

IVAN CARLOS CARREIRO ALMEIDA

**ATRIBUTOS FÍSICOS DO SOLO EM RESPOSTA À ADIÇÃO DE EFLUENTE
TRATADO DE INDÚSTRIA DE CELULOSE**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Solos e Nutrição de Plantas, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

VIÇOSA
MINAS GERAIS - BRASIL
2008

IVAN CARLOS CARREIRO ALMEIDA

**ATRIBUTOS FÍSICOS DO SOLO EM RESPOSTA À ADIÇÃO DE EFLUENTE
TRATADO DE INDÚSTRIA DE CELULOSE**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Solos e Nutrição de Plantas, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

APROVADA: 24 de julho de 2008

Prof. Hugo Alberto Ruiz
(Co-orientador)

Prof. Júlio César Lima Neves
(Co-orientador)

Prof. Genelício Crusoé Rocha

Dr. Gualter Guenther Costa da Silva

Prof. Raphael Bragança Alves Fernandes
(Orientador)

Aos meus queridos pais, Carlos Lacerda de Almeida e Jacira Caminote Carreiro Almeida, e ao meu querido irmão Alan Carreiro Almeida, pelo amor e exemplo de vida.

Aos amigos, que são minha família em Viçosa, presentes em todos os momentos.

Dedico.

Happy the man who finds
wisdom, the man who gains
understanding!
Provérbio 3, 13

AGRADECIMENTOS

A Deus, por sempre iluminar os meus caminhos.

A CAPES pela concessão de bolsa durante o período de mestrado.

À Universidade Federal de Viçosa, por todas as oportunidades e ensinamentos transmitidos e ao Departamento de Solos.

Ao professor Raphael Bragança A. Fernandes, exemplo de profissional, pela amizade, orientação e ensinamentos que contribuíram para minha formação pessoal e profissional.

Aos professores Hugo A. Ruiz e Júlio César L. Neves pela co-orientação, amizade, oportunidade e idéias sempre construtivas para o engrandecimento deste trabalho.

A todos os professores do DPS que contribuíram para minha formação e por despertar-me o desejo de aprender e a admiração pela Ciência do Solo. Em especial aos professores Carlos Schaefer, João Ker, Maurício Fontes, Nairam Barros, Jaime Mello, Roberto Novais e Victor Hugo Alvarez.

À Celulose Nipo-Brasileira (CENIBRA S.A), pela disponibilização de sua área experimental, sem a qual não seria possível a realização deste trabalho. Em especial ao Doutor Gualter Silva e ao técnico Gilson, pela assistência prestada na empresa.

Aos funcionários do DPS, Luciana e aos laboratoristas Cláudio, Benedito, Fábio, Bráz e Carlos Fonseca pela valiosa colaboração e amizade.

Ao Breno Serafim e a Ivanilda Aguiar pela amizade e imensa colaboração na realização deste trabalho.

Aos estagiários, Túlio e Eduardo pelo grandioso auxílio e amizade.

Aos amigos e companheiros da Pós Graduação: Alexandre, Amanda, Bruno, Dalton, David, Diogo, Fabrício, Fernanda, Flancer, Gislane, Guilherme, Helton, Henrique, Hugo, Igor, Ítalo, Jocimar, Joaquin, Kleberson, Leonardus, Márcio, Marcos, Maurel, Pacheco, Rogério, Sandro, Thiago, e aos demais colegas, não citados, meu muito obrigado, por tornar essa jornada mais alegre e prazerosa.

Aos meus avôs Januário (*in memorian*) e Dina por despertar-me a paixão pelas Ciências Agrárias e aos demais familiares pelo amor e carinho.

Aos meus amigos de república, aos longos desses anos em Viçosa, pela amizade e convívio. E aos amigos, espalhados pelo mundo, pela força e torcida para a realização dessa etapa de vida.

E a quem mais, de alguma forma, contribuiu para realização deste trabalho.

Muito obrigado!

BIOGRAFIA

IVAN CARLOS CARREIRO ALMEIDA, filho de Carlos Lacerda de Almeida e Jacira Caminote Carreiro Almeida, nascido em 12 de abril de 1983, na cidade de Governador Valadares, Minas Gerais. Iniciou o curso de Agronomia na Universidade Federal de Viçosa (UFV) em 2001. Em 2005 foi *trainee* nos Estados Unidos. Ao longo do curso de graduação foi três vezes bolsista de Iniciação Científica do PIBIC/CNPQ e uma vez bolsista da FURNABE. Graduou-se em outubro de 2006 e, neste mesmo ano, ingressou no curso de Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas da UFV, submetendo-se a defesa em julho de 2008.

ÍNDICE

	Página
RESUMO	vii
ABSTRACT	x
INTRODUÇÃO GERAL	1
CAPÍTULO 1 - Qualidade física e química de um neossolo em resposta à aplicação por seis anos de efluente tratado de uma indústria de celulose	4
CAPÍTULO 2 - Qualidade física e química do solo e de percolados após adição de efluentes de uma indústria de celulose	27
CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	65
APÊNDICE	66

RESUMO

ALMEIDA, Ivan Carlos Carreiro, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, julho de 2008.
Atributos físicos do solo em resposta á adição de efluente tratado de indústria de celulose. Orientador: Raphael Bragança Alves Fernandes. Co-orientadores: Hugo Alberto Ruiz e Júlio César Lima Neves.

A disposição no solo de efluente de indústria de celulose pode ser opção atrativa para a destinação final destas águas residuárias, pois além de ser um processo adicional aos sistemas de tratamento existentes, apresenta potencial como fonte suplementar de água e nutrientes para as plantas. Neste contexto, este trabalho teve como objetivo avaliar o efeito da aplicação de efluentes de indústria de celulose sobre alguns atributos físicos do solo. Três experimentos foram conduzidos: um em campo (experimento I) e dois em laboratório (experimentos II e III). No experimento I foi estudado um experimento instalado em área experimental de uma empresa do setor florestal, conduzido sobre um Neossolo Flúvico, em que durante seis anos têm sido aplicado quatro tratamentos com a cultura do eucalipto: irrigado; não irrigado; com fertirrigação e com a aplicação de efluentes da fábrica de celulose. Uma área de mata próxima foi usada como referência. No solo de todos os tratamentos foram avaliados: resistência à penetração, condutividade hidráulica (k_0) em campo e em laboratório, análise química de rotina, textura, diâmetro médio geométrico (DMG) e ponderado (DMP) dos agregados, argila dispersa em água (ADA), índice de dispersão de argila (ID), densidade do solo (D_s), porosidade total (PT), microporosidade (M_i) e macroporosidade (M_a), carbono orgânico total (COT), intervalo hídrico ótimo (IHO) e a relação de adsorção de sódio (RAS) no extrato da pasta saturada (EPS). Os resultados obtidos indicaram incremento da D_s com o cultivo do

eucalipto, com conseqüente redução da PT e K_0 (laboratório). O efluente aplicado promoveu a redução do DMG e DMP dos agregados e aumento do ID, o que pode ser associado aos incrementos nos teores de Na, com conseqüente aumento da RAS verificados no solo e no EPS deste tratamento. No experimento II (laboratório), um ensaio utilizando colunas de PVC preenchidas com solos foi montado, com três repetições, buscando-se avaliar o efeito da aplicação superficial de efluente tratado de indústria de celulose durante cinco semanas sobre as características físicas do solo e sobre o percolado recolhido na base das colunas. Três solos predominantes na região da empresa florestal foram utilizados no preenchimento das colunas: Neossolo Flúvico (RY), Cambissolo Háplico (CX) e Latossolo Amarelo (LA). As colunas foram submetidas à aplicação de quatro tratamentos (efluente; efluente+água; água; água+água), formados pela adição semanal de volumes líquidos totais equivalentes a um volume de poros de cada classe de solo. Ao final do experimento as colunas foram desmontadas e seccionadas, sendo divididas em três partes (superior, média e inferior), cujos conteúdos de solo foram analisados separadamente para a avaliação da textura, características químicas de rotina e ADA. No EPS obtido com essas amostras foram determinados os teores de Ca, Mg, Na e K, pH, condutividade elétrica (CE) e calculado a RAS. Nos percolados coletados após cada aplicação foram determinados os teores de Ca, Mg, Na, K, P, Cd, Cr, Pb, Ni, Zn, Mn, Al, além do pH e CE. Os resultados obtidos indicaram que a adição do efluente aumentou o teor de Na no percolado, no EPS e no complexo sortivo do solo. O efluente aplicado também proporcionou incrementos do pH em todas as camadas de solo da coluna, e da CE no EPS. A adição de água após a aplicação do efluente mostrou-se capaz de reduzir os teores de Na no sistema e, conseqüentemente, os valores de PST, CE e RAS, embora não alcançando valores considerados ideais. A adição do efluente incrementou a dispersão de argilas na camada superior do LA e CX, coincidindo com solos de menor ID natural. O solo RY não apresentou dispersão significativa com a adição do efluente e nos seus percolados foram obtidos maiores teores de cátions, o que foi associado à sua granulometria mais grosseira. No experimento III, (laboratório), buscou-se avaliar o efeito de aplicações sucessivas do efluente tratado de indústria de celulose sobre a K_0 de amostras dos mesmos três solos indicados anteriormente. Para isto amostras indeformadas dos solos, contidas em anéis volumétricos, foram submetidas à avaliação semanal, por cinco semanas, da K_0 durante a aplicação de água ou de efluente. Finalizado o período de avaliação, as amostras foram submetidas à avaliação da ADA, M_a , M_i , PT, Ds e equivalente de umidade. Os dados obtidos mostraram haver efeito da aplicação do efluente sobre a condutividade hidráulica somente para o LA, para o qual a adição da água residuária reduziu os valores de K_0 . Nenhuma outra

característica avaliada nos solos apresentou alteração significativa com os líquidos aplicados. Os resultados dos três experimentos conduzidos indicaram um potencial de uso do efluente como fonte alternativa de água para a cultura do eucalipto, entretanto, devido à sua alta concentração de Na^+ e possibilidade de dispersão de argilas, seu uso deve ser efetuado de maneira planejada e sob um programa de monitoramento da qualidade do solo.

ABSTRACT

ALMEIDA, Ivan Carlos Carreiro, M.S., Universidade Federal de Viçosa, July 2008. **Physical soil attributes in response to the addition of treated effluents from the cellulose industry.** Advisor: Raphael Bragança Alves Fernandes. Co-advisors: Hugo Alberto Ruiz and Júlio César Lima Neves.

The disposal of effluents from the cellulose industry in soil can be an attractive option for the use of these residual waters since it is an additional process to the existing treatment systems as well as provide a supplemental source of water and nutrients for the plants. Therefore, the objective of this study was to evaluate the effect of application of these cellulose industry effluents on the physical attributes of the soil. Three experiments were performed: one in the field (experiment I) and two in the laboratory (experiments II and III). Experiment I was setup in an experimental area of a forestry company, conducted in Fluvic Neossol soil, where four different treatments had been applied to a eucalyptus plantation for six years: irrigated, non-irrigated, with fertirrigation and with the application of effluents from the cellulose plant. A nearby pasture area was used as a reference. Soil samples from each of the different treated areas were evaluated for: penetration resistance, hydraulic conductivity (k_0) in the field and in the laboratory, routine chemical analyses, texture, geometric mean diameter (GMD) and weight mean diameter (WMD) of aggregate, water-dispersible clay (WDC), dispersion index (DI), bulk density (BD), total porosity (PT), microporosity (Mi), macroporosity (Ma), organic carbon (OC), least limiting water range (LLWR) and the sodium absorption ration (SAR) in the saturated paste extract (SPE). The obtained results indicated

the increase of BD in the eucalyptus plantation, and the consequent reduction of the PT and K_0 (laboratory). The applied effluent promoted the reduction in the GMD and WMD of the aggregates and increase in the DI, which can be associated with the increase in the Na levels, with the consequent increase of the SAR verified in the soil and in the SPE for this treatment. In experiment II (laboratory), a test using PVC columns filled with soils was setup in triplicate, with the goal of evaluating the effect of the surface application of treated effluent from the cellulose industry for a period of five weeks on the physical characteristics of the soil and the leaching recovered at the base of the columns. Three predominant soils from the region of the forestry company were used to fill the columns: Fluvic Neossol (RY), Haplic Cambisol (CX) and Yellow Latosol (LA). The columns were then submitted to the application of four different treatments (effluent, effluent+water, water and water+water), formed by the weekly addition of equivalent liquid volumes to a volume of pores for each soil class. At the end of the experiment, the columns were dismantled and the soil divided into three parts (upper, middle and lower), each section being separately analyzed for the evaluation of textures, routine chemical characteristics and WDC. In the SPE obtained from these samples the levels of Ca, Mg, Na, K, pH, electrical conductivity (EC) were determined and the SAR was calculated. From the leaching collected after the each applications, Ca, Mg, Na, K, P, Cd, Cr, Pb, Ni, Zn, Mn, Al, pH and EC were determined. The obtained results indicated that the addition of the effluent increased the level of Na in the leaching, in the SPE and in the sorptive complex of the soil. The applied effluent also caused increases in the pH in all layers of the soil in the column, and in the EC of the SPE. The addition of water after the application of the effluent showed to be capable of reducing the levels of Na in the system and, consequently, the values of ESP, EC and SAR, however the values considered ideal were not reached. The addition of the effluent increased the clay dispersion in the upper layer of the LA and CX, coinciding with soils of lesser natural DI. The RY soil showed no significant dispersion with the addition of the effluent and from its leaching, greater levels of cations were obtained, which was associated to its greater particle size. In experiment III (laboratory), the effect of successive treated effluent applications from the cellulose industry on K_0 of samples from the same three soil types previously mentioned. Undeformed soil samples, contained in volumetric rings, were submitted to weekly evaluation, for a period of five weeks, of the K_0 during the application of water or effluent. After the evaluation period was completed, the samples were submitted for the evaluation of WDC, Ma, Mi, PT, BD and moisture content equivalent. The obtained data showed the effect of the application of the effluent on the hydraulic conductivity for LA, for which the addition of residual water reduced the values of

K₀. No other evaluated characteristic in the soils presented significant alteration with the liquids applied. The results of the three experiments conduction indicate the potential use of effluents as an alternative water source for eucalyptus, however, due to its high concentration of Na⁺ and potential for clay dispersion, its use should be carefully managed and under the control of a soil monitoring program.

INTRODUÇÃO GERAL

No Brasil, os produtos de celulose e papéis brasileiros são fabricados, em sua maioria, a partir de madeira de florestas plantadas, em especial de eucaliptos e pinus, que são espécies vegetais de crescimento rápido, alta produtividade e que atendem aos requisitos do processo fabril. A área ocupada com florestas plantadas com essas duas essências florestais no Brasil alcançou 5.373.417 ha no ano de 2006, sendo que, deste total, aproximadamente, 1,7 milhão de ha foram destinados ao setor de papel e celulose (ABRAF, 2007). O setor nessa época foi responsável por cerca de quatro por cento do PIB nacional (BRACELPA, 2007).

A indústria de papel e celulose brasileira vem apresentando recordes de produção ano após ano, o que faz com que a demanda de matéria prima também aumente consideravelmente. Esse aumento da demanda de pinus e, principalmente, de eucalipto, faz com que se procurem novas áreas e, ou, se intensifiquem a busca por incrementos de produtividade. Novas áreas sendo incorporadas ao processo produtivo acarretam, na maioria das vezes, incrementos no custo de produção, tendo em vista a maior distância entre o plantio florestal e a indústria. Neste contexto, o aumento da produtividade e a redução do ciclo de corte tem sido o principal foco de ação das indústrias do setor.

A precipitação pluvial e o balanço hídrico são características, dependentes do clima, importantes para o crescimento de plantas na região tropical. Ao contrário da irradiação e da temperatura, relativamente constantes, a precipitação pluvial é muito variável, constituindo-se em fator determinante da produtividade. Considera-se que a distribuição das chuvas tem papel mais importante na produtividade florestal do que o total de precipitação (Barros & Comerford, 2002). Em regiões com chuvas sazonais, no período seco, as árvores podem sofrer considerável estresse hídrico, podendo até atingir um ponto crítico de suprimento de água. Este limite é verificado quando a água armazenada no solo é insuficiente para atender a demanda transpiracional das árvores. (Barros & Comerford, 2002).

Diante do exposto, o uso da irrigação nas regiões que apresentam estações secas prolongadas passa a ser de grande valia para assegurar boa produtividade da floresta. Entretanto, devido às restrições ao uso de água dos mananciais para a irrigação do plantio florestal e ao alto custo desta técnica, seu emprego nem sempre é viável.

Considerando especialmente a indústria de celulose, o aumento da produção nacional desta matéria prima também tem sido acompanhado do incremento da geração de efluentes provenientes dos processos de fabricação. Na atualidade é generalizada a preocupação da sociedade com as questões ambientais e, no caso específico desses resíduos, os órgãos

ambientais têm estado vigilantes no que se refere à sua disposição adequada. Essa também é uma preocupação constante das empresas, em especial daquelas que valorizam e investem em programas de qualidade e gestão ambiental.

A disposição dos efluentes no meio ambiente deve ser precedida de tratamento adequado, entretanto, ao final desse processo, grande volume do efluente tratado é devolvido aos cursos d'água, sem qualquer outro aproveitamento no processo industrial. Uma vez que é estimado que sejam consumidos 36 m³ de água por tonelada de polpa celulósica produzida (Springer, 2000) e, considerando a elevada produção das indústrias nacionais, percebe-se o potencial de geração de efluente que pode ser destinado à irrigação no decorrer de todo o ano. Assim o uso desses efluentes na irrigação de plantios florestais passa a ser opção interessante para as empresas florestais, pois além de operar como um processo adicional aos sistemas de tratamento existentes, diminuindo a descarga de efluente no corpo d'água receptor e constitui também fonte suplementar de água e nutrientes para o povoamento florestal (Rezende, 2003).

Apesar dos benefícios concretos com o aproveitamento do efluente na agricultura, a presença de alguns constituintes, como o Na, é preocupante. Esse elemento químico é frequentemente associado a modificações químicas e físicas indesejáveis em solos, sendo seu aporte e dinâmica dependente de alguns fatores, tais como: concentração de Na no efluente; possibilidade de ser absorvido pela cultura; intensidade de lixiviação no perfil do solo; permeabilidade do solo e dinâmica de outros íons, como Ca, Mg, carbonatos e bicarbonatos na solução e no complexo de troca do solo.

Não obstante, o estudo desses fatores é de grande relevância para subsidiar a aplicação dessas águas residuárias em solos, uma vez que ainda pouco se sabe sobre o impacto que a aplicação dessas águas residuárias pode ocasionar ao solo, principalmente, no tocante às suas propriedades físicas.

Neste contexto, este trabalho tem como hipótese que a adição de efluente, tratado proveniente da fabricação de celulose, objetivando o reuso de sua água como irrigação altera alguns atributos químicos e físicos do solo, envolvidos diretamente na caracterização da qualidade do solo. Diante disto, este trabalho visa avaliar o efeito da aplicação de efluentes tratados provenientes de uma indústria de celulose (processo Kraft) sobre as propriedades físicas do solo, em condições de campo e de laboratório.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABRAF – Associação Brasileira de Produtores de Florestas Plantadas. Anuário Estatístico da ABRAF 2007 (Ano Base 2006) 84p. Disponível em <http://www.abraflor.org.br/estatisticas/anuario-ABRAF-2007.pdf>. Consultado em setembro de 2007.
- Barros, N. F.; Comerford, N. B. Sustentabilidade da produção de florestas plantadas na região tropical. In: Tópicos em Ciência do Solo, v.2, p.487-592. 2002.
- BRACELPA – Associação Brasileira de Celulose e Papel. Desempenho do setor em 2006 e projeção para 2007 (Revisão Agosto 2007). 8p. Disponível em http://www.bracelpa.org.br/bra/estatisticas/pdf/anual/desempenho_2006.pdf. Consultado em setembro de 2007.
- Rezende, A. A. P. Fertirrigação do eucalipto com efluente tratado de fábrica de celulose kraft branqueada. UFV, 2003. 160p. (Tese de Doutorado).
- Springer, A. M., et al. Uma revisão sobre aspectos ambientais relacionados aos efluentes líquidos das indústrias de celulose e papel. O papel nº 09, 2000. p.70-76.

