

ANA AUGUSTA PASSOS REZENDE

**FERTIRRIGAÇÃO DO EUCALIPTO COM EFLUENTE TRATADO DE
FÁBRICA DE CELULOSE KRAFT BRANQUEADA**

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, para obtenção do título de *Doctor Scientiae*.

VIÇOSA
MINAS GERAIS – BRASIL
2003

ANA AUGUSTA PASSOS REZENDE

**FERTIRRIGAÇÃO DO EUCALIPTO COM EFLUENTE TRATADO DE
FÁBRICA DE CELULOSE KRAFT BRANQUEADA**

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, para obtenção do título de *Doctor Scientiae*.

APROVADA: 28 de novembro de 2003.

Prof. Mauro Aparecido Martinez
(Conselheiro)

Prof. Cláudio Mudado Silva
(Conselheiro)

Prof. Júlio César Lima Neves

Prof. Eduardo von Sperling

Prof. Antonio Teixeira de Matos
(Orientador)

**[...] *the world has enough for everyone's need, but not for some
people's greed [...]***

Frase atribuída a Mahatma Gandhi (Spangenberg, 2001)

AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal de Viçosa por intermédio do Departamento de Engenharia Agrícola pelo apoio e oportunidade de realizar os trabalhos.

À Aracruz Celulose S.A. pela iniciativa em investigar alternativas de manejo sustentável, cuja parceria e apoio possibilitaram a realização deste estudo, especialmente na pessoa do Engenheiro Sebastião da Fonseca.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pela concessão da bolsa de estudos.

Ao Inter-American Institute for Cooperation on Agriculture, IICA - Canadá, e à Universidade de Guelph, Canadá, pela oportunidade de participar do Internship Program in Agricultural Science and Agricultural Research, o qual forneceu subsídios ao projeto de pesquisa.

Ao Prof. Antônio Teixeira de Matos, pela orientação e estímulo.

Ao Prof. Mauro Martinez, o reconhecimento pela grande contribuição técnica.

Ao Prof. Julio César Lima Neves, que sempre deu incentivos a este trabalho, pela amizade e apoio fundamental em várias etapas desse estudo. Ao Prof. Nairan Félix de Barros pelas contribuições e sugestões.

Ao Prof. Eduardo von Sperling que, gentilmente, aceitou participar da Banca Examinadora, pela contribuição na fase de aprovação deste trabalho.

Aos professores que tive oportunidade de conviver durante o período dos estudos, pela amizade e atenção dispensada, em especial, Prof. Márcio

Mota, Prof. Paulo Afonso Ferreira, Prof. Hugo Ruiz e Prof. Calvin Chong (University of Guelph).

Aos funcionários do Departamento de Engenharia Agrícola, em especial ao Simão, Francisco Viana Teixeira e Antônio Inácio, e aos funcionários do Departamento de Solos, em especial ao Cláudio Brustolini, Carlinhos, Carlos Fonseca e Braz Júlio pela amizade, pelo apoio e pela constante disposição demonstrada durante o correr dos trabalhos.

Aos estudantes e estagiários que em vários momentos deste trabalho prestaram seu apoio, em especial ao Danilo Fukunaga e Marcos Vinícius pelo interesse, dedicação e companheirismo.

Aos colegas de curso cujos encontros, embora poucos, foram válidos e sinceros.

Ao Cláudio, companheiro de muitas caminhadas, pelo carinho e constante incentivo; às minhas crianças, Juliano e Marcela, que se mostraram compreensivas nos momentos em que eu estive ausente e, à minha mãe que sempre se fez presente nos momentos mais atribulados.

Enfim, a todos que cruzaram nosso caminho nestes quatro anos de estudo que culminaram neste trabalho, e que de certa forma deram seu apoio, mesmo que com um sorriso.

Obrigado.

ÍNDICE

RESUMO	viii
ABSTRACT	xi
1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO DE LITERATURA.....	4
2.1. Geração e tratamento do efluente de fábricas de celulose.....	4
2.1.1. Processos de fabricação da celulose e geração do efluente	4
2.1.2. Tratamento e composição do efluente final do processo de fabricação da celulose	6
2.2. Disposição de águas residuárias no solo	10
2.2.1. Métodos e taxas de aplicação das águas residuárias no solo	11
2.2.2. Critérios de qualidade da água para aproveitamento agrícola ...	14
2.3 Disposição de efluentes da indústria de celulose no solo	19
2.3.1. Efeitos do efluente de indústria de celulose no solo e na planta	23
2.3.1.1. Efeitos na cobertura vegetativa.....	23
2.3.1.2. Efeitos no solo	25
2.4 Riscos ambientais associados à disposição de efluentes da indústria de celulose no solo	27
3. MATERIAL E MÉTODOS	29
3.1. Construção e preparo das Unidades Experimentais	30
3.2. Plantio e condução do experimento.....	31
3.3. Parâmetros avaliados	33
3.4. Caracterização dos solos.....	34

3.5. Caracterização da água residuária utilizada na fertirrigação e do percolado das colunas de solo	39
3.6. Análises do material vegetal	41
3.7. Tratamentos e análise estatística dos dados	42
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	43
4.1. Avaliação do efluente tratado do processo de fabricação da celulose (ETFC) como água para uso em fertirrigação.....	43
4.1.1. Características físicas e físico-químicas	43
4.1.2. Concentração de macronutrientes.....	45
4.1.3. Concentração de micronutrientes.....	47
4.1.4. Aporte de nutrientes.....	48
4.1.5. Elementos tóxicos.....	48
4.2. Aplicação do ETFC no solo.....	52
4.2.1. Características gerais dos solos.....	52
4.2.2. Efeitos da aplicação do ETFC nas características físicas e químicas do solo.....	54
4.2.2.1. Efeitos da aplicação do ETFC na fertilidade do solo.....	71
4.2.2. Efeitos da aplicação do ETFC nas características físicas e químicas do solo.....	
4.3. Lixiviação de sais e possíveis riscos de contaminação das águas subterrâneas com a fertirrigação	
4.4. Efeitos da aplicação do ETFC nas plantas	94
4.4.1. Características dendrométricas e produção de matéria seca vegetal	94
4.4.1.1. Altura das plantas.....	96
4.4.1.2. Diâmetro do lenho	98
4.4.1.3. Produção de biomassa da parte aérea.....	100
4.4.1.4. Biomassa radicular.....	102
4.4.1.5. Relação parte aérea:raízes.....	107
4.4.2. Análise nutricional.....	107
4.4.2.1. Análise geral dos resultados obtidos	107
4.4.2.2. Macronutrientes.....	111
4.4.2.3. Micronutrientes.....	115
4.4.2.4. Sódio	116
4.4.3. Avaliações visuais das plantas	121
5. CONCLUSÕES	125

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	129
APÊNDICE	142

RESUMO

REZENDE, Ana Augusta Passos, D.S., Universidade Federal de Viçosa, novembro de 2003. **Fertirrigação do eucalipto com efluente tratado de fábrica de celulose kraft branqueada**. Orientador: Antônio Teixeira de Matos. Conselheiros: Mauro Martinez, Nairan Félix de Barros e Cláudio Mudado Silva.

A aplicação no solo do efluente tratado de fábrica de celulose kraft branqueada, por meio da fertirrigação de eucalipto, surge como opção atrativa para fornecimento de nutrientes e água para a planta, além de constituir um processo suplementar de tratamento ou de disposição final para essa água residuária industrial. O objetivo deste estudo consistiu na investigação e análise dos efeitos da fertirrigação de eucalipto com efluente tratado do processo kraft de produção da polpa celulósica branqueada (ETFC) sobre o sistema solo-água-planta, ou seja, sobre as características físicas e químicas do solo e da água subterrânea, e sobre as características morfológicas, o estado nutricional e produção de biomassa das plantas (parte aérea e raízes). Neste trabalho, caracterizou-se o efluente secundário do processo de fabricação de celulose kraft branqueada (ETFC) e investigou-se, por meio de experimentos em ambientes controlados (casa de vegetação), os efeitos da fertirrigação do eucalipto com ETFC sobre Argissolos e Neossolos Quartzarênicos, característicos da região de Aracruz, Espírito Santo. Foram montadas e monitoradas noventa unidades experimentais em colunas de solo, preenchidas

com três solos de texturas diferentes, cultivadas com híbrido clonal de *Eucalyptus grandis* x *E.urophyla*, e submetidas a cinco lâminas de fertirrigação, aplicadas por gotejamento e definidas em função de taxas de aplicação de sódio (elemento predominante no ETFC). Após a fertirrigação com ETFC por um período de seis meses observou-se expressivo aumento na salinidade dos solos estudados, notadamente nas maiores taxas de ETFC aplicadas, correspondentes às taxas de 4 e 8 t ha⁻¹ de sódio. Embora o ETFC apresente RAS elevada, a alta condutividade elétrica contrabalançou o seu efeito dispersante da argila do solo. O solo de textura arenosa (RQ_o) apresentou-se vulnerável à contaminação da água subterrânea, apesar das características físicas e químicas da água percolada indicarem que houve atenuação de alguns parâmetros do efluente aplicado, como micronutrientes e nitrato. Observou-se, para este solo, ganho expressivo na cor do percolado, bem como aumento nas concentrações de elementos como potássio, sódio, cloreto na taxa de aplicação mais alta, correspondente à lâmina de ETFC de 1146 mm, ou seja, 8 t ha.⁻¹ de sódio, que suplantaram aqueles valores típicos encontrados nas águas subterrâneas. Neste Neossolo (RQ_o) foram observados os menores valores de crescimento de planta e produção de biomassa, apresentando melhor desempenho nas menores taxas. A maior produção de biomassa e crescimento de planta, em geral, ocorreu no Argissolo de textura média/argilosa (PAd1) para a lâmina de aplicação de ETFC de 880 mm, correspondente à taxa de aplicação de sódio de 6,49 t ha⁻¹. No Argissolo de textura arenosa/média (PAd2), as variáveis de crescimento e produção variaram linearmente com as lâminas de ETFC aplicadas, sendo assim, a melhor resposta ocorreu para a maior taxa de aplicação (1146 mm de ETFC). As concentrações de nutrientes nos solos foram compatíveis com valores de referência para a cultura do eucalipto. O estudo, também, indicou que ocasionais descargas dos sais acumulados na zona radicular seriam necessárias para minimizar seus efeitos na disponibilidade de água e na toxicidade para as plantas. Assim, a aplicação intermitente do efluente, intercalada por períodos com aplicação de água não salina (chuva ou irrigação), deverá possibilitar a remoção de grande quantidade de sais, especialmente nos solos mais arenosos. Em geral, o comportamento relativamente bom do sistema solo-planta, quando submetido a diferentes

taxas de aplicação do efluente, confirma a possibilidade do aproveitamento agrícola do ETFC.

ABSTRACT

REZENDE, Ana Augusta Passos, D.S., Universidade Federal de Viçosa, november 2003. Fertirrigation of eucalyptus with treated bleached kraft mill effluent. Adviser: Antônio Teixeira de Matos. Committee members: Mauro Martinez, Nairan Félix de Barros and Cláudio Mudado Silva.

Land application of treated pulp mill effluent through fertirrigation appears to be an attractive option for eucalyptus nutrition and water supply. It also constitutes a supplementary treatment process or final disposal of the mill effluent. The aim of this study was to investigate and evaluate the effects of eucalyptus fertirrigation using a bleached kraft pulp mill treated effluent (BKME) on the soil-water-plant system, i.e., on soil and groundwater physical and chemical properties, on above and below ground plant biomass and on plant growth and nutrition. Biologically treated effluent from a bleached pulp mill was characterized and used in controlled environment (greenhouse) experiments to investigate the effects of eucalyptus fertirrigation. Three characteristic soils from a Brazilian eucalyptus plantation and five different BKME application rates were tested. These rates were defined according to the load of the predominant BKME cation, sodium ($\text{t sodium}\cdot\text{ha}^{-1}$). The main results observed after BKME application over a six month period were the following. An expressive increase in the salinity of the studied soils was observed, especially at high BKME application rates. No dispersal effects in soil with high clay content were observed. BKME contained low levels of magnesium and phosphorus,

indicating the need for complementation of these nutrients in the fertirrigation. There was a high risk of groundwater contamination in sandy soil, in spite of the reduction of BOD, nitrate and micronutrients in the leachate. Increases in leachate color and concentrations of elements such as potassium, sodium and chloride were observed at the highest application rate (1146 mm of BKME, corresponding to a loading rate of 8 t sodium.ha⁻¹). In general, the best biomass productivity and plant growth results were obtained in fine textured soil at a BKME application rate of 880 mm, corresponding to a loading rate of 6.49 t sodium.ha⁻¹. The lowest growth rate and biomass production results were observed for the sandy soil. plant growth and biomass production varied linearly with the BKME application rates in the medium textured soil and thus the best results were obtained at the highest rate (1146 mm of BKME). In general, the nutrient concentrations in the soils that received BKME were within the allowable limits for eucalyptus cultivation. The study also indicated that discharges of the salt accumulated in the root zone would be necessary to minimize its effects on the water supply and on plant toxicity. Intermittent application of the effluent, intercalated with periods of application of non-saline water (rain or irrigation), should make it possible to remove a great amount of salts, especially in the sandy soils. In general, the good response of the soil-plant system under different effluent application rates confirms the possibility of agricultural use of BKME.

1. INTRODUÇÃO

A indústria de celulose e papel é considerada uma das atividades mais bem-sucedidas do setor industrial brasileiro de base florestal, o qual é responsável por cerca de 4% do Produto Interno Bruto, sendo a produção anual de celulose da ordem de 8,7 milhões de toneladas (ABTCP, 2003).

A matéria prima para o processo de fabricação da celulose no Brasil é proveniente, em sua maior parte, de florestas plantadas de eucalipto (cerca de 70%) e de pinus, espécies vegetais de rápido crescimento e que atendem os requisitos qualitativos do processo fabril. Estas florestas são planejadas e, dependendo das condições climáticas e de disponibilidade de água e nutrientes no solo, podem proporcionar produtividades superiores a $50 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ (Barros, 2000).

Contudo, as elevadas taxas de crescimento das espécies de eucalipto impõem elevada demanda sobre os recursos de solo, em especial água e nutrientes, exigindo um manejo intenso do sistema solo-água-planta. A seleção de técnicas de manejo compatíveis com a capacidade do sítio em fornecer água e nutrientes para as plantas constitui um dos aspectos fundamentais para garantir a sustentabilidade florestal, isto é, a manutenção ou o incremento da produção florestal, ao longo de rotações ou de colheitas sucessivas (Barros & Comerford, 2002). Esta sustentabilidade estaria comprometida se as técnicas de manejo levarem ao uso excessivo da água de recarga dos aquíferos, tendo

em vista a crescente escassez de recursos hídricos, e a deterioração de sua qualidade, a qual é essencial tanto à vida humana, quanto ao processo fabril.

A fertirrigação de florestas plantadas vem sendo aplicada em escala experimental, com o objetivo de se agregar às técnicas silviculturais de manejo, visando aumentar a disponibilidade (e ou a eficiência de uso) dos recursos água e nutrientes para o plantio, e, conseqüentemente, aumentar a produtividade.

Nos últimos anos, os requerimentos legais relativos ao gerenciamento das águas tornaram-se mais restritivos, fazendo-se necessário investigar alternativas para seu reuso e melhoria dos processos de tratamento e disposição final das águas residuárias. Isto fez com que houvesse um crescente interesse na aplicação de águas residuárias municipais e industriais no solo, tornando estas numa forma de adição de água e nutrientes ao ecossistema florestal.

A indústria de celulose está entre aquelas que vêm considerando e empregando a disposição no solo como uma alternativa no gerenciamento de seus resíduos. A indústria de celulose requer um grande volume de água em seu processo fabril, podendo demandar valores acima de 100 m³ por tonelada de polpa produzida (Carter & Gleadow, 1994). Conseqüentemente, produz um grande volume de efluentes, cujas características variam de acordo com o processo de fabricação utilizado. Assim, a disposição destes efluentes, via fertirrigação, torna-se uma opção atrativa para a destinação final destas águas residuárias. Além de operar como um processo adicional aos sistemas de tratamento existentes, reduzindo a carga de efluente lançada no corpo d'água receptor, constitui, também uma fonte suplementar de água e nutrientes para as plantas.

A experiência acumulada sobre o assunto indica que o processo de disposição de efluente no solo deve ser entendido, planejado e gerenciado com o mesmo grau de atenção e importância dado a qualquer outro processo operacional. Dada à complexidade da constituição química dos efluentes de fábricas de celulose, há, ainda, a necessidade de maiores informações e de melhor entendimento do comportamento, no solo e na cobertura vegetativa, dos seus principais constituintes, bem como das limitações referentes à

qualidade da água subterrânea, para que se possam estabelecer condições operacionais seguras de sistemas de disposição desses efluentes no solo.

Neste sentido, com este estudo objetivou-se investigar, por meio de experimentos em ambientes controlados (casa-de-vegetação), os efeitos, sobre o solo e o eucalipto, da disposição do efluente do tratamento secundário do processo de fabricação de celulose branqueada (ETFC) no solo, como definir taxas de aplicação dos efluentes por fertirrigação, além de avaliar os riscos ambientais associados a esta prática. Os objetivos específicos foram: (a) caracterizar o ETFC e avaliar o uso deste efluente na fertirrigação; (b) avaliar os efeitos da aplicação de diferentes taxas de aplicação do ETFC na fertirrigação do eucalipto sobre as características morfológicas, o estado nutricional e a produtividade das plantas; e sobre as características físicas e químicas do material de solo e da água percolada em colunas preenchidas com material de solos representativos de áreas de produção de eucalipto; (c) avaliar o efeito de chuvas simuladas nas características físicas e químicas do solo e da água percolada; e (d) avaliar a vulnerabilidade dos solos à contaminação do lençol freático como consequência da prática da fertirrigação com ETFC.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. Geração e tratamento do efluente de fábricas de celulose

A natureza e a composição do efluente de fábricas de celulose encontram-se bem documentadas em termos de parâmetros de controle da poluição. Porém, a quantidade e a concentração dos efluentes de uma fábrica é função do tipo de processo utilizado e das práticas operacionais, bem como do grau de reuso da água. As indústrias de celulose diferem em tamanho, tipo de matéria-prima processada, processos industriais e produtos finais.

No sentido de avaliar o volume e as características dos efluentes da indústria de celulose e sua potencialidade de ser aplicado no solo, torna-se necessário um conhecimento básico do processo de fabricação da celulose.

2.1.1. Processos de fabricação da celulose e geração do efluente

Os processos de fabricação de celulose são constituídos por três unidades operacionais básicas: a preparação da matéria-prima, que consiste no descascamento e lavagem de toras de madeiras e obtenção dos cavacos; a polpação, que inclui o cozimento da madeira, a depuração, a lavagem, o peneiramento, e o branqueamento da polpa. No caso de uma fábrica integrada, tem-se, em seqüência, o processo de fabricação do papel.

A fonte primária de fibra para fabricação da celulose é a madeira, sendo que, no Brasil, ela é oriunda principalmente do eucalipto, o qual produz a polpa celulósica denominada “fibra curta”. O processo de polpação separa a celulose e a hemicelulose dos demais constituintes da madeira (lignina, extrativos, dentre outros). Os processos de polpação utilizados podem ser classificados como mecânicos, térmicos, químicos e combinações destes. Os processos de polpação química envolvem a separação das fibras da madeira com emprego de produtos químicos inorgânicos e podem ser classificados em alcalinos, no qual são utilizados os processos sulfato ou kraft e o processo soda, e o processo ácido que constitui o processo sulfito.

