.L.; PAGA, A.L.; HELMKE, P.A.; LOEPPERT, R.H.; SOLTANPOUR, P.N.; TABATABAI, M.A.; JOHNSTON, C.T. & SUMMER, M.E., eds. **Methods of soil analysis: Chemical methods. Part. 3**. Soil Science Society of America, Madison 1996. p.961-1010.

NOGUEIRA, S.F. **Efeitos da irrigação com esgoto tratado e fertilização nitrogenada na ciclagem de carbono e nitrogênio e no metabolismo microbiano de um solo cultivado com capim-Bermuda Tifton 85**. 2008. 138p. Tese (Doutorado em Química na Agricultura e no Ambiente) – Centro de Energia Nuclear na Agricultura, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2008.

NOGUEIRA, S.F.; Pereira, B.F.F.; Gomes, T.M.; Paula, A.M.; Santos, J.A.; Montes, C.R. Treated sewage effluent: Agronomical and economical aspects on bermudagrass production, **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v.116, 51–159. 2013.

ORON, G. Soil as complementary treatment component for simultaneous wastewater disposal and reuse. **Water Science & Technology**, Oxford, v. 34, p.243-252, 1996.

PAGLIAI, M., GUIDI, G. Porosity and pore size distribution in a field test following sludge and compost application. In: HERMITE, P.L., OTT, H. (Eds.), **Proceedings of the Second European Symposium**, Vienna, 1981. p. 21-28.

PESCOD, M.B. **Wastewater treatment and reuse in agriculture**. Rome: FAO, 1992. 125 p. (Irrigation and Drainage Paper, 47).

QUIRK, J.P.; SCHOFIELD, R.K. The effect of electrolyte concentration on soil permeability. **European Journal of Soil Science**. Oxford, v.6, 163–178. 1955.

RAMIREZ-FUENTES, E.; LUCHO-CONSTANTINO, C; ESCAMILLA-SILVA, E.; DENDOOVEN, L. Characteristics, and carbon and nitrogen dynamics in soil irrigated with wastewater for different lengths of time. **Bioresource Technology**, New York, v.85, 179-187, 2002.

RASSINI, J. B. Período de estacionalidade de produção de pastagens irrigadas. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.39, n. 8, p. 821-825, 2004.

REYNOLDS, W.D.; ELRICK, D.E. Falling head soil core (Tank) method. In: DANE, J.H.; TOPP, C. (Ed.). **Methods of soil analysis**. 3rd. ed. Madison: Soil Science Society of America, 2002. p. 809-812.

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

RICHARDS, L. A. Physical conditions of water in soil. In: C. A. BLACK, D. D. EVANS, J. L. WHITE, L. E. ENSMINGER and F. E. CLARK, ed. **Methods of soil analysis - Physical and mineralogical properties, including statistics of measurements and sampling**. Madison, ASASSA, 1965. p.128-152.

RODRIGUES, R.S. **As dimensões legais e institucionais do reuso de água no Brasil: Proposta de regulamentação do reuso no Brasil**. 2005. 177 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Hidráulica e Sanitária). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo 2005.

ROLIM, F.A. Estacionalidade de produção de forrageiras. In: PEIXOTO, A.M.; MOURA, J.C.; FARIA, V.P. (Ed.). **Pastagens: fundamentos da exploração racional**. Piracicaba: Fealq, 1994. p.533-566.

RUIZ, P.M.E; UTSET, S.A. Uso del modelo swacrop en la estimación de las necesidades hídricas de la papa (*Solanum tuberosum* L.), determinación de las propiedades hidráulicas del suelos. **Revista Ciências Técnicas Agropecuárias**, Cuba. v.8, p 61-65, 1999.

RUSSO, D. Physical aspects of soil salinity. In: HILLEL, D. (Ed). **Encyclopedia of Soils in the Environment**. Oxford: Elsevier Ltd., 2005. Vol. 3, p. 442-453.

SANTIN, R.C. **Emissão de gases de efeito estufa em solo cultivado com pastagem (Tifton 85) e irrigado com efluente de esgoto tratado**. 2012. 82 p. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2012.

SANTOS, A.P.R. dos. **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. 79 p. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2004.

SANTOS, E.E.; RIBEIRO, M.R. Influência da irrigação e do cultivo nas propriedades de um latossolo e um argissolo da região do submédio São Francisco: Atributos morfológicos e físicos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.24, p.875-84, 2000.

SHAINBERG, I.; LETEY, J. Response of soils to sodic and saline conditions. **Hilgardia**, Berkeley, v. 52, p. 1-57, 1984.

SHIKLOMANOV, I.A. **World Water Resources and their use beginning of the 21st century Prepared in the Framework of IHP UNESCO**. State Hydrological Institute, St. Petersburg. 1999. Disponível em: <http://webworld.unesco.org/water/ihp/db/shiklomanov/>. Acesso em: 23 ago. 2011.

SILVA, C.L.; KATO, E. Efeito do selamento superficial na condutividade hidráulica saturada da superfície de um solo sob cerrado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.32, n.2, p.213-220, 1997.

SINGH, K.A. Effect of nitrogen levels on yield, root biomass distribution, nitrogen recovery by forage grasses and changes in soil properties of acid Inceptisol. **Indian Journal of Agricultural Sciences**. Cambridge, v.69, p.551-554, 1999.

SORT, X.; ALCANIZ, J.M. Modification of soil porosity after application of sewage sludge. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 49, 337-345, 1999.

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

TARCHITZKY, J.; CHEN, Y.; BANIN, A. Humic substances and pH effects on sodium and calcium montmorillonite flocculation and dispersion. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, 52, 1449–1452. 1993.

TARCHITZKY, J.; GOLOBATI, Y.; KEREN, R.; CHEN, Y. Wastewater effects on montmorillonite suspensions and hydraulic properties of sandy soil. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, 63, 554–560. 1999.

UHLAND, R.E. Physical properties of soils as modified by crops and management. **Soil Science Society of America Proceedings**, Madison, v.14, p.361-366, 1949.

VAN GENUCHTEN, M.T. **A closed-form equation for predicting the conductivity of unsaturated soils.** Soil Science Society of American Journal, Madison, v.44, p.892-898, 1980.

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

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

VELOSO, M.E.C. **Efeito de diferentes qualidades de água sobre algumas propriedades físico-químicas de um Brunizem Avermelhado.** 1991. 52 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 1991.

WARRICK, A.W.; NIELSEN, D.R. Spatial variability of soil physical properties in the field. In: HILLEL, D. **Applications of soil physics.** New York, Academic Press, 1980. p.319-344.

WERNER, J. C.; PAULINO, V. T.; CANTARELLA, H.; ANDRADE, N. O.; QUAGGIO, J. A. Forrageiras. In: RAIJ, B. van; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J.

WHO. **Guidelines for the safe use of wastewater, excreta and greywater: Wastewater use in agriculture.** Geneva, 2006. Disponível em: http://whqlibdoc.who.int/publications/2006/9241546824_eng.pdf. Acesso em: 5 fev. 2013.