CAPÍTULO 1

Qualidade física e química de um neossolo em resposta à aplicação por seis anos de efluente tratado de uma indústria de celulose

RESUMO

A disposição no solo de águas residuárias pode constituir uma opção atrativa para certos empreendimentos, em especial quando os efluentes gerados apresentem potencial de fornecer água e nutrientes para as plantas. Como determinados impactos ambientais podem ser associados a tal disposição, tal aplicação deve ser precedida da devida avaliação de suas conseqüências, principalmente porque o recurso natural solo apresenta íntima relação com os demais compartimentos ambientais: hidrosfera, atmosfera e biosfera. Neste contexto, o presente trabalho teve como objetivo avaliar a qualidade física e química de um Neossolo Flúvico cultivado com eucalipto e que recebeu, durante seis anos, a aplicação de efluente de uma indústria de celulose via fertirrigação. Os tratamentos avaliados foram: eucalipto não irrigado; eucalipto irrigado; eucalipto com fertirrigação; eucalipto com aplicação de efluente; e área de mata (referência). Em todos os tratamentos, o solo foi avaliado quanto a resistência, a penetração, condutividade hidráulica (K_0) em campo e em laboratório, análises química de rotina, textura, diâmetro médio geométrico (DMG) e ponderado (DMP) dos agregados, argila dispersa em água (ADA), índice de dispersão de argila (ID), densidade do solo, macroporosidade, microporosidade e porosidade total, carbono orgânico (CO), intervalo hídrico ótimo (IHO) e composição do extrato da pasta saturada (EPS). Embora a aplicação dos efluentes não tenha afetado a resistência do solo à penetração e os valores de K_0 , ela promoveu a redução dos valores de DMG e DMP dos agregados e o aumento do ID, o que foi associado aos expressivos incrementos nos teores de Na^+ no solo e no EPS e, conseqüentemente, da razão de adsorção de sódio (RAS) e da porcentagem de sódio trocável (PST), decorrentes de tal disposição. O uso do efluente incrementou os valores de pH do solo, mas não alterou os teores de Ca^{2+} e Mg^{2+} trocáveis, e nem de CO. Não se verificou efeito da aplicação de efluentes sobre o IHO. A aplicação do efluente proporcionou a obtenção de elevada RAS e intermediária condutividade elétrica no EPS, o que pode afetar no futuro a qualidade do solo. Efeitos negativos não foram verificados após a aplicação durante todo um ciclo do cultivo do eucalipto, mas um programa de monitoramento deve ser conduzido e alternativas estudadas. Como a aplicação de Ca^{2+} e Mg^{2+} ou mesmo a gessagem em associação com a disposição do efluente no solo.

Palavras chave: águas residuárias, reuso da água, dispersão de argilas, RAS

ABSTRACT

ALMEIDA, Ivan Carlos Carreiro, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, July 2008.

Treated wastewater of cellulose industry and his effect on some physical and chemical attributes of the soil, when applied by fertirrigação during a productive cycle of eucalyptus. Advisor: Raphael Bragança Alves Fernandes. Co-advisors: Hugo Alberto Ruiz and Júlio César Lima Neves.

The application of cellulose industry wastewater to soils is an attractive disposal alternative as it decreases the amounts of residues thrown to water bodies, besides functioning as water and nutrient supply for plants. Nevertheless, some unwanted effects toward the soil physical, bio and chemical properties may arise if the utilization of these residues is not properly handled. This work aimed at evaluating some physical and chemical characteristics of a Fluvic Neossol under eucalyptus cultivation that has received cellulose wastewater application over a six years period. Our experiment was comprised by four treatments and a reference area. The experimental design was as follows: no irrigation; irrigation; fertirrigation; cellulose wastewater and an adjacent area was taken as reference. For so much, we evaluated the following soil characteristics: resistance to penetration, hydraulic conductivity (K_0) under field and laboratory conditions, routine chemical analysis, particle size distribution, geometric mean diameter (GMD) and weight mean diameter (WMD) of aggregate, water-dispersible clay (WDC), dispersion index (DI), bulk density (BD), macroporosity, microporosity and total porosity, organic carbon (OC), least limiting water range (LLWR), and composition of saturated paste extract. Wastewater application did not increase soil bulk density and soil penetration resistance, and neither reduced hydraulic conductivity, but reduced the aggregate stability (GMD and WMD values) and increased clay dispersion. These effects were related to expressive increasing of soil Na^+ contents, and consequently increasing of sodium adsorption ratio (SAR) and exchangeable sodium percentage (ESP) verified in this treatment. The use of the wastewater increased the values of soil pH, but did not change the soil Ca^{2+} , Mg^{2+} and OC contents, when compared to the treatment with fertirrigation, but increased Na^+ in the soil solution with consequent reduction of the cation nutrients. Effects on LLRW were expressive only when compared the reference area (forest) with the applied treatments in the eucalyptus cultivated areas.

Words key: industry effluent, water reuse, clay dispersion, sodium adsorption ratio

INTRODUÇÃO

A indústria de celulose brasileira vem obtendo incrementos expressivos de produção para atender a demanda mundial de papel, o que faz com que haja aumento da demanda de matéria prima, formada em sua maioria, por eucaliptos e pinus. A necessidade de aumento de produção tem feito com que as empresas do setor busquem alternativas de manejo que aumentem a produtividade florestal. Uma prática de manejo interessante que tem sido avaliada experimentalmente é a irrigação, uma vez que a disponibilidade hídrica para as florestas plantadas é considerada a mais limitante, já que, nas condições tropicais, a irradiação e temperatura são relativamente não limitantes. Entretanto, a prática da irrigação florestal ainda é bastante discutível do ponto de vista do uso dos recursos hídricos e também em face, principalmente, aos custos envolvidos, que nem sempre são viáveis.

No processo de produção da celulose são gerados volumes expressivos de efluentes, que são tratados e lançados nos corpos d'água. A disposição destes efluentes via irrigação torna-se, portanto, uma opção atrativa para a destinação final destas águas residuárias, tanto do ponto de vista ambiental como econômico. Além de operar como um processo adicional aos sistemas de tratamentos existentes, reduzindo ainda mais a carga de efluente lançada no corpo d'água receptor, constitui também uma fonte suplementar de nutrientes e, principalmente, de água para as plantas (Rezende, 2003).

Mais recentemente, tem se intensificado os estudos acerca da aplicação no solo de águas residuárias (Santos, 2004; Lado et al., 2005; Cavallet et al., 2006; Sousa et al., 2006; Fonseca et al., 2007, Gloaguen et al., 2007; Heidarpour et al., 2007). Em sua maioria, esses trabalhos visam o reuso desses efluentes em atividades agrosilvopastoris, sendo mais comum o uso de águas provenientes de esgotos urbanos e industriais tratados.

Smith e Bond (1999), trabalhando com o uso de efluente tratado de esgoto doméstico, consideram que a aplicação dessas águas em florestas constitui alternativa interessante para o reuso da água, porque (i) a cultura florestal não faz parte da cadeia alimentar humana; (ii) a adição promove uma boa imagem ambiental para a empresa; (iii) as árvores exigem mais água em relação a outras culturas, requerendo, portanto, menos área para o volume de efluente ofertado e, (iv) as árvores são retentoras de C e N na biomassa, principalmente no tronco, o que representa um mecanismo de seqüestro desses elementos no ecossistema por um longo período de tempo.

Poucos são os trabalhos que avaliam os efluentes gerados pelas atuais indústrias de papel e celulose, que utilizam o processo Kraft de branqueamento. Esses efluentes

freqüentemente apresentam alta concentração de Na⁺ e alta razão de adsorção de sódio (RAS). Assim seu uso pode incrementar os teores desse cátion no solo, com efeitos sobre suas características físicas e químicas, podendo influenciar direta ou indiretamente o desenvolvimento das plantas. Em especial, merecem atenção os efeitos relacionados à dispersão de argilas, que podem acarretar redução da porosidade, da taxa de infiltração e da condutividade hidráulica, e também contribuir para a desestabilização da estrutura do solo (Feigin et al., 1991). Os efluentes podem ainda elevar o pH do solo, afetando a disponibilidade da maioria dos micronutrientes.

Neste contexto, o objetivo do presente trabalho foi o de avaliar o efeito de efluentes de uma indústria de celulose que utiliza o processo Kraft de produção de papel sobre a qualidade física e química de um Neossolo Flúvico, em condições de campo, após período de seis anos de aplicação em área de floresta plantada com eucalipto, portanto, durante todo um ciclo produtivo da cultura.

MATERIAL E MÉTODOS

Área de estudo e tratamentos

O estudo foi desenvolvido entre 2001 e 2006 no município de Santana do Paraíso, região centro-leste do Estado de Minas Gerais, localizado a 19°18'23" S e 42°22'46" W, e a 220 m de altitude, na bacia do Rio Doce, em áreas da empresa Celulose Nipo Brasileira (CENIBRA S.A.).

O clima da região, segundo a classificação de Köppen, é do tipo Aw, sendo considerado temperado chuvoso-mesotérmico, com precipitação média anual de 1.163 mm, temperatura média anual de 25,2 °C, média das temperaturas máximas de 31,5 °C, médias das temperaturas mínimas de 19,1 °C e umidade relativa do ar média de 65,2 % (Silva, 2006). Dados climáticos da maior parte do período do experimento são apresentados no Quadro 1.

Quadro 1 - Dados climáticos referentes ao período de outubro de 2001 a dezembro de 2005, obtidos em uma estação meteorológica próxima à área experimental

Mês	Tmed	Tmax	Tmin	Prec.	Rad. tot.
	----- °C -----			mm	MJ.(m ² .dia) ⁻¹
Jan	25,2 ± 0,2	31,2 ± 0,4	21,6 ± 0,2	283,3 ± 33,2	18,4 ± 0,9
Fev	25,1 ± 0,3	31,4 ± 0,7	20,8 ± 0,2	292,5 ± 118,0	19,9 ± 1,6
Mar	25,1 ± 0,3	31,5 ± 0,6	21,1 ± 0,2	116,3 ± 28,0	19,0 ± 0,9
Abr	23,9 ± 0,2	30,6 ± 0,6	19,7 ± 0,1	82,0 ± 22,2	16,8 ± 0,8
Mai	21,8 ± 0,2	28,6 ± 0,5	17,3 ± 0,5	37,9 ± 11,9	13,7 ± 0,7
Jun	20,0 ± 0,3	27,7 ± 0,7	15,1 ± 0,6	18,4 ± 10,7	13,1 ± 0,8
Jul	19,5 ± 0,4	27,0 ± 0,6	14,4 ± 0,6	13,6 ± 10,7	12,9 ± 0,6
Ago	20,8 ± 0,5	28,5 ± 0,4	15,2 ± 0,6	11,4 ± 3,8	15,6 ± 0,2
Set	22,3 ± 0,3	29,3 ± 0,6	17,0 ± 0,7	35,6 ± 22,8	15,3 ± 1,1
Out	24,1 ± 0,2	31,0 ± 0,5	18,9 ± 0,3	67,9 ± 18,2	18,8 ± 1,2
Nov	25,0 ± 0,3	31,2 ± 0,5	20,7 ± 0,2	162,1 ± 86,4	18,2 ± 0,3
Dez	25,2 ± 0,2	31,4 ± 0,4	21,1 ± 0,2	311,0 ± 67,6	21,9 ± 2,3

Tmed = temperatura média; Tmax = temperatura máxima (média); Tmin = temperatura mínima (média); Prec. = precipitação anual; Rad. tot. = radiação global total.

O solo da área foi classificado como um Neossolo Flúvico distrófico típico, situado em área de baixada e relevo levemente ondulado, formada por sedimentos de afluentes do rio Doce. A vegetação regional era formada por floresta estacional semidecidual, formada de tipos arbóreos de médio a grande porte, com distribuição espaçada e que se intercalam com tipos de menor tamanho. Grande parte dessa vegetação foi substituída por pastagens (Oliveira e Leite, 2000), sendo que estas geralmente degradadas têm sido substituídas por floresta plantadas de eucalipto.

O efluente utilizado na área experimental foi proveniente da estação de tratamento de efluentes da própria empresa e cuja composição média é apresentada no Quadro 2.

As avaliações aqui descritas foram efetuadas em um experimento previamente instalado pela empresa, no qual diferentes clones de eucalipto foram cultivados. Para fins de comparação um tratamento controle (T1) foi utilizado, constituído de uma área lateral próxima, formada por vegetação secundária, denominada doravante de mata.

Quadro 2 - Composição química média do efluente tratado da indústria de celulose estudada

	pH	CE dS m ⁻¹	N	P	K	Na	Ca	Mg	Zn	Cu	Fe	Mn
			----- mg L ⁻¹ -----									
M ⁽¹⁾	7,88	1,91	3,5	2,6	45,5	1.030	34,0	3,6	0,3	0,2	1,4	0,2
s ⁽³⁾	0,25	1,74	3,1	1,8	66,1	1.467	45,3	4,9	0,4	0,3	2,5	0,2

	T	SST	CL	COT	FE	O+G	AOX	SS	COR	DBO	DQOs	DQOt
	°C	mL L ⁻¹ h ⁻¹	----- mg L ⁻¹ -----									
M ⁽²⁾	35,7	28,8	202,1	99,7	0,02	2,4	1,9	0,1	410,1	26,0	175,9	201,9
s	1,1	7,4	33,6	13,0	0,05	0,5	0,2	0,1	76,8	7,7	23,7	25,3

CE = condutividade elétrica; T = temperatura; SST = sólidos sedimentáveis totais; CL = cloretos; COT = carbono orgânico total; FE = fenóis; O+G= óleos e graxas; AOX = halogênios orgânicos adsorvíveis; SS = sólidos suspensos; COR = cor real; DBO = demanda bioquímica de oxigênio (5 dias, 20 °C); DQOs = demanda química de oxigênio (solúvel); DQOt = demanda química de oxigênio (total).

⁽¹⁾ M = valores médios referentes às análises efetuadas entre 2003 e 2007 (dados da empresa)

⁽²⁾ M = valores médios referentes às coletas efetuadas em 2007 (dados da empresa)

⁽³⁾ desvio padrão

No momento desse estudo, as árvores apresentavam, aproximadamente, seis anos de idade e, desde o plantio, foram submetidas aos seguintes tratamentos: T2 = sem irrigação (cultivo de eucalipto sem irrigação ou fertirrigação); T3 = irrigação com água (eucalipto irrigado com água fresca até atender a evapotranspiração potencial (ET₀) das plantas); T4 = fertirrigação (eucalipto fertirrigado com água fresca até a ET₀, com 100% da adubação recomendada) e; T5 = efluente (eucalipto irrigado com efluente tratado da fábrica de celulose, após tratamento prévio, até atender a ET₀ das plantas). A área total ocupada pelo experimento foi de 4,92 ha, distribuída em áreas de 0,50; 0,40; 1,36; 1,70 e 0,96 ha, correspondentes aos tratamentos T1, T2, T3, T4 e T5, respectivamente.

A aplicação de água, fertirrigação e efluente foi efetuada mediante sistema de irrigação por gotejamento, após prévia filtragem para preservação dos gotejadores. Os cálculos das lâminas de irrigação foram obtidos por meio dos valores estimados da evapotranspiração (ET₀) por meio da equação de Penman-Monteith, baseando-se nos dados climatológicos (Quadro 1). A Figura 1 apresenta as lâminas aplicadas no tratamento com efluente (T5).

Determinações em laboratório

As amostras coletadas em campo foram encaminhadas aos laboratórios do Departamento de Solos da Universidade Federal de Viçosa, onde foram realizadas as seguintes determinações: textura, pelo método da pipeta e por peneiramento (Ruiz, 2005a, 2005b); análises químicas de rotina, segundo Defelipo e Ribeiro (1981); caracterização química do extrato da pasta saturada (EPS), com as determinações de pH, Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ e cálculo da RAS (Richards, 1954); percentagem de saturação de sódio no solo (PST); carbono orgânico (CO), quantificado com aquecimento externo (Yeomans e Bremner, 1988); argila dispersa em água (ADA); índice de dispersão (ID), relacionando-se a ADA e a argila total; diâmetro médio geométrico (DMG) e diâmetro médio ponderado (DMP) dos agregados (Kemper e Chepil, 1965); densidade de partículas (D_p), pelo método do balão volumétrico; densidade do solo (D_s), pelo método do anel volumétrico; porosidade total (PT), determinada pela equação $PT = 1 - D_s/D_p$; microporosidade (M_i), a partir da quantidade de água retida no solo submetido ao potencial de -0,006 kPa; macroporosidade (M_a), calculada pela diferença entre PT e M_i ; condutividade hidráulica em meio saturado (K_0), com permeâmetros de carga constante, segundo Ferreira (1999), e o intervalo hídrico ótimo (IHO). Os métodos de análise, quando não indicados por outras fontes foram efetuados segundo recomendações constantes em EMBRAPA (1997). No caso do IHO, a metodologia utilizada foi a sugerida por Tormena et al. (1998), sendo os valores de resistência à penetração ajustados em relação à D_s e θ , utilizando-se um modelo de regressão não-linear gerado no software Statistica®, conforme as equações 1 e 2. Para o cálculo do IHO foi utilizado um algoritmo desenvolvido em EXCEL® por Leão e Silva (2004).

$$RP = a.\theta^b .Ds^c \quad (1)$$

$$\theta = EXP(d + e.Ds).\psi^f \quad (2),$$

em que:

a, b, c, d, e, f = parâmetros de ajuste.

Determinações em campo

Em condições de campo foram efetuadas as determinações da condutividade hidráulica (K_0), utilizando-se o permeâmetro de Guelph (Reynolds et al., 1992), e da

resistência à penetração (RP) até 50 cm de profundidade, com um penetrômetro de impacto modelo IAA/PLANALSUCAR-STOLF (Stolf et al. 1983). Nessas avaliações foram utilizadas uma e dez repetições, respectivamente, para K_0 e RP, dentro de cada subárea, perfazendo um total de quatro e 40 repetições por tratamento, respectivamente.

Análises estatísticas

Os resultados obtidos foram submetidos à análise de variância, sendo o desdobramento das respectivas interações realizado independentemente da significância, de modo a se testar os efeitos da aplicação dos efluentes, mediante contrastes ortogonais (Quadro 3). Em todas as análises estatísticas foi utilizado o software Statistica® (Statsoft, 1999).

Quadro 3 - Contrastes ortogonais (C) utilizados na comparação entre os diferentes tratamentos

Tratamentos	C1	C2	C3	C4
Mata (T1)	4	0	0	0
Sem irrigação (T2)	-1	3	0	0
Irrigação com água (T3)	-1	-1	2	0
Fertirrigação (T4)	-1	-1	-1	1
Efluente (T5)	-1	-1	-1	-1

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A substituição da mata pelos cultivos de eucalipto acarretou o incremento da dispersão de argilas (ADA e ID), redução do tamanho médio dos agregados (DMG e DMP) e incrementos na D_s , com conseqüente redução na porosidade total (Quadro 4). Esses resultados, indicados pelo contraste C1, são esperados e freqüentemente observados quando as atividades antrópicas de uso do solo substituem os ambientes naturais.

Quadro 4 – Qualidade física do solo em resposta aos tratamentos avaliados

TRATAMENTO	AGR	AFN	SIL	ARG	ADA	ID	DMG	DMP
	%						mm	
Mata (T1)	50	11	12	27	11	39	2,60	2,31
Sem irrigação (T2)	42	14	15	29	16	53	2,21	1,75
Irrigação com água (T3)	39	18	16	27	15	54	2,48	2,01
Fertirrigação (T4)	30	20	20	30	17	52	2,49	1,95
Efluente (T5)	46	16	14	24	14	59	2,03	1,52
C1 ⁽¹⁾		(-)**	(-)*		(-)*	(-)**	(+)**	(+)**
C2								
C3								
C4	(-)**	(-)*	(+)*	(+)*		(-)**	(+)**	(+)*

TRATAMENTO	Ds	PT	Mi	Ma	K ₀ Guelph	K ₀ Laboratório
	kg dm ⁻³	m ³ m ⁻³			cm h ⁻¹	
Mata (T1)	1,33	0,49	0,30	0,19	2,30	21,92
Sem irrigação (T2)	1,39	0,47	0,29	0,18	6,83	7,76
Irrigação com água (T3)	1,38	0,47	0,29	0,18	11,75	10,26
Fertirrigação (T4)	1,37	0,47	0,30	0,17	3,27	7,24
Efluente (T5)	1,39	0,47	0,29	0,18	2,81	17,06
C1 ⁽¹⁾	(-)**	(+)**				(+)**
C2						
C3					(+)*	
C4						(-)*

AGR: areia grossa; AFN: areia fina; ARG: argila; SIL: silte; ADA: argila dispersa em água; ID: índice de dispersão; DMG: diâmetro médio geométrico; DMP: diâmetro médio ponderado; Ds: densidade do solo; PT: porosidade total; Mi: microporosidade; Ma: macroporosidade; K₀ Guelph: condutividade hidráulica com permeâmetro de Guelph (campo); K₀ Laboratório: condutividade hidráulica. ⁽¹⁾ Contrastes: C1: mata vs eucalipto; C2: sem irrigação vs irrigados; C3: irrigado vs fertirrigados; C4: fertirrigado vs fertirrigados com efluente. ** e * contrastes significativos a 1 e 5 %, respectivamente. Sinais (+) e (-) indicam, respectivamente, relação de superioridade ou inferioridade das médias dos tratamentos comparados no respectivo contraste, comparando-se o primeiro com o segundo termo do contraste.