O processo kraft constitui o processo de fabricação de celulose branqueada mais comumente usado no Brasil e no mundo. No processo kraft, a polpação envolve o cozimento dos cavacos de madeira em solução alcalina de hidróxido de sódio (NaOH) e sulfeto de sódio (Na₂S), denominado de licor de cozimento ou licor branco, realizado em reatores pressurizados sob alta temperatura, quando a solução alcalina proporciona a extração e solubilização da lignina.

Após a separação da polpa, o licor do cozimento, agora denominado de licor preto, segue para o setor de recuperação onde é evaporado em evaporadores de múltiplos estágios, alcançando uma concentração de sólidos acima de 70%. O licor concentrado é encaminhado para uma caldeira, denominada caldeira de recuperação, onde é queimado. A parcela inorgânica do licor é recolhida e encaminhada para o setor de caustificação onde é transformada em licor branco e retorna para o cozimento da madeira. Este processo possibilita uma alta reciclagem dos produtos químicos usados no cozimento, a extração de subprodutos úteis e a produção de energia da queima do licor preto (Silva, 1999). O processo de cozimento produz uma polpa marrom escura que é depurada, lavada e encaminhada para a planta de branqueamento de multi-estágios (Carter & Gleadow, 1994). O branqueamento objetiva limpar e remover o residual de lignina e outras substâncias cromóforas da polpa celulósica.

No processo de branqueamento pode-se utilizar o cloro gasoso ou reagente à base de cloro, como o dióxido de cloro (ClO₂), e outros reagentes como oxigênio (O₂), ozônio (O₃) e peróxido de hidrogênio (H₂O₂). Os estágios

de branqueamento são constituídos de um misturador, seguido de um reator (torres de branqueamento) e por lavador da polpa. A água utilizada para lavagem da polpa neste setor não é reutilizada no processo, tornando-se o maior volume de efluente líquido direcionado para a estação de tratamento de efluentes, contendo alto teor de material orgânico, cor intensa e, sobretudo compostos organoclorados. Estes compostos são originados da ligação do cloro com os precursores orgânicos presentes na madeira, quando o cloro ou compostos de cloro são utilizados como agentes de branqueamento (Silva, 1997).

No entanto, a tecnologia de branqueamento tem se desenvolvido rapidamente de forma que é possível produzir, hoje, polpa totalmente branqueada por meio da substituição do uso de cloro elementar por dióxido de cloro, utilizando-se as seqüências denominadas ECF (Elemental Chlorine Free), ou dispensando-se totalmente o uso de compostos a base de cloro, ou seja, utilizando-se as seqüências denominadas TCF (Total Chlorine Free) (Smook, 1990). Os efeitos tóxicos de tais efluentes não estão totalmente avaliados, porém evidências vêm mostrando que a conversão das seqüências de branqueamento para ECF e TCF elimina, virtualmente, a produção de compostos clorados persistentes e bioacumulativos dos efluentes do branqueamento (UNEP, 1996; Silva, 1997).

Após o branqueamento, a polpa é seca e embalada, ou segue para a máquina de papel nas fábricas integradas.

2.1.2. Tratamento e composição do efluente final do processo de fabricação da celulose

A quantidade de água requerida numa indústria de celulose e papel pode variar de 20 a 450 m³tsa⁻¹ (tonelada seca ao ar) de celulose produzida (Allen & Liu, 1997; Carter & Gleadow, 1994; Thacker, 1985b). Em termos de capacidade de produção, as fábricas variam em tamanho podendo processar de 50 t.dia⁻¹ até quantidades maiores que 1500 t.dia⁻¹ (Allen & Liu, 1997). Vários setores da fábrica de celulose e papel geram efluentes, tais como licor da polpação, água de lavagem da polpa, efluente da planta de branqueamento e efluente da máquina de papel. O setor de branqueamento gera de 40 a 60 %

dos efluentes totais da fábrica de celulose kraft branqueada. Normalmente, o fluxo individual de cada efluente setorial é misturado antes do tratamento, produzindo o efluente geral ou efluente combinado.

A carga poluente do efluente final da indústria de celulose depende, principalmente, das tecnologias empregadas nos processos de polpação e branqueamento. Os efluentes dos processos de polpação e branqueamento possuem composição química variada. Os fatores que contribuem para esta complexidade química são (a) a fonte de madeira; (b) o processo químico empregado no branqueamento; (c) o grau de fechamento de circuito, o controle de derrames, o sistema de coleta e manejo dos condensados provenientes da evaporação do licor preto; (d) o tipo de substâncias químicas adicionadas no processo; (e) a carga orgânica que entra na planta de branqueamento, o grau de designificação; (f) o tipo e a eficiência do tratamento de efluentes, e (g) as instabilidades no processo (Carter & Gleadow, 1994; Allen & Liu, 1997; UNEP, 1996). Assim, há uma grande variação de fábrica para fábrica, sendo, por isso, não esperado encontrar efluentes idênticos. O processo kraft de polpação é responsável pela geração de efluentes contendo altas concentrações dos elementos sódio, sulfato, cloreto, e cor intensa.

A maioria das fábricas tem suas próprias estações de tratamento, onde o efluente tratado é lançado no corpo de água receptor. Outras lançam o efluente, após sedimentação prévia, no sistema de esgoto doméstico do município para o tratamento conjunto.

O tratamento das águas residuárias do processo de fabricação de celulose geralmente é constituído por um tratamento preliminar, onde ocorre a remoção de sólidos grosseiros, por gradeamento; por um tratamento primário, em decantadores primários, onde ocorre a remoção de parte do material orgânico e de sólidos em suspensão; e de um tratamento secundário ou tratamento biológico, onde ocorre a degradação da matéria orgânica dissolvida quantificada pela DBO (Demanda Bioquímica de Oxigênio) e/ou pela DQO (Demanda Química de Oxigênio). Nas fábricas de celulose kraft no Brasil e no mundo os processos de tratamento aeróbios são os mais utilizados. Os processos de tratamento de efluentes utilizando sistemas de lodo ativado e de lagoa mecanicamente aerada são aqueles que mais se destacam para o tratamento dos efluentes de fábrica de celulose kraft. Para melhor desempenho

do tratamento biológico na remoção do material orgânico, podem ser adicionados nutrientes (nitrogênio e fósforo) aos efluentes. Em alguns casos, torna-se necessária a realização de tratamento terciário, que tem como objetivo a remoção de poluentes específicos (usualmente tóxicos ou compostos não biodegradáveis) ou ainda, a remoção complementar de poluentes não suficientemente removidos no tratamento secundário (von Sperling, 1996).

Os parâmetros mais importantes no monitoramento dos efluentes de indústrias de celulose são os sólidos suspensos (SS), a DBO₅ (Demanda Bioquímica de Oxigênio obtida após 5 dias de incubação da amostra, sob temperatura de 20°C), a DQO (Demanda Química de Oxigênio), a cor, os derivados fenólicos e os compostos organoclorados. Os constituintes químicos dos efluentes, de maior importância no caso de uso em fertirrigação são os nutrientes N (nitrogênio), P (fósforo) e K (potássio), Na⁺ (sódio), Ca²⁺ (cálcio), Mg²⁺ (magnésio) e B (boro), e os metais pesados Cd (cádmio), Cr (cromo), Cu (cobre), Hg (mercúrio), Ni (níquel), Mo (molibdênio), Pb (chumbo), e Zn (zinco).

As concentrações de DBO₅ em efluentes sem tratamento de indústria de celulose kraft branqueada situam-se na faixa entre 250 e 400 mgL⁻¹. As concentrações de DQO estão na faixa entre 400 e 1350 mgL⁻¹. Os sólidos suspensos geralmente tendem a variar de 20 a 400 mgL⁻¹, porém concentrações tão altas quanto 1000 mgL⁻¹ podem ocorrer, dependendo da forma de operação da fábrica (Rezende, 1999). Assim, os efluentes de celulose e papel tendem a ser mais concentrados do que os esgotos domésticos típicos. Estas elevadas concentrações de sólidos suspensos totais são indicativas de que o tratamento preliminar e o tratamento primário são indispensáveis no aproveitamento dessas águas residuárias em irrigação.

A cor elevada dos efluentes é decorrente da presença de derivados da lignina, principalmente provenientes da linha de fibras e do branqueamento, e não é removida nos tratamentos primário e secundário (McKague & Carlberg, 1996). Os valores de pH de efluentes combinados, não tratados, tende a ficar na faixa de 6 a 9. Entretanto, efluentes das operações de polpação e branqueamento podem ser muito ácidos ou alcalinos.

Os efluentes sem tratamento, ou seja, efluentes brutos, provenientes de fábricas de celulose são deficientes em nitrogênio e fósforo, com exceção das

fábricas que adotam amônia como agente de polpação (Thacker, 1985b; Priha, 1994). De forma a aumentar a eficiência do tratamento biológico dos efluentes, nitrogênio e fósforo são freqüentemente introduzidos no processo, porém estes efluentes secundários tendem, ainda, a ter concentrações mais baixas destes nutrientes do que o esgoto doméstico tratado de forma similar, cujos valores variam de 15 a 50 mg.L⁻¹ para o nitrogênio, e 2 a 20 mg.L⁻¹ para o fósforo (von Sperling, 1996).

Os efluentes da indústria de celulose podem possuir altas concentrações de sódio e de sólidos dissolvidos, pois compostos de sódio são empregados como licor de polpação em diversos processos, tais como kraft ou processo sulfato, soda, quimiotermodinâmicos e outros. São também encontrados teores significativos de potássio, magnésio e cálcio (Rezende, 1999), porém, os elementos predominantes no efluente são sódio e cloreto.

Os efluentes de fábricas de celulose e papel possuem baixas concentrações, ou concentrações insignificantes de metais pesados e de outros elementos traço de importância ambiental (Rezende, 1999). O tratamento secundário remove de forma eficiente tais elementos, quando presentes no efluente bruto.

O branqueamento com compostos à base de cloro, normalmente o cloro molecular (Cl₂) e o dióxido de cloro (ClO₂), produz grande variedade de compostos organoclorados nos efluentes do branqueamento. Uma medida aproximada da concentração de material orgânico clorado nos efluentes é o AOX "Adsorbable Organic Halogen". As concentrações de AOX variam de 8 mg L⁻¹ a valores superiores a 20 mgL⁻¹, dependendo de fatores tais como conteúdo de lignina na polpa, a tecnologia adotada no branqueamento, o consumo de água, e o tratamento adotado no efluente (Allen & Liu, 1997). As eficiências de remoção de AOX variam nos sistema de tratamento secundário por lodos ativados ou lagoas aeradas (Kookana & Rogers, 1995). Jokela et al. (1993) reportaram eficiências de remoção de AOX em sistemas de lodos ativados variando de 19 a 55%. Outros trabalhos indicaram eficiências da ordem de 22 - 40% (Nevalainen et al., 1991). Similares eficiências foram reportadas para sistemas de lagoas aeradas (Bryant & Barkley, 1991). Segundo Bryant & Barkley (1991) e Collins & Allen (1991), a maior parte do AOX removido nestes processos biológicos é constituída por compostos de

baixo peso molecular, indicando que, os efluentes tratados possam ainda conter uma carga significativa de compostos orgânicos com alto peso molecular.

Os efluentes do processo industrial são isentos de coliformes fecais, entretanto, se forem misturados aos esgotos sanitários da fábrica, organismos patogênicos entéricos poderão estar presentes (Ogden & Nutter, 1993). Foi reportada a presença de números consideráveis de bactérias, actinomicetes, fungos, leveduras e *Azotobacter* em efluente combinado da fabricação de papel (Kannan & Oblisami, 1990a).

2.2. Disposição de águas residuárias no solo

A terminologia disposição no solo tem sido definida como aplicação planejada e controlada de um resíduo específico sobre a superfície do solo a fim de se alcançar um grau específico de tratamento, por meio de processos físicos, químicos e biológicos que ocorrem naturalmente no sistema água-solo-planta (Metcalf & Eddy, 1991; Sanks & Asano, 1976; USEPA, 1981).

A aplicação de águas residuárias no solo tem se tornado uma tecnologia moderna aceitável, apesar de suas raízes serem centenárias (Phung, 1978; Ogden & Nutter, 1993), e suas potencialidades têm sido, recentemente, reconhecidas no campo da engenharia (Metcalf & Eddy, 1991; USEPA, 1981). Nos últimos 20 anos, tem sido renovado o interesse nos métodos de disposição/tratamento de resíduos no solo, entendendo as águas residuárias como uma fonte de água e nutrientes, incluindo o uso em plantios florestais (Cromer et al., 1984; Myers et al., 1995; NCASI, 1985; Urie & Red, 1986; Crites & Reed, 1986; Nutter & Red, 1985).

O objetivo da disposição de resíduos no solo é a sua destinação final em quantidades que não venham a comprometer os componentes ambientais (solo, água, ar, organismos, etc.). No processo de tratamento por disposição no solo utiliza-se do sistema solo-planta para a degradação, assimilação e imobilização dos constituintes da água residuária, bem como dos produtos de sua transformação no meio. O solo tem normalmente um papel importante na disposição de águas residuárias, atuando como depósito e meio de tratamento

para os diferentes constituintes químicos da água residuária. No sentido de identificar o efeito do solo na água residuária, e vice-versa, torna-se importante conhecer as características físicas e químicas do solo antes e após a sua aplicação.

A vegetação constitui outro importante componente do sistema, agindo como extratora de grande parte dos macros e micronutrientes disponíveis, evitando seu acúmulo e a conseqüente salinização do meio e contaminação das águas superficiais e subterrâneas. Permite, também, a melhoria de algumas características do solo tais como a sua estrutura, proporcionando aumento da infiltração e percolação de água. As espécies vegetais ao serem selecionadas, segundo Feigin et al. (1991), devem atender a, no mínimo, um dos seguintes objetivos: consumo de água, remoção de contaminantes, tolerância aos sais, produção de biomassa, rápido crescimento, e habilidade de fixação de nitrogênio atmosférico.

A avaliação das características microbianas e bioquímicas das águas residuárias, isto é, do efluente, permite verificar se as mesmas reúnem as condições especificadas pelas normas e critérios de saúde pública, tendo em consideração o tipo de cultura, o solo, a forma de aplicação no solo. O conhecimento das características químicas do efluente permite determinar a taxa de aplicação e os meios pelos quais podem ser minimizados os impactos negativos do mesmo na área destinada à sua disposição.

Os princípios da regulamentação da disposição no solo relacionam-se à manutenção e melhoria da qualidade do sistema solo-planta com o mínimo risco à saúde humana e a outros receptores ambientais.

2.2.1. Métodos e taxas de aplicação das águas residuárias no solo

O método e a taxa de aplicação da água residuária devem ser coerentes com as características do sistema solo-planta.

Os efluentes devem ser aplicados em quantidades previamente calculadas, de acordo com a capacidade de assimilação do sistema solo-planta, que dependem de fatores específicos de cada área, como propriedades físicas e químicas do solo, taxas de absorção da vegetação, limitações de

qualidade da água subterrânea e de risco de prejuízos a outras atividades biológicas.

As características das águas residuárias que irão limitar a sua aplicação no solo são determinadas por meio de balanços de água, de nutrientes como nitrogênio e fósforo, de material orgânico e de outros constituintes presentes em concentrações significativas. Em geral, o projeto de sistemas de aplicação é controlado pela taxa de aplicação hidráulica ou lâmina de aplicação, ou seja, pelo volume de água residuária aplicada por unidade de área por um determinado período de tempo.

Em alguns casos, o fator de controle constitui a taxa de carga orgânica, como no caso de águas residuárias muito concentradas. Em algumas águas residuárias industriais, outros fatores devem ser levados em consideração, tais como carga de sais, ou carga de metais. Entretanto, em geral, para águas residuárias com valores de DBO iguais ou inferiores a 1000 mg L^{-1} , as taxas de aplicação podem ser definidas com base na taxa de aplicação hidráulica (Rowe & Abdel-Magid, 1995).

Em sistemas projetados para obtenção de um ótimo crescimento da cultura, a taxa de aplicação hidráulica constitui a quantidade de água a ser usada pela planta, sob condições não restritas, para alcançar a produção potencial (Overcash & Pal, 1979).

Segundo Metcalf & Eddy (1991), existem três métodos básicos de aplicação de águas residuárias no solo: infiltração rápida (métodos de inundação ou infiltração-percolação), escoamento superficial, e infiltração lenta ou irrigação, dentre outros processos naturais como áreas alagadas construídas (wetlands), aplicação subsuperficial e aqüicultura.

Em sistemas de *infiltração rápida*, o efluente é aplicado no solo por aspersão ou por inundação de superfície, os mesmos métodos usados na irrigação, porém com taxas de aplicação da ordem de $400 \text{ m}^3\text{ha}^{-1}\text{d}^{-1}$. Quando alguma cultura é cultivada na área de disposição, a mesma deve ser tolerante ao excesso de água e aos constituintes do efluente (Deemer & Presley, 1983).

Nos sistemas de *escoamento superficial*, a água residuária é aplicada sobre a parte mais alta da rampa de tratamento, de forma a fluir através da vegetação em uma superfície inclinada, até um ponto de descarga específico. A maior parte do efluente tratado é coletada como escoamento superficial no

final da rampa, enquanto que parte é perdida por evapotranspiração ou percolação (Metcalf & Eddy, 1991). As taxas usuais de aplicação de esgoto doméstico por escoamento superficial variam de 60 a 150 mm por semana para esgoto gradeado e de 150 a 400 mm por semana para efluente secundário (Campos,1999).

A *irrigação* consiste do processo mais utilizado ultimamente, sendo o efluente aplicado por aspersão, de forma localizada ou por superfície, em taxas que variam de 30 a 50 m³ha⁻¹d⁻¹ para áreas agricultáveis e acima de 150 m³ha⁻¹d⁻¹ para áreas cultivadas com gramíneas (Metcalf & Eddy, 1991; Rowe & Abdel-Magid, 1995; Feigin et al.,1991). Os parâmetros limitantes para estabelecimento da taxa de aplicação hidráulica constituem a permeabilidade do solo ou a carga para um constituinte em particular, tal como nitrogênio, DBO ou elementos-traço.

No caso de irrigação de culturas agrícolas, os sistemas são projetados pelo requerimento de água para produção do cultivar, e devem ser compatíveis com as práticas agrícolas, as características do solo e da água, o relevo, as condições climáticas, o tipo de cultura irrigada, a técnica de irrigação, como também com os riscos de salinização do solo e de contaminação de águas subterrâneas, e a vazão da água residuária a ser disposta no solo (Ghassemi, 1995).

O uso do termo *fertirrigação com água residuária* é recomendado em substituição ao de infiltração lenta ou irrigação, entendendo que o uso de água residuária como fonte de água para satisfação das necessidades hídricas da cultura poderá comprometer a qualidade do solo e águas subterrâneas, como o desenvolvimento das plantas (Matos, 2003; Matos et al. 2003). Dessa forma, o referencial para definição das taxas de aplicação deixa de ser lâminas, definidas por critérios exclusivamente hidráulicos ou calculadas com base na evapotranspiração da cultura, para passarem a ser definidas pela capacidade do solo e das culturas de assimilar o resíduo aplicado. A taxa de aplicação passa a ser calculada com base no constituinte presente, proporcionalmente, em maior quantidade. Neste caso, podem ser considerados os nutrientes, como nitrogênio, fósforo, potássio, ou mesmo elementos tóxicos, que passam a ser fatores limitantes, tais como sódio, cloro e metais pesados.

A *fertirrigação* pode ser feita utilizando-se técnicas de aplicação idênticas às utilizadas para irrigação convencional, porém, caso estejam em solução íons ou substâncias que possam trazer problemas se aplicados sobre o dossel das plantas, recomenda-se a aplicação localizada (microaspersão ou gotejamento) (Costa e Brito, 1994).

Em muitas técnicas de disposição são comuns períodos de repouso da aplicação da água residuária, como aplicações sazonais, o que permite tempo para a degradação da matéria orgânica pelos microrganismos, e para a drenagem da água de forma a restabelecer condições aeróbias. Estes períodos de repouso dependem do método de disposição, do solo, da cultura, e de considerações de manejo. Usualmente resultam em variações relativamente grandes nas taxas de aplicação, e conseqüentemente, requerem maiores áreas de estocagem e de aplicação da água residuária.

2.2.2. Critérios de qualidade da água para aproveitamento agrícola

As informações encontradas na literatura sobre qualidade de água para aproveitamento agrícola referem ao seu uso como água de irrigação. Nesta técnica as lâminas aplicadas são sempre muito maiores do que no caso de uso como fertirrigação. Entretanto, as informações encontradas podem ser úteis para predição dos problemas que podem ocorrer com o solo e plantas.

A qualidade das águas residuárias que receberam tratamento e que é requerida para irrigação varia, dependendo de fatores de saúde pública, econômicos e ambientais, de barreiras institucionais e preocupações sociais e legais. Alguns fatores relevantes para avaliação das águas de irrigação compreendem: riscos à saúde, a salinidade, a sodicidade, a toxicidade específica de íons, a concentração de nutrientes (N, P) e os bicarbonatos, o pH, o cloro residual, e a possibilidade de alteração da permeabilidade do solo.

Quanto à limitação da água de irrigação relativa aos riscos à saúde, advindos de sua qualidade microbiológica, estão apresentados nos Quadros 1 e 2 critérios adotados pela Agência de Proteção Ambiental norte americana, USEPA, e os recomendados pela Organização Mundial de Saúde (OMS).

Quadro 1 - Critérios de qualidade microbiológica recomendados pela USEPA para a utilização de águas residuárias na agricultura^{1/}.

Tipo de irrigação e cultura	Processo de tratamento	Qualidade do efluente
Culturas alimentícias não processadas comercialmente Irrigação superficial ou por aspersão de qualquer cultura, incluindo culturas a serem consumidas cruas	Secundário + filtração + desinfecção	DBO ≤ 10mg.L ⁻¹ Turbidez ≤ 2UNT ^{3/} Cloro residual > 1 mg.L ⁻¹ ^{4/} Coliformes fecais ND Organismos patogênicos ND
Culturas alimentícias processadas comercialmente ^{2/} Irrigação superficial de pomares e vinhedos	Secundário + desinfecção	DBO ≤ 30 mg.L ⁻¹ SS ≤ 30 mg.L ⁻¹ Cloro residual ≥ 1 mg.L ⁻¹ Coliformes fecais ≤ 200/100mL ^{5/}
Culturas não alimentícias Pastagens para rebanhos de leite ^{1/} , forrageiras, cereais, fibras e grãos	Secundário + desinfecção	DBO ≤ 30 mg.L ⁻¹ SS ≤ 30 mg.L ⁻¹ Cloro residual ≥ 1 mg.L ⁻¹ Coliformes fecais ≤ 200/100mL
Irrigação, campos de esportes, parques, jardins e cemitérios	Secundário + filtração + desinfecção	DBO ≤ 10mg.L ⁻¹ Turbidez ≤ 2UNT Cloro residual ≥ 1 mg.L ⁻¹ Coliformes fecais ND Organismos patogênicos ND

1/ USEPA (1992). O consumo de culturas irrigadas não deve ser permitido antes de 15 dias após a irrigação; desinfecção mais rigorosa (< 14 CF/100mL) se o período de 15 dias não for observado. 2/ Culturas alimentícias processadas comercialmente são aquelas que recebem processamento físico ou químico, prévio à comercialização, suficiente para a destruição de patógenos. 3/ turbidez pré-desinfecção, média diária; nenhuma amostra > 5 UNT. 4/ cloro residual livre após tempo de contato mínimo de 30 minutos; residuais ou tempo de contato mais elevados podem ser necessários para garantia de inativação de vírus e parasitas. 5/ média móvel de sete dias; nenhuma amostra > 800 CF/100mL; lagoas de estabilização podem alcançar o critério de qualidade sem a necessidade de desinfecção.

Quadro 2 - Critérios de qualidade microbiológica recomendados pela OMS para a utilização de águas residuárias na agricultura ^{1/}.

Categoria	Tipo de irrigação e cultura	Nematóides intestinais (ovos.L ⁻¹) ^{2/}	Coliformes fecais (org./100mL) ^{3/}	Processo de tratamento
A	Culturas a serem consumidas cruas, campos de esporte, parques e jardins ^{4/}	<1	<1000	Lagoas de estabilização em série, ou tratamento equivalente em termos de remoção de patogênicos.
B	Culturas processadas industrialmente, cereais, forragens, pastagens, árvores ^{5/}	<1	Sem recomendação	Lagoas de estabilização com 8 – 10 dias de tempo de detenção ou remoção equivalente de helmintos e coliformes fecais.
C	Irrigação localizada de plantas da categoria B na ausência de riscos para os agricultores e público em geral	Não aplicável	Não aplicável	Pré-tratamento de acordo com o método de irrigação, no mínimo sedimentação primária.

1/ OMS (1989), Em casos específicos as presentes recomendações devem ser adaptadas a fatores locais de ordem ambiental, sócio-cultural, e epidemiológica. 2/ média aritmética durante o período de irrigação; Ascaris, Trichuris, Necator e Ancylostoma. 3/ média geométrica durante o período de irrigação. 4/ para parques e jardins onde o acesso público seja permitido: 200 CF/100mL. 5/ no caso de árvores frutíferas, a irrigação deve terminar duas semanas antes da colheita e nenhum fruto deve ser apanhado do chão. Irrigação por aspersão não deve ser empregada.

Ressalta-se que são recomendados pela USEPA, para a irrigação irrestrita ou irrigação por aspersão em qualquer situação, padrões microbiológicos de qualidade de águas residuárias semelhantes aos padrões de potabilidade de água, enquanto os critérios estabelecidos pela OMS, para irrigação irrestrita, são mais rigorosos quanto à presença de ovos de helmintos, mas flexíveis quanto à qualidade bacteriológica, e omissos em relação a vírus e protozoários.

No Quadro 3 estão apresentados os critérios de qualidade de água recomendados para irrigação de longa ou curta duração. Na Quadro 4, por sua vez, estão apresentadas algumas diretrizes para interpretação da qualidade da

Quadro 3 - Critérios da qualidade da água de irrigação no que se refere aos metais.

Parâmetros	Limites máximos recomendados para metais (mg L ⁻¹)	
	Irrigação em base contínua ^{1/}	Até 20 anos de irrigação ^{2/}
Alumínio (Al)	5,0	20
Arsênio (As)	0,10 ^{3/}	2
Boro (B)	0,75	2
Cádmio (Cd)	0,01	0,05
Crômio (Cr)	0,10	1
Cobre (Cu)	0,20	5
Manganês (Mg)	0,20	10
Molibdênio (Mo)	0,01	0,05 ^{4/}
Níquel (Ni)	0,20	2
Chumbo (Pb)	5,0	10
Selênio (Se)	0,02	0,02
Cobalto (Co)	0,05	-
Zinco (Zn)	2,0	2,0
Ferro (Fe)	5,0	20

Fonte: UNEP(1996).

1/ limites para qualquer tipo de solo. Concentração máxima baseada na taxa de aplicação consistente com boas práticas de irrigação (10.000 m³ha⁻¹ano⁻¹), para consumo contínuo de água num mesmo lugar. 2/ limites para solos neutros a alcalinos (pH 6 a 8,5) de textura fina. 3/ culturas sensíveis. 4/ apenas solos ácidos.

água para fins de irrigação, segundo Ayers e Westcot (1991). Estas diretrizes foram formuladas prevendo o risco potencial à produção da cultura associada à irrigação por longo período.

Uma classificação da qualidade da água para irrigação, em termos de risco de salinidade, normalmente mensurada pelos sólidos dissolvidos totais (SDT) ou pela condutividade elétrica, foi elaborada por McNeal (1981) e apresentada no Quadro 5.

Os conceitos de salinidade, sodicidade e toxicidade iônica, apresentados no Quadro 4, são aplicáveis também para irrigação localizada (Leon & Cavallini, 1999), ressaltando-se, porém, que se deve levar em conta a qualidade da água sob o ponto de vista de possível entupimento de emissores,

Quadro 4 - Diretrizes para interpretação da qualidade da água de irrigação^{1/}.

Problemas e constituintes relacionados com unidades	Grau de restrição ao uso			
	Nenhuma	Leve a moderada	severa	
Salinidade				
CE da água de irrigação	dS m ⁻¹	< 0,7	0,7 - 3,0	> 3,0
SDT (sólidos dissolvidos totais)	mg L ⁻¹	< 450	450 - 2000	> 2000
Efeitos na permeabilidade do solo				
	dS m ⁻¹			
RAS = 0 - 3 e CE =		> 0,7	0,7 - 0,2	< 0,2
RAS = 3 - 6 e CE =		> 1,2	1,2 - 0,3	< 0,3
RAS = 6 - 12 e CE =		> 1,9	1,9 - 0,5	< 0,5
RAS = 12 - 20 e CE =		> 2,9	2,9 - 1,3	< 1,3
RAS = 20 - 40 e CE =		> 5,0	5,0 - 2,9	< 2,9
Toxicidade (efeitos em culturas sensíveis)				
Sódio (Na ⁺) - irrigação por superfície	RAS	< 3	3 - 9	> 9
- irrigação por aspersão	mg L ⁻¹	< 70	> 70	-
Cloreto (Cl ⁻) - irrigação por superfície	mg L ⁻¹	< 140	140 - 350	> 350
- irrigação por aspersão	mg L ⁻¹	< 100	> 100	-
Boro (B)	mg L ⁻¹	< 0,7	0,7 - 3,0	> 3
Miscelâneos (efeitos em culturas sensíveis)				
N total	mg L ⁻¹	< 5	5 - 30	> 30
HCO ₃ (aspersão sobre a copa)	mg L ⁻¹	< 90	90 - 500	> 500
pH	unidade	6,5 - 8,4		
cloro residual (aspersão sobre a copa)	mg L ⁻¹	< 1,0	1,0 - 5,0	> 5,0

1/ Fonte: University of California Committee of Consultants (1974) apud Ayers & Westcot (1991).

Quadro 5 - Guia geral para salinidade na água de irrigação^{1/}.

Classificação	SDT ^{2/} (mg L ⁻¹)	CE ^{3/} (dS. m ⁻¹)
Águas sem efeitos deletérios conhecidos	≤ 500	≤ 0.75
Águas de efeitos deletérios para culturas sensíveis	500- 1000	0,75 – 1,5
Águas que podem ter efeitos deletérios para muitas culturas, requerendo cuidados no manejo	1000-2000	1,5 - 3
Águas que podem ser usadas para culturas tolerantes em solos permeáveis, requerendo cuidadoso manejo	2000-5000	3 – 7,5

1/ Adaptado de USEPA, 1981; 2/ Sólidos dissolvidos totais; 3/ Condutividade elétrica.

causados por fatores de ordem física, química e, ou, biológica. O entupimento nos sistemas pode ocorrer devido a um fator ou combinação de fatores, ou seja: presença de altas concentrações de matéria suspensa (material orgânico e material inorgânico); precipitação de compostos de cálcio e magnésio, como também fertilizantes dissolvidos (fosfato, amônia, ferro, zinco, cobre e manganês) e metais pesados na água; e (c) presença e crescimento de algas, bactérias, e outros organismos na água. Não se tem, ainda, estudado qual destes fatores e suas combinações que poderiam causar maior problema de entupimento (Sandri et al., 2001; Leon & Cavallini, 1999; Metcalf & Eddy, 1999; Oron et al., 1980). No Quadro 6 encontram-se resumidas informações sobre faixas de valores e influência de alguns atributos de qualidade da água nos problemas de obstrução em sistemas de irrigação por gotejamento.

2.3. Disposição de efluentes da indústria de celulose no solo

A indústria de celulose encontra-se entre aquelas indústrias que vêm considerando a disposição no solo como uma alternativa no gerenciamento de seus efluentes líquidos. Revisão bibliográfica realizada por Rezende (1999) indicou um considerável número de pesquisas conduzidas neste campo, incluindo algumas em escala real.

Quadro 6 - Influência da qualidade da água no surgimento de problemas de obstrução em sistemas de irrigação localizada ^{1/}.

Problemas	Grau de restrição de uso			
	unidades	nenhuma	moderada	severa
Físicos				
Sólidos em suspensão	mg.L ⁻¹	< 50	50 -100	>100
Químicos				
pH		< 7.0	7.0 – 8.0	>8.0
Sólidos solúveis	mg.L ⁻¹	< 500	500 – 2000	> 2000
Manganês	mg.L ⁻¹	< 0.1	0.1 – 1.5	> 1.5
Ferro	mg.L ⁻¹	< 0.1	0.1 – 1.5	> 1.5
Ácido sulfúrico	mg.L ⁻¹	< 0.5	0.5 – 2.0	> 2.0
Biológicos				
População bacteriana	Nº max.mL ⁻¹	<10000	10.000 – 50.000	> 50.000

1/ Nakayama (1982) apud Ayers & Westcot (1991).

Vários artigos sobre aplicação de efluente de indústria de celulose e papel foram publicados na década de 50 (Crawford, 1958; Gellman, 1960), entretanto, a maioria das experiências relatadas data da década de 80, sendo pequeno o número de artigos publicados recentemente. Estes estudos se concentraram quase que exclusivamente, nos aspectos de produtividade das culturas fertirrigadas e empregaram desde o efluente combinado das fábricas, bruto, ou após tratamento primário e/ou secundário, até efluentes setoriais das fábricas, como condensados oriundos da evaporação do licor preto, águas de lavagem do processo de branqueamento da polpa e licores do cozimento. Problemas relativos à salinidade e ao acúmulo de sódio no solo, bem como taxas de aplicação ideais foram, também, estudadas. Todavia, pouca atenção tem sido dada para o comportamento, no solo, dos compostos orgânicos e inorgânicos presentes nos efluentes. Além disso, os impactos ambientais decorrentes da aplicação do efluente por períodos mais longos não estão totalmente entendidos.

Pesquisas realizadas entre os anos 60 e 80 relatam a relação entre as características do efluente, taxas de aplicação e a germinação de sementes e o

crescimento e sobrevivência de mudas (Flower, 1969; Blosser & Owers, 1964; Blosser & Caron, 1965; Ogden & Nutter, 1993). A maioria das pesquisas esteve concentrada no monitoramento da formação de sais solúveis em solos, na absorção de potássio, cálcio e magnésio pelas plantas, devido ao acúmulo de sódio no solo (Hansen et al., 1980; Rajannan & Oblismani, 1979; Narum, 1979). Outros estudos avaliaram a aplicação no solo como um processo de filtro biológico ou como tratamento de efluentes (Flower, 1969; Gellman, 1960). Nas décadas seguintes, 80 e 90, passou-se a dar maior atenção à qualidade da água subterrânea em áreas de disposição de efluentes da indústria de celulose e papel (Ogden & Nutter, 1993; NCASI, 1985; Kulkarnii, 1988; Fazeli et al., 1991; Abasheyeva et al., 1993; Aw et al., 1993).

As primeiras aplicações do efluente em áreas exploradas com silvicultura ocorreram nos anos 50, na América do Norte, a maior parte em projetos experimentais ou pilotos (Crawford, 1958; Westnhouse, 1960). Nos anos 80, a aplicação do efluente ficou limitada a poucas fábricas e apenas a áreas não florestadas. Várias características, apontadas por Nutter e Red (1985) como únicas do sistema florestal, contribuíram para este cenário: (a) o fato de florestas requererem grandes áreas de aplicação, devido à baixa assimilação de nutrientes por espécies florestais; (b) a grande distância entre as fábricas e as áreas plantadas, inviabilizando economicamente a aplicação; e (d) o pouco conhecimento dos aspectos biológicos associados à prática. Entretanto, deve-se levar em consideração o fato de que a indústria de celulose, nos últimos anos, vem inovando suas tecnologias, principalmente com a adoção de tecnologias mais limpas, o que vem refletindo diretamente nas características do efluente final.

Smith et al. (1997) e Thacker (1985b) estudaram a aplicação do efluente da fabricação da celulose em silvicultura como uma opção atrativa para se alcançar operações que levassem a um crescente fechamento de circuito para o setor florestal.

Para a aplicação no solo de águas residuárias, tem sido comum, adotar a carga de DBO e, em menor número de vezes, a carga de sólidos suspensos, como parâmetros referenciais para a definição da taxa de efluente a ser aplicada no solo. Um valor em torno de $225 \text{ kg ha}^{-1}\text{d}^{-1}$ de DBO tem sido considerado como limite superior na capacidade de assimilação de efluentes

industriais pelo solo, em termos de manutenção da qualidade do solo e da cobertura vegetal (Blosser & Caron, 1965; Braile, 1979). A adição de matéria orgânica ajuda a manter a estrutura do solo, melhora a capacidade de retenção de água e previne a lixiviação de nutrientes. Segundo Braile (1979), taxas substancialmente mais altas (até $750 \text{ kg ha}^{-1} \text{ d}^{-1}$ de DBO) podem ser alcançadas quando se trata de dejetos de indústria alimentícia, principalmente quando a estação de colheita e industrialização dura apenas poucos meses e o sistema adotado é o de infiltração-percolação.

Sólidos suspensos (especialmente fibras), quando presentes em grandes concentrações nos efluentes aplicados podem proporcionar rápido entupimento de tubulações e emissores hidráulicos, tornando inviável seu aproveitamento na fertirrigação do eucalipto (Adin & Sacks, 1991; Rav-Acha et al., 1995). Os sólidos suspensos contribuem também, a princípio, para de problemas de colmatação da superfície do solo (Braile, 1979).

A alta intensidade de cor dos efluentes tem sido mais um fator de incentivo para considerar a aplicação no solo, evitando, assim, causar problemas estéticos nos corpos d'água receptores. Um estudo geral foi realizado por Juwarkar & Subrahmanyam (1986) mostrando a capacidade de solos em remover a cor dos efluentes contendo lignina.

O pH pode ser o fator limitante à aplicação dos efluentes no solo, já que, condições de alta acidez podem trazer problemas de toxicidade, como disponibilizar alguns metais, enquanto que alcalinidade pode proporcionar indisponibilização de grande parte dos micronutrientes essenciais às plantas. A faixa ótima de pH no efluente a ser aplicado ao solo deverá estar entre 6,5 e 8,5, permitindo, assim, prever os efeitos adversos relacionados à disponibilidade de nutrientes (Gheyi et al., 1997).