Considerando as áreas cultivadas com eucalipto, embora não se esperasse alterações de textura com os tratamentos, notou-se efeito significativo da aplicação do efluente por seis anos sobre esta característica nos primeiros cinco centímetros do solo, conforme indicação do contraste C4 (Quadro 4). Os dados obtidos indicaram redução dos teores de argila e silte no tratamento T5, o que pode ser associado ao efeito do efluente aplicado sobre a dispersão de argilas, e conseqüente perda dessa fração textural, como também sugerido pelos maiores valores de ID e menores de DMG e DMP neste tratamento. O efeito do efluente sobre o incremento da concentração salina do solo não pode ser desprezado, uma vez que isto pode prejudicar a dispersão dos agregados no procedimento analítico, reduzindo os teores de argila obtidos. Os incrementos de areia grossa e fina no tratamento com efluente (T5) são relativos e, obviamente, diretamente associados à redução dos teores de argila. Entretanto, essa possível dispersão verificada na avaliação da textura não obteve respaldo nos valores obtidos de ADA, o que pode ser associado ao fato de haver menos argila sujeita aos efeitos dispersivos do efluente, dada a redução dessa fração granulométrica em T5 (Quadro 4). Por outro lado, quando se avalia o ID, que retrata a dispersão via valores relativos entre a argila dispersa e a argila total, verifica-se maior dispersão no tratamento com efluente.

Ainda considerando-se apenas os tratamentos com floresta plantada, nenhuma diferença foi verificada quanto à estrutura do solo, assim como representada pelos valores de Ds, PT, Mi e Ma. Por sua vez, efeito negativo da aplicação do efluente foi observado na análise dos valores de DMG e DMP (contraste C4), refletindo uma ação sobre a estabilidade dos agregados. A situação verificada apresenta-se em consonância com a dispersão indicada na análise prévia efetuada para a variável ID, e indica a necessidade de cuidados com a aplicação deste tipo de água residuária. Avaliações do efeito da aplicação de efluentes sobre a estabilidade de agregados não são muito comuns, sendo que a maior parte dos trabalhos se restringe às determinações de ADA e ID. Por outro lado, alguns trabalhos como os de Levy et al. (2003) e Bhardwaj et al. (2007) indicam a ausência de efeito da aplicação de efluente sobre a estabilidade de agregados de solos argilosos. Trabalhando com efluentes de esgotos domésticos, os autores atribuem tal efeito ao menor valor de RAS e à matéria orgânica adicionada conjuntamente com este tipo de água residuária.

Com respeito aos valores obtidos de condutividade hidráulica em meio saturado (K_0), verificou-se comportamento diferenciado em função da metodologia utilizada (Quadro 4). Quando avaliada em campo, via permeâmetro de Guelph, destacam-se os baixos valores de K_0 associados à mata, inferiores aos demais tratamentos cultivados com eucalipto. Neste caso, uma possível explicação é a subsolagem efetuada no momento da implantação da cultura do

eucalipto, que facilitou a condutividade da água nestes tratamentos, uma vez que a avaliação foi efetuada na linha de plantio. Já o expressivo valor obtido no tratamento irrigado (T3), que determinou a significância do contraste C3, é de difícil explicação, possivelmente nesse caso devido à grande variabilidade natural, normalmente atribuída a esta determinação. No caso da avaliação da K_0 em laboratório, utilizando-se frasco de Mariote, verifica-se comportamento esperado da mata em relação aos demais tratamentos com eucalipto (contraste C1, quadro 4), como efeito da própria substituição da vegetação nativa. Esta mesma metodologia indicou superioridade nos valores de K_0 na área do tratamento com efluente (T5), situação não verificada para com o permeâmetro de Guelph. Esta diferença de resultados pode ser atribuída ao fato de a avaliação da K_0 com o Guelph se dar em todo perfil e em sentido multidirecional do solo, e a determinação da K_0 , utilizando frasco de Mariote, somente utilizar a camada superficial (0-5 cm) correspondente à altura do cilindro metálico utilizado. Assim, para essa última determinação pode ser considerado um efeito do efluente promovendo o enriquecimento relativo de partículas mais grosseiras na camada superior do solo, favorecendo, desta forma, a K_0 determinada em laboratório. Tal ponderação encontra respaldo no incremento da dispersão (ID) e na eluviação de argila diagnosticada e já discutida previamente. Efeito de incremento de permeabilidade do solo com aplicação de soluções salinas também foi verificado por Almeida Neto (2007), que observou incrementos de K_0 após adição de águas salinas e sódicas, mesmo quando RAS foi alta e CE baixa.

No tocante às características químicas, diferenças significativas foram verificadas no solo sob cultivo de eucalipto em relação à mata. A retirada da vegetação original e a incorporação da área ao processo produtivo levaram redução dos valores de CTC e CO (Quadro 5). A matéria orgânica foi reduzida com o cultivo do solo com eucalipto em relação à mata. Esta redução também foi evidente quando se promoveu a irrigação do solo com água ou efluente, o que pode ser associado ao favorecimento em termos de umidade no meio para a atividade dos microrganismos. Embora o efluente apresentasse teores consideráveis de material orgânico, como indicado por seus valores de DBO (Quadro 2), sua passagem prévia por filtros do sistema de irrigação, seguramente reduziram a carga orgânica aportada ao solo, e desta forma, incrementos de CO não foram identificados com a aplicação da água residuária.

A CTC foi reduzida com o cultivo do eucalipto, o que pode ser associado à mineralização matéria orgânica (MO). A menor CTC verificada no tratamento T5, onde foi aplicado o efluente, pode ser associada tanto à redução da MO quanto à perda de argila verificada nos primeiros 5 cm de solo, que são importantes contribuintes da CTC dos solos.

Quadro 5 – Qualidade química do solo em reposta aos tratamentos avaliados

TRATAMENTOS	pH	Ca -- cmol _c dm ⁻³ --	Mg -- cmol _c dm ⁻³ --	K -- mg dm ⁻³ --	Na -- mg dm ⁻³ --	PST %	CTC cmol _c dm ⁻³	CO dag kg ⁻¹
Mata (T1)	5,05	2,10	0,41	81	4	0,18	8,03	2,32
Sem irrigação (T2)	5,77	2,63	0,80	118	14	0,91	6,79	1,80
Irrigação com água (T3)	5,32	2,11	0,55	65	16	0,89	7,60	1,24
Fertirrigação (T4)	5,23	2,18	0,55	137	7	0,38	7,58	1,59
Efluente (T5)	6,02	2,16	0,70	130	170	11,68	6,33	1,28
C1 ⁽¹⁾			(-)**	(-)**	(-)**	(-)**	(+)*	(+)**
C2			(+)*		(-)**	(-)**		(+)*
C3				(-)**	(-)**	(-)**		
C4	(-) ⁰				(-)**	(-)**	(+)*	

⁽¹⁾ Contrastes: C1: mata vs eucalipto; C2: sem irrigação vs irrigados; C3: irrigado vs fertirrigados; C4: fertirrigado vs fertirrigados com efluente. ⁰, * e ** contrastes significativos a 10, 5 e 1 %, respectivamente. Sinais (+) e (-) indicam, respectivamente, relação de superioridade ou inferioridade das médias dos tratamentos comparados no respectivo contraste, comparando-se o primeiro com o segundo termo do contraste.

Quando comparados somente os tratamentos sob eucalipto, observa-se que a irrigação leva à obtenção de menores teores de Ca²⁺, Mg²⁺ e K⁺, quando comparado com o tratamento sem irrigação, o que pode ser resultado da lixiviação desses nutrientes no perfil, lavando os nutrientes da camada avaliada (0 – 5 cm), ou a maior disponibilidade de água no solo pode ter favorecido o transporte destes cátions, aumentando sua absorção pelas plantas, reduzindo assim os teores obtidos na análise. Entretanto, o contraste C2 não indicou significância nessa comparação para Ca²⁺ e K⁺, o que pode ser associado à diluição dos outros tratamentos na resposta do contraste. Para o Mg²⁺ tal contraste mostrou-se significativo e confirma a hipótese acima, já que a ausência do nutriente no T3 e T4, e a baixa concentração de Mg²⁺ no efluente não foram suficientes para promover incrementos de seus teores no solo.

Diferenças significativas quanto ao Ca²⁺ não foram verificadas entre os tratamentos avaliados, resultado não esperado dada a elevada concentração desse nutriente no efluente aplicado (Quadro 2). Provavelmente a inexistência de diferenças esteja relacionada à razoável fertilidade natural do solo preexistente aos tratamentos, que pode ser confirmado pelos teores de Ca no solo sob mata nativa. A alta concentração de Na⁺ na solução do solo decorrente da adição de efluentes também pode ser considerada, uma vez que pode, por efeito de massa, ter promovido o deslocamento do Ca²⁺ impedido seu acesso aos sítios de adsorção.

Nos tratamentos que receberam fertirrigação T4 e T5 houve incremento nos teores de K^+ . Os incrementos de nutrientes podem ser associados às ofertas constantes de K^+ nas adubações efetuadas com as fertirrigações.

Os incrementos de Na^+ foram expressivos com a aplicação do efluente, que também proporcionou incremento no pH do solo, atingindo valor médio de 6,02, dentro da faixa ótima para a disponibilidade da maioria dos nutrientes e menor atividade do alumínio trocável.

Como indicado previamente, o efeito da adição do efluente incrementou de forma considerável os teores de Na^+ no complexo de troca, o que elevou significativamente sua participação na CTC do solo, conforme indicado pelo valor médio de PST, que atingiu 11,68 %. Situação semelhante foi verificada por Santos (2004), que observou incrementos na PST de solo que recebeu efluente de esgoto urbano, sendo diagnosticado como consequência, aumento na dispersão de argilas.

Tradicionalmente tem-se considerado que uma PST superior a 15 % afeta as propriedades estruturais e hidráulicas do solo (Richards, 1954). Ainda que tal valor não tenha sido atingido no presente estudo, a área merece um acompanhamento, uma vez que, como já indicado, foram diagnosticados alguns indícios de dispersão e efeitos sobre a estrutura. No entanto, generalizações considerando um único valor quando se pretende diagnosticar solos afetados por sais, como sugerido pelo limite de referência proposto no trabalho clássico de Richards (1954), são sabidamente não adequadas dada a diversidade de solos existentes. Freire et al. (2003) sugerem o estudo individual de cada solo e da água disponível para ser aplicada antes de conclusões generalizadas.

A aplicação do efluente proporcionou alterações significativas no extrato da pasta saturada (EPS) (Quadro 6). A água residuária proporcionou incremento nos valores de pH, Na^+ , RAS e condutividade elétrica (CE), reflexo direto das características químicas do efluente (Quadro 2). A não tão pronunciada CE e elevada RAS verificada no solo que recebeu efluente (T5) é preocupante, tendo em vista que reflete uma baixa concentração de sais associada com altos teores de Na^+ em solução, o que incrementa a atividade deste cátion, expandindo assim a dupla camada difusa, e favorecendo os fenômenos de dispersão. Além disso, um possível efeito sobre as plantas não pode ser descartado, muito embora, não se tenha verificado qualquer indício de algum efeito desta natureza sobre o eucalipto cultivado na área por seis anos, mas que pode ter efeito danoso para as mudas do próximo plantio, visto a maior sensibilidade de indivíduos mais jovens.

Quadro 6 – Natureza química do extrato da pasta saturada dos solos em reposta aos tratamentos avaliados

TRATAMENTOS	pH	Ca	Mg	K	Na	RAS	CE
		----- mg L ⁻¹ -----					dS m ⁻¹
Mata (T1)	4,2	149,9	32,3	35,0	10,7	0,21	0,9
Sem irrigação (T2)	5,1	56,8	18,2	17,7	8,3	0,25	0,4
Irrigação com água (T3)	4,6	59,7	13,8	11,7	11,7	0,35	0,4
Fertirrigação (T4)	4,6	84,5	25,7	35,7	10,7	0,26	0,6
Efluente (T5)	6,5	37,5	13,8	23,0	300,0	10,60	1,2
C1 ⁽¹⁾	(-)**	(+)**	(+)**	(+)**	(-)**	(-)**	(+)*
C2				(-)**	(-)**	(-)**	(-)**
C3	(-)**			(-)**	(-)**	(-)**	(-)**
C4	(-)**	(+)*	(+)*	(+)**	(-)**	(-)**	(-)**

⁽¹⁾ Contrastes: C1: mata vs eucalipto; C2: sem irrigação vs irrigados; C3: irrigado vs fertirrigados; C4: fertirrigado vs fertirrigados com efluente. ⁰, * e ** contrastes significativos a 10, 5 e 1 %, respectivamente. n.s: indicam contrastes não significativos. Sinais (+) e (-) indicam, respectivamente, relação de superioridade ou inferioridade das médias dos tratamentos comparados no respectivo contraste, comparando-se o primeiro com o segundo termo do contraste.

Merecem destaque os teores de Ca²⁺ e Mg²⁺ no EPS verificados no tratamento controle (mata, T1 no Quadro 6), bem superior aos demais tratamentos, não refletindo os teores trocáveis verificados no solo (Quadro 5). Supõe-se que nessa área predominam formas mais solúveis do que nas áreas cultivadas com eucalipto, em consonância com ambientes naturais de vegetação clímax, onde os ganhos de produtividade são reduzidos. Nas áreas de eucalipto, a extração de nutrientes é mais intensa, reduzindo os teores de formas mais prontamente assimiláveis como essas. No caso desses cátions no EPS da área que recebeu efluente (T5), a redução verificada nos teores em relação aos demais tratamentos se justifica pela substituição do Ca²⁺ e Mg²⁺ pelo Na⁺ adicionado via água residuária, que, por efeito de massa, desloca os cátions bivalentes da solução do solo.

O potencial de salinização do efluente é evidenciado na análise dos valores de Na⁺, CE e RAS obtidos no EPS da área irrigada com efluente (T5). Os teores alcançados deste cátion no extrato são expressivos, determinando os valores de CE obtidos e elevando com grande discrepância a RAS. Enquanto a CE de T5 apenas dobra em relação ao tratamento fertirrigado (T4), a RAS é mais que 40 vezes superior ao mesmo tratamento. Esse dado é preocupante e merece atenção por parte dos gestores da empresa, uma vez que configura um quadro de elevada RAS associada a uma CE intermediária, o que pode proporcionar um cenário futuro

de impactos negativos sobre a qualidade física do solo, afetando a relação entre os fenômenos de floculação e dispersão. Ainda que os valores de ADA obtidos não tenham indicado tal situação (Quadro 4), os dados do EPS bem como os indícios levantados pelos valores de ID apontam para essa possibilidade.

Uma recomendação que poderia ser avaliada para evitar futuros danos à estrutura dos solos que tem recebido o efluente poderia ser a aplicação de Ca^{2+} e Mg^{2+} juntamente com a água residuária, ou mesmo a prática da gessagem previamente ao período chuvoso. Desta forma, seriam minimizados os efeitos do Na^+ em solução, reduzindo os valores de RAS e adicionando cátions mais flocculantes ao solo. Incrementar os valores de cátions bivalentes no solo com este propósito encontra respaldo em trabalhos como o de Lado et al. (2005), que ao aplicarem efluente de esgoto urbano em solos de textura contrastante, verificaram dispersão de argila apenas no arenoso, atribuindo tal diferença aos maiores teores de Ca trocável presente no solo argiloso que era rico em CaCO_3 (10%).

Os tratamentos com cultivo de eucalipto proporcionaram a obtenção de menores valores (Figura 2) de resistência do solo à penetração (RP) que a área controle (T1), o que pode ser associado à subsolagem no momento do plantio, como já comentado. Considerando o momento da avaliação, nota-se que o fator umidade foi o principal controlador da RP, já que solos que apresentaram maior umidade apresentaram menor resistência e vice-versa. Desta forma, além do efeito da subsolagem, a maior RP diagnosticada no solo sob mata está também diretamente relacionada à menor umidade verificada em T1. Da mesma forma, atribui-se como causa da menor RP observada no tratamento fertirrigado, o maior teor de água presente em T4 no momento da utilização do penetrômetro. Neste contexto, considerando o intervalo de tempo dos tratamentos adotados, não se verificaram efeitos da aplicação de efluentes sobre a resistência à penetração. Efeitos indiretos de sua aplicação, por sua vez, podem ser apenas relacionados à eventual umidade proporcionada por esses resíduos líquidos.

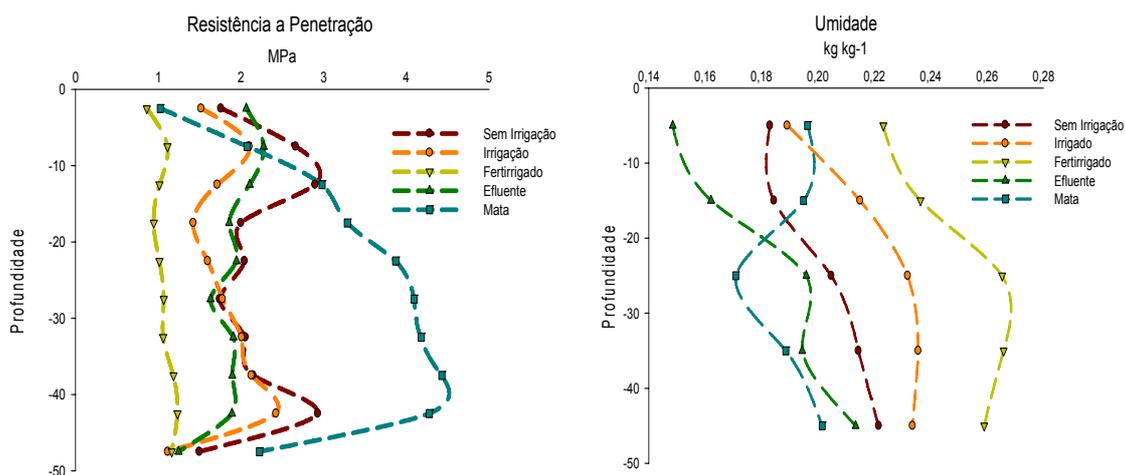


Figura 2 – Resistência à penetração e umidade do solo no momento de sua avaliação em condições de campo e em resposta aos tratamentos avaliados.

Outro indicador avaliado foi o intervalo hídrico ótimo (IHO), considerado por alguns autores como o mais indicado no estudo de alterações das propriedades físicas do solo, por integrar em uma mesma avaliação os efeitos da densidade, aeração, resistência à penetração e retenção de água no solo sobre o desenvolvimento das plantas (Tormena et al., 1998; Reichert et al., 2003; Leão et al., 2004).

A análise dos dados obtidos indicou redução expressiva do IHO com o cultivo de florestas plantadas (Figura 3). Na mata (T1), verifica-se ampla faixa de umidade adequada ao crescimento das plantas, o que foi reduzido nos demais tratamentos, em especial, nas áreas sem irrigação, irrigada e com efluente. No tratamento com fertirrigação (T4), a faixa de IHO foi menos alterada com a retirada da vegetação nativa. Considerando a densidade do solo crítica (Dsc), ou seja, valor que determina o final do IHO, não foi verificado grande diferença em função dos tratamentos avaliados. Os valores de Dsc foram de 1,50; 1,50; 1,53; 1,44 e 1,46 g cm⁻³ para os tratamentos T1, T2, T3, T4 e T5, respectivamente.

O principal controlador do IHO em todos os tratamentos foi a água disponível, intervalo entre as umidades associadas à capacidade de campo e ao ponto de murcha permanente. Enquanto a porosidade de aeração praticamente não influenciou na definição do intervalo, a resistência à penetração de 2 MPa afetou o IHO somente a partir de valores de Ds entre 1,3 e 1,4 g cm⁻³.