A lixiviação de nitrato em decorrência da aplicação do efluente da indústria de celulose no solo é, por razão das baixas concentrações de nitrogênio no efluente, menos preocupante, quando comparado ao risco de aplicação de esgoto doméstico. A adição de nutrientes antes da aplicação no solo não tem sido relatada na bibliografia, nem a resposta da vegetação à deficiência destes nutrientes.

As concentrações de cloreto no efluente de indústrias de celulose situam-se na faixa de $120\text{-}350 \text{ mg L}^{-1}$, o que pode comprometer a utilização do

efluente para fertirrigação, uma vez que tais concentrações podem causar danos severos às folhas das plantas com aplicação do efluente por aspersão.

Águas para irrigação com Razão de Adsorção de Sódio (RAS) entre 4 e 9 são consideradas de pequeno risco no que refere-se à dispersão da argila e, por consequência, à permeabilidade do solo. De acordo com a literatura, alguns efluentes combinados de fábricas de celulose possuem RAS nesta faixa, sendo assim, potencialmente adequadas para a fertirrigação (Cromer et al., 1984). No entanto, as baixas condutividades elétricas de alguns efluentes setoriais de fábricas de celulose, como aqueles procedentes do cozimento e da lavagem da polpa, aliadas à relativamente elevada RAS podem trazer problemas físico-químicos ao solo, destruindo sua estrutura e, por consequência, sua macroporosidade (Matos & Rezende, 2002). Para aproveitamento dessas águas residuárias, misturas devem ser realizadas ou deve-se prover a solução de cálcio e magnésio para diminuir o valor da RAS.

O efluente aplicado ao solo, mesmo depois de submetido ao tratamento secundário, pode ainda conter uma significativa concentração de compostos orgânicos de alto peso molecular de elevada toxicidade para a biota.

2.3.1. Efeitos do efluente de indústria de celulose no solo e na planta

2.3.1.1. Efeitos na cobertura vegetativa

A literatura sobre aproveitamento agrícola de efluentes tratados de indústria de celulose, em geral, não revela efeitos negativos no desenvolvimento de culturas, tais como: o atraso na maturidade, a deterioração na qualidade dos produtos finais e a diminuição da resistência a doenças, tal como tem sido reportado em relação à aplicação de esgoto doméstico no solo (Feigin et al., 1991). Reduções significativas no crescimento de arroz, grão preto (*Vigna mungo*) e tomates foram observados em fertirrigação com 100% de efluente (Rajannan & Oblismani, 1979). Entretanto, com a diluição do efluente (mistura de efluente e água de fontes naturais) verificou-se aumento no crescimento de plantas fertirrigadas. Os autores sugeriram que a melhoria no desempenho agrônômico da cultura seja devida ao decréscimo na

concentração típica de vários constituintes químicos no efluente diluído. Em geral, plantas fertirrigadas com efluente sem diluição apresentaram mais altas concentrações de N, P, K no tecido vegetal do que os controles ou aquelas fertirrigadas com efluente diluído.

Dentre as variáveis-chaves utilizadas para determinar o comportamento de espécies fertirrigadas com efluentes industriais estão a sobrevivência e o crescimento das plantas. A tolerância ao sal constitui um importante parâmetro, tendo em vista que um dos maiores problemas relacionados com o efluente seja a presença de sais inorgânicos. Algumas espécies têm habilidade em acumular Na^+ e Cl^- , podendo, dessa forma, ser usadas para remover esses íons da água residuária.

A fertirrigação pode proporcionar aumento significativo em todos os parâmetros de crescimento das plantas; tendo sido verificado aumento da concentração de nitrogênio e fósforo (Johnson & Ryder, 1988), além de ferro e manganês, dentre outros micronutrientes nas plantas. Aumentos da concentração de cloreto e alumínio nas plantas também foram documentados. O aumento de cloreto é, provavelmente, devido à alta concentração deste elemento no efluente industrial, entretanto, no caso do nitrogênio e fósforo, o resultado são surpreendentes, considerando-se a baixa concentração em que se encontram no efluente.

Culturas como arroz, grama-batatais, trigo, cebola, cana-de-açúcar, aveia, alfafa e pastagens podem crescer com sucesso quando o efluente industrial de celulose e papel é utilizado, mesmo quando altas taxas de aplicação (200 mm/semana) são utilizadas (Johnson & Ryder, 1988; Juwarkar & Subrahmanyam, 1986; Kulkamii, 1988; Narun, 1979). Espécies florestais como Kenaf (*Hibiscus cannabinus*), sesbenia (*Sesbenia grandiflora*), pinus Monterey (*Pinus radiata*) cresceram com sucesso, não apresentando diferença significativa em relação às plantas controle (Juwarkar & Subrahmanyam, 1986; Cromer et al., 1982).

Tem sido verificado acúmulo de Na^+ e Cl^- em plantas fertirrigadas com efluente da produção da celulose por períodos muito longos (Cromer et al., 1984; Aw et al., 1983). Algumas espécies arbóreas apresentaram crescimento elevado e altas taxas de sobrevivência quando submetidas a elevadas taxas de aplicação do efluente, por longos períodos. Acredita-se que esses resultados

sejam devido ao fato dessas espécies requererem grandes quantidades de água e serem bioacumuladoras de Na e Cl^- , além de estarem sendo cultivadas em solos de alta permeabilidade (Hansen, 1980; Aw, 1994).

2.3.1.2. Efeitos no solo

A aplicação de efluente no solo pode ocasionar efeitos indesejáveis nas suas características químicas (Fuller & Warrick, 1985). Uma grande preocupação refere-se ao acúmulo de sais, como resultado de aplicação por longos períodos.

Adishesha et al. (1997) não encontraram mudanças significativas nas características do solo submetido, por período de tempo inferior a 3 anos, à fertirrigação com efluente da indústria de celulose e papel. Por outro lado, vários estudos (Cromer et al., 1984; Hansen et al., 1980; Aw, 1994; Hayman & Smith, 1979) abordando efeitos químicos da aplicação de efluente de indústrias de celulose e papel no solo, indicaram altas concentrações de Na^+ , Cl^- , K_2O , Ca^{2+} , e K^+ , além de valores elevados de condutividade elétrica e de razão de adsorção de sódio (RAS), bem como baixa concentração de Mg^{+2} e outros nutrientes essenciais (Aw et al., 1993; Aw, 1994). A irrigação com efluente não diluído de indústria de celulose e papel pode, também, ocasionar aumento nos valores de pH do solo, no conteúdo de carbono orgânico, matéria orgânica, e nutrientes disponíveis (Johnson & Ryder, 1988; Kannan & Oblisami, 1990a, 1990b; Juwarkar & Subrahmanyam, 1986).

Conforme reportado por Johnson e Ryder (1988), surpreendentemente o aumento na concentração de sódio no solo, parece ser independente das taxas de aplicação do efluente. Este aumento no conteúdo de Na pode causar a dispersão da argila do solo, conduzindo a uma pobre infiltração e aeração desse meio. Isto, também, sugere que a fertirrigação com efluentes da indústria de celulose pode constituir perigo potencial para as culturas.

Para se prevenir o risco de predominância de sódio no solo, deve-se compensar a aplicação do efluente com outras fontes de Ca^{+2} e Mg^{+2} que, aliada a altos índices pluviométricos, podem promover a lixiviação do Na^+ , e o restabelecimento do balanço de cátions. Com isso, nenhuma redução na

permeabilidade do solo deve ser observada (Johnson & Ryder, 1988). Geralmente, efluentes com RAS igual ou menor que 8 não proporcionam nenhuma redução na permeabilidade do solo. Exceções a estas têm sido observadas para solos com alto teor de argila que foram previamente fertirrigados com efluentes com nível médio de sais (Cromer et al., 1984). Solos de textura grosseira não apresentaram efeitos de deterioração severos e nenhuma perda na permeabilidade foi observada em decorrência da aplicação de efluentes detentores de alta porcentagem de sódio trocável (Johnson & Ryder, 1988; Cromer et al., 1984).

A incorporação de corretivos orgânicos, incluindo lodo de indústrias de celulose e esterco bovino, no solo das áreas de aplicação de efluentes, proporcionou a manutenção da produtividade durante a fertirrigação com efluente, devido ao fornecimento de nutrientes não disponibilizados para as culturas e por contribuir para a melhoria da estrutura do solo, aumentando taxas de infiltração e o potencial de lixiviação do sódio (Vasconcelos e Cabral, 1993; U.S.EPA, 1981).

A disposição de efluentes da indústria de celulose e papel no solo tem proporcionado rápida estabilização do material orgânico presente em suspensão, aumentando a razão entre ácidos húmicos e fúlvicos (Abasheyeva et al., 1993).

Os microrganismos do solo têm participação vital na degradação de material orgânico incorporado, constituindo importante fonte de enzimas para o meio. Entretanto, são estes organismos os primeiros a deparar com as mudanças ambientais causadas pela disposição dos efluentes. Enquanto que a pesquisa em química do solo exposto ao efluente de celulose e papel é, de certa forma extensa, pouco se conhece sobre os efeitos nas reações bioquímicas no solo, em particular na variação populacional nos diversos grupos de microrganismos no meio. Investigações revelaram um aumento nas populações de bactérias, actinomicetes, fungos, rhizobia e fermentos, cuja presença foi mais alta após 15 anos de aplicação do efluente. A população microbiana esteve diretamente proporcional à quantidade de carbono orgânico presente e às condições da disposição de nutrientes no solo, tendo sua dinâmica afetada por uma multiplicidade de fatores (Kannan & Oblisami, 1990a). Os autores também verificaram que a aplicação de efluentes de

indústria de celulose e papel não inibe as atividades enzimáticas, mas sim tende a aumentá-las.

2.4. Riscos ambientais associados à disposição de efluentes da indústria de celulose no solo

Os riscos ambientais na disposição de efluentes de celulose branqueada em curso d'água vêm sendo bem documentados (Dell et al., 1996). Poucos artigos referem-se à avaliação de risco na aplicação de efluente no solo. A maioria dos artigos aborda a disposição no solo do lodo proveniente do tratamento de efluentes (Vasconcelos e Cabral, 1993; Keenan et al., 1990).

Desde que certas substâncias químicas, óleos, solventes, ou outras substâncias perigosas e tóxicas foram eliminadas do processo industrial, o efluente secundário da indústria de celulose pode ser considerado como de boa qualidade, no mínimo igual àquela fornecida pelo tratamento secundário de esgoto doméstico. No entanto, quando de sua disposição no solo, a mobilidade dos sais nesse meio pode constituir um problema potencial de poluição para as águas subterrâneas.

A qualidade da água subterrânea foi monitorada em áreas de disposição de efluentes da celulose e papel por alguns pesquisadores (Johnson & Ryder, 1988; Cromer et al., 1984). Nos estudos efetuados, foram observados aumentos na concentração de alguns contaminantes na água subterrânea. Inicialmente, concentrações mais altas foram encontradas nas camadas superiores do aquífero, apresentando tendência de redução com a profundidade. Aplicações por períodos prolongados (período correspondente a 3 anos), em áreas de disposição de efluentes, proporcionaram grande aumento nas concentrações de sódio e cloreto, em todas as profundidades, indicando uma distribuição uniforme da solução. Um aumento nas concentrações de sódio, cloreto, potássio e sulfato foram observados em razão das altas concentrações desses íons no efluente e também devido à própria natureza arenosa do solo, resultando em uma alta taxa de lixiviação. Cálcio e magnésio também apresentaram aumentos, porém numa magnitude menor. Não foi reportada nenhuma mudança na cor da água subterrânea, bem como nenhuma

expressiva alteração dos níveis do lençol freático. Nos experimentos conduzidos, ficou evidente que, com o aumento da taxa de aplicação houve aumento proporcional da quantidade de íons móveis que atingiram o lençol freático. Por outro lado, caso a capacidade de retenção iônica seja suplantada, mesmo os nutrientes considerados de baixa mobilidade poderão atingir as águas do lençol freático. Solos arenosos proporcionam taxas mais altas de infiltração e mais baixa capacidade de tamponamento aos íons incorporados, sendo, por estas razões, os que mais riscos proporcionam à qualidade das águas subterrâneas.

Avaliação de risco foi empregada na caracterização das várias formas de exposição múltipla para dioxina, associada à fertirrigação com efluente do processo kraft de celulose branqueada (Sullivan et al., 1990). A potencialidade para exposição e subsequente toxicidade em gado, por meio da ingestão de alfafa fertirrigada com esse efluente foi avaliada. Os múltiplos meios de exposição humana à dioxina foram identificados como ingestão de água de poço, contato da pele com o efluente, contato da pele com solo, inalação de vapor ou particulado, ingestão de carne/leite de bovino alimentado com alfafa e inalação de dioxina gasosa liberada do solo. Concentrações de risco específico foram desenvolvidas para cada cenário de exposição, sendo concluído que estes meios não apresentam formas significativas para exposição ou risco para seres humanos ou vida selvagem.

Não há informações suficientes referentes ao movimento e ao comportamento de compostos orgânicos presentes em efluentes de fábricas de celulose, quando dispostos no solo. Kookana e Rogers (1995) apresentaram uma revisão sobre o assunto, mas muito dos estudos consultados referem-se mais às fontes de compostos orgânicos de outras atividades do que, propriamente, de indústrias de celulose branqueada.

3. MATERIAL E MÉTODOS

O trabalho foi conduzido em casa-de-vegetação do Departamento de Solos da Universidade Federal de Viçosa, UFV, e contou com o apoio dos Laboratórios de Qualidade da Água e de Análise Química de Resíduos do Departamento de Engenharia Agrícola/UFV, Laboratório de Papel e Celulose do Departamento de Engenharia Florestal/UFV e Laboratório de Física do Solo e de Solos Florestais do Departamento de Solos/UFV.

O experimento compreendeu 90 unidades experimentais, constituídas por colunas contendo amostras de material de três tipos de solos e plantas de eucalipto, submetidas a cinco diferentes lâminas de fertirrigação com efluente tratado do processo de fabricação da celulose, aplicadas por gotejamento.

Amostras de Argissolos e Neossolos Quartzarênicos, de áreas representativas de plantio de eucalipto da ARACRUZ CELULOSE S.A., no município de Aracruz, região litorânea do Estado do Espírito Santo, localizada a 19°48' S e 40°17' W, foram coletadas e transportadas para o município de Viçosa, Minas Gerais. A água residuária utilizada no experimento consistiu do efluente do sistema de tratamento secundário da fábrica da Aracruz Celulose, no Espírito Santo, sendo coletada e enviada, a cada 2 meses, para o local do experimento, onde era mantida refrigerada em câmara de resfriamento a 4° C. O estudo abrangeu, também, o uso de um material genético, proveniente de híbrido clonal de *Eucalyptus grandis* x *E. urophylla*

Para avaliação do efeito da fertirrigação em diferentes estações do ano, consideraram-se duas condições climáticas na condução do experimento: cultivo em período de estiagem e cultivo em período chuvoso. Na primeira condição, as colunas receberam apenas a fertirrigação com o efluente tratado da indústria de celulose. Na segunda condição, adicional à fertirrigação com efluente, houve aplicação, a partir do nonagésimo dia de cultivo, de lâminas de água que totalizaram a precipitação média mensal ocorrida nos últimos quinze anos na região de Aracruz, ES.

Ao longo de 180 dias de cultivo das plantas de eucalipto foram monitorados: a temperatura ambiente, as lâminas de água evapotranspirada, as lâminas de água de chuva simulada, as características físicas e químicas da água drenada das colunas, os sintomas visuais de deficiência ou toxicidade nas plantas, bem como as características morfológicas (tamanho, diâmetro de caule, coloração) das plantas. Ao final deste período, procedeu-se as análises das características físicas e químicas dos solos das unidades experimentais, em amostras coletadas em cinco profundidades nas colunas, bem como a análise química do material foliar das plantas de eucalipto.

Durante a condução dos experimentos, a temperatura ambiente dentro da casa-de-vegetação permaneceu entre a mínima de 15°C e a máxima de 38°C, enquanto a radiância fotossinteticamente ativa variou na faixa de 320 a 470 $\mu\text{moles de fóton m}^{-2} \text{ s}^{-1}$.

3.1. Construção e preparo das Unidades Experimentais

As unidades experimentais foram constituídas por colunas de solo montadas em tubo de PVC rígido, diâmetro 200 mm e 65 cm de altura, com seccionamento de 10 em 10 cm para facilitar a montagem da coluna e a posterior coleta de amostras, em diferentes profundidades, ao final do período de experimentação. Para vedação dos pontos de junção dos anéis e fixação das colunas, utilizou-se silicone e fita adesiva (45 mm de largura), deixando-se, na extremidade superior da coluna, uma borda de cinco centímetros. Todas as colunas foram montadas tendo na sua base um tampão perfurado no centro com furo de 1 cm de diâmetro. No fundo das colunas foi colocada uma camada

de 1 cm de lã de vidro intercalada com camada de areia (diâmetro médio de partículas de 5 mm). Tanto a lã de vidro quanto a areia foram previamente lavadas com ácido clorídrico 5% e, posteriormente, água destilada, de forma a possibilitar a remoção de impurezas nelas presentes.

As colunas foram preenchidas com solo previamente seco ao ar, destorroado e devidamente homogeneizado e passado em peneira de malha de 4 mm, acondicionado-se camada por camada, de forma a repetir posições idênticas às encontradas no campo. Para garantir uma perfeita uniformidade do perfil, quanto às propriedades físicas e químicas, o acondicionamento do material de solo nas colunas foi feito por camadas de, aproximadamente, 5 cm. O material recebeu compactação, de forma a se obter massa específica próxima à encontrada em condições de campo, determinada em amostras não deformadas para cada tipo de solo. A compactação das camadas de solo procedeu-se através de golpes dados por um soquete de madeira de dimensões pouco inferiores ao diâmetro interno das colunas, quando lançado a uma altura pré-fixada.

No sentido de uniformizar a umidade inicial, as colunas de solo foram umedecidas até a saturação (tempo de 48 a 96 horas para alcançar saturação, dependendo do tipo de solo), por fluxo ascendente, utilizando-se água deionizada. Obtida a saturação, as extremidades superiores das colunas foram cobertas com filme plástico, evitando-se, assim, perdas por evaporação, e então drenadas. As colunas foram pesadas antes da saturação e após serem drenadas para a determinação da umidade inicial média ao longo das mesmas, presumindo que esta esteja próximo à umidade na capacidade de campo de cada solo. Em cada bloco do experimento, uma coluna de cada tipo de solo foi selecionada para controle da evapotranspiração.

3.2. Plantio e condução do experimento

Mudas de eucalipto híbrido clonal de *E. grandis* x *E. urophylla* (clone 3918 da Aracruz Celulose), de idade aproximada de 75 dias, foram transplantadas na camada superficial de cada coluna (0 – 10 cm), previamente à saturação das colunas de solo. Como adubação de plantio, adicionou-se,

nesta camada, 1,94 g de fertilizante NPK + B 6 – 30 – 6 por dm^3 de solo, o que correspondeu a 116 mg dm^{-3} de N, 250 mg dm^{-3} de P e 96,6 mg dm^{-3} de K, conforme adubação de plantio recomendada para os solos em estudo (COMISSÃO DE FERTILIDADE DE SOLO, 1999).

Durante o período de condução do experimento, ou seja, 180 dias, os solos foram submetidos a cinco diferentes lâminas de fertirrigação por gotejamento (0; 114,6; 286,5; 515,7 e 1146 mm ano^{-1}) em aplicações diárias do efluente em estudo, feitas com a utilização de sistema de aplicação de macro e micro-gotas, usado para aplicação de soro em hospitais. Estas lâminas de aplicação do efluente foram definidas em função da facilidade operacional na condução do experimento, e foram determinadas com referência à concentração de sódio, considerado o fator limitante por ser o constituinte presente, proporcionalmente, em maior quantidade no efluente tratado do processo de fabricação de celulose kraft branqueada. Assim, as lâminas de aplicação correspondem a uma carga de aplicação de 0; 0,85; 2,12; 3,80 e 8,50 $\text{t ha}^{-1}\text{ano}^{-1}$ de Na^+ , respectivamente.

No experimento com simulação de chuva, os eventos de chuva simulada foram determinados com base na precipitação pluviométrica média anual de 1.440 mm, de ocorrência na região da fábrica de celulose, no município de Aracruz, ES. Adotou-se, neste trabalho, 10 eventos mensais de chuva, de intensidade de 12,5 mm e aplicados a cada 3 dias, durante três meses, totalizando 360mm de chuva aplicada por coluna de solo e, para isso, utilizou-se água destilada e regadores. Para evitar a formação de fluxo preferencial pelas paredes da coluna, as lâminas de água foram aplicadas com auxílio de anéis de PVC com diâmetro de 150 mm e 2 cm de altura, os quais foram cravados na extremidade superior da coluna, deixando-se uma borda de um centímetro.

O percolado das colunas foi coletado e a cada volume de poros (volume de efluente equivalente ao volume ocupado por poros na coluna de lixiviação) drenado, uma alíquota foi retirada para análise. Na Figura 1 está mostrada uma visão geral do experimento.



Figura 1 - Visão geral do experimento e detalhes das unidades experimentais

3.3. Parâmetros avaliados

Ao final do período de cultivo da plantas, procedeu-se à determinação da concentração de sódio (Na^+), cálcio (Ca^{+2}), magnésio (Mg^{+2}) e alumínio (Al^{+3}) trocáveis; potássio (K), fósforo (P), enxofre (S), micronutrientes (Fe, Zn, Mn, Cu, e B); metais pesados (cromo, níquel, chumbo e cádmio) disponíveis; cloreto (Cl^-); nitrogênio total ($\text{N}_{\text{Kjeldahl}}$); e carbono orgânico (COrg) em amostras de solo coletadas em diferentes profundidades: 0-10; 10-20, 20-30; 30-40; e 40-55 cm. Nas mesmas amostras, foram determinados a argila dispersa, o pH, e a condutividade elétrica no extrato de saturação do solo (CE_{es}).

Nas plantas, foram avaliados os sintomas visuais de deficiência ou toxicidade em folhas e raízes e, determinadas as características morfológicas (altura de planta, diâmetro de caule), as relações massa seca parte aérea/raiz, além dos teores, nas folhas, de N_{total} , P, Ca, Mg, Na, K, Cl, S, B, Fe, Zn, Mn e Cu.

Nos percolados das colunas, quando ocorreram, e na água residuária aplicada na superfície do solo, as análises realizadas incluíram a medição do pH, da CE, e da cor, além da determinação das concentrações de Na, Cl^- , N_{total} ,

Ca, Mg, K, S, e P. Parâmetros de controle ambiental como demanda bioquímica de oxigênio (DBO), demanda química de oxigênio (DQO) ou carbono orgânico total (COT), e halogênios orgânicos adsorbíveis (AOX) também foram determinados.

3.4. Caracterização dos solos

Os solos utilizados no experimento foram escolhidos entre os de maior representatividade de áreas de produção de eucalipto da Aracruz Celulose. O material de solo foi coletado nas profundidades de 0 a 100 cm, em glebas pertencentes à Empresa, no Município de Aracruz, ES. Segundo o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SiBCS) (EMBRAPA, 1999a e 2000), os solos em estudo foram classificados como:

- PAd1 (antigo PA1) – Argissolo Amarelo Distrófico A moderado relevo plano textura média/argilosa;
- PAd2 (antigo PA7–12) – Argissolo Amarelo Distrófico A moderado relevo plano textura arenosa/média;
- RQo (Areia Quartzosa) – Neossolo Quartzarênio Órtico textura arenosa.

Para a realização das análises físicas e químicas e avaliação da fertilidade e salinidade inicial do solo, amostras foram coletadas em diferentes profundidades. As características químicas e físicas estão apresentados nos Quadros 7 e 8, respectivamente. Os valores médios de densidade do solo das amostras PAd1, PAd2 e RQo foram, respectivamente, de $1,52 \text{ g.cm}^{-3}$; $1,50 \text{ g.cm}^{-3}$ e $1,35 \text{ g cm}^{-3}$, sendo estes, os valores utilizados na montagem das colunas de solo.

As análises físicas de caracterização dos solos foram realizadas no início do experimento, antes da montagem das colunas. Determinou-se a densidade das partículas (d_p), a macroporosidade e a textura de amostras retiradas a cada 10 cm de profundidade do solo, segundo metodologia descrita em EMBRAPA (1997). A condutividade hidráulica do solo em meio saturado foi obtida pelo método do permeâmetro de carga constante, conforme a

Quadro 7 - Características químicas^{1/} das amostras dos solos usados nas colunas do experimento em casa-de-vegetação.

Solo	Profundidade	pH H ₂ O	P	K	Na	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Al ³⁺	H+Al	SB	CTC (t)	CTC (T)	V	m	ISNa	P-rem	Zn	Fe	Mn	Cu
			mg.dm ⁻³			cmol _c .dm ⁻³									%			mg.L ⁻¹		
PAd1	0-10cm	4,67	19,06	16	10	0,48	0,19	0,72	5,48	0,75	1,47	6,23	12,0	49,0	2,96	50,0	3,65	86,7	7,11	ND
	10-60cm	4,79	3,20	10	11	0,71	0,20	0,72	4,69	0,99	1,71	5,68	17,4	42,1	2,80	55,2	2,94	80,1	7,88	ND
	60-100cm	4,59	0,56	9	7	0,15	0,06	0,96	3,17	0,26	1,22	3,43	7,6	78,7	2,49	12,4	3,77	87,8	0,17	ND
PAd2	0-10cm	4,79	4,86	9	10,0	0,20	0,11	0,36	2,64	0,37	0,73	3,01	12,3	49,30	5,96	9,6	0,62	53,2	0,00	ND
	10-60cm	4,90	0,86	4	6,0	0,27	0,16	0,24	2,31	0,47	0,71	2,78	16,9	33,8	3,67	13,1	0,67	176,1	0,07	0,83
	60-100cm	4,88	0,47	8	6,0	0,41	0,11	0,36	2,44	0,57	0,93	3,01	18,9	38,7	2,81	0,0	0,67	223,0	0,11	0,76
RQo	0-30cm	5,51	4,75	6	4,0	0,65	0,23	0,00	1,78	0,92	0,92	2,7	34,1	0,0	1,89	13,1	3,90	44,1	24,90	ND
	30-60cm	5,59	0,78	1	2,0	0,18	0,04	0,00	0,33	0,23	0,23	0,56	41,1	0,0	3,78	12,9	0,63	39,5	1,66	ND
	60-100cm	5,50	1,12	1	2,0	0,17	0,05	0,00	0,59	0,23	0,23	0,82	28	0,0	3,78	15,6	0,32	251,3	2,08	ND

1/ pH em água – relação 1:2,5 ; P - K - Na - Fe - Zn - Mn - Cu – Extrator Mehlich 1; Ca - Mg – Al -- Extrator KCl 1 mol.L⁻¹ .
H + Al - Extrator Acetato de Cálcio 0,5 mol.L⁻¹ – pH 7,0; SB – Soma de bases trocáveis; CTC (t) – Capacidade de troca catiônica efetiva.
CTC (T) – Capacidade de troca catiônica a pH 7,0; V – índice de saturação por bases; m – índice de saturação por alumínio;
ISNa - Índice de Saturação de Sódio; P-rem – Fósforo remanescente; ND- não detectável.

Quadro 8 - Caracterização física^{1/} dos materiais de solo utilizados nas colunas do experimento em casa de vegetação

Solo	Profundidade cm	Ds ^{2/} (g.cm ⁻³)	Dp ^{3/} (g.cm ⁻³)	Porosidade	Macroporosidade	K _o ^{4/} (20°C) cm.h ⁻¹	Areia	Areia	Silte	Argila	Retenção de água (%) ^{6/} Pressão (KPa)						AD ^{7/} mm.cm ⁻¹
				Total	%		Grossa	Fina			10	33	100	300	500	1500	
PAd1	0 - 10	1,29	2,72	52,56	31,53	37,87	57	13	5	25	16,44	14,04	13,83	12,72	11,28	10,64	0,340
	10 - 20	1,47	2,72	45,98	19,74	11,28	49	14	3	34	27,15	21,08	19,97	17,85	15,95	13,91	0,717
	20 - 30	1,39	2,74	49,20	22,96	9,15	52	13	4	31	24,92	19,54	18,3	16,13	14,41	14,13	0,541
	30 - 40	1,48	2,74	45,89	17,76	5,31	50	11	3	36	30,83	20,90	20,76	18,29	16,92	16,10	0,480
	40 - 50	1,51	2,78	45,73	19,67	10,96	46	12	2	40	28,79	23,74	22,61	19,62	18,21	17,84	0,590
	50 - 60	1,66	2,74	39,59	8,41	5,20	44	12	2	42	29,87	23,75	22,7	19,92	18,59	17,94	0,581
	60 - 80	1,61	2,74	41,06	11,23	16,98	43	11	3	43	32,32	25,41	24,04	20,78	19,54	18,02	0,739
	80 - 100	1,56	2,80	44,45	12,72	7,99	40	9	1	50	32,94	24,10	22,49	20,45	18,51	17,77	0,633
PAd2	0 - 10	1,51	2,64	42,80	34,48	36,85	73	18	4	6	5,66	5,32	4,63	3,86	3,53	2,10	0,322
	10 - 20	1,47	2,72	45,98	35,29	32,45	68	21	5	7	6,29	5,05	4,88	3,89	3,61	3,13	0,192
	20 - 30	1,48	2,66	44,53	30,24	29,36	63	26	4	8	6,98	5,98	5,63	4,83	4,49	4,05	0,193
	30 - 40	1,51	2,67	43,56	27,20	26,35	59	27	5	9	9,60	7,45	6,81	5,25	4,95	4,56	0,289
	40 - 50	1,64	2,78	40,88	23,44	19,88	57	25	6	13	14,12	9,40	8,12	7,5	6,87	6,28	0,312
	50 - 60	1,46	2,72	46,38	25,44	55,77	52	24	5	20	16,93	13,74	12,86	11,15	10,22	9,27	0,447
	60 - 80	1,55	2,76	43,83	18,00	73,09	51	26	5	19	16,74	12,05	11,66	9,87	8,97	8,57	0,348
	80 - 100	1,54	2,75	43,80	18,00	72,33	51	24	5	21	16,54	13,63	12,11	10,30	9,11	8,75	0,488
RQo	0 - 10	1,35	2,61	48,3	46,10	Nd ^{5/}	91,5	4	2	2,5	4,52	3,80	3,56	3,32	2,97	2,65	0,187
	10 - 20	1,35	2,67	49,4	47,50	Nd	92	4	1	3	3,11	2,74	2,39	2,00	1,25	1,17	0,194
	20 - 30	1,35	2,65	49,1	47,60	Nd	93	4	1	2	2,24	1,96	1,70	1,52	1,35	0,99	0,125
	30 - 40	1,35	2,70	50,0	48,00	Nd	91,5	4,5	1	3	1,64	1,36	1,36	0,96	0,60	0,42	0,122
	40 - 60	1,35	2,76	51,1	49,00	Nd	91,5	4,5	2	2	1,65	1,38	1,16	0,82	0,54	0,43	0,122
	60 - 80	1,35	2,76	51,1	49,00	Nd	92	4,5	2	1,5	3,47	1,87	1,68	1,06	0,98	0,93	0,254
	80 - 100	1,35	2,63	48,7	47,50	Nd	92	5,5	0,5	2	3,03	1,73	1,59	1,28	0,90	0,58	0,254

1/ Características dos solos em condições naturais de campo. 2/ massa específica do solo, ou densidade do solo. 3/ massa específica ou densidade de partículas. 4/ Condutividade hidráulica em meio saturado. 5/ não determinado. 6/ percentagem em bases volumétricas de solo. 7/ Água disponível no solo.

metodologia de Klute (1965), apresentada em EMBRAPA (1997), usando água destilada e uma solução eletrolítica de cloreto de cálcio, CaCl_2 ($0,5 \text{ mmol.L}^{-1}$). A curva de retenção de água no solo foi obtida utilizando-se o método do extrator de Richards (1954), para amostra de solo com estrutura deformada, empregando as tensões de 10, 33, 100, 300, 1000 e 1500 kPa.

As análises de determinação do conteúdo de argila dispersa foram feitas após a finalização do experimento, conforme metodologia descrita em EMBRAPA (1997) e adaptada pelo Laboratório de Física do Solo da UFV.

As análises físico-químicas e químicas das amostras de solo, na caracterização inicial dos solos e após a finalização do experimento, seguiram, para a maioria dos atributos, metodologias descritas em EMBRAPA (1997). As amostras foram destorroadas e secas ao ar, sob temperatura ambiente, em local sombreado e bem ventilado, sobre superfície limpa. As amostras foram peneiradas em malha de 2 mm, obtendo-se a terra fina seca ao ar (TFSA). O pH foi determinado em água usando-se 10 cm^3 TFSA e 25 mL de água destilada, ou seja, na relação solo:solução 1:2,5. A condutividade elétrica foi determinada no extrato de saturação (CE_{es}) a 25°C .

O carbono orgânico foi determinado pelo Método Walkley & Black que utiliza o dicromato ($\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$) em meio ácido como oxidante dos compostos orgânicos contidos em amostra de 1,0 g de TFSA triturada em almofariz. Para a dosagem do carbono orgânico "facilmente oxidável" (CO_{fo}), procedeu-se a titulação do dicromato de potássio ($1/6 \text{ mol.L}^{-1}$) remanescente da oxidação com solução de sulfato ferroso amoniacal, usando-se a difenilamina como indicador. O conteúdo de carbono orgânico total foi estimado multiplicando o conteúdo de CO_{fo} por um fator de 1,3, assumindo-se que, em média, 77% dos compostos orgânicos foram oxidados. O conteúdo de matéria orgânica foi estimado multiplicando-se o valor do conteúdo de carbono orgânico total pelo fator 1,724 (fator de "Van Bemmelen")¹.

Na determinação de cálcio, magnésio e alumínio trocáveis, a extração de Ca^{2+} , Mg^{2+} e Al^{3+} foi feita com KCl 1 mol L^{-1} , na relação de 5 cm^3 de TFSA para 50 mL de extrator, com 5 min de agitação da mistura, seguida por decantação por 16 horas. As concentrações de Ca^{2+} e Mg^{2+} foram

¹ Fator de "Van Bemmelen" considera que, em média, a matéria orgânica do solo tenha 58% de carbono, ou seja $f=100/58= 1,724$.

determinadas por espectrofotometria de absorção atômica (EAA), com adição de cloreto de estrôncio (1600 mg L^{-1} de Sr^{2+} na solução de leitura) para prevenir a interferência do íon fosfato nas determinações. As concentrações de Al^{3+} foram determinadas por titulometria, utilizando-se solução de NaOH diluído ($0,025 \text{ mol L}^{-1}$) como titulante, na presença de azul-de-bromotimol como indicador.

Fósforo disponível, e potássio e sódio trocáveis foram determinados usando-se a solução Mehlich-1 ($\text{HCl } 0,05 \text{ mol L}^{-1} + \text{H}_2\text{SO}_4 \text{ } 0,0125 \text{ mol L}^{-1}$) como solução extratora, com 5 min de agitação da mistura, seguido de decantação por 16 h. O fósforo foi determinado por espectrofotometria de absorção molecular e potássio e sódio por espectrofotometria de chama.

A determinação de enxofre disponível foi feita pelo Método de Hoefft et al., ou seja, extração do enxofre disponível feita com $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$, 500 mg L^{-1} de fósforo, em HOAc 2 mol L^{-1} (Hoefft et al., 1973; Alvarez, V. et al., 2001). Em 10 cm^3 de TFSA adicionou-se 0,5 g de carvão ativado e 25 mL do extrator. Agitou-se a mistura por 45 min, seguida de decantação por 5 min e filtração em papel de filtração lenta. As concentrações de enxofre disponível foram determinadas em espectrofotômetro UV-visível.

A extração de zinco, manganês, ferro e cobre trocáveis foi feita em conjunto com o fósforo disponível e potássio trocável, ou seja, utilizando-se da mesma solução extraída com Mehlich-1. As concentrações de Zn, Mn, Fe e Cu foram determinadas em espectrofotômetro de absorção atômica.

A extração dos metais cromo, níquel, chumbo e cádmio foi feita com extrator Mehlich modificado ($\text{HCl } 0,05 \text{ mol L}^{-1} + \text{H}_2\text{SO}_4 \text{ } 0,025 \text{ mol L}^{-1}$, com 5 min de agitação da mistura, seguido de decantação por 16 h. As concentrações destes metais foram determinadas por espectrofotometria de absorção atômica.

Para a extração de boro disponível utilizou-se o método da água quente, ou seja, com a adição de água deionizada a 10 cm^3 de TFSA, acondicionada em saco grosso de polietileno contendo 0,4 g de carvão ativado, 20 mL de água e aquecendo-se a mistura, em forno microondas (por 4 min, a 700 W seguido de 5 min a 490 W). Após filtragem lenta da mistura, a determinação de boro foi feita por espectrofotometria UV/VIS com azometina. (EMBRAPA, 1999b; Abreu et al., 1994 e Ferreira, 1998).

O nitrogênio foi determinado utilizando-se o método Kjeldahl, incluindo as formas orgânicas de N e o N-NH_4^+ . Amostra de 1 g de TFSA foi submetida à digestão ácida (conversão do N orgânico em NH_4^+ e, posteriormente, em amônia), seguida de destilação da amônia arrastada com o H_3BO_3 e titulação com HCl ($0,05 \text{ mol L}^{-1}$), na presença de indicador ácido-base (APHA, 1995).

As concentrações de cloreto ($\text{cmol}_c \text{ L}^{-1}$) foram determinadas no extrato de saturação por titulação com nitrato de prata (AgNO_3) em presença de dicromato de potássio (K_2CrO_4) como indicador.

3.5. Caracterização da água residuária utilizada na fertirrigação e do percolado das colunas de solo

A água residuária utilizada no experimento, para fertirrigação do eucalipto, consistiu do efluente do sistema secundário de tratamento de efluentes da fábrica da celulose de polpa branqueada (celulose Kraft) da Aracruz Celulose S/A, após passar por lagoa de decantação.

O processo fabril da Aracruz Celulose é composto por três linhas de produção independentes (Fábricas A, B e C) que geram, atualmente, uma vazão total de $200.000 \text{ m}^3 \text{ d}^{-1}$ de efluentes líquidos, os quais são encaminhados a uma Estação de Tratamento de Efluentes (ETE). A ETE é composta por tratamento preliminar (unidade de gradeamento), por um sistema de decantação primária e desaguamento de lodo primário, e por um sistema de tratamento secundário biológico composto por cinco lagoas aeradas facultativas em série, seguida por uma lagoa de decantação.