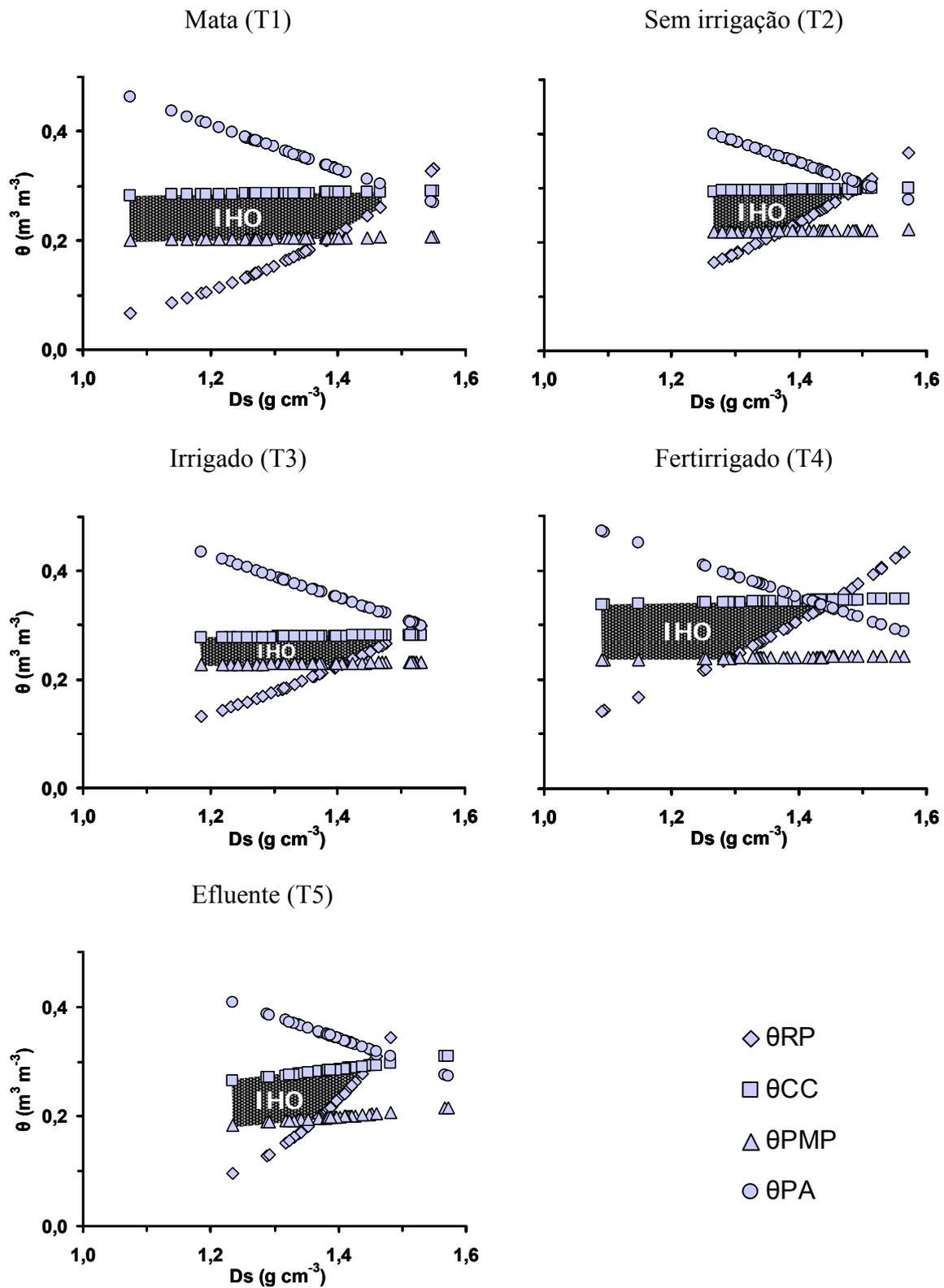


Figura 3 – Intervalo hídrico ótimo (IHO) considerando a densidade do solo (D_s) e as umidades na capacidade de campo (θ_{CC} ; $\psi = -0,01$ MPa), ponto de murcha permanente (θ_{PMP} ; $\psi = -1,5$ MPa), porosidade de aeração mínima de 10 % (θ_{PA}) e resistência à penetração de 2,0 MPa (θ_{RP}), nos tratamentos avaliados.

CONCLUSÕES

1 - A disposição superficial do efluente de celulose utilizado incrementa a dispersão de argilas, dada à sua elevada concentração de sódio e baixa condutividade elétrica no complexo de troca e na solução do solo.

2 – As alterações decorrentes da dispersão verificada sobre a permeabilidade e a densidade do solo não são expressivas mesmo após todo um ciclo a cultura do eucalipto, mas para usos em um maior intervalo de tempo, recomenda-se o devido acompanhamento, via monitoramento, da qualidade do solo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Almeida Neto, O. B. Dispersão da argila e condutividade hidráulica em solos com diferentes mineralogias, lixiviados com soluções salino-sódicas Viçosa: UFV, 2007. 83p. (Tese de Doutorado).
- Bhardwaj, A. K.; Goldstein, D.; Azenkot, A.; Levy, G.J. Irrigation with treated wastewater under two different irrigation methods: Effects on hydraulic conductivity of a clay soil. *Geoderma*, v.140, p.199–206, 2007.
- Cavallet, L. E.; Lucchesi, L. A. C.; Moraes, A.; Schimidt, E.; Perondi, M.A.; Fonseca, R.A. Melhoria da fertilidade do solo decorrentes da adição de água residuária da indústria de enzimas *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.10, p.724–729, 2006.
- Defelipo, B. V.; Ribeiro, A. C. Análise química do solo. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, 1981. 17p. (Boletim Extensão, 29).
- EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Manual de métodos de análise de solo. 2.ed. Rio de Janeiro, Centro Nacional de Pesquisa de Solos, 1997. 212p.
- Feigin, A.; Ravina, I.; Shalhevet, J. Irrigation with treated sewage effluent: management for environmental protection. Berlin: Springer-Verlag, 1991. 224p.
- Fonseca, A. F.; Herpin, U.; Paula, A. M.; Victória, R. L.; Melfi, A. J. Agricultural use of treated sewage effluents: agronomic and environmental implications and perspectives for Brazil. *Scientia Agricola*, v.64, p.194-209, 2007.
- Ferreira, P. A. Drenagem de terras agrícolas. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, 1999. 187p.
- Freire, M. B. G. S.; Ruiz, H. A.; Ribeiro, M. R.; Ferreira, P. A.; V. H. Alvarez V.; Freire, F.J. Estimativa do risco de sodificação de solos de Pernambuco pelo uso de águas salinas *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 7, p.45-52, 2003.
- Gloaguen, T. V.; Forti, M. C.; Lucas, Y.; Montes, C. R.; Gonçalves, R. A. B.; Herpin, U.; Melfi, A. J. Soil solution chemistry of a Brazilian Oxisol irrigated with treated sewage effluent. *Agricultural Water Management*, v.88, p.119-131, 2007.
- Heidarpour, M.; Mostafazadeh-Fard, B.; Koupai, J. A.; Malekian, R. The effects of treated wastewater on soil chemical properties using subsurface and surface irrigation methods. *Agricultural Water Management*, v.90, p.87-94, 2007.
- Kemper, W. D.; Chepil, W. S. Size distribution of aggregates. In: BLACK, C.A. (ed.) *Methods of soil analysis*. Madison, American Society of Agronomy, 1965. p.449-510.

- Lado, M.; Ben-Hur, M.; Assouline, S. Effects of effluent irrigation on seal formation, infiltration, and soil loss during rainfall. *Soil Science Society of America Journal*, v.69, p.1432–1439, 2005.
- Leão, T. P.; Silva, A. P. A simplified Excel[®] algorithm from estimating the least limiting water range of soils. *Scientia Agricola.*, v.61, p.649-654, 2004.
- Leão, T. P.; Silva, A. P.; Macedo, M. C. M.; Imhoff, S.; Euclides, V.P.B. Intervalo hídrico ótimo na avaliação de sistemas de pastejo contínuo e rotacionado. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.28, p.415-423, 2004.
- Levy, G. J.; Mamedov, A. I.; Goldstein, D. Sodicity and water quality effects on slaking of aggregates from semi-arid soils. *Soil Science*, v.168, p.552-562, 2003.
- Reichert, J. M.; REINERT D. J.; BRAIDA, J. A. Manejo, qualidade do solo e sustentabilidade: condições físicas do solo agrícola. XXIX Congresso Brasileiro de Ciências do Solo, 29, 2003, Ribeirão Preto. CD-ROM. Sociedade Brasileira de Ciências do Solo. (Palestras), 2003.
- Reynolds, W. D.; Vieira, S. R.; Topp, G. C. An assessment of the single-head analysis for the constant head well permeameter. *Canadian Journal Soil Science*, v.72, p.489-501, 1992.
- Rezende, A. A. P. Fertirrigação do eucalipto com efluente tratado de fábrica de celulose kraft branqueada. UFV, 2003. 160p. (Tese de Doutorado).
- Richards, L. A. *Diagnosis and improvement of saline and alkali soils*. Washington D.C.: US Department of Agriculture, 1954.160p.
- Ruiz, H. A. Dispersão física do solo para análise granulométrica por agitação lenta. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 30., 2005, Recife - PE. CD-ROM. Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2005a.
- Ruiz, H. A. Incremento da exatidão da análise granulométrica do solo por meio da coleta da suspensão (silte + argila). *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.29, p.297-300, 2005b
- Santos, A. P. R. Efeito da irrigação com efluente de esgoto tratado, rico em sódio, em propriedades químicas e físicas de um Argissolo Vermelho distrófico cultivado com capim-Tifton 85, ESALQ: Piracicaba, 2004. 79p. (Dissertação de Mestrado).
- Silva, G. G. C. Nutrição, Crescimento e sua modelagem em povoamento de eucalipto em resposta à disponibilidade de água e nutrientes, UFV: Viçosa, 2006. 102 p. (Tese de Doutorado)
- Smith, C. J.; Bond, W.J. Losses of nitrogen from an effluent-irrigated plantation. *Australian Journal of Soil Research*, v.37, p.371-389, 1999.

- Sousa, J. T.; Ceballos, B. S. O; Henrique, I.N.; Dantas, J.P.; Lima, S.M.S. Reuso de água residuária na produção de pimentão (*Capsicum annuum* L.) Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v.10, p.89-96, 2006.
- Statsoft. Statistica®: Statistica programa for Windows, version 7.0, Statsoft, Inc. Tulsa, EUA. 1999.
- Stolf, R.; Fernandes, J.; Furlani, U. L. Recomendações para uso do penetrômetro de impacto modelo IAA/PLANALSUCAR-STOLF. 1983. p.1-9. (Série Penetrômetro de Impacto. Boletim Técnico, 1).
- Tormena, C. A.; Silva, A. P.; Libardi, P. L. Caracterização do intervalo hídrico ótimo de um Latossolo Roxo sob plantio direto. Revista Brasileira de Ciência do Solo, v.22, p.573-581, 1998.
- Yeomans, J. C.; Bremner, J. M. A rapid and precise method for routine determination of organic carbon in soil. Communications in Soil Science and Plant Analysis, v.19, p.1467-1476, 1988.

CAPÍTULO 2

**QUALIDADE FÍSICA E QUÍMICA DO SOLO E DE PERCOLADOS
APÓS ADIÇÃO DE EFLUENTES DE UMA INDÚSTRIA DE CELULOSE**

RESUMO

Apesar dos potenciais benefícios do aproveitamento de efluentes na agricultura, já largamente difundidos na literatura, a presença de alguns constituintes químicos podem comprometer a qualidade das águas residuárias de diferentes empreendimentos econômicos. Um desses constituintes é o sódio, que pode apresentar efeito sobre os fatores que governam os fenômenos de agregação e dispersão das argilas, afetando por consequência, a permeabilidade e dinâmica da água e ar do solo. Diante do exposto, o presente estudo teve como objetivo avaliar os efeitos da aplicação superficial de efluentes tratados de uma indústria de celulose, que utiliza o processo Kraft de polpação e branqueamento, sobre a qualidade física e química em profundidade de solos, a condutividade hidráulica (K_0) e as características da solução percolada no perfil. O trabalho foi conduzido a partir de dois ensaios de laboratório (ensaios I e II), utilizando-se em ambos os casos, amostras de três classes de solos predominantes no município de Belo Oriente, MG: Neossolo Flúvico (RY), Cambissolo Háptico (CX) e Latossolo Amarelo (LA). No ensaio I, empregaram-se colunas de PVC preenchidas com amostras deformadas dos solos e, no ensaio II, anéis volumétricos contendo amostras indeformadas dos mesmos solos. No primeiro ensaio, os tratamentos foram constituídos por quatro líquidos aplicados na parte superior das colunas em volumes equivalentes a um volume de poros de cada solo: efluente; efluente+água; água; água+água. Ao final do ensaio as colunas foram desmontadas e divididas em três partes (anéis), que foram analisadas separadamente quanto à textura, análise química de rotina, argila dispersa em água (ADA), índice de dispersão (ID) e composição do extrato da pasta saturada (EPS). No EPS foram determinados os teores de Ca, Mg, K e Na, pH, condutividade elétrica (CE) e calculado a razão de adsorção de sódio (RAS). Nos percolados foram determinados os teores de Ca, Mg, Na, K, P, Cd, Cr, Pb, Ni, Zn, Mn, Al, além do pH e CE. No ensaio II foi avaliado o efeito da aplicação de dois líquidos percolantes sobre a condutividade hidráulica (K_0): água deionizada e efluente. A determinação da K_0 foi efetuada semanalmente durante cinco semanas e na mesma amostra. Ao final de todas essas avaliações, as amostras de solo foram analisadas quanto à densidade do solo, argila dispersa em água, macroporosidade, microporosidade e porosidade total e equivalente de umidade. Os resultados obtidos no ensaio de colunas indicaram que a adição do efluente incrementou o teor de Na no percolado, no EPS e no complexo sortivo do solo. O efluente aplicado também proporcionou incrementos do pH em todas as camadas de solo da coluna e da CE no EPS. A adição de água após a aplicação do efluente contribuiu para reduzir os teores de Na no sistema e, conseqüentemente, os valores de

percentagem de sódio trocável (PST), CE e RAS, embora não a valores considerados ideais. A adição do efluente incrementou a dispersão de argilas somente na camada superficial do LA e CX, coincidindo com os solos de menor ID natural. O solo RY não apresentou dispersão significativa com a adição do efluente e nos seus percolados foram obtidos maiores teores de cátions, o que foi associado à sua granulometria mais grosseira e menor CTC. Houve redução da K_0 somente a partir da quarta semana de aplicação do efluente no LA. Nas demais propriedades físicas avaliadas não foram verificados efeitos da aplicação do efluente. A partir dos resultados obtidos em nos dois ensaios, considera-se que a aplicação de efluentes de indústria de celulose no solo apresenta potencial de comprometer as características físico-químicas de solos, sendo recomendado para seu uso técnicas de manejo mais refinadas e o acompanhamento de um programa de monitoramento.

Palavras chaves: reúso da água, águas residuárias, permeabilidade do solo, extrato da pasta saturada.

ABSTRACT

ALMEIDA, Ivan Carlos Carreiro, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, July 2008.
Physical and chemical quality of soil and leaching after the addition of effluents from the cellulose industry. Advisor: Raphael Bragança Alves Fernandes. Co-advisors: Hugo Alberto Ruiz and Júlio César Lima Neves.

Despite the potential benefits of the use of effluents in agriculture, very few works are published in relation to the presence of chemical constituents which can compromise residual water quality from different industries. One of these constituents is sodium, which can affect the factors which govern the aggregation and clay dispersion phenomena, therefore affecting the permeability and water and air dynamics of the soil. The objective of the present study was to evaluate the effects of the surface application of treated effluents from a cellulose plant which uses the Kraft process of pulping and whitening, on the physical and chemical quality of subterranean soils hydraulic conductivity (K_0) and the characteristics of the leaching solution. The work was performed with two laboratory tests (tests I and II), using in both cases, three soils predominant in the municipality of Belo Horizonte, MG: Fluvic Neossol (RY), Haplic Cambisol (CX) and Yellow Latosol (LA). In test I, columns of PVC were filled with deformed soil samples and, in test II, volumetric rings were used containing undeformed samples of the same soils. In the first test, the treatments were constituted of four liquids applied to the upper section of the columns in volumes equivalent to the pore volume of each soil: effluent, effluent+water, water, water+water. At the end of the tests, the columns were disassembled and divided into three parts (rings), which were separately analyzed for texture, routine chemical analyses, water-dispersible clay (WDC), dispersion index (DI) and composition of the saturated paste extract (SPE). In the SPE, levels of Ca, Mg, K and Na were measured along with pH, electrical conductivity (EC) and the sodium adsorption ratio (SAR) was calculated. From the leaching, concentrations of Ca, Mg, Na, K, P, Cd, Cr, Pb, Ni, Zn, Mn and Al were measured, along with pH and EC. In test II, the affect of the application of the two liquids (deionized water and effluent) on the hydraulic conductivity (K_0) of the leaching was determined. Determination of K_0 was performed weekly for a period of five weeks on the same sample. At the end of the evaluation period, the soil samples were analyzed for soil density, clay dispersion in water, macroporosity, microporosity, total porosity and equivalent moisture content. The obtained results from the tests in the columns indicated that the addition of the effluent increased the concentration of Na in the leaching, in the EPS and in the sortive complex of the soil. The applied effluent also caused increase in pH

in all soil levels of the column as well as the EC in the SPE. The addition of water after the application of the effluent contributed to reduce the levels of Na in the system and, consequently, the values of exchangeable sodium percentage (ESP), EC and SAR, however, the ideal levels were not reached. The addition of the effluent also caused an increase in the dispersion of clay in the upper layer of LA and CX, coinciding with the soils of lesser natural DI. The RY soil showed no significant dispersion with the addition of the effluent and in its leaching greater cation concentrations were found, associated with the greater particle size and lesser CTC. Reduction of the K_0 was reported after four weeks of effluent application in the LA. All other physical properties evaluated showed no effect from the application of the effluent. From the results obtained in the two tests, it was determined that the application of effluents from the cellulose industry on soil presented potential to compromise the physico-chemical characteristics of soils, recommending careful management techniques accompanied by a soil monitoring program.

Keywords: water reuse, residual waters, soil permeability, saturated paste extract.

INTRODUÇÃO

O emprego de águas residuárias na irrigação pode reduzir a necessidade de fertilização das culturas e o nível requerido de tratamento do efluente e, conseqüentemente, os custos envolvidos nestes processos. Esses benefícios são decorrentes, respectivamente, do fato de a maior parte das águas residuárias apresentarem em sua constituição algum nutriente para as plantas e à capacidade de o solo e as culturas de se comportarem como biofiltros naturais (Haruvy, 1997).

A indústria nacional de celulose encontra-se em expansão dada a importância que o produto tem adquirido na balança comercial brasileira. O incremento decorrente da produção tem gerado volumes expressivos de efluentes, que são tratados e lançados nos corpos d'água, como exige a legislação ambiental pertinente.

A disposição final de efluentes no solo, além de operar como um processo adicional aos sistemas de tratamentos existentes, reduzindo ainda mais a carga de efluente lançada no corpo d'água receptor, pode constituir também uma fonte suplementar de nutrientes e, principalmente, de água para as plantas (Rezende, 2003). Isto pode ser muito interessante para empreendimentos que geram elevado volume de águas residuárias e que, ao tratarem seus efluentes e os lançarem nos cursos d'água, não conseguem tirar proveito econômico do resíduo final produzido. Recentemente, tem se intensificado o número de estudos acerca da aplicação no solo de águas residuárias (Santos, 2004; Lado et al., 2005; Cavallet et al., 2006; Sousa et al., 2006; Fonseca et al., 2007, Gloaguen et al., 2007; Heidarpour et al., 2007). Em sua maioria, esses trabalhos visam o reuso desses efluentes em atividades agrosilvopastoris, sendo mais comum o uso de águas provenientes de esgotos urbanos e industriais tratados.

Estudos acerca dos efeitos do reuso de efluentes de indústria de celulose ainda são poucos difundidos. Rezende et al. (2000), em revisão sobre a aplicação de efluentes de indústria de celulose e papel no solo, destacam que alguns artigos chegaram a ser publicados na década de 50 do século passado, muito embora a maior parte das experiências relatadas seja da década de 80 subsequente, destacando ser pequeno o número de artigos publicados mais recentemente.

Entretanto, apesar dos benefícios concretos com o aproveitamento de efluentes na agricultura, largamente difundido na literatura, a presença de alguns constituintes químicos, em especial o Na, podem comprometer a qualidade das águas residuárias das empresas do setor. Altas concentrações de Na em águas de irrigação são freqüentemente associadas a eventuais deteriorações na estrutura dos solos, aumentando a dispersão de argilas, afetando o

sistema de poros e contribuindo para alterações na infiltração e condutividade hidráulica (K_0) deste meio poroso, favorecendo o selamento da camada superficial, escoamento superficial e problemas de erosão (Bhardwaj et al., 2007).