O gradeamento e os decantadores primários recebem todos os efluentes, exceto os efluentes ácidos dos branqueamentos e efluentes alcalinos isentos de fibras provenientes da caustificação das fábricas A e B. Todos os efluentes da Fábrica C passam pelo tratamento preliminar e primário. Os efluentes tratados nos decantadores são encaminhados a um tanque onde são misturados com os efluentes ácidos e os efluentes alcalinos sem fibras das Fábricas A e B. Atualmente, no tanque de mistura, o pH é corrigido com a adição de hidróxido de sódio. Após corrigido o pH, os efluentes são enviados à

série de lagoas aeradas facultativas seguidas de uma lagoa de decantação, antes de serem enviados ao mar por meio de um emissário submarino.

Nitrogênio e fósforo não são dosados intencionalmente nas lagoas, sendo os nutrientes provenientes, principalmente, dos esgotos sanitários da fábrica, que são misturados com os efluentes industriais e de outras fontes pontuais que chegam na estação. Lagoas aeradas facultativas acumulam lodo biológico no seu interior e, geralmente, não necessitam de dosagem intencional de nutrientes, pois ocorre uma reciclagem destes elementos dentro da própria lagoa, com a “auto-oxidação” do lodo.

O efluente final, aqui referenciado como efluente tratado do processo de fabricação da celulose (ETFC), teve suas características físicas e químicas monitoradas semanalmente, durante o período de 39 meses (julho de 1999 a setembro de 2002). Valores de pH, CE, cor, sólidos totais, sólidos dissolvidos totais, sólidos em suspensão, DQO, DBO, nitrogênio total, Na^+ , Cl^- , N total, Ca^{+2} , Mg^{+2} , K, S, P, AOX e o número mais provável de coliformes foram determinados durante o período de 180 dias de condução do experimento.

As análises de caracterização do ETFC e do líquido percolado das colunas de solo foram feitas conforme APHA (1995; 1997) e normas internas da Aracruz Celulose, com algumas particularidades.

A cor foi determinada pelo método da solução padrão de platina-cobalto. A cor das amostras foi expressa em unidades arbitrárias de cor. Uma unidade de cor (C.U., cor unit) ou Unidade Hazen, corresponde à absorção de luz no comprimento de onda de 465nm, por uma solução padrão de platina-cobalto de 1 mg L^{-1} , em pH 7,6 (APHA, 1997) .

A concentração de AOX foi determinada segundo a Norma SCAN –W 9:89. A amostra foi submetida a um pré-tratamento ácido e o conteúdo de haletos foi determinado por pirólise da amostra devidamente filtrada com carvão ativo. Para maior confiabilidade nas determinações, foi utilizado oxigênio (pureza de 99,99%) no equipamento, sendo as amostras preparadas de forma a proporcionarem leituras na faixa de máxima precisão do aparelho (80 millicoulombs).

As determinações de cloreto foram feitas por cromatografia, em Cromatógrafo SCL - 10AVp, módulos da marca Shimadzu. A amostra foi diluída 5 vezes com água destilada, filtrada em membrana de celulose regenerada,

0,45 µm de porosidade, e injetada. A determinação de cloreto também foi feita pelo método argentométrico (Método de Mohr), pela titulação da amostra com solução padrão de nitrato de prata, na presença do indicador cromato de potássio.

A determinação quantitativa de coliformes totais e fecais em amostras do ETFC foi realizada pela técnica do número mais provável – NMP, utilizando-se os princípios dos métodos enzimáticos da técnica do sistema cromogênico. Utilizou-se o kit de análises Collilert, sendo a leitura efetuada com utilização de lâmpada UV fluorescente de 6W e comprimento de onda de 365nm (APHA, 1997).

3.6. Análises do material vegetal

Ao final do período de experimentação, por ocasião do desmonte das colunas de solo, foram medidas a altura das plantas, o diâmetro à altura de 3,0 cm, e separados os componentes da parte aérea (folhas, galhos e lenho) e raízes, que foram quantificadas por camada de solo (0-10; 10-20; 20-30; 30-40 e 40-60cm). O material vegetal foi pesado e as amostras dos componentes da parte aérea e das raízes foram secas em estufa de ventilação forçada de ar, sob temperatura de 70°C, até peso constante, determinando-se, assim, o peso da matéria seca.

As análises químicas realizadas nas folhas das plantas, coletadas ao final do período de cultivo das mudas de eucalipto, seguiram, basicamente, a metodologia descrita em EMBRAPA (1999b). Sub amostras de folhas, após secas, foram moídas (40 mesh) e mineralizadas para análise química. Nos extratos da mineralização sulfúrica, determinou-se nitrogênio e nos extratos de mineralização nítrico-perclórico determinaram-se: fósforo, potássio, cálcio, magnésio, enxofre, ferro, manganês, cobre, zinco e sódio.

As concentrações totais de Cu, Fe, Mn, Zn, Ca e Mg foram determinadas diretamente nos extratos da digestão nítrico-perclóricas das folhas, por espectrofotometria de absorção atômica, sendo que, para a determinação de Ca e Mg, adicionou-se cloreto de estrôncio à solução, a fim de se evitar a interferência de fosfatos e de alumínio possivelmente presentes. Sódio e

potássio foram determinados diretamente em extratos nítrico-perclóricos, em fotômetro de emissão de chama. Enxofre e fósforo foram determinados, por colorimetria, em espectrofotômetro UV-visível. Nitrogênio foi determinado utilizando-se o método Kjeldhal. Cloro foi determinado por extração em solução aquosa, na forma de íon Cl^- , seguida de titulação com nitrato de prata (AgNO_3), na presença de dicromato de potássio, como indicador. A extração de boro foi feita por digestão via seca, por calcinação. Após filtragem lenta a determinação de boro foi feita usando-se a espectrofotometria de absorção molecular (UV/VIS), com o emprego de azometina (EMBRAPA, 1999b).

3.7. Tratamentos e análise estatística dos dados

O delineamento experimental compreendeu 90 unidades experimentais, constituído de dois experimentos, com e sem aplicação de chuva simulada. Nas análises estatísticas, verificou-se a normalidade dos dados e a homogeneidade das variâncias entre os dois experimentos, optando-se pela análise conjunta dos dois experimentos. Os dados foram interpretados por meio de análise de variância e de regressão.

Os experimentos foram montados segundo um esquema de parcelas subdivididas, tendo nas parcelas um esquema fatorial 5x3 (5 lâminas de aplicação do ETFC e 3 tipos de solo) e nas subparcelas as camadas (5 camadas, ou seja, 5 profundidades), no delineamento de blocos ao acaso com 3 repetições.

Equações de regressão foram ajustadas aos dados coletados em função das taxas de aplicação de águas residuárias, considerando-se cada solo e a condição de receptor de chuva simulada ou não. Os modelos foram escolhidos com base na significância dos coeficientes, utilizando-se o teste “F” - considerando o nível máximo de significância de 10%, e testada em relação ao quadrado médio do resíduo das respectivas análises de variância - e os valores de R^2 (coeficiente de determinação). As médias dos tratamentos em cada solo foram comparadas pelo teste Tukey a 5% de probabilidade.

As análises estatísticas foram feitas utilizando-se os *softwares* SAEG 5.0 (FUNARBE, 1993; Ribeiro Junior, 2001) e SAS (Scholotzhauer & Littell, 1997).

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Avaliação do efluente tratado do processo de fabricação da celulose (ETFC) como água para uso em fertirrigação

Considerando as características do ETFC apresentadas no Quadro 9 e os critérios de qualidade das águas de irrigação (Ayers & Westcot, 1991; USEPA, 1981; UNEP, 1996; USEPA, 1992; OMS, 1989) apresentados nos Quadros 1a 6 pode-se inferir quanto à qualidade deste efluente, em termos do seu potencial fertilizante e restrições de uso.

4.1.1. Características físicas e físico-químicas

O efluente tratado de toda fábrica kraft possui cor intensa, atingindo valores superiores a 1000 mg L^{-1} de Pt. Entretanto, isso não constitui fator limitante para seu uso em fertirrigação, já que, segundo Juwarker & Subrehmany (1986), a cor é proveniente, principalmente, da presença de derivados de lignina, que não traz efeitos tóxicos às plantas quando presente no solo.

A concentração média de sólidos sedimentáveis em cone de Imhoff foi de $0,26 \text{ mL L}^{-1}$. Considerando-se que o líquido em análise é de efluente de lagoa de decantação e com tempo de detenção suficientemente longo para que

Quadro 9 - Caracterização do ETFC (efluente do tratamento secundário da fabricação da celulose kraft branqueada) aplicado nas colunas de solo.

Parâmetros	Unidade	Valores	
		Faixa de variação ^{1/}	Valor médio
Cor	mg L ⁻¹	1079-1517 ^{2/}	1369 ^{2/}
pH	-	6,90-8,20	7,58
Sólidos totais (ST)	mg L ⁻¹	-	2446 ^{2/}
Sólidos dissolvidos Totais (SDT)	mg L ⁻¹	-	1789 ^{2/}
Sólidos em suspensão (SS)	mg L ⁻¹	-	60,0 ^{2/}
Sólidos sedimentáveis	mL.L ⁻¹	0,1 - 2,0	0,25
DQO ^{4/}	mg L ⁻¹	-	375 ^{2/}
DBO ^{5/}	mg L ⁻¹	35 - 85,5 ^{2/}	68 ^{2/}
C.E. ^{6/}	dS m ⁻¹	2,7 - 4,3	3,4
Sódio (Na)	mg L ⁻¹	488,10 - 987,10	742,48
Cálcio (Ca)	mg L ⁻¹	28,29 - 102,10	49,44
Magnésio (Mg)	mg L ⁻¹	3,94 - 11,04	7,6,86
RAS ^{7/}	-	-	26,2
Nitrogênio Kjeldhal	mg L ⁻¹	-	6,8 ^{2/}
amônio	mg L ⁻¹	<5,46	1,69
nitrato	mg L ⁻¹	0,00	0,00
Fósforo (P)	mg L ⁻¹	0,17 - 2,16	1,074
Potássio (K)	mg L ⁻¹	13,06 - 56,95	27,357
Enxofre (S)	mg L ⁻¹	63,54-189,30	116,65
Cobre (Cu)	mg L ⁻¹	0,00 -0,141	0,010
Ferro (Fe)	mg L ⁻¹	0,00 -1,34	0,574
Zinco (Zn)	mg L ⁻¹	0,00 -0,43	0,048
Manganês (Mn)	mg L ⁻¹	0,064-0,59	0,305
Alumínio (Al)	mg L ⁻¹	0,477 - 11,80	3,45
Boro (B)	mg L ⁻¹	0,00 -1,35	0,170
Cádmio (Cd)	mg L ⁻¹	0,00 -0,022	0,001
Cobalto (Co)	mg L ⁻¹	0,00 -0,045	0,005
Cromo (Cr)	mg L ⁻¹	0,00 -0,66	0,135
Mercúrio (Hg)	mg L ⁻¹	0,00 -0,102	0,016
Molibdênio (Mo)	mg L ⁻¹	0,00 -1,282	0,029
Níquel (Ni)	mg L ⁻¹	0,00 -0,89	0,016
Chumbo (Pb)	mg L ⁻¹	0,00 -0,288	0,027
Silício (Si)	mg L ⁻¹	1,29-12,98	5,001
Vanádio (V)	mg L ⁻¹	0,00 -0,069	0,009
Cloreto (Cl ⁻)	mg L ⁻¹	117 -731	493
Sulfato (SO ₄ ⁻²)	mg L ⁻¹	178,31-897,40	426,12
Carbonato	mg L ⁻¹	0,00	0 ^{2/}
Bicarbonato	mol _c L ⁻¹	-	8,3 ^{2/}
AOX ^{3/}	mg L ⁻¹ de Cl ⁻	-	4,59 ^{3/}
Coliforme Total	NMP/100mL	-	< 5000
Coliforme fecal	NMP/100mL	-	< 1000

1/ Determinações semanais durante 39 meses. 2/ Valores médios de 6 determinações mensais, durante monitoramento do experimento. 3/ Halogênios orgânicos adsorvíveis; leituras inferiores à precisão do aparelho (20 mgCl. L⁻¹). 4/ Demanda química de oxigênio. 5/ Demanda bioquímica de oxigênio. 6/ Condutividade elétrica. 7/ Razão de adsorção de sódio dada por $RAS = Na^+ (Ca^{+2} + Mg^{+2})^{-1/2}$, em que os teores de Na⁺, Ca⁺² e Mg⁺² são em cmolc.L⁻¹.

haja decantação de sólidos mais grosseiros, não seria de se esperar encontrar altas concentrações de sólidos sedimentáveis no efluente analisado.

A concentração de sólidos suspensos, da ordem de 60 mg L^{-1} , indica moderado risco de entupimento de gotejadores (Ayers & Westcot, 1991), caso seja este o método escolhido para a aplicação do efluente. Em efluentes não tratados, os sólidos em suspensão são constituídos, predominantemente, por fibras e, por esta razão, podem proporcionar entupimento de tubulação e emissores hidráulicos (Adin & Sacks, 1991 e Rav-acha et al., 1995). O tratamento primário e o secundário, implementados na Aracruz Celulose, são suficientes na remoção desses sólidos, sendo que os sólidos suspensos presentes no efluente final são de caráter biológico, constituídos essencialmente de flocos biológicos. Assim, no que se refere ao parâmetro sólidos suspensos, a magnitude da concentração destes sólidos biológicos no efluente é que irá viabilizar ou não o seu aproveitamento em fertirrigação com aplicações por gotejamento.

Os altos valores de condutividade elétrica encontrados no efluente (2,7 a $4,3 \text{ dS. m}^{-1}$) indicam elevada concentração de íons em solução. Considerando-se o guia do USEPA (1981) para salinidade da água de irrigação, Quadro 5, o ETFC se enquadra como água que deve ser usada para culturas tolerantes em solos permeáveis, requerendo cuidadoso manejo. De acordo com Ayers e Westcot (Quadro 4), o ETFC é classificado como água com restrição severa, quanto ao risco de salinização, no caso de disposição no solo, isto, caso não haja meios para remoção dos sais acumulados nesse meio.

Pelos valores obtidos de pH do ETFC, entre 6,9 e 8,2, ao longo do período de monitoramento, o efluente caracteriza-se como levemente básico, possivelmente em razão da presença de alcalinidade, se enquadrando na faixa de pH considerada ótima para uso em fertirrigação (Quadro 4).

4.1.2. Concentração de macronutrientes

As concentrações de nitrogênio presente no ETFC indicam um baixo potencial de substituição de adubações nitrogenadas nos cultivos de eucalipto, quando da utilização desse efluente na fertirrigação. As baixas concentrações

de íon amônio e os valores não detectáveis de nitrato no ETCP, que são as formas iônicas preferencialmente absorvidas pelas plantas, indicam que as fontes de nitrogênio prontamente disponíveis para as plantas são pequenas, havendo necessidade de complementação nutricional com outra fonte de N, no caso do uso do efluente para fertirrigação de culturas agrícolas. Os resultados indicam que, se por um lado o efluente não representa a possibilidade da substituição de adubações nitrogenadas nos cultivos de eucalipto, por outro indica pequeno risco de contaminação de águas subterrâneas com nitrato. A concentração de amônio variou de valores não detectáveis a $5,5 \text{ mg L}^{-1}$, com valores médios de $1,7 \text{ mg L}^{-1}$.

Os valores de concentração de fósforo, de $0,17$ a $2,16 \text{ mg L}^{-1}$, como foi observado no caso do nitrogênio inorgânico, foram baixos, quando comparados aos de outros macronutrientes, o que indica a necessidade de complementação de adubação fosfatada, no caso do uso do efluente na fertirrigação de culturas agrícolas.

O potássio é encontrado no efluente na faixa de 13 a 57 mg L^{-1} , com valores médios de 27 mg L^{-1} , podendo ser o ETFC fonte desse macronutriente para as plantas.

A concentração de cálcio no efluente situou-se entre 28 e $102,10 \text{ mg L}^{-1}$ ao longo do período de monitoramento. Da mesma forma que comentado para potássio, o ETFC pode ser importante fonte de cálcio para o solo. No caso do magnésio, a faixa de concentração foi de $3,9$ a $11,0 \text{ mg L}^{-1}$.

Os valores de concentração do enxofre no efluente ficaram, predominantemente, na faixa de 63 a 189 mg L^{-1} , verificando-se uma tendência de aumento na concentração desse elemento no efluente com o tempo de monitoramento.

As concentrações de sulfato variaram entre 178 e 897 mg L^{-1} . As altas concentrações de sulfato no meio líquido favorecem a proliferação de bactérias redutoras de sulfato, ou sulfobactérias, que poderão causar problemas de entupimento nas tubulações de fertirrigação e odor.

Comparativamente ao nitrogênio inorgânico e ao fósforo, as concentrações de potássio, cálcio, magnésio e enxofre podem ser consideradas relativamente altas, viabilizando o aproveitamento do ETFC para fornecer esses nutrientes como substituinte de fertilizantes comerciais.

4.1.3. Concentração de micronutrientes

O ETFC apresentou, em geral, baixas concentrações de micronutrientes. Os valores de concentração de boro no efluente apresentaram forte oscilação durante o período de monitoramento da qualidade do ETFC, situando-se na faixa de não detectável a $1,35 \text{ mg L}^{-1}$. Segundo Ayers & Westcot (1991), Quadro 4, com base nas concentrações de boro encontradas, o ETFC constitui uma água de uso irrestrito em irrigação.

O cobre está presente em baixas concentrações no efluente do tratamento secundário, encontrando-se, predominantemente, valores até $0,14 \text{ mg L}^{-1}$, e uma concentração média de $0,01 \text{ mg L}^{-1}$. Os valores encontrados estão dentro dos limites recomendados pela UNEP (1996) para água de irrigação (Quadro 3).

A concentração de ferro no efluente oscilou entre $0,0$ e $1,35 \text{ mg L}^{-1}$. Os valores encontrados estão dentro dos limites de qualidade da água para irrigação segundo UNEP (1996), conforme Quadro 3, porém, indicam risco moderado de entupimento de gotejadores (Quadro 6), caso o efluente seja aplicado no solo utilizando-se este método.

A concentração de manganês no efluente oscilou na faixa de $0,06$ a $0,6 \text{ mg L}^{-1}$, embora tendência de decréscimo na concentração desse micronutriente possa ser observada ao longo do período de monitoramento. Os riscos de entupimento de gotejadores estão, segundo dados apresentados na Quadro 6, entre nenhum e moderado. Porém, o valor médio de concentração de $0,31 \text{ mg L}^{-1}$ supera o limite máximo recomendado pela UNEP (1996), para irrigação contínua (Quadro 3).

Para as concentrações de molibdênio, zinco, silício e cobalto encontraram-se valores menores que $1,28 \text{ mg L}^{-1}$; $0,43 \text{ mg L}^{-1}$; $0,045 \text{ mg L}^{-1}$, e na faixa de $1,29$ a $12,98 \text{ mg L}^{-1}$ respectivamente. Observou-se tendência de decréscimo nas concentrações de Mo e Zn e aumento nas concentrações de Si e Co durante o período de monitoramento da qualidade dos efluentes do tratamento secundário. Segundo os critérios da UNEP (1996), as concentrações de molibdênio superaram os valores máximos recomendados para irrigação, enquanto os de zinco e cobalto ficaram bem abaixo, não havendo referência quanto ao elemento silício.

4.1.4. Aporte de nutrientes

Com base nas recomendações de adubação para cultivo de eucalipto (CFSEMG, 1999), nas concentrações de nutrientes encontradas no ETFC e nas lâminas do efluente aplicadas nos tratamentos (114,6; 286,5; 515,7; e 1146 mm ano⁻¹) estimou-se o potencial fertilizante do ETFC, considerando um período de fertirrigação de 365 dias. Ressalta-se que esta estimativa não contempla um aspecto fundamental, que é a forma em que os nutrientes se encontram no efluente, porém pode-se comparar o aporte de nutrientes aplicados nos quatro tratamentos, cujos dados estão apresentados no Quadro 10.

Desta forma, o ETFC seria capaz de suprir a demanda total de potássio e cálcio para a maioria das culturas, mas apenas parcialmente a demanda de fósforo nos tratamentos com lâminas de aplicação mais altas. Na prática, se for feita a complementação de adubação, seria possível dispensar totalmente a adubação potássica e reduzir a dose de fósforo. A adubação com enxofre e fósforo para taxas mais baixas permaneceria necessária. Estes dados revelam que a aplicação do ETFC pode ser suficiente para o atendimento da demanda da maioria das culturas e, de outro, a necessidade de manejo adequado, cotejando o balanço hídrico e de nutrientes.

Em relação aos micronutrientes, a fertirrigação com ETFC seria capaz de suprir as demandas de Cu, Fe, B, Mn e Mo (estes em excesso para as taxas mais altas), sendo necessária a complementação com Zn para a maioria das culturas, conforme dados apresentados no Quadro 10. Nutrientes em excesso, podem comprometer a produtividade e a qualidade das culturas bem como resultar em problemas ambientais, principalmente por lixiviação e contaminação do lençol freático.

4.1.5. Elementos tóxicos

Entre os principais contaminantes tóxicos presentes no ETFC destacam-se os elementos sódio (Na⁺) e cloreto (Cl⁻), em razão da grande concentração com que estão presentes.

Quadro 10 - Potencial fertilizante e adição de metais pesados ao solo de acordo com cada lâmina de aplicação do ETFC utilizada no experimento

Tratamento	Lâmina mm.ano ⁻¹	Aplicação de macronutrientes e sódio ^{1/}													
		N kg ha ⁻¹		P kg ha ⁻¹		K kg ha ⁻¹		Ca kg ha ⁻¹		Mg kg ha ⁻¹		S t ha ⁻¹		Na t ha ⁻¹	
		amplitude	média	amplitude	Média	amplitude	média	amplitude	média	amplitude	média	amplitude	média	amplitude	média
T1	114,6	-	7,79	0,19 - 2,47	1,23	14,9- 65,2	31,35	32,4- 117,0	56,65	4,51- 12,6	7,85	0,072- 0,22	0,134	0,55- 1,131	0,851
T2	286,5	-	19,5	0,49- 6,18	3,08	37,4- 163,1	78,37	81,1- 292,5	141,64	11,3- 31,6	19,64	0,182- 0,542	0,334	1,39- 2,82	2,127
T3	515,7	-	35,1	0,88- 11,1	5,53	67,5- 292,7	141,08	145,9- 526,5	254,96	20,3- 56,9	35,36	0,327- 0,976	0,601	2,51- 5,08	3,829
T4	1146	-	77,9	1,95-24,72	12,30	149,7- 652,6	313,51	324,2- 1170	566,50	45,1- 126,5	78,50	0,728- 2,16	1,34	5,59 - 1,13	8,50
Tratamento	Lâmina mm.ano ⁻¹	Aplicação de micronutrientes (kg ha ⁻¹)													
		B		Cu		Zn		Fe		Mn		Mo			
		amplitude	média	amplitude	média	amplitude	média	amplitude	média	amplitude	média	amplitude	média		
T1	114,6	0 -1,55	0,19	0 - 0,16	0,01	0 - 0,49	0,06	0- 1,53	0,66	0,07- 0,67	0,34	0- 1,47	0,03		
T2	286,5	0 -3,87	0,49	0 - 0,40	0,03	0 - 1,23	0,14	0- 3,84	1,64	0,18- 1,69	0,87	0- 3,67	0,08		
T3	515,7	0 -6,96	0,87	0 - 0,73	0,05	0- 2,21	0,25	0- 6,91	2,96	0,33- 3,04	1,57	0- 6,60	0,15		
T4	1146	0 -15,47	1,90	0 - 1,60	0,12	0 - 4,93	0,55	0- 15,36	6,58	0,73- 6,76	3,49	0- 14,67	0,33		
Tratamento	Lâmina mm.ano ⁻¹	Adição de metais pesados (kg ha ⁻¹)													
		Cr		Cd		Ni		Pb		Hg		Si			
		amplitude	média	amplitude	média	amplitude	média	amplitude	média	amplitude	média	amplitude	média		
T1	114,6	0- 0,756	0,15	0- 0,025	0,001	0- 1,02	0,018	0- 0,330	0,031	0- 0,115	0,018	1,48 - 14,87	5,73		
T2	286,5	0- 1,89	0,38	0- 0,063	0,003	0- 2,55	0,048	0- 0,825	0,077	0- 0,287	0,046	3,70 - 37,0	14,33		
T3	515,7	0- 3,40	0,69	0 - 0,113	0,005	0- 4,59	0,083	0- 1,485	0,139	0- 0,516	0,083	6,65 - 66,5	25,79		
T4	1146	0- 7,56	1,55	0- 0,252	0,014	0- 10,20	0,183	0- 3,300	0,309	0- 1,15	0,183	14,80 - 148,0	57,31		

A concentração de sódio no efluente esteve na faixa de 488 a 987 mg L⁻¹, com valor médio em torno de 742 mg L⁻¹. Estas concentrações altas de sódio constituem, sem dúvida, o fator mais limitante para o uso dessas águas na fertirrigação de culturas agrícolas. Segundo Ayers & Westcot (1991), Quadro 4, concentrações superiores a 70 mg L⁻¹ já apresentam grau de restrição, de leve a moderado, para uso em irrigação por aspersão, podendo apresentar problemas de toxicidade. A aplicação de águas ricas em sódio por aspersão provoca queima de folhas, razão pela qual a aplicação localizada pode ser considerada mais adequada para a disposição do ETFC no solo. Durante o período de monitoramento da qualidade do ETFC, os valores de concentração de Na⁺ mantiveram-se constantes, revelando não ter havido alterações significativas no emprego de sais de sódio no processo produtivo da celulose.

Em conseqüência da alta concentração de Na e da concentração relativamente baixa de Ca e Mg, tem-se alto valor da razão de adsorção de sódio (RAS = 26,2), entretanto, riscos, como de dispersão de argila, de selamento de poros do solo, com conseqüente redução da taxa de infiltração de água no solo e maior susceptibilidade à erosão, em decorrência da intensificação do escoamento superficial, não são muito altos uma vez que a condutividade elétrica também é alta. Sob o ponto de vista de efeitos na permeabilidade do solo, a ETFC apresenta grau de restrição de leve a moderado para uso como água de irrigação (Quadro 4).

O íon cloreto, como contra-íon do íon sódio na formação de sais, está presente, também, em altas concentrações no efluente do tratamento secundário. A faixa de variação desse íon é, no entanto, mais ampla, estando entre 117 e 731 mg L⁻¹, o que pode comprometer a utilização do ETFC para irrigação, principalmente por aspersão, já que para concentrações de cloreto superiores a 350 mg L⁻¹ o grau de restrição para uso é severo (Ayers & Westcot, 1991).

A concentração de alumínio no ETFC ficou na faixa de 0,47 a 11,8 mg L⁻¹. Entretanto, há evidente queda na concentração do Al⁺³ ao longo do período de monitoramento, o que é um aspecto positivo no caso do uso desse efluente na fertirrigação de culturas agrícolas, uma vez que o alumínio é um elemento tóxico às plantas, com limites máximos recomendados de 5 e

20 mg L⁻¹, para irrigação contínua e por períodos de até 20 anos, respectivamente, conforme UNEP (1996), Quadro 3. Não obstante, deve-se ressaltar a elevada tolerância do eucalipto ao alumínio (Neves et al., 1982).

Os efluentes tratados apresentaram concentrações insignificantes de metais pesados cujos valores situaram-se abaixo do permissível para lançamento em corpos d'água receptores, conforme estabelecido na Resolução CONAMA 20/86 (CONAMA, 1986). O cádmio constitui um dos metais pesados que proporcionam maior risco ambiental quando disposto no solo, em vista de sua mais alta mobilidade e sua elevada toxicidade mesmo em concentrações muito baixas. Os valores de concentração de cádmio no ETFC estiveram na faixa de valores não detectáveis a 0,022 mg L⁻¹.

A concentração de mercúrio no efluente do secundário ficou na faixa de 0,0 a 0,10 mg L⁻¹, com valor médio de 0,016 mg L⁻¹. Verificou-se tendência de diminuição da concentração de Hg no efluente durante o tempo de monitoramento, porém, em diversas ocasiões as amostras apresentaram concentrações de mercúrio relativamente altas, suplantando o valor de 0,01 mg L⁻¹, estabelecido na Resolução CONAMA 20/86 como padrão para lançamento de efluentes em corpos d'água (CONAMA, 1986). Como no solo o mercúrio é fortemente retido, ficando muito menos biodisponível do que no caso de seu lançamento em corpos d'água receptores, a utilização do efluente como fertirrigação pode ser ambientalmente muito mais adequada do que a sua disposição de outra forma.

As concentrações de níquel no ETFC estiveram relativamente baixas ($\leq 0,89$ mg L⁻¹) durante o período de monitoramento. As concentrações de chumbo no ETFC situaram-se na faixa de valores não detectáveis a 0,20 mg L⁻¹. O cromo foi encontrado numa faixa de valores inferiores a 0,7 mg L⁻¹, e as concentrações de vanádio situaram-se entre valores não detectáveis e 0,07 mg L⁻¹.

Quanto à concentração de material orgânico clorado no ETFC, mensurado pela concentração de AOX, as concentrações variaram em torno de 4,0 mg L⁻¹ de cloreto. Acredita-se que estes compostos remanescentes no efluente após o tratamento secundário, por serem de alto peso molecular, sejam fisicamente retidos e degradados nas primeiras camadas do solo, conforme discutido por Kookana e Rogers (1995).

Apesar de ocorrer a contribuição de esgoto doméstico na geração do efluente final da fábrica, esse constitui parcela pouco significativa do volume total, sendo identificada a presença de coliformes fecais em contagens inferiores a 1000 CF/100 mL, valor do padrão bacteriológico da OMS para irrigação irrestrita (Quadro 2). Em termos de ovos de helmintos, o tempo de detenção nas lagoas de estabilização é plenamente suficiente para que ocorra sua total remoção. Quanto aos critérios de qualidade recomendados pela USEPA (Quadro 1), cujos valores são semelhantes à água potável, espera-se que com a desinfecção do ETFC estes possam ser atingidos, em termos microbiológicos.

Devido à complexidade da composição do ETFC, este se classifica como “água de irrigação que pode ter efeitos deletérios nas plantações mais sensíveis, ou que requer um manejo cuidadoso”. Tal efluente, por apresentar concentrações elevadas de sólidos dissolvidos totais como altos valores de condutividade elétrica, pode ser utilizado para fertirrigação de plantas tolerantes a sais, cultivadas em solos permeáveis, desde que haja um manejo adequado do sistema e monitoramento ambiental. Entretanto, haveria severa restrição ao emprego de sistemas de irrigação por aspersão, em decorrência das elevadas concentrações de cloretos.

4. 2. Aplicação do ETFC no solo

4.2.1. Características gerais dos solos

Os Argissolos (solos PAd1 e PAd2) têm caracteristicamente, o horizonte superficial (A) mais arenoso e o horizonte subsuperficial (B), com coloração amarelada e textura média a argilosa, o que condiciona redução significativa, em profundidade, da permeabilidade. Não existem grandes diferenças nas características físicas e químicas entre os horizontes B e C, exceto no que se refere à coloração do material. Trata-se de solos de estrutura adensada, com valores elevados de massa específica. Os valores médios de massa específica do solo são de $1,50 \text{ g cm}^{-3}$ e $1,52 \text{ g cm}^{-3}$, respectivamente para os solos PAd1 (textura argilosa) e PAd2 (textura arenosa/média) (Quadro 8). Segundo a EMBRAPA (2000), na região de Aracruz, é comum a presença de concreções

endurecidas de ferro (canga ou petroplintita), dispendo-se freqüentemente em leitos ou camadas que, caso sejam contínuos em conjunto com o adensamento natural no topo do horizonte B dos solos, possibilitam a formação de um lençol freático suspenso. Nestas condições, toda a dinâmica da água no solo pode ficar controlada por esse nível de impedimento local em plantios de eucalipto.

A porosidade total desses solos é baixa; contudo é elevada a relação macro/microporos, o que concorre para baixa disponibilidade de água. Os Argissolos Amarelos da região são de baixa fertilidade natural, conforme apresentado no Quadro 7, possuindo baixa capacidade de troca catiônica, sendo pobres em ferro e em bases trocáveis (EMBRAPA, 2000).

Os Neossolos Quartzarênicos (RQ_o) compreendem solos arenosos, com distribuição granulométrica que enquadra nas classes texturais areia e areia franca (% areia - % argila > 70%) e seqüência de horizontes do tipo A-C, sendo evidenciada alguma diferenciação de cor e ligeiro aumento na percentagem de argila com a profundidade do perfil. São solos excessivamente drenados, com permeabilidade rápida ao longo de todo o perfil, porosos, pouco suscetíveis à erosão, sendo predominantemente ácidos, com saturação por bases baixa. Apresentam baixos teores de matéria orgânica e de nutrientes, os quais decrescem com a profundidade.

Os dados de retenção de água dos solos, apresentados no Quadro 8, indicam que é baixa a umidade do solo associada às diferentes tensões, o que traduz os elevados valores de relação macro-microporos dos solos estudados e baixa capacidade de retenção de água. No Quadro 8 estão apresentados os valores calculados para água disponível (AD) no solo, tomada como sendo a diferença no conteúdo de água entre a capacidade de campo (CC) e o ponto de murcha permanente, sendo que nos solos PAd1 e PAd2, de textura mais fina que o RQ_o, a CC foi tomada como sendo o conteúdo de água relativo à tensão de 33 kPa e no solo de textura mais grosseira (RQ_o) equivalente a 10 kPa (EMBRAPA, 1997).

Para fins comparativos, costuma-se definir disponibilidade baixa de água no solo para valores menores que 0,69 mm.cm⁻¹; disponibilidade média para valores entre 0,70 – 1,29 mm.cm⁻¹ e disponibilidade alta para valores maiores que 1,30 mm.cm⁻¹ (EMBRAPA, 2000). Em geral, verifica-se que as classes de disponibilidade de água dos solos são predominantemente baixas, o que pode ser

devido à baixa atividade de argila e, principalmente, à relativamente alta relação macro-microporos presente nos solos estudados.

A CMA, capacidade máxima de armazenamento de água, corresponde àquela ocorrente em solo saturado, ou seja, a água ocupando todo o volume de poros. Assim, tem-se, em média, para todo o perfil, os valores de $0,46 \text{ m}^3\text{m}^{-3}$, $0,44 \text{ m}^3\text{m}^{-3}$ e $0,49 \text{ m}^3\text{m}^{-3}$ para os solos PAd1, PAd2 e RQo, respectivamente.

4.2.2. Efeitos da aplicação do ETFC nas características físicas e químicas do solo

Nos Quadros 11 a 16 estão apresentados as equações que descrevem a variação dos atributos analisados em função da lâmina aplicada de ETFC ao longo das colunas de solo, para as condições sem e com aplicação de chuvas simuladas. O coeficiente de determinação (R^2) baixo (<60%) encontrado para as equações de regressão ajustadas para as variáveis dependentes como argila dispersa, fósforo, cálcio, nitrogênio, carbono orgânico, enxofre e boro, em determinadas profundidades e tipos de solo, indicam baixa capacidade preditiva das equações ajustadas, isto é, que essas equações não foram adequados para descrever a interferência da lâmina de aplicação nas variáveis físicas e químicas dos solos. As equações propostas que melhor se adequaram foram aquelas ajustados para as variáveis pH, CE_{es} , Na^+ e Cl^- .

Nas Figuras 2 a 18 esta apresentada a evolução dos atributos pH, argila dispersa, CE_{es} , C.O., $N_{Kjeldahl}$, P, S, B e Cl^- disponíveis, K^+ , Ca^{+2} , Mg^{+2} , Na^+ e Al^{+3} trocáveis, micronutrientes (Fe, Zn, Mn e Cu) e alguns metais disponíveis, ao longo do perfil dos solos, após 180 dias de aplicação de lâminas de ETFC, com e sem simulação de chuva. Os valores médios destes atributos, para diferentes profundidades dos solos estudados, estão apresentados no Apêndice 1 (Quadros 1A a 6A).

Os valores de pH do solo aumentaram nas primeiras camadas de todos os solos com o incremento das taxas de aplicação de ETFC, chegando a atingir valores acima de 7,0 nas menores profundidades (0-10 cm) (Figura 2). Porém,

Quadro 11 - Equações de regressão dos atributos químicos do solo PAd1 em função de lâminas de aplicação ETFC.