A condutividade hidráulica é uma das propriedades físicas do solo mais importantes na determinação quantitativa e qualitativa do movimento da água (Pereira et al., 2002) e índice muito relevante na avaliação da qualidade do solo. O decréscimo da capacidade de condução de água no solo em função da aplicação de efluentes está normalmente associado ao uso de águas com elevados teores de Na, associados a baixas concentrações de Ca e, ou, de outros sais solúveis. Ayers e Westcot (1991) afirmam que águas que apresentam baixa condutividade elétrica e alta razão de adsorção de sódio (RAS) devem ser utilizadas com cuidado para a irrigação, uma vez que favorecem a dispersão de argilas, com conseqüente efeito sobre as propriedades físico-hídricas dos solos. Segundo Freire (2001) e Kaledhonkar et al. (2006), a condutividade hidráulica decresce com o aumento da RAS, sendo os efeitos mais pronunciados quando a água de irrigação apresenta baixa condutividade elétrica (CE). Esses autores, em revisão de vários outros trabalhos, destacam que os efeitos da RAS e CE sobre a permeabilidade têm sido observados em solos de diferentes texturas, relação Ca:Mg e mineralogia da fração argila e que, tanto a dispersão dos colóides como a expansão de algumas argilas tendem a reduzir a permeabilidade do solo.

Assim, os fatores da qualidade da água que mais comumente podem influenciar na infiltração da água no solo são os teores totais de sais e o teor de Na em relação aos teores de Ca e Mg. Alta salinidade aumenta a velocidade de infiltração, enquanto baixa salinidade, ou proporção alta de sódio em relação ao cálcio e magnésio, diminui. Ambos os fatores (salinidade e proporção de sódio) podem atuar simultaneamente (Maia et. al, 1998).

Halliwell et al. (2001) em revisão sobre o assunto aborda os efeitos do excesso de Na em águas residuárias e suas implicações para seu uso em sistemas irrigados, destacando a importância de estudos prévios para validação da relação riscos/benefícios desta iniciativa.

Além do Na, a possível presença de alguns outros elementos potencialmente tóxicos devem ser considerados neste tipo de estudo, uma vez que o uso intermitente dessa água residuária pode proporcionar a sua acumulação e problemas futuros à qualidade do solo, bem como e, principalmente, a contaminação de águas subterrâneas.

Em estudos diversos que abordam o tema salinidade do solo, além das variáveis inerentes ao efluente, algumas determinações no solo também merecem destaque. Dentre estas, destacam-se as avaliações de variáveis relacionadas à possível dispersão de argilas e dados obtidos no extrato da pasta saturada também têm sido considerados relevantes na

identificação de eventuais problemas e mesmo na definição de técnicas de manejo a serem adotadas (Raij, 1991). Os valores obtidos por essas determinações podem influenciar diretamente no comportamento das propriedades físicas do solo, principalmente no que se refere à dispersão de argilas.

Para melhor avaliação dos efeitos da aplicação de efluentes sobre as características físicas do solo, uma opção em estudos realizados em laboratório tem sido o uso de colunas preenchidas com solo. Esta técnica permite a coleta de percolados e também a análise posterior aos ensaios de camadas de solo, avaliando-se desta forma, o efeito em profundidade das lâminas aplicadas. Técnica essa usada por Freire et al. (2003), Rezende (2003), Guedes et al. (2006), Dikinya et al. (2006), Almeida Neto (2007), Cunha & Moraes (2007) e outros.

Diante do exposto, o presente estudo teve como objetivo avaliar os efeitos da aplicação superficial de efluentes de uma indústria de celulose que utiliza processo Kraft de polpação e branqueamento sobre a solução percolada, a qualidade física de solos em profundidade e da condutividade hidráulica do solo ao longo de sucessivas aplicações.

MATERIAL E MÉTODOS

Este trabalho foi realizado no Laboratório de Física do Solo do Departamento de Solos da Universidade Federal de Viçosa, Minas Gerais.

Para o ensaio de aplicação de efluentes foram selecionadas três classes de solo predominantes nas áreas de atuação da empresa Celulose Nipo Brasileira (CENIBRA S.A.), no município de Belo Oriente (MG): Latossolo Amarelo distrófico típico (LA), textura argilosa; Cambissolo Háptico tb distrófico típico (CX), argiloso e; Neossolo Flúvico distrófico típico (RY), franco argilo arenoso. (Quadro 1).

O trabalho foi dividido em dois ensaios: um utilizando colunas de PVC preenchidos com solo de amostras deformadas e o outro, anéis volumétricos contendo amostras indeformadas, sendo estes considerados as unidades experimentais de cada ensaio.

Quadro 1 – Características químicas e físicas dos solos estudados

SOLO	Prof. (cm)	pH (H ₂ O)	P	K	Na	Ca	Mg	Al	H+Al	CO	AG	AF	SIL	ARG
			--- mg dm ⁻³ ---	----- cmol _c dm ⁻³ -----	----- dag kg ⁻¹ -----	----- dag kg ⁻¹ -----	----- dag kg ⁻¹ -----							
CX	0-10	4,16	14,7	73	12,3	1,32	0,43	0,48	6,4	1,98	17	17	11	55
	10-20	4,12	1,5	38	3,3	0,26	0,08	0,87	5,1	1,03	14	15	12	59
	20-30	3,91	1,6	24	3,3	0,21	0,06	0,87	4,1	0,81	16	18	11	55
LA	0-10	4,03	2,7	48	4,3	0,36	0,04	1,06	7,5	1,91	23	17	2	58
	10-20	4,02	1,8	21	0,2	0,23	0,01	1,25	5,9	1,32	24	16	2	58
	20-30	4,88	1,2	15	0,2	0,22	0,01	1,35	5,7	1,10	23	16	2	59
RY	0-10	5,22	80	132	9,3	2,65	0,87	0,00	2,9	1,18	55	11	9	25
	10-20	4,89	12,4	97	2,2	1,55	0,45	0,29	4,9	1,03	50	11	11	28
	20-30	4,41	1,7	87	0,2	1,00	0,27	0,48	3,8	0,81	47	10	11	32

Solos: CX = Cambissolo Háplico tb distrófico típico; LA = Latossolo Amarelo distrófico típico; RY = Neossolo Flúvico distrófico típico. pH em água: relação 1:2,5; P, Na e K: extrator Mehlich-1; Ca, Mg, e Al: extrator KCl 1mol L⁻¹; CO: carbono orgânico, método Walkley-Black. AG, AF, SIL e ARG = areia grossa, areia fina, silte e argila, respectivamente.

O efluente utilizado no experimento para ambos os ensaios foi proveniente da indústria de celulose da CENIBRA, após passagem por uma estação de tratamento de efluentes. Para fins de sua caracterização, amostras em triplicata foram analisadas. Parte das amostras foi submetida à digestão nitroperclórica (Tedesco et al., 1995) para a determinação dos valores de P, K, Na, Ca, Mg, Zn, Cu, Fe, Mn, Cd, Cr, Pb e Ni. A partir dos teores de Na, Ca e Mg foi calculada a razão de adsorção de sódio (RAS), segundo Richards (1954). Outra parte foi utilizada para a determinação do pH e condutividade elétrica (CE). Os sólidos sedimentáveis totais foram obtidos em cone de Inhoff (APHA, 1997). A demanda biológica de oxigênio (DBO) e demanda bioquímica de oxigênio (DQO) foram obtidas segundo APHA (1997).

Ensaio I: Colunas de PVC

O experimento para avaliação dos efeitos da aplicação do efluente no solo e no percolado foi conduzido em colunas de PVC preenchidas com solo, no Laboratório de Física do Solo. Para o preenchimento das colunas, foram utilizadas amostras provenientes das camadas de 0-10, 10-20 e 20-30 cm de profundidade, de três classes de solos LA, CX e RY (Quadro 1).

Cada unidade experimental (coluna) foi constituída por três anéis de PVC, com 10 cm de diâmetro interno e 10 cm de altura cada, exceto o anel superior, que foi de 13 cm, para evitar perdas do líquido no momento da aplicação. Os anéis foram sobrepostos e vedados com cola de silicone nas uniões. Externamente, eles foram fixados com fita adesiva, para formar uma coluna de 33 cm. Na extremidade inferior da coluna foi adaptado um *cap* de PVC perfurado, uniformemente distribuídos para facilitar a saída do percolado. Após a montagem, a parede interna das colunas foi previamente parafinada de modo a evitar o escoamento preferencial do líquido percolante via parede dos tubos de PVC. Na seqüência, no primeiro centímetro da base do anel inferior adicionou-se uma camada fina de lã de vidro e; sobre esta, 1 cm de areia muito grossa (2,0-1,0 mm) previamente lavada em ácido e, a seguir, outra camada de lã de vidro.

A coluna então formada foi preenchida com solo previamente seco ao ar e, posteriormente, peneirado em malha de 4 mm. O preenchimento se deu até três centímetros da borda superior, formando uma coluna de 30 cm de altura e volume de 2,36 dm³. O preenchimento da coluna foi efetuado despejando constantemente o solo com o auxílio de um funil, e realizando-se movimentos circulares, com intuito de se reduzir ao máximo a segregação dos agregados. Após o preenchimento de cada anel da coluna, com amostras correspondentes às camadas do perfil do solo (0-10, 10-20 e 20-30 cm), foram aplicadas três batidas, deixando a coluna cair, na vertical, de uma altura de aproximadamente cinco centímetros para a melhor acomodação do material. Seguidamente a superfície do solo foi coberta com uma camada de lã de vidro, a fim de evitar distúrbios na seção de infiltração do solo com a aplicação dos líquidos.

Previamente as aplicações dos tratamentos, as colunas com solos foram saturadas com água deionizada, de maneira ascendente, para garantir a expulsão de todo o ar presente em seu interior, evitando assim, dificuldades e caminhos preferenciais na descida do líquido aplicado. As colunas foram vedadas com plástico no topo e na base para minimizar eventuais perdas por evaporação, sendo somente retiradas as vedações nos momentos de aplicação.

O experimento foi formado por um fatorial 3 x 4, sendo três classes de solo e quatro tratamentos, com três repetições, em um delineamento inteiramente casualizado (DIC). Portanto, para cada classe de solo, foram montadas doze colunas que, considerando os três anéis de cada uma, comporam 36 unidades experimentais de avaliação. Os tratamentos consistiram da aplicação semanal dos líquidos (efluente ou água deionizada), com ou sem aplicação adicional de água deionizada entre as aplicações dos líquidos: T1 = efluente + aplicação adicional de água deionizada; T2 = efluente; T3 = água deionizada + aplicação adicional de água deionizada e; T4 = água deionizada. A aplicação de água adicional entre as aplicações semanais (T1 e T3) visou simular eventuais eventos pluviométricos que podem ocorrer no campo e desta forma influenciar no efeito do efluente.

As aplicações de água ou efluente foram efetuadas uma vez por semana, durante cinco semanas. Cada percolação foi calculada de forma a adicionar um volume de líquido equivalente a um volume de poros da amostra de solo no interior da coluna, o que permitiu a aplicação de um volume semanal de 1,285 (164 mm); 1,255 (160 mm) e 1,145 (146 mm) dm³ de líquido respectivamente, para os solos CX, LA e RY.

A aplicação de água adicional, quando cabia ao tratamento, foi efetuada três dias após a adição do líquido inicial, seja ele água ou efluente.

Após as aplicações, o líquido percolado foi coletado e imediatamente foram analisados nos extratos obtidos os valores de pH e de condutividade elétrica (CE). O restante do percolado foi armazenados sob refrigeração para posterior determinação dos teores de Ca, Mg, P, K, Na, Zn, Cd, Cu, Ni, Pb, Cr, Mn e Fe em equipamento ICP-OES.

Uma vez finalizadas as percolações, as colunas foram seccionadas a 10 e 20 cm de profundidade. As amostras foram individualizadas formando-se subamostras correspondentes às profundidades de 0-10 cm, 10-20 cm e 20-30 cm. Cada subamostra foi seca à sombra e, posteriormente submetida a análises físicas, químicas e ao preparo do extrato da pasta saturada.

Nas amostras provenientes dos anéis da coluna foi promovida a caracterização química de rotina do solo (Defelipo e Ribeiro, 1981); e a determinação da textura, realizada pelo método da pipeta e do peneiramento (EMBRAPA, 1997, com modificações de Ruiz, 2005a, 2005b); e da argila dispersa em água (ADA) e índice de dispersão (ID), contidos em EMBRAPA (1997). No restante dessas mesmas amostras foi obtido o extrato da pasta saturada, no qual foram determinados o pH, a CE, os teores de Ca, Mg, Na, K, além do cálculo da RAS (Richards, 1954).

Na análise estatística dos resultados, os anéis das colunas de PVC preenchidos com solo foram considerados como subparcelas. A análise dos líquidos percolados coletados semanalmente foi realizada de forma semelhante, sendo que neste caso, as subparcelas foram formadas pelas semanas de coletas.

Os resultados obtidos foram submetidos à análise de variância, sendo o desdobramento das respectivas interações realizado independentemente da significância, de modo a testar os efeitos da aplicação dos efluentes, mediante os contrastes (Quadro 2). Em todas as análises estatísticas foi utilizado o software Statistica® (Statsoft, 1999).

Quadro 2 - Contrastes (C1, C2, C3) utilizados na comparação entre os diferentes tratamentos

Tratamentos	C1	C2	C3
T1 = Efluente + Água (E+A)	1		1
T2 = Efluente (E)		1	-1
T3 = Água + Água (A+A)	-1		
T4 = Água (A)		-1	

Ensaio II: Anéis Volumétricos

Para a execução do experimento foram utilizadas amostras indeformadas coletadas nas três classes de solos três classes de solos LA, CX e RY (Quadro 1). As amostras de solo, coletadas com anéis volumétricos metálicos de 5 cm de diâmetro e 5 cm de altura, correspondendo a um volume de 98,17 cm³, foram tomadas na superfície do solo. Em cada área representativa das classes de solos escolhidas foram coletados 10 anéis volumétricos. Os anéis, após a coleta, foram identificados e devidamente embalados para transporte até o Laboratório, onde toda a parte experimental foi executada.

Uma vez no laboratório, as amostras de solo dentro dos anéis cilíndricos foram acondicionadas em bandejas com água deionizada para a saturação e, posteriormente, submetidas à determinação da condutividade hidráulica (K_0) em meio saturado, utilizando-se permeâmetro de carga constante.

Na avaliação da K_0 foram utilizados dois líquidos percolantes que constituíram os dois tratamentos avaliados: água deionizada (T1) e efluente (T2) de uma indústria de celulose. Ambos os líquidos foram dispostos em frascos de Mariote momentos antes da determinação da K_0 , realizada segundo Ferreira (1999).

A determinação da condutividade hidráulica foi repetida a cada sete dias, durante cinco semanas na mesma amostra. Após cada avaliação da K_0 , as amostras eram retornadas às bandejas com água destilada a fim de mantê-las constantemente saturadas, sendo as amostras que receberam aplicação de efluente dispostas em bandejas diferentes das amostras que receberam somente água.

O ensaio foi composto pelas três classes de solo (LA, CX e RY), dois tratamentos (T1 e T2) e cinco semanas (tempo) de avaliação da K_0 , com cinco repetições. A análise estatística considerou um delineamento inteiramente casualizado (DIC), sendo a avaliação semanal considerada como parcela subdividida no tempo.

Logo após a última determinação da K_0 , os anéis contendo as amostras de solo foram submetidas ao potencial - 6 kPa para a obtenção da microporosidade (M_i). Na seqüência, as amostras foram encaminhadas à estufa de secagem. A porosidade total (PT) das amostras foi obtida com a equação $PT = 1 - D_s/D_p$, onde a densidade do solo (D_s) e densidade de partículas (D_p) foram calculadas, respectivamente, conforme o método do anel volumétrico e do balão volumétrico. A macroporosidade (M_a) foi obtida a partir da diferença entre PT e M_i . Findas essas determinações, as amostras de solo foram ainda utilizadas para as determinações de argila dispersa em água (ADA) e equivalente de umidade (EU). Todos esses procedimentos foram executados segundo recomendações de EMBRAPA (1997).

Os resultados obtidos foram submetidos à análise de variância, sendo o teste F assumido como conclusivo para a significância dos dados, exceto para o caso da avaliação da condutividade hidráulica, para a qual foram realizados desdobramentos das respectivas interações independentemente da significância, de modo a se testar os efeitos da aplicação dos tratamentos, dentro de cada solo e em cada semana de avaliação. Em todas as análises estatísticas foi utilizado o software Statistica® (Statsoft, 1999).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Características do efluente

As características químicas do efluente utilizado no experimento atestam a eficiência do tratamento executado pela empresa, estando em conformidade com os padrões de lançamento requeridos pelas normas ambientais correspondentes (Quadro 3). Teores baixos de macronutrientes como N e P são verificados, ao passo que os teores de K, Ca e Mg são bastante razoáveis. Alguns micronutrientes, como Zn, Cu Fe e Mn, foram identificados, já os

metais pesados Cd, Cr e Ni não foram encontrados no material. Somente o Pb foi detectado, embora em concentração menor que o limite definido para o lançamento de efluentes (CONAMA, 2005). Os teores de Na e o pH são altos, compatíveis com o processo de polpação da celulose, no qual são utilizados sulfeto e hidróxido de sódio. Os valores de DBO são menores que os limites estabelecidos em Minas Gerais para o lançamento, mas os valores de DQO superam a referência estadual (COPAM, 1986). Entretanto, os teores de DQO são admissíveis pelo órgão ambiental estadual, tendo em vista que correspondem a um produto final cujo tratamento apresentou redução maior que 90% da DQO original.

Considerando a composição química do efluente, nota-se que o maior problema a ele associado é o alto teor de Na. Esse componente determina os elevados valores de RAS e CE obtidos, com implicações diretas sobre sua qualidade final e seu potencial de uso em disposição sobre o solo. Os valores de RAS e CE enquadram o efluente avaliado como C₃S₃, ou seja, como de muito alto risco de sodificação (C₃) e de alto risco de salinização (S₃), segundo o diagrama do Laboratório de Salinidade dos Estados Unidos (Richards, 1954). Segundo a classificação de Ayers e Westcot (1991), o efluente seria classificado como de moderada restrição ao uso para salinização, considerando o desenvolvimento vegetal e, como de restrição severa, considerando efeitos sobre a permeabilidade do solo.

Diante do exposto, percebe-se as limitações de uso da água residuária, tendo em vista, os problemas de salinização e dispersão de argilas que o mesmo pode acarretar.

Quadro 3 - Características química do efluente da produção da indústria de celulose utilizado no experimento, proveniente da empresa CENIBRA, Belo Oriente (MG)

	N	P	K	Na	Ca	Mg	Zn	Cu	Fe	Mn
	----- mg L ⁻¹ -----									
Média	0,02	0,15	20,0	380	14,6	1,5	0,04	0,11	1,33	0,18
Limites ⁽¹⁾							5	0,5	15	1
	pH	RAS	CE	SST	Cd	Cr	Pb	Ni	DBO	DQO
			dS m ⁻¹	mL L ⁻¹ h ⁻¹	----- mg L ⁻¹ -----					
Média	7,89	25,4	1,93	0,1	< ld ⁽²⁾	< ld	0,12	< ld	2,78	164,6
Limites ⁽¹⁾	5-9 ⁽³⁾				0,2	0,5	0,5	2	60 ⁽⁴⁾	90 ⁽⁴⁾

RAS = razão de adsorção de sódio; CE = condutividade elétrica; SST = sólidos sedimentáveis totais; DBO = demanda bioquímica de oxigênio (5 dias, 20 °C); DQOs = demanda química de oxigênio (solúvel). ⁽¹⁾ Valores máximos permitidos para lançamento de efluentes segundo Resolução 357/2005 (CONAMA, 357); ⁽²⁾ inferior ao limite de detecção; ⁽³⁾ valor recomendado; ⁽⁴⁾ valores máximos permitidos para lançamento de efluentes segundo Deliberação Normativa 10/86 (COPAM, 1986).

Ensaio I: Colunas de PVC

Análise do percolado

A análise do percolado obtido das colunas preenchidas com os solos estudados indicou resultados distintos entre tratamentos para as variáveis analisadas. A magnitude e o padrão dos teores de Na no percolado ao longo das semanas de avaliação foram muito semelhantes entre os solos considerados (Figura 1). De todo o modo a aplicação do efluente incrementou ($p < 0,01$), em todas as semanas de avaliação, os teores de Na determinados, sendo que a aplicação de água adicional (T1) causou redução ($p < 0,01$) na concentração do cátion no percolado. Mesmo assim, os teores de Na no percolado foram elevados e superiores a 100 mg L^{-1} . A semelhança de resposta do teor de Na nos três solos avaliados pode ser atribuída à alta concentração do Na no efluente e à elevada lâmina aplicada. Já na terceira semana, em todos os solos analisados, o complexo de troca foi praticamente saturado, uma vez que a partir daí, os teores de Na^+ tenderam a constância.

O Latossolo Amarelo e o Cambissolo Háplico apresentaram maior capacidade de adsorção de Ca, Mg e K (Figuras 1 e 2), em comparação com o Neossolo Flúvico. As menores concentrações desses elementos no líquido percolado do LA e CX refletem sua textura mais argilosa e, por conseguinte, maior CTC, quando comparados a RY, já que os teores de MO são semelhantes nos solos estudados. Resultados semelhantes foram verificados por Melo et al. (2006), ao trabalharem com aplicação de águas residuárias em colunas preenchidas com solo, que verificaram maior fator de retardamento para cátions básicos em solo argiloso em comparação a outros dois solos de textura média e arenosa, indicando ser a textura um dos principais fatores controladores do movimento de solutos no solo.

Quanto ao K, não houve diferenças estatísticas entre tratamentos no LA. No CX, verificou-se na terceira e quarta semanas efeito dos tratamentos, com incremento nos teores com a aplicação do efluente e redução com a adição de água (T1). No RY, a situação verificada foi semelhante ao solo CX, sendo que essas diferenças começaram a ocorrer a partir da segunda semana (Figura 1).

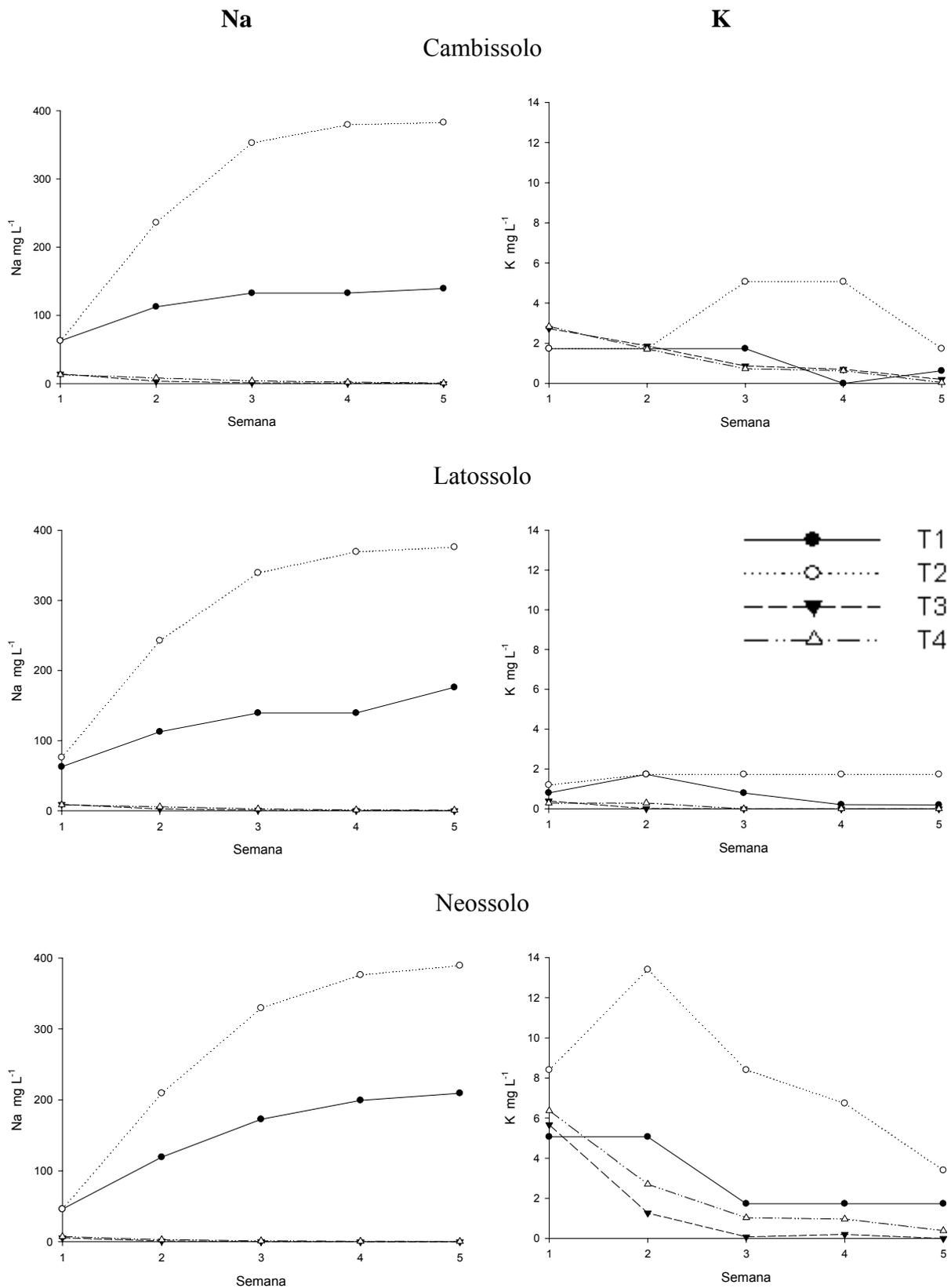


Figura 1 – Concentrações de Na e K no percolato recolhido das colunas preenchidas com os solos avaliados ao longo das 5 semanas de avaliação (T1 = efluente + água; T2 = efluente; T3 = água + água e; T4 = água).

Considerando os teores de Ca no percolado, não foram verificadas nas cinco semanas de avaliação diferenças significativas entre tratamentos no LA e CX, ou seja, a aplicação do efluente, com ou sem água adicional, não interferiu nos teores obtidos no percolado (Figura 2). No RY verificou-se que a adição do efluente incrementou os teores de Ca no percolado, sendo os mesmos reduzidos com a colocação de água adicional (Figura 2).

Os teores de Mg no percolado foram semelhantes nos diferentes tratamentos efetuados no LA, não se verificando efeito do efluente adicionado nem do tratamento com água adicional. No CX, verificaram-se a partir da segunda semana de aplicação, incrementos nos teores obtidos no percolado do tratamento com efluente (T2), que foram reduzidos a partir desta mesma semana com a aplicação de água adicional. Para o RY, em todo o período avaliado, a adição do efluente incrementou os teores de Mg no percolado, que também foram reduzidos com o tratamento com água (T1) (Figura 2).

Quanto ao pH do percolado, percebe-se para todos os solos e tratamentos tendência de elevação dos valores com o passar das semanas de avaliação (Figura 3). Possivelmente em razão do excesso de umidade na coluna de lixiviação, o que pode ter favorecido a redução de Fe e Mn pela biota do solo, consumindo H^+ do sistema, elevando assim o pH do meio (Souza et al., 2006). Isto é corroborado pelos teores de Fe (Figura 4) e Mn obtidos no percolado (dados não apresentados), que alcançaram valores expressivos e de magnitude superior inclusive ao do efluente adicionado. Considerando individualmente os solos estudados, não se verificaram diferenças estatísticas entre os tratamentos avaliados, sendo que o incremento verificado de pH foi mais expressivo no RY, de menor poder tampão, dado sua textura mais grosseira.

A CE e RAS apresentaram tendência semelhante ao do Na, denotando o papel deste cátion na determinação do comportamento dessas variáveis. Em todo o período avaliado, a aplicação do efluente incrementou os valores de CE e RAS no percolado, que foram reduzidos com a aplicação de água adicional (T1) (Figuras 3 e 4).

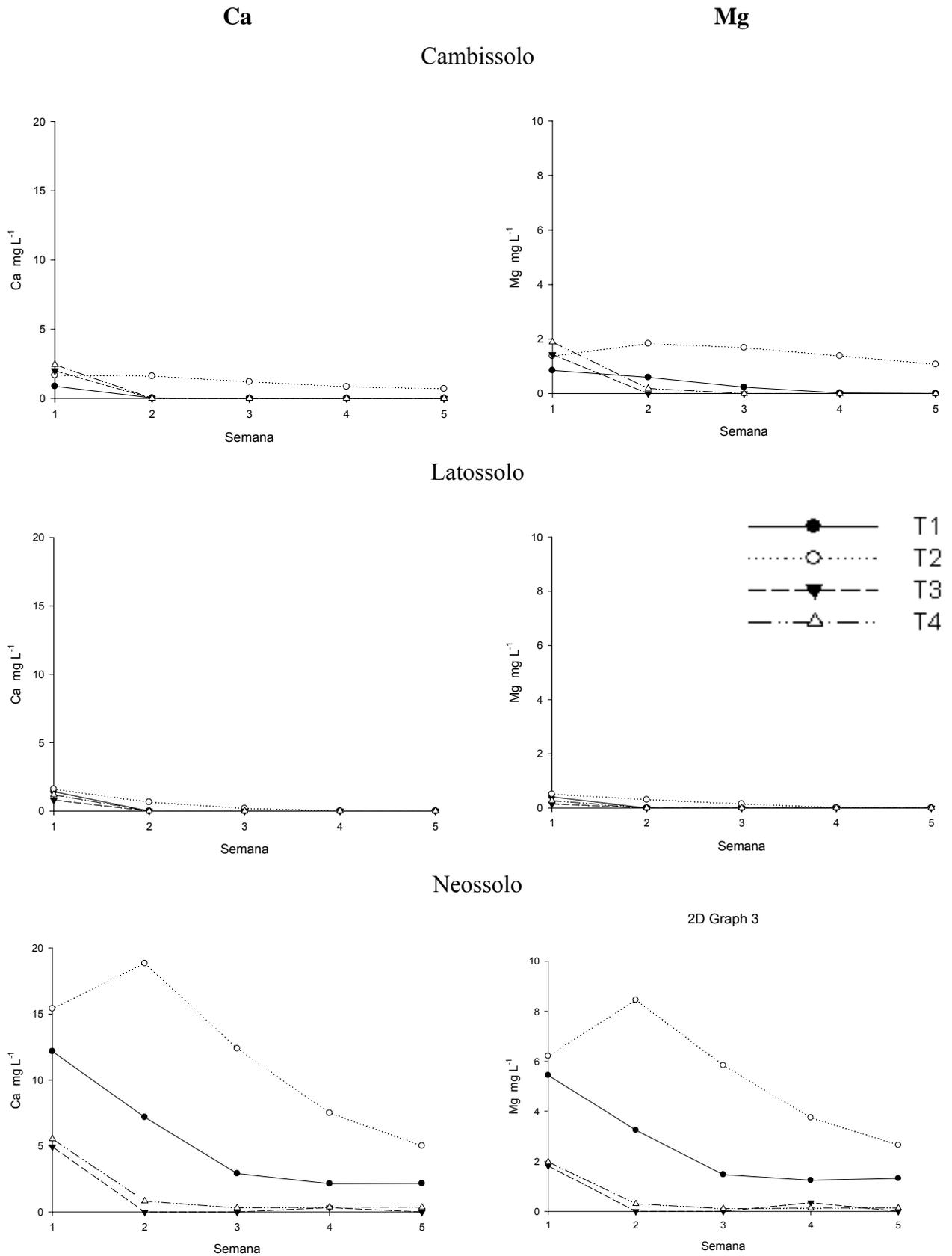


Figura 2 – Concentrações de Ca²⁺ e Mg²⁺ no percolado recolhido das colunas preenchidas com os solos avaliados ao longo das cinco semanas de avaliação (T1 = efluente + água; T2 = efluente; T3 = água + água e; T4 = água).

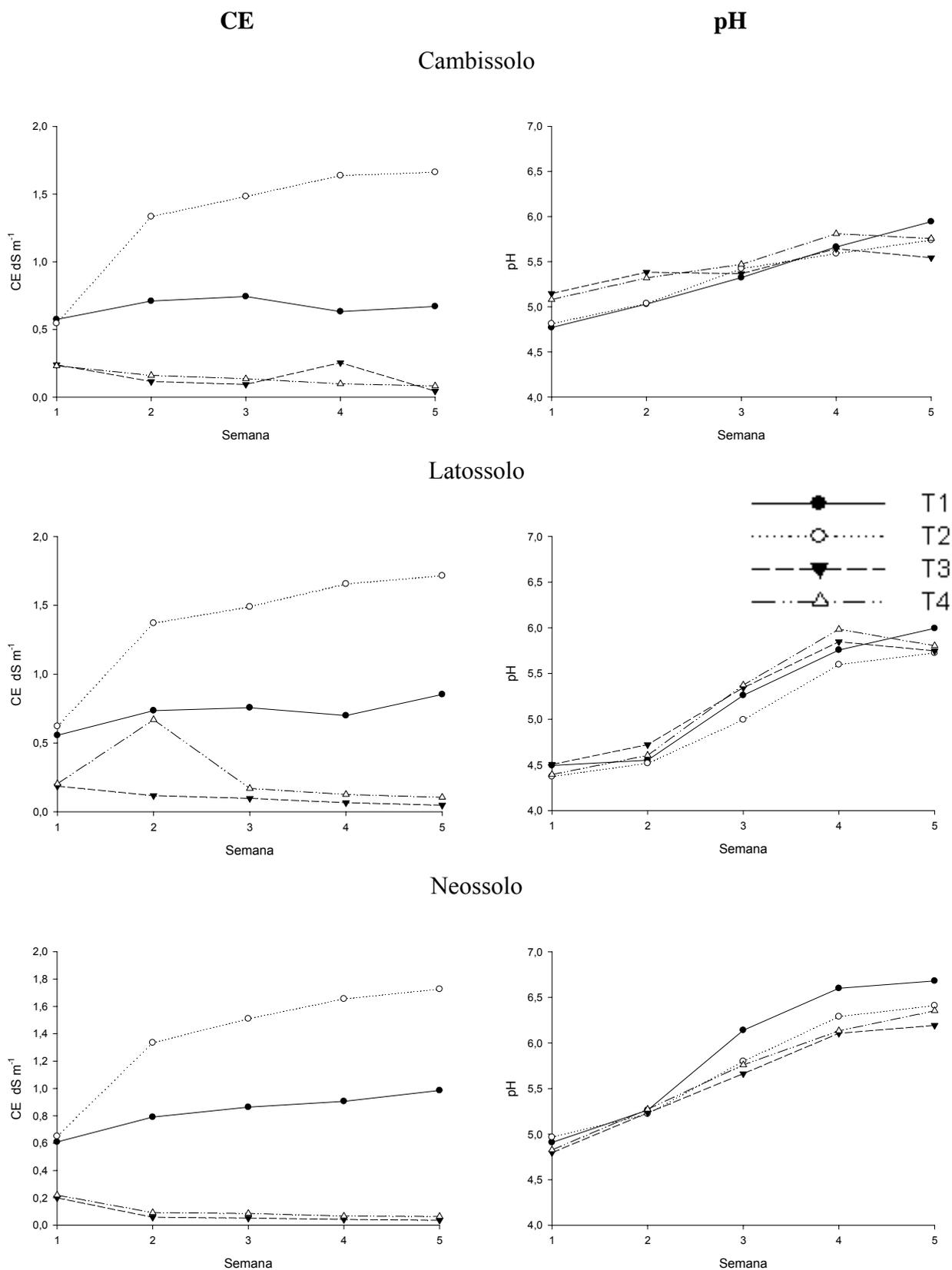


Figura 3 – Valores de condutividade elétrica (CE) e de pH no percolato recolhido das colunas preenchidas com os solos avaliados ao longo das cinco semanas de avaliação (T1 = efluente + água; T2 = efluente; T3 = água + água e; T4 = água).

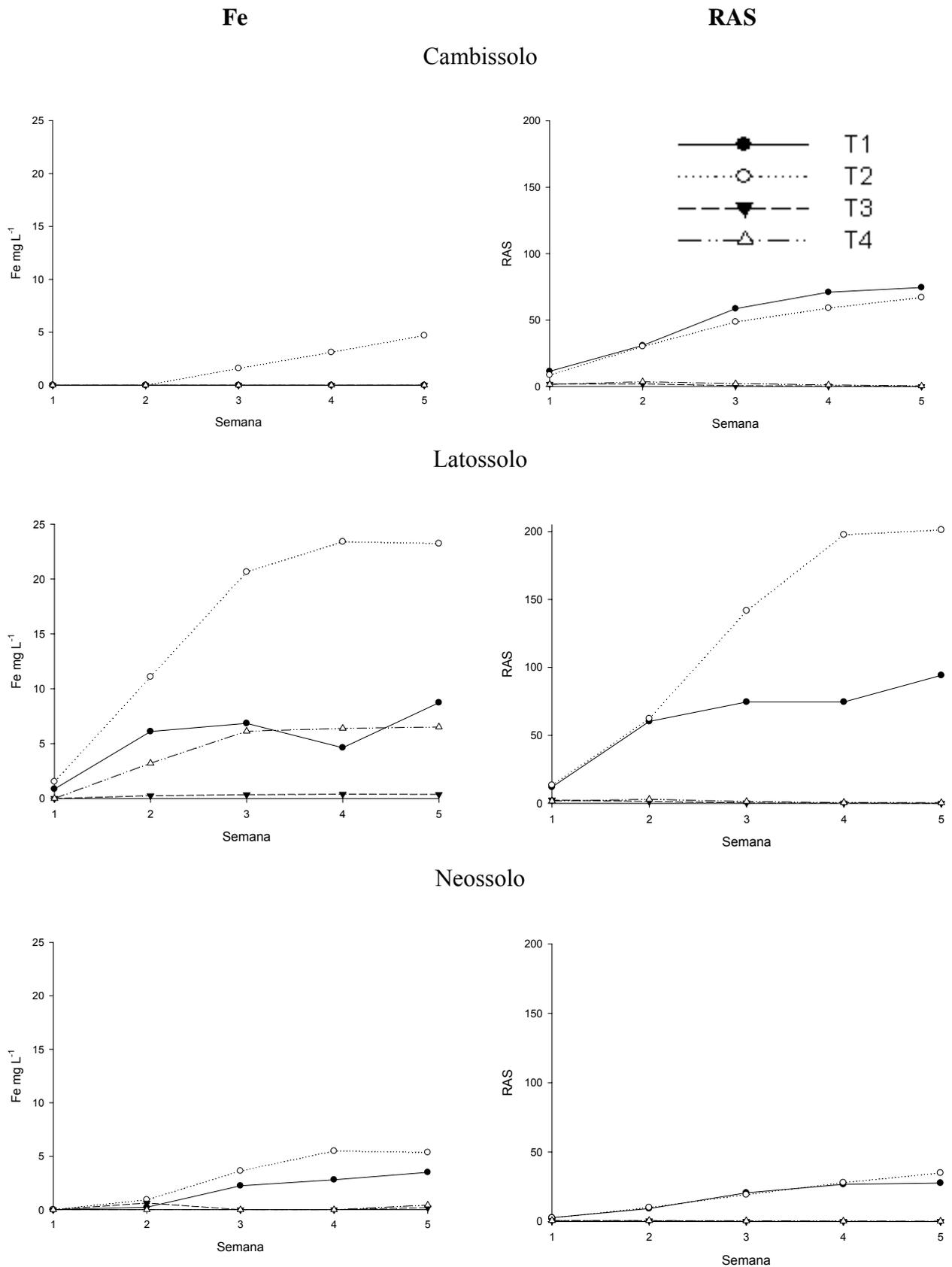


Figura 4 – Concentrações de Fe e a RAS (Razão de Adsorção de Sódio) no percolato recolhido das colunas preenchidas com os solos avaliados ao longo das cinco semanas de avaliação (T1 = efluente + água; T2 = efluente; T3 = água + água e; T4 = água).

Os elementos Cd, Cr, Cu, Ni, P, Pb e Zn não foram detectados nos percolados dos solos estudados, o que pode ser atribuído às baixas concentrações no efluente aplicado e à capacidade do solo em adsorver esses elementos químicos. Com relação ao Fe e Mn, foram detectadas no percolado concentrações superiores às do efluente, o que indica perda desses elementos previamente presentes no solo, influenciando os valores de pH, como já discutido. Uma vez reduzidos, Fe e Mn se tornam mais solúveis e passíveis de movimentação, sendo lixiviados do sistema.

Características das amostras de solo

Os valores de pH obtidos nas amostras retiradas dos anéis da coluna de PVC indicaram o mesmo comportamento para todos os solos avaliados (Quadros 4, 5 e 6). A aplicação do efluente elevou o pH dos solos em todo o perfil considerado (Quadros 4, 5 e 6, contraste C2). Já a aplicação de água adicional (T1) não alterou o efeito da adição do efluente (T2) (Quadros 4, 5 e 6, contraste C3). O caráter alcalino do efluente, com pH próximo a 7,9, explica os resultados obtidos. Os valores de pH verificados para o solo RY alcançaram valores maiores que 7,0 no anel superior, reflexo do menor poder tampão deste solo.

Os teores de K obtidos nas amostras de solo apresentaram incrementos significativos com a aplicação do efluente nos dois primeiros anéis avaliados em todos os três solos estudados, indicando contribuição positiva da água residuária como supridora desse nutriente. No último anel (20 – 30 cm), não se verificou efeito do efluente sobre esses teores. A aplicação de água adicional (T1) não alterou o efeito da adição do efluente (T2) (Quadros 4, 5 e 6).

Os teores de Mg não foram alterados com os tratamentos avaliados nos três solos considerados. Quanto ao Ca, ausência de efeito dos tratamentos foi verificada para o Cambissolo e Neossolo, sendo que no Latossolo, diferenças foram identificadas apenas na primeira camada considerada (0 – 10 cm), para a qual a adição do efluente (T2) incrementou os teores trocáveis em comparação com a adição de água (T4), conforme C2, (Quadros 4, 5 e 6).

Quadro 4 – Caracterização química e física de amostras de um Cambissolo Háplico (CX) nas três camadas (anéis) da coluna, após tratamentos de percolação e significância dos contrastes testados

Tratamento	Anel cm	pH	K	Na	Ca	Mg	PST	ARG	ID
		(H ₂ O)	-----	cmol _c dm ⁻³	-----	-----	-----	%	-----
E+A (T1)	0-10	6,5	0,31	1,27	1,7	0,4	17	53	65
E (T2)		6,5	0,35	2,11	1,5	0,4	27	53	67
A+A (T3)		5,2	0,17	0,02	0,9	0,4	0	53	56
A (T4)		5,2	0,13	0,03	1,3	0,4	0	54	56
E+A (T1)	10-20	6,5	0,24	1,03	0,5	0,2	21	58	70
E (T2)		6,0	0,22	1,64	0,4	0,2	30	57	74
A+A (T3)		5,2	0,05	0,00	0,2	0,1	0	57	62
A (T4)		4,9	0,07	0,00	0,3	0,1	0	59	59
E+A (T1)	20-30	6,2	0,12	0,82	0,1	0,1	20	56	72
E (T2)		5,9	0,10	1,00	0,2	0,1	21	56	59
A+A (T3)		5,0	0,06	0,00	0,2	0,1	0	56	6
A (T4)		5,0	0,07	0,00	0,2	0,1	0	56	9
C1	0-10	(+)**	(+)**	(+)**	(+)**		(+)**		
C2		(+)**	(+)**	(+)**			(+)**		
C3				(-)**			(-)*		
C1	10-20	(+)**	(+)**	(+)**			(+)**		
C2		(+)**	(+)**	(+)**			(+)**		
C3				(-)*			(-)*		
C1	20-30	(+)**		(+)**			(+)**		(+)**
C2		(+)**		(+)**			(+)**		(+)**
C3									

PST: percentual de saturação de sódio; ARG: argila total; ID: índice de dispersão. ⁽¹⁾ Contrastes: C1: T1 vs T3, efluente vs água com água adicional; C2: T2 vs T4, efluente vs água sem água adicional; C3: T1 vs T2, efluente com água adicional vs efluente sem água adicional. ** e * contrastes significativos a 1 e 5 %, respectivamente. Sinais (+) e (-) indicam, respectivamente, relação de superioridade ou inferioridade das médias dos tratamentos comparados no respectivo contraste, comparando-se o primeiro com o segundo termo do contraste.

Quadro 5 – Caracterização química e física de amostras de um Latossolo Amarelo (LA) nas três camadas (anéis) da coluna, após tratamentos de percolação e significância dos contrastes testados

Tratamento	Anel cm	pH (H ₂ O)	K -----	Na cmol _c dm ⁻³	Ca -----	Mg -----	PST -----	ARG %	ID -----
E+A (T1)	0-10	6,6	0,29	1,26	1,0	0,1	18	53	54
E (T2)		6,3	0,29	1,86	1,0	0,1	24	53	56
A+A (T3)		5,1	0,04	0,01	0,3	0,1	0	52	29
A (T4)		5,0	0,06	0,00	0,4	0,2	0	53	32
E+A (T1)	10-20	6,3	0,15	0,98	0,3	0,0	16	57	52
E (T2)		6,0	0,17	1,59	0,3	0,0	24	57	56
A+A (T3)		5,1	0,04	0,00	0,2	0,0	0	57	33
A (T4)		5,2	0,05	0,00	0,2	0,0	0	56	35
E+A (T1)	20-30	5,7	0,06	0,85	0,1	0,0	15	58	43
E (T2)		5,7	0,06	1,03	0,2	0,0	17	58	47
A+A (T3)		5,1	0,03	0,00	0,1	0,0	0	57	36
A (T4)		5,0	0,03	0,00	0,1	0,0	0	57	34
C1	0-10	(+)**	(+)**	(+)**	(+)**		(+)**		(+)*
C2		(+)**	(+)**	(+)**	(+)*		(+)**		(+)*
C3				(-)*					
C1	10-20	(+)**	(+)**	(+)**			(+)**		(+)*
C2		(+)**	(+)**	(+)**			(+)**		(+)*
C3				(-)*			(-)*		
C1	20-30	(+)*		(+)**			(+)**		
C2		(+)*		(+)**			(+)**		
C3									

PST: percentual de saturação de sódio; ARG: argila total; ID: índice de dispersão. ⁽¹⁾ Contrastes: C1: T1 vs T3, efluente vs água com água adicional; C2: T2 vs T4, efluente vs água sem água adicional; C3: T1 vs T2, efluente com água adicional vs efluente sem água adicional. ** e * contrastes significativos a 1 e 5 %, respectivamente. Sinais (+) e (-) indicam, respectivamente, relação de superioridade ou inferioridade das médias dos tratamentos comparados no respectivo contraste, comparando-se o primeiro com o segundo termo do contraste.

Quadro 6 – Caracterização química e física de amostras de um Neossolo Flúvico (RY) nas três camadas (anéis) da coluna, após tratamentos de percolação e significância dos contrastes testados

Tratamento	Anel cm	pH (H ₂ O)	K -----	Na cmol _c dm ⁻³	Ca -----	Mg -----	PST -----	ARG %	ID -----
E+A (T1)	0-10	7,3	0,40	1,01	2,5	0,6	15	25	59
E (T2)		7,4	0,44	1,73	2,4	0,6	24	25	65
A+A (T3)		6,3	0,24	0,04	2,7	0,9	1	25	52
A (T4)		6,1	0,23	0,02	2,6	0,8	0	26	50
E+A (T1)	10-20	6,9	0,28	0,85	1,4	0,4	13	28	58
E (T2)		6,8	0,33	1,76	1,5	0,5	25	29	61
A+A (T3)		6,0	0,24	0,00	1,5	0,5	0	29	50
A (T4)		6,0	0,24	0,00	1,5	0,5	0	29	52
E+A (T1)	20-30	6,7	0,23	0,78	0,9	0,3	14	33	65
E (T2)		6,4	0,22	1,46	0,9	0,3	24	33	65
A+A (T3)		6,0	0,21	0,00	0,9	0,3	0	33	55
A (T4)		5,7	0,20	0,00	0,9	0,3	0	32	56
C1	0-10	(+)**	(+)**	(+)**			(+)**		
C2		(+)**	(+)**	(+)**			(+)**		
C3				(-)*			(-)*		
C1	10-20	(+)**		(+)**			(+)**		
C2		(+)**	(+)*	(+)**			(+)**		
C3				(-)**			(-)**		
C1	20-30	(+)**		(+)**			(+)**		
C2		(+)*		(+)**			(+)**		
C3				(-)*			(-)**		

PST: percentual de saturação de sódio; ARG: argila total; ID: índice de dispersão. ⁽¹⁾ Contrastes: C1: T1 vs T3, efluente vs água com água adicional; C2: T2 vs T4, efluente vs água sem água adicional; C3: T1 vs T2, efluente com água adicional vs efluente sem água adicional. ** e * contrastes significativos a 1 e 5 %, respectivamente. Sinais (+) e (-) indicam, respectivamente, relação de superioridade ou inferioridade das médias dos tratamentos comparados no respectivo contraste, comparando-se o primeiro com o segundo termo do contraste.

Quanto ao Na, os resultados obtidos indicaram que a aplicação do efluente (T2) incrementou os teores em todo o perfil da coluna considerado, e que o emprego de água adicional (T1) reduziu os teores nos solos, assim como também verificado por Rezende (2003) ao estudar a aplicação de resíduos de celulose em solos em condição de casa de vegetação. Isto indica a importância do uso intercalado com água de melhor qualidade concomitantemente com a gessagem para evitar ou reduzir o processo de sodificação de solos que recebem efluentes. Esta água pode ser adicionada via irrigação, ou pode-se ainda contar com a água da chuva, que deve surtir o mesmo efeito. Apenas no último anel (20 – 30 cm) do CX e LA, não ocorreu redução significativa dos teores de Na com a aplicação de água adicional (T1), embora os dados obtidos tenham indicado tendência de sua redução (Quadros 4 e 5).

Os valores de PST obtidos são reflexo direto dos teores de Na presentes nas amostras de solo analisadas. O incremento dos teores de Na com a aplicação do efluente elevou a contribuição deste cátion no complexo de troca em todo o perfil de solo considerado nas colunas de percolação, assim como verificado por Freire et al. (2003) e Almeida Neto (2007) ao irrigar solos em colunas com soluções de concentração salinas diversas. O contraste C2 que compara a adição do efluente (T2) com a adição de água (T4) indicou para todos os solos e camadas, a elevação do PST. Tal situação é preocupante tendo em vista os possíveis impactos sobre a qualidade física do solo. No campo tal situação foi verificada por Santos (2004), que notou aumento da dispersão de argila em todas as profundidades avaliadas devido ao incremento do PST do solo em resposta à aplicação de efluente de esgoto urbano.

A adição de efluente nas colunas preenchidas com solo acarretou tendência de incrementos na dispersão de argilas conforme dados de ID (Quadros 4, 5 e 6), corroborando com o trabalho de Gloaguen (2005), que verificou incrementos de ADA em todo perfil do solo (0-100 cm) com a aplicação de efluentes tratados de esgoto. Entretanto, os contrastes indicam efeitos, conforme indicação do contraste C2, somente em algumas camadas dos solos mais argilosos, LA e CX (Quadros 4 e 5). Essas camadas foram coincidentes com as que apresentavam previamente maior grau de floculação, ou seja, menor ADA. Naquelas amostras de maior argila dispersa, previamente ao ensaio à aplicação do efluente, não houve incrementos significativos de dispersão. Já nas camadas de menor ADA originalmente, o efeito do efluente na dispersão de argilas foi significativo.

Independentemente dos efeitos dos tratamentos, há de se destacar os elevados valores de dispersão encontrados no presente estudo, em especial em solos como o Latossolo, reconhecidamente de maior floculação natural, principalmente em subsuperfície. Tal situação

pode ser associada ao procedimento de preparo das amostras, no qual pode haver um incremento artificial da dispersão de argilas devido aos processos de destorroamento e peneiramento do solo para a obtenção de unidades menores que 4 mm.

Características do extrato da pasta saturada

O estudo do extrato da pasta saturada (EPS) permite avaliação aproximada da constituição da solução do solo (Quadros 7, 8 e 9). Considerando os dados obtidos no presente estudo, tendência de elevação do pH foi verificado quando se promoveu a adição do efluente, muito embora diferenças significativas apenas tenham sido observadas para o Cambissolo, conforme C2.

Os teores de Ca e Mg presentes no EPS não refletiram qualquer efeito da adição do efluente. Somente no Neossolo, a adição de água (T1) foi capaz de reduzir os teores desses elementos no EPS, possivelmente pela menor capacidade adsortiva deste solo. Os teores de K foram incrementados com a aplicação do efluente apenas no primeiro anel do CX e RY que, com as aplicações de água adicional, foram reduzidos.

Com relação ao Na no EPS, constatou-se que a aplicação do efluente (T2) incrementou significativamente seus teores no extrato e que a aplicação da água adicional (T1) foi capaz de reduzi-los, muito embora tenham permanecido elevados. Observou-se tendência semelhante dos teores de Na com a CE e RAS no obtidas no EPS em todas as camadas de solo. O fato de a CE acompanhar as variações do Na é justificado, uma vez que dado sua grande presença no efluente, esse íon contribui majoritariamente para a CE do extrato, em comparação com outros íons também presentes. Do mesmo modo, os elevados teores de Na em relação aos de Ca e Mg presentes no efluente, contribui para os altos valores de RAS identificados no EPS em todo o perfil do solo (Quadro 7, 8 e 9).

Os altos valores de RAS obtidos nos EPS dos tratamentos que receberam efluentes (T1 e T2) merecem destaque, uma vez que podem justificar a tendência de dispersão verificada para as amostras de solo das três camadas estudadas, já que Freire et.al (2003) e Lado et al. (2005) sugerem que a dispersão de argila é fortemente relacionada com a RAS. Lado et al. (2005) ao avaliarem dois solos de textura contrastantes após a aplicação de efluente, verificaram o aumento da dispersão de argilas em solo arenoso e ausência de efeito em solo argiloso. Suas explicações foi que a alta concentração de Ca no segundo solo impediu que a RAS e o PST aumentasse, não afetando desta forma a dispersão de argilas.

Quadro 7 - Características físico-químicas do extrato da pasta de saturação do Cambissolo Háplico (CX) e respectivos contrastes para as três camadas da coluna de percolação

Tratamento	Anel cm	pH (H ₂ O)	CE dS cm ⁻¹	----- mg L ⁻¹ -----			RAS	
				Na	K	Ca		
E+A (T1)	0-10	7,07	0,35	115	11	2,45	2,12	13,37
E (T2)		7,18	1,08	362	23	2,54	2,21	50,60
A+A (T3)		5,67	0,06	2	6	1,83	1,50	0,32
A (T4)		4,84	0,10	5	9	3,54	3,22	0,76
E+A (T1)	10-20	6,47	0,30	103	7	1,69	1,37	14,63
E (T2)		5,67	1,01	340	12	2,12	1,80	42,75
A+A (T3)		5,04	0,04	2	4	1,65	1,33	0,31
A (T4)		5,24	0,05	3	6	1,52	1,20	0,54
E+A (T1)	20-30	6,13	0,27	92	4	1,23	0,91	15,78
E (T2)		5,42	0,78	280	7	1,52	1,20	44,33
A+A (T3)		5,28	0,04	3	4	1,18	0,86	0,49
A (T4)		5,23	0,06	3	4	1,18	0,86	0,47
C1 ⁽¹⁾				(+)*				
C2	0-10	(+)*	(+)**	(+)**	(+)*			(+)**
C3			(-)*	(-)**	(-)**			(-)**
C1				(+)*				
C2	10-20		(+)**	(+)**				(+)**
C3				(-)*	(-)**			(-)**
C1								(+)*
C2	20-30		(+)*	(+)**				(+)**
C3				(-)**				(-)**

CE: condutividade elétrica; RAS: razão de adsorção de sódio. ⁽¹⁾ Contrastes: C1: T1 vs T3, efluente vs água com água adicional; C2: T2 vs T4, efluente vs água sem água adicional; C3: T1 vs T2, efluente com água adicional vs efluente sem água adicional. ** e * contrastes significativos a 1 e 5 %, respectivamente. Sinais (+) e (-) indicam, respectivamente, relação de superioridade ou inferioridade das médias dos tratamentos comparados no respectivo contraste, comparando-se o primeiro com o segundo termo do contraste.

Quadro 8 - Características físico-químicas do extrato da pasta de saturação do Latossolo Amarelos (LA) e respectivos contrastes para as três camadas da coluna de percolação

Tratamento	Anel cm	pH (H ₂ O)	CE dS cm ⁻¹	----- mg L ⁻¹ -----			RAS	
				Na	K	Ca		
E+A (T1)	0-10	6,83	0,26	131	7	1,10	0,77	23,22
E (T2)		5,74	0,96	285	13	2,94	2,61	28,88
A+A (T3)		4,86	0,05	2	3	1,56	1,24	0,24
A (T4)		4,76	0,05	2	3	1,50	1,18	0,30
E+A (T1)	10-20	6,17	0,52	96	4	1,96	1,64	12,87
E (T2)		5,18	1,13	357	11	1,87	1,55	48,15
A+A (T3)		4,95	0,04	1	2	1,11	0,78	0,18
A (T4)		4,90	0,05	1	2	1,25	0,93	0,23
E+A (T1)	20-30	4,83	0,58	107	3	1,43	1,10	16,53
E (T2)		4,97	0,77	347	6	1,57	1,25	50,10
A+A (T3)		4,63	0,06	1	2	1,43	1,11	0,17
A (T4)		4,84	0,05	1	2	1,17	0,85	0,23
C1 ⁽¹⁾		(+)*		(+)*				(+)**
C2	0-10		(+)**	(+)**				(+)**
C3			(-)*	(-)**				
C1	10-20							
C2		(+)**	(+)**				(+)**	
C3		(-)*	(-)**				(-)**	
C1	20-30			(+)*				(+)*
C2		(+)*	(+)**				(+)**	
C3				(-)**			(-)**	

CE: condutividade elétrica; RAS: razão de adsorção de sódio. ⁽¹⁾ Contrastes: C1: T1 vs T3, efluente vs água com água adicional; C2: T2 vs T4, efluente vs água sem água adicional; C3: T1 vs T2, efluente com água adicional vs efluente sem água adicional. ** e * contrastes significativos a 1 e 5 %, respectivamente. Sinais (+) e (-) indicam, respectivamente, relação de superioridade ou inferioridade das médias dos tratamentos comparados no respectivo contraste, comparando-se o primeiro com o segundo termo do contraste.

Quadro 9 - Características físico-químicas do extrato da pasta de saturação do Neossolo Flúvico (RY) e respectivos contrastes para as três camadas da coluna de percolação

Tratamento	Anel cm	pH (H ₂ O)	CE dS cm ⁻¹	Na			K		Ca		Mg	RAS
				----- mg L ⁻¹ -----			-----		-----			
E+A (T1)	0-10	7,78	0,36	152	13	2,51	2,19	16,97				
E (T2)		7,69	1,35	361	26	5,75	5,43	25,94				
A+A (T3)		6,43	0,13	4	11	5,77	5,45	0,28				
A (T4)		6,25	0,11	3	10	4,59	4,27	0,22				
E+A (T1)	10-20	6,90	0,40	116	8	1,77	1,45	16,14				
E (T2)		6,92	1,37	359	19	4,15	3,83	31,62				
A+A (T3)		5,91	0,06	2	9	2,23	1,91	0,20				
A (T4)		5,03	0,09	3	8	2,41	2,09	0,36				
E+A (T1)	20-30	4,78	0,45	151	6	1,88	1,56	20,09				
E (T2)		5,76	1,33	341	13	3,51	3,19	32,25				
A+A (T3)		4,85	0,06	1	4	2,02	1,70	0,17				
A (T4)		5,22	0,06	1	5	1,77	1,45	0,18				
C1 ⁽¹⁾	0-10			(+)**		(+)**	(+)**	(+)*				
C2			(+)**	(+)**	(+)*			(+)**				
C3			(-)**	(-)**	(-)*	(-)**	(-)**					
C1	10-20			(+)*				(+)*				
C2			(+)**	(+)**				(+)**				
C3			(-)**	(-)**		(-)*	(-)*	(-)*				
C1	20-30			(+)**				(+)*				
C2			(+)**	(+)**				(+)**				
C3			(-)**	(-)**				(-)**				

CE: condutividade elétrica; RAS: razão de adsorção de sódio. ⁽¹⁾ Contrastes: C1: T1 vs T3, efluente vs água com água adicional; C2: T2 vs T4, efluente vs água sem água adicional; C3: T1 vs T2, efluente com água adicional vs efluente sem água adicional. ** e * contrastes significativos a 1 e 5 %, respectivamente. n.s: indicam contrastes não significativos. Sinais (+) e (-) indicam, respectivamente, relação de superioridade ou inferioridade das médias dos tratamentos comparados no respectivo contraste, comparando-se o primeiro com o segundo termo do contraste.

O efeito da água adicional (T1) em reduzir os teores de Na na solução do solo podem ser trabalhados no manejo da irrigação da área que recebe os efluente, ainda que tal redução não seja próximo da ideal. Em períodos mais chuvosos, assim como observados na região de Belo Oriente, o risco de salinização dos solos é reduzido, o que deve ser considerado no programa de irrigação. Imaginar por outro lado, uma recomendação de aplicação restrita ao período das chuvas seria pouco prático, uma vez que a maior demanda de água pelo eucalipto é justamente no período da estiagem.

Ensaio II: Avaliação da condutividade hidráulica

Condutividade hidráulica

Considerando a qualidade da água residuária utilizada, a expectativa dos ensaios conduzidos era de que com a aplicação do efluente houvesse redução da permeabilidade do solo, com conseqüente redução da condutividade hidráulica. Tal hipótese era amparada nos altos valores de RAS e medianos de CE do efluente que, como verificado por Freire (2001) ao estudar algumas classes de solos do Estado de Pernambuco, podem levar à redução da K_0 em laboratório. Dados semelhantes também têm sido verificados com a utilização de águas residuárias, como os de Gonçalves et al. (2007), que observaram redução da K_0 avaliada em campo em Latossolo de textura média do Estado de São Paulo, que recebeu irrigação com efluente de esgoto urbano tratado.

Entretanto, em que pese a hipótese levantada, a aplicação de efluente de forma sucessiva nas cinco semanas de avaliação não alterou os valores obtidos de K_0 no Neossolo Flúvico (RY) e no Cambissolo Háplico (CX) avaliados no presente estudo. Os valores obtidos de K_0 foram semelhantes aos observados com a utilização de água deionizada (Figura 5).

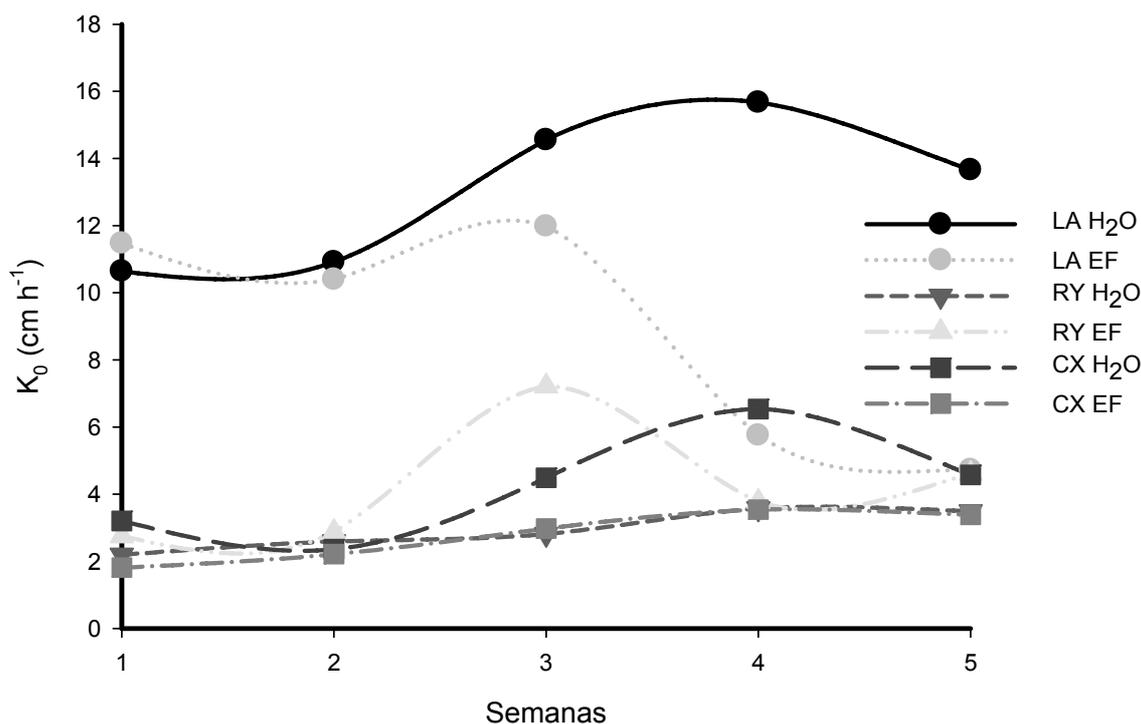


Figura 5 - Condutividade hidráulica em meio saturado dos solos Cambissolo Háplico (CX), Latossolo Amarelo (LA) e Neossolo Flúvico (RY), em função da aplicação semanal de efluente (EF) e água deionizada (H₂O) como líquidos percolantes.

No caso do Latossolo Amarelo (LA), somente nas duas últimas semanas de aplicação, verificou-se diferença estatística ($p < 0,05$) entre os líquidos, com o efluente causando a redução da condutividade hidráulica. Aparentemente, com o passar das semanas o efeito do efluente se estabeleceu, determinando a redução dos valores de K_0 no período final de avaliação, correspondendo à hipótese do presente trabalho. Embora com condutividade hidráulica inicial bem superior aos demais solos avaliados, dada sua estrutura granular, a redução da K_0 verificada no LA levou seus valores a próximos dos obtidos para RY e CX, solos com fraca estrutura. Efeitos em longo prazo podem ser sugeridos frente aos dados obtidos, embora qualquer previsão assertiva neste sentido carece de maior aprofundamento, dado o restrito tempo de análise.

A ausência de efeito do efluente sobre o Cambissolo e Neossolo é de difícil explicação, principalmente, no caso do CX, que é tão argiloso quanto e bem menos oxidico que o LA. A dispersão no Cambissolo foi, portanto, aquém da esperada, tendo em vista seu alto teor de argila e mineralogia menos oxidica, fatores que normalmente são relacionados ao favorecimento dos fenômenos de dispersão (Frenkel et al., 1978). Resultados de Silva et. al. (2005), ao trabalharem com um Neossolo Flúvico, textura franco-argilosa, em áreas propícias

à salinização no Estado do Ceará, também indicaram ausência de diferenças significativas na K_0 avaliada em laboratório, atribuindo tal fato ao pouco tempo de tratamento que durou durante um ciclo de cultivo de bananeira.

Características físicas dos solos após aplicação dos líquidos

As características físicas avaliadas nas amostras presentes nos anéis após os ensaios de determinação da K_0 não apresentaram diferenças significativas, dentro de um mesmo solo, comparando-se os tratamentos com os dois líquidos testados (Quadro 10). Considerando o espaço temporal analisado, a densidade do solo, porosidade, argila dispersa em água e o equivalente de umidade não foram alterados, indicando que a aplicação do efluente não afeta essas propriedades físicas do solo.

Quadro 10 - Características físicas dos solos utilizados nos ensaios após as determinações da condutividade hidráulica

	Líquido	Ds kg dm ⁻³	PT ----- m m ⁻³ -----	Mi	Ma	ADA --- % ---	EU kg kg ⁻¹
LA	H ₂ O	1,20	0,53	0,36	0,17	20,59	0,21
	EF	1,16	0,54	0,36	0,18	20,51	0,22
RY	H ₂ O	1,51	0,41	0,29	0,11	12,36	0,13
	EF	1,47	0,42	0,29	0,14	11,39	0,13
CX	H ₂ O	1,21	0,51	0,45	0,06	22,52	0,31
	EF	1,21	0,51	0,46	0,05	23,87	0,29

Solos: CX = Cambissolo Háplico tb distrófico típico; LA = Latossolo Amarelo distrófico típico; RY = Neossolo Flúvico distrófico típico. Ds = densidade do solo; PT = porosidade total; Mi: microporosidade; Ma: macroporosidade; ADA: argila dispersa em água; EU: equivalente de umidade

Muito embora o efluente apresentasse elevados teores de Na, razoável CE e elevada RAS, não se verificou dispersão de argilas, o que freqüentemente é relacionado com a origem de problemas de permeabilidade do solo (Yousaf e Rhoades, 1987). Em trabalhos que se têm verificado este tipo de efeito, predomina o uso de amostras deformadas ou incubadas, diferentemente da situação avaliada no presente estudo. Com o uso de amostras indeformadas, admite-se uma maior dificuldade de ação do componente dispersante sobre a massa do solo, já que eventualmente predomina um fluxo de líquido via macroporos, que nem sempre

permitem o adequado contato e equilíbrio dos íons da solução percolada com o complexo de troca.

As razões pelas quais não foram verificadas diferenças nas características físicas (Quadro 10), muito embora, tenha sido observada influência do efluente sobre os valores de K_0 (Figura 5), ainda que apenas em um solo, podem ser associadas ao efeito localizado. No caso da determinação da K_0 no Latossolo, presume-se que o efeito tenha sido superficial, concentrado nos primeiros milímetros do solo. O fato de as amostras terem sido mantidas em ambiente sem controle de umidade e dentro de bandejas com água nos intervalos das determinações pode ter contribuído para a ascensão capilar de sais, que uma vez na superfície, tenham promovido alterações que afetaram a infiltração da água. Desta forma, algum tipo de selamento pode ter sido produzido, com reflexos diretos sobre os valores de K_0 . No caso das características físicas avaliadas, que foram determinadas considerando todo o volume do anel volumétrico, ou mesmo toda a massa de solo correspondente a dito volume, esse efeito localizado acaba sendo diluído, não sendo verificadas, portanto, diferenças significativas apreciáveis. Efeito localizado da aplicação de efluentes também foi observado por Santos (2004), ao verificar incrementos mais pronunciados da dispersão de argilas na superfície do solo que recebeu a adição de águas residuárias de esgoto urbano tratado. Em profundidade, o experimento realizado em condições de campo, evidenciou efeitos bem menos expressivos.

CONCLUSÕES

- 1 - A disposição superficial do efluente de celulose estudado incrementa os teores de sódio na solução e complexo sortivo do solo e seu movimento no perfil.
- 2 - A adição de água de boa qualidade após a aplicação do efluente é capaz de reduzir os teores de sódio na solução e complexo sortivo do solo.
- 3 - Aplicações constantes e sucessivas do efluente estudado alteram a condutividade hidráulica do solo, o que remete à necessidade de se monitorar a qualidade do solo ao longo do tempo para sua avaliação.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Almeida Neto, O. B. Dispersão da argila e condutividade hidráulica em solos com diferentes mineralogias, lixiviados com soluções salino-sódicas Viçosa: UFV, 2007, 83p. (Tese de Doutorado).
- APHA – American Public Health Association. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. 19 ed. Nova Iorque: APHA, AWWA, WPCR, 1997.
- Ayers, R. S.; Westcot, D. W. A qualidade da água na agricultura. Campina Grande: UFPB, 1991. 218p. (Estudos FAO: Irrigação e Drenagem, 29).
- Bhardwaj, A. K.; Goldstein, D.; Azenkot, A.; Levy, G. J. Irrigation with treated wastewater under two different irrigation methods: Effects on hydraulic conductivity of a clay soil. *Geoderma*, v. 140, p.199-206, 2007.
- Cavallet, L. E.; Lucchesi, L. A. C.; Moraes, A.; Schimidt, E.; Perondi, M.A.; Fonseca, R.A. Melhoria da fertilidade do solo decorrentes da adição de água residuária da indústria de enzimas. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.10, p.724–729, 2006.
- CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução 357/05. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências. Disponível em <http://www.mma.gov.br/port/conama/res/res05/res35705.pdf>. 23p. 2005
- COPAM – Conselho Estadual de Política Ambiental de Minas Gerais. Deliberação Normativa 10/86. Estabelece normas e padrões para qualidade das águas, lançamento de efluentes nas coleções de águas, e dá outras providências. Disponível em http://www.paas.uff.br/legisla/copam10_86.pdf. 18p. 1986.
- Cunha, L. P. & Moraes, S. O. Avaliação do regime estacionário em colunas de amostras deformadas de solo sob saturação. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.31, p.1197-1203, 2007
- Defelipo, B. V.; Ribeiro, A. C. Análise química do solo. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, 1981. 17p. (Boletim Extensão, 29).
- Dikinya, O.; Hinz, C.; Aylmore, G. Dispersion and re-deposition of fine particles and their effects on saturated hydraulic conductivity. *Australian Journal of Soil Research*, v. 44, p. 47–56, 2006.
- EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Manual de métodos de análise de

- solo. 2^a.ed. Rio de Janeiro, Centro Nacional de Pesquisa de Solos, 1997. 212p.
- Ferreira, P. A. Drenagem de terras agrícolas. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, 1999. 187p.
- Fonseca, A. F.; Herpin, U.; Paula, A. M.; Victória, R. L.; Melfi, A. J. Agricultural use of treated sewage effluents: agronomic and environmental implications and perspectives for Brazil. *Scientia Agricola*, v.64, p.194-209, 2007.
- Freire, M. B. G. S. Saturação por sódio e qualidade da água de irrigação na degradação de propriedades físicas de solos no Estado de Pernambuco. Viçosa: UFV, 2001. 66 p. (Tese de Doutorado).
- Freire, M. B. G. S.; Ruiz, H. A.; Ribeiro, M. R.; Ferreira, P. A.; Alvarez V., V. H.; Freire, F. J. Estimativa do risco de sodificação de solos de Pernambuco pelo uso de águas salinas. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.7, p.45-52, 2003.
- Frenkel, H.; Goertzen, J.O.; Rhoades, J.D. Effects of clay type and content, exchangeable sodium percentage, and electrolyte concentration on clay dispersion and soil hydraulic conductivity. *Soil Science Society of America Journal*, v.42, p.32-39, 1978.
- Gloaguen, R. A. B. G. Efeito da irrigação com efluente de esgoto tratado nas propriedades físico-hídricas de um Latossolo. Piracicaba: ESALQ, 2005. 119p. (Tese de Doutorado).
- Gloaguen, T. V.; Forti, M. C.; Lucas, Y.; Montes, C. R.; Gonçalves, R. A. B.; Herpin, U.; Melfi, A. J. Soil solution chemistry of a Brazilian Oxisol irrigated with treated sewage effluent. *Agricultural Water Management*, v.88, p.119-131, 2007.
- Gonçalves, R. A. B.; Folegatti, M.V.; Gloaguen, T. V.; Libardi, P. L.; Montes, C. R.; Luca, Y.; Dias, C. T. S.; Melfi, A. J. Hydraulic conductivity of a soil irrigated with treated sewage effluent. *Geoderma*, v.139, p. 241-248, 2007.
- Guedes, M. C.; Andrade, C. A.; Poggiani, F.; Mattiazzo, M. E. Propriedades químicas do solo e nutrição do eucalipto em função da aplicação de lodo de esgoto. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.30, p.267-280, 2006.
- 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*, v.39, p.1259-1267, 2001.
- Haruvy, N. Agricultural reuse of wastewater: nation-wide cost benefit analysis. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, v.66, p.133-119, 1997.
- Heidarpour, M.; Mostafazadeh-Fard, B.; Koupai, J. A.; Malekian, R. The effects of treated wastewater on soil chemical properties using subsurface and surface irrigation methods. *Agricultural Water Management*, v.90, p.87-94, 2007.

- Kaledhonkar, M.J.; Keshari, A. K.; Van der Zee, S. E .A. T. M. Relative sensitivity of ESP profile to spatial and temporal variability in cation exchange capacity and pore water velocity under simulated field conditions. *Agricultural Water Management*, v.83, p.58 -68, 2006.
- Lado, M.; Ben-Hur, M.; Assouline, S. Effects of effluent irrigation on seal formation, infiltration, and soil loss during rainfall. *Soil Science Society of America Journal*, v.69, p.1432–1439, 2005.
- Maia, C. E.; Morais, E. R. C.; Oliveira, M. Classificação da água de irrigação utilizando quatro metodologias de cálculo para a razão de adsorção de sódio. I. Região da Chapada do Apodi, Rio Grande do Norte. *Revista Caatinga*, v.11, p.41-46, 1998.
- Melo, R. F.; Ferreira, P. A.; Matos, A. T.; Ruiz, H. A.; Oliveira, L. B. Deslocamento miscível de cátions básicos provenientes da água residuária de mandioca em colunas de solo. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.10, p.456–465, 2006.
- Pereira, F. A. C.; Fonseca, A. A. O.; Almeida, E. C.; Moreira, C. S.; Macedo, J. D. B.; Cruz, J. D. Comparação entre condutividade hidráulica saturada determinada em campo e laboratório. *Magistra*, v.13, p.1-4, 2002.
- Raij, B. van. Avaliação da fertilidade do solo. Piracicaba: POTAFOS, 1991. 343 p.
- Rezende, A. A. P. Fertirrigação do eucalipto com efluente tratado de fábrica de celulose kraft branqueada. UFV, 2003. 160p (Tese de Doutorado). Disponível em <ftp://ftp.bbt.ufv.br/teses/engenharia%20agricola/2003/181101f.pdf>
- Rezende, A. A. P.; Matos, A. T.; Silva, C. M. Utilização do efluente de indústria de celulose e papel em irrigação – uma revisão. In: Congresso Internacional de Celulose e Papel. ABTCP-TAPPI: São Paulo, 2000. 12p. Disponível em <http://www.celuloseonline.com.br/imagembank/Docs/DocBank/dc/dc312.pdf>.
- Richards, L. A. Diagnosis and improvement of saline and alkali soils. Washington D.C: United States Salinity Laboratory. 1954, 160p. (USDA Agriculture Handbook, 60).
- Ruiz, H. A. Dispersão física do solo para análise granulométrica por agitação lenta. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 30., 2005, Recife - PE. CD-ROM. Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2005a.
- Ruiz, H. A. Incremento da exatidão da análise granulométrica do solo por meio da coleta da suspensão (silte + argila). *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.29, p.297-300, 2005b
- Santos, A. P. R. Efeito da irrigação com efluente de esgoto tratado, rico em sódio, em propriedades químicas e físicas de um Argissolo Vermelho distrófico cultivado com capim-Tifton 85; Piracicaba: ESALQ, 2004, 79 p. (Dissertação de Mestrado).

- Silva, E. F.; Assis Júnior, R. N.; Sousa, J. I. G. Efeito da qualidade da água de irrigação sobre atributos hídricos de um Neossolo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.29, p.389-396, 2005.
- Sousa, J. T.; Ceballos, B. S. O; Henrique, I. N.; Dantas, J. P.; Lima, S. M. S. Reuso de água residuária na produção de pimentão (*Capsicum annuum* L.) *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental* v.10, p.89-96, 2006.
- Souza, R.; Camargo, F. A. O; Vahl, L. C. Solos alagados (reações de redox). In: Meurer, E. J. *Fundamentos de química do solo*. Porto Alegre: Evangraf, p.185-211, 2006
- Statsoft. *Statistica®: Statistica program for Windows, version 7.0*, Statsoft, Inc. Tulsa, EUA. 1999.
- Tedesco, M. J.; Gianello, C.; Bissani, C. A.; Bohnen, H.; Volkweiss, S. J. *Análise de solo, plantas e outros materiais*. Porto Alegre: UFRGS, 1995. 174 p.
- Yousaf, M.; Rhoades, J. D. Dispersion of clay from some salt affected, arid land soil aggregates. *Soil Science Society of America Journal*, v.51, p.920-924,1987.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados de todas as avaliações conduzidas indicam que o efluente de indústria de celulose pode ser usado como fonte alternativa de água para a cultura do eucalipto, porém devido à alta concentração de sódio e à possibilidade de dispersão de argilas, seu uso deve ser efetuado com técnicas refinadas de manejo da irrigação e sob constante e adequado programa de monitoramento da qualidade do solo.

APÊNDICE

Quadro 1 - Análise de variância (ANOVA) das variáveis referentes ao experimento de campo

Fonte de Variação	Graus de Liberdade
Tratamento	4
Resíduo	15
Total	19

Quadro 2 - Análise de variância (ANOVA) do experimento de laboratório (ensaio I) referente à avaliação individual de cada uma das três classes de solo para as variáveis DMP, DMG, ADA, dos atributos medidos no extrato da pasta saturada e dos atributos químicos de rotina e COT.

Fonte de Variação	Graus de Liberdade
Classe de Solo	2
Tratamento	3
Classe Solo X Tratamento	6
Repetição (1)	2
Repetição X Classe Solo (2)	4
Repetição X Tratamento (3)	6
Repetição X Classe Solo X Tratamento (4)	12
Erro A (1 + 2 + 3 + 4)	24

Anel	2
Repetição X Anel (Erro B)	4

Classe Solo X Anel	4
Tratamento X Anel	6
Classe Solo X Tratamento X Anel	12
Erro C	44
Total	107

Quadro 3 - Análise de variância (ANOVA) do experimento de laboratório (ensaio I) referente à avaliação individual de cada uma das três classes de solo para a análise química dos líquidos recolhidos no percolado semanalmente

Fonte de Variação	Graus de Liberdade
Classe de Solo	2
Tratamento	3
Classe Solo X Tratamento	6
Repetição (1)	2
Repetição X Classe Solo (2)	4
Repetição X Tratamento (3)	6
Repetição X Classe Solo X Tratamento (4)	12
Erro A (1 + 2 + 3 + 4)	24
<hr style="border-top: 1px dashed black;"/>	
Semana	4
Repetição X Semana (Erro B)	8
<hr style="border-top: 1px dashed black;"/>	
Classe Solo X Semana	8
Tratamento X Semana	12
Classe Solo X Tratamento X Semana	24
Erro C	88
Total	203

Quadro 4 - Análise de variância (ANOVA) do experimento de laboratório (ensaio II) referente à avaliação da condutividade hidráulica ao longo do tempo.

Fonte de Variação	Graus de Liberdade
Classe de Solo	2
Repetição X Classe de Solo (Erro A)	27
<hr style="border-top: 1px dashed black;"/>	
Tempo	5
Repetição X Tempo (Erro B)	45
<hr style="border-top: 1px dashed black;"/>	
Classe de Solo X Tempo	10
Erro C	90
Total	179