Parâmetro	Profundidade cm	Equação ajustada	R ²
pH	0-10	$\hat{y} = 4,226 + 0,00118^{**}x$	0,925
CE	10-55	$\hat{Y} = \bar{y}$	-
	0-10	$\hat{y} = 0,71075 + 0,0103^{**}x - 0,4516E-05^{**}x^2$	0,915
	10-20	$\hat{y} = 0,5688 + 0,005024^{**}x$	0,890
	20-30	$\hat{y} = 0,1903 + 0,0033^{**}x$	0,913
	30-40	$\hat{y} = 0,3504 - 0,00826^{**}x + 0,0000385^{**}x^2 - 0,2648E-07^{**}x^3$	0,346
Argila Dispersa	40-55	$\hat{Y} = \bar{y}$	-
	0-10	$\hat{Y} = \bar{y}$	-
	10-20	$\hat{y} = 5,511 + 0,0852x - 0,0000673^{**}x^2$	0,347
	20-30	$\hat{y} = 19,903 + 0,1647^{**}x - 0,0004297^{**}x^2 + 0,2374E-06^{**}x^3$	0,708
	30-40	$\hat{y} = 22,977 + 0,0467x - 0,0000387^{**}x^2$	0,161
Na	40-55	$\hat{Y} = \bar{y}$	-
	0-10	$\hat{y} = 49,955 + 0,3307^{**}x + 0,00142^{**}x^2 - 0,1165E-05^{**}x^3$	0,891
	10-20	$\hat{y} = 8,784 + 0,77947^{**}x - 0,00038^{**}x^2$	0,848
	20-30	$\hat{y} = 10,049 + 0,3402^{**}x - 0,000136^{**}x^2$	0,817
	30-40	$\hat{y} = 3,625 + 0,1062^{**}x$	0,901
K	40-55	$\hat{y} = 5,654 + 0,0588^{**}x$	0,619
	0-10	$\hat{y} = 20,167 + 0,0672^{**}x - 0,00002056^{**}x^2$	0,799
	10-20	$\hat{y} = 5,926 + 0,0249^{**}x - 0,00001193^{**}x^2$	0,634
P	20-55	$\hat{Y} = \bar{y}$	-
	0-10	$\hat{y} = 37,776 - 0,02617^{**}x + 0,0000169^{**}x^2$	0,235
Ca	10-55	$\hat{Y} = \bar{y}$	-
	0 - 20	$\hat{Y} = \bar{y}$	-
	20-30	$\hat{y} = 0,0483 + 0,00007027^{**}x$	0,492
Mg	30 - 55	$\hat{Y} = \bar{y}$	-
	0-55	$\hat{Y} = \bar{y}$	-
	0-10	$\hat{y} = 0,4892 + 0,0068^{**}x - 0,2141E-05^{**}x^2$	0,608
	10-20	$\hat{y} = 0,1057 + 0,0075^{**}x - 0,2649E-05^{**}x^2$	0,802
	20-30	$\hat{y} = 0,3224 + 0,0033^{**}x$	0,867
Cl ⁻¹	30-40	$\hat{y} = 0,2953 - 0,00465^{**}x + 0,2407E-04^{**}x^2 - 0,1627E-07^{**}x^3$	0,614
	40-55	$\hat{Y} = \bar{y}$	-
	0-10	$\hat{Y} = \bar{y}$	-
	10-20	$\hat{y} = 0,6871 + 0,000565x - 0,5071E-06^{**}x^2$	0,277
	20-30	$\hat{y} = 0,7156 + 0,0002881x - 0,2989E-06^{**}x^2$	0,083
N	30-40	$\hat{y} = 0,7916 - 0,0001285$	0,134
	40-55	$\hat{Y} = \bar{y}$	-
	0-10	$\hat{Y} = \bar{y}$	-
	10-20	$\hat{y} = 0,7412 + 0,00167x - 0,1344E-05^{**}x^2$	0,354
CO	20-55	$\hat{Y} = \bar{y}$	-
	0-10	$\hat{Y} = \bar{y}$	-
B	10-20	$\hat{y} = 3,7112 + 0,00516x - 0,4613E-05^{**}x^2$	0,157
	10-20	$\hat{Y} = \bar{y}$	-
	20-30	$\hat{y} = 0,6742 + 0,001405^{**}x$	0,679
	30-40	$\hat{y} = 0,5921 + 0,003411x - 0,2774E-05^{**}x^2$	0,154
S	40-5	$\hat{Y} = \bar{y}$	-
	0-10	$\hat{y} = 30,872 + 0,5984^{**}x - 0,00133x^2 + 0,76E-06^{**}x^3$	0,276
	10-20	$\hat{y} = 22,6942 + 0,11974^{**}x$	0,567
	20-30	$\hat{y} = 13,975 + 0,0555^{**}x$	0,679
	30-55	$\hat{Y} = \bar{y}$	-

1/ **, *, °: coeficiente significativo a 1, 5 e 10%, respectivamente.

2/ situação $\hat{y} = y$, onde \hat{y} valor estimado, e y valor médio do atributo na camada seccionada de 10 cm.

Quadro 12 - Equações de regressão dos atributos químicos do solo PAd2 em função de lâminas de aplicação do ETFC.

Parâmetro	Profundidade média cm	Equação ajustada	R ²
pH	0-10	$\hat{y} = 4,19 + 0,00509^{**}x - 0,2947E-05^{**}x^2$	0,862
	10-20	$\hat{y} = 4,141 - 0,000166^{**}x + 0,149E-05^{**}x^2$	0,887
	20-55	$\hat{Y}=\hat{y}$	-
CE	0-10	$y = 0,80023 + 0,009159^{**}x - 0,458E-5^{**}x^2$	0,867
	10-20	$\hat{y} = 0,6847 + 0,01447^{**}x - 0,811E-05^{**}x^2$	-
	20-30	$\hat{y} = 0,6603 + 0,00935^{**}x - 0,353E-05^{**}x^2$	0,925
	30-40	$\hat{y} = 0,4267 + 0,00342^{**}x$	0,839
	40-55	$\hat{y} = 0,2093 + 0,001375^{**}x$	0,615
Argila Dispersa	0-40	$\hat{Y}=\hat{y}$	-
	40-50	$\hat{y} = 18,527 - 0,01385^{**}x$	0,709
Na	0-10	$\hat{y} = 21,2 + 6,5821^{*}x^{0,5} + 0,1149^{**}x$	-
	10-20	$\hat{y} = 40,1 + 0,3829^{**}x$	0,909
	20-30	$\hat{y} = 28,341 + 0,2869^{**}x$	0,966
	30-40	$\hat{y} = 16,9633 + 0,1519^{**}x$	0,911
	40-55	$\hat{y} = 5,9521 + 0,09825^{**}x$	0,721
K	0-10	$\hat{y} = 9,447 + 0,00887^{**}x + 0,0001139^{**}x^2 - 0,8367E-07^{\circ}x^3$	-
	10-20	$\hat{y} = 3,0649 + 0,0227^{**}x$	0,945
	20-30	$\hat{y} = 3,5717 + 0,00566^{*}x$	0,517
	30-55	$\hat{Y}=\hat{y}$	-
P	0-10	$y = 34,564 - 0,04626x + 0,1327E-03x^2 - 0,8103E-07^{\circ}x^3$	0,414
	10-20	$\hat{y} = 4,197 + 0,00426^{\circ}x$	0,310
	20-55	$\hat{Y}=\hat{y}$	-
Ca	0-10	$y = 0,3803 + 0,000159^{**}x$	0,430
	10-20	$\hat{y} = 0,2217 - 0,000077^{\circ}x$	0,357
	20-30	$\hat{y} = 0,1367 + 0,000224x - 0,2140E-06^{\circ}x^2$	0,439
	30-55	$\hat{Y}=\hat{y}$	-
Mg	0-10	$\hat{y} = 0,0181 + 0,269E-04^{\circ}x$	0,661
	10-20	$\hat{y} = 0,0420 - 0,324E-04^{\circ}x$	0,516
	20-30	$\hat{y} = 0,11221 + 0,741E-04^{**}x - 0,12929E-06^{**}x^3$	0,655
	30-40	$\hat{y} = 0,09406 - 0,000282x + 0,11422E-05^{**}x^2 - 0,7902E-09^{**}x^3$	0,515
	40-55	$\hat{y} = 0,0456 - 0,1105E-04^{**}x + 0,7727E-07^{\circ}x^2$	0,647
Cl ⁻¹	0-10	$\hat{y} = 0,4339 + 0,005899^{**}x - 0,3113E-05^{\circ}x^2$	0,830
	10-20	$\hat{y} = 0,3710 + 0,01104^{**}x - 0,7181E-05^{**}x^2$	0,826
	20-30	$\hat{y} = 0,30123 + 0,00816^{**}x - 0,3331E-05^{**}x^2$	0,895
	30-40	$\hat{y} = 0,2299 + 0,00547^{**}x - 0,2209E-05^{\circ}x^2$	0,697
	40-55	$\hat{y} = 0,12527 + 0,001363^{**}x$	0,779
N	0-55	$\hat{Y}=\hat{y}$	-
	0-55	$\hat{Y}=\hat{y}$	-
CO	0-10	$\hat{Y}=\hat{y}$	-
	10-20	$y = 2,0959 + 0,1008x - 0,2754E-04x^2 + 0,1661E-07^{\circ}x^3$	0,301
	20-30	$\hat{y} = 2,0833 + 0,003219x - 0,3074E-05^{\circ}x^2$	0,302
	30-55	$\hat{Y}=\hat{y}$	-
S	0-10	$\hat{y} = 39,414 + 0,5063^{\circ}x - 0,00135x^2 + 0,8572E-06^{\circ}x^3$	0,759
	10-20	$\hat{y} = 88,372 + 0,0886^{**}x$	0,462
	20-30	$\hat{y} = 61,123 + 0,10677^{**}x$	0,723
	30-40	$\hat{y} = 7,6405 + 0,0876^{**}x$	0,735
	40-55	$\hat{y} = 1,0060 - 0,00232^{**}x + 0,3023E-05^{\circ}x^2$	0,675

1/ **, *, °: coeficiente significativo a 1, 5 e 10%, respectivamente.

2/ situação $\hat{y} = y$, onde \hat{y} valor estimado, e y valor médio do atributo na camada seccionada de 10 cm.

Quadro 13 - Equações de regressão dos atributos químicos do solo arenoso RQ₀ em função de lâminas de aplicação do ETFC.

Parâmetro	Profundidade cm	Equação ajustada	R ²
pH	0-10	$\hat{y} = 5,16 + 0,005112^{**}x - 0,2649E-05^{**}x^2$	0,830
	10-20	$\hat{y} = 5,05 + 0,00511^{**}x - 0,2899E-05^{**}x^2$	0,854
	20-30	$\hat{y} = 4,82 + 0,00393^{**}x - 0,1798E-05^{**}x^2$	0,813
	30-40	$\hat{y} = 4,70 + 0,003962^{**}x - 0,1756E-05^{**}x^2$	0,849
	40-55	$\hat{y} = 5,54 - 0,00058^{**}x + 0,1112E-05^{\circ}x^2$	0,244
CE	0-10	$\hat{y} = 0,5726 + 0,001029^{*}x$	0,681
	10-20	$\hat{y} = 0,2771 + 0,001123^{**}x$	0,648
	20-30	$\hat{y} = 0,4524 + 0,00088^{*}x$	0,549
	30-40	$\hat{y} = 0,4522 + 0,00107^{*}x$	0,565
	40-55	$\hat{y} = 0,2365 + 0,00378^{**}x$	0,720
Argila Dispersa	0-55	$\hat{Y} = \bar{y}$	-
Na	0-10	$\hat{y} = 22,862 + 0,1093^{**}x$	0,852
	10-20	$\hat{y} = 14,499 + 0,1037^{**}x$	0,858
	20-30	$\hat{y} = 18,597 + 0,1147^{**}x$	0,864
	30-40	$\hat{y} = 14,928 + 0,09615^{**}x$	0,779
	40-55	$\hat{y} = -0,762 + 0,2623^{**}x$	0,968
K	0-10	$\hat{y} = 5,347 + 0,01069^{**}x$	0,779
	10-20	$\hat{y} = 3,070 + 0,00689^{**}x$	0,789
	20-30	$\hat{y} = 3,033 + 0,00778^{**}x$	0,772
	30-40	$\hat{y} = 1,761 + 0,00855^{**}x$	0,831
	40-55	$\hat{y} = 1,372 + 0,01797^{**}x$	0,920
P	0-10	$\hat{y} = 16,958 + 0,004921^{*}x$	0,916
	10-55	$\hat{Y} = \bar{y}$	-
Ca	0-10	$\hat{y} = 0,2891 + 0,000449^{**}x - 0,2871E-06^{*}x^2$	0,603
	10-55	$\hat{Y} = \bar{y}$	-
Mg	0-10	$\hat{y} = 0,01835 + 0,00002759^{\circ}x$	0,685
	10-55	$\hat{Y} = \bar{y}$	-
Cl ⁻¹	0-40	$\hat{Y} = \bar{y}$	-
	40-55	$\hat{y} = 0,2653 + 0,001727^{**}x$	0,417
N	0-55	$\hat{Y} = \bar{y}$	-
CO	0-10	$\hat{y} = 0,8724 + 0,00289x - 0,2468E-05^{**}x^2$	0,250
	10-30	$\hat{Y} = \bar{y}$	-
	30-40	$\hat{y} = 0,3041 + 0,0074x - 0,0000212x^2 + 0,1328E-07^{**}x^3$	0,176
	40-55	$\hat{y} = 0,204 + 0,0065^{*}x - 0,00001713x^2 + 0,1061E-07^{*}x^3$	0,196
B	0-55	$\hat{Y} = \bar{y}$	-
S	0-40	$\hat{Y} = \bar{y}$	-
	40-55	$\hat{y} = 13,237 + 0,120997^{**}x$	0,610

1/ **, *, °: coeficiente significativo a 1, 5 e 10%, respectivamente.

2/ situação $\hat{y} = y$, onde \hat{y} valor estimado, e y valor médio do atributo na camada seccionada de 10 cm.

Quadro 14 - Equações de regressão de atributos químicos do solo PAd1 em função de lâminas de aplicação do ETFC com aplicação de chuvas simuladas (CC)

Parâmetro	Profundidade cm	Equação ajustada	R ²
pH	0-10	$\hat{y} = 4,29 + 0,9140E-03^{**}x$	0,922
	10-20	$\hat{y} = 4,07 + 0,3518E-03^{\circ}x$	0,809
	20-55	$\hat{Y}=\bar{y}$	-
EC	0-10	$\hat{y} = 0,5999 + 0,00606^{**}x - 0,2755E-05^{*}x^2$	0,915
	10-20	$\hat{y} = 0,5313 + 0,00292^{**}x$	0,917
	20-30	$\hat{y} = 0,5652 + 0,00260^{**}x$	0,876
	30-55	$\hat{y} = 0,1857 + 0,00178^{**}x$	0,921
Argila Dispersa	0-10	$\hat{y} = 22,8566 + 0,0883x - 0,00025x^2 + 0,1524E-06^{\circ}x^{-3}$	0,285
	10-20	$\hat{y} = 3,1234 + 0,00743^{\circ}x$	0,876
	20-30	$\hat{Y}=\bar{y}$	-
	30-55	$\hat{y} = 16,0521 - 0,0109^{**}x$	0,917
Na	0-10	$\hat{y} = 17,527 + 0,7131^{**}x - 0,2265E-03^{**}x^2$	0,978
	10-20	$\hat{y} = 10,667 + 0,4771^{**}x$	0,986
	20-30	$\hat{y} = 35,539 + 0,2912^{**}x$	0,877
	30-55	$\hat{y} = 13,7378 + 0,174522^{**}x$	0,926
K	0-10	$\hat{y} = 15,933 + 0,0409^{**}x$	0,807
	10-20	$\hat{y} = 4,409 + 0,0097^{**}x$	0,744
	20-55	$\hat{Y}=\bar{y}$	-
P	0-55	$\hat{Y}=\bar{y}$	-
Ca	0-10	$\hat{y} = 0,418 + 0,7490E-04^{\circ}x$	0,124
	10-55	$\hat{Y}=\bar{y}$	-
Mg	0-10	$\hat{y} = 0,053 + 0,2655E-04^{\circ}x$	0,286
	10-55	$\hat{Y}=\bar{y}$	-
Cl ⁻¹	0-10	$\hat{y} = 0,346 + 0,00217^{**}x$	0,839
	10-20	$\hat{y} = 0,0059 + 0,00442^{**}x - 0,19812E-05^{\circ}x^2$	0,965
	20-30	$\hat{y} = 0,5448 + 0,002245^{**}x$	0,750
	30-55	$\hat{y} = 0,232684 + 0,00164^{**}x$	0,887
N	0-20	$\hat{Y}=\bar{y}$	-
	20-30	$\hat{y} = 0,5848 + 0,6269E-03x - 0,469932E-06^{**}x^2$	0,638
	30-55	$\hat{Y}=\bar{y}$	-
CO	0-55	$\hat{Y}=\bar{y}$	-
B	0-55	$\hat{Y}=\bar{y}$	-
S	0-10	$\hat{y} = 44,107 + 0,0941^{**}x$	0,584
	10-20	$\hat{y} = 36,156 + 0,1515^{**}x$	0,843
	20-30	$\hat{y} = 23,7352 + 0,0875^{**}x$	0,877
	30-55	$\hat{y} = 8,54109 + 0,0212^{**}x + 0,1499E-03^{\circ}x^2$	0,301

1/ **, *, °: coeficiente significativo a 1, 5 e 10%, respectivamente.

2/ situação $\hat{y} = y$, onde \hat{y} valor estimado, e y valor médio do atributo na camada seccionada de 10 cm.

Quadro 15 - Equações de regressão dos atributos químicos do solo PAd2 em função de lâminas de aplicação do ETFC com aplicação de chuvas simuladas (CC).

Parâmetro	Profundidade cm	Equação ajustada	R ²
pH	0-10	$\hat{y} = 4,56 + 0,004133^{**}x - 0,1899E-05^{**}x^2$	0,881
	10-20	$\hat{y} = 4,525 + 0,00122^{**}x$	0,789
	20-30	$\hat{y} = 4,343 + 0,000325 \text{ } ^{\circ}x$	0,352
	30-55	$\hat{Y} = \bar{y}$	-
CE	0-10	$\hat{y} = 0,6063 + 0,002639^{**}x$	0,897
	10-20	$\hat{y} = 0,2357 + 0,00639^{**}x - 0,25229E-05$	0,889
	20-30	$\hat{y} = 0,649 + 0,00394^{**}x$	0,866
	30-55	$\hat{y} = 0,7307 + 0,00638^{**}x - 0,2509E-05 \text{ } ^{\circ}x^2$	0,793
Argila Dispersa	0-10	$\hat{Y} = \bar{y}$	-
	10-20	$\hat{Y} = \bar{y}$	-
	20-30	$\hat{Y} = \bar{y}$	-
	30-55	$\hat{y} = 5,094 + 0,00959^*x$	0,320
Na	0-10	$\hat{y} = 35,710 + 0,2478^{**}x$	0,943
	10-20	$\hat{y} = 15,967 + 0,2838^{**}x$	0,949
	20-30	$\hat{y} = 13,491 + 0,3099^{**}x$	0,979
	30-40	$\hat{y} = 24,528 + 0,2634^{**}x$	0,963
K	0-10	$\hat{y} = 7,651 + 0,04233^{**}x - 0,00001627^*x^2$	0,842
	10-20	$\hat{y} = 2,686 + 0,02059^{**}x$	0,939
	20-30	$\hat{y} = 1,675 + 0,004229 \text{ } ^{\circ}x$	0,548
	30-55	$\hat{Y} = \bar{y}$	-
P	0-55	$\hat{Y} = \bar{y}$	-
Ca	0-10	$\hat{y} = 0,203 + 0,000227^{**}x$	0,753
	10-55	$\hat{Y} = \bar{y}$	-
Mg	0-10	$\hat{y} = 0,0141 + 0,00004769^{**}x$	0,877
	10-20	$\hat{Y} = \bar{y}$	-
	20-30	$\hat{y} = 3,981 + 0,6697E-04^*x - 0,8079E-07 \text{ } ^{\circ}x^2$	0,236
	30-55	$\hat{y} = 0,161 - 0,9453E-04^{**}x$	0,472
Cl ⁻¹	0-10	$\hat{y} = 0,4364 + 0,001321^{**}x$	0,794
	10-20	$\hat{y} = 0,3323 + 0,00204^{**}x$	0,863
	20-30	$\hat{y} = 0,3473 + 0,00272^{**}x$	0,795
	30-15	$\hat{y} = 0,4379 + 0,00254^{**}x$	0,848
N	0-55	$\hat{Y} = \bar{y}$	-
CO	0-55	$\hat{Y} = \bar{y}$	-
B	0-10	$\hat{y} = 1,8239 + 0,001105^*x$	0,843
	10-20	$\hat{y} = 1,147 + 0,0064 \text{ } ^{**}x - 0,4168E-05^{**}x^2$	0,273
	20-55	$\hat{Y} = \bar{y}$	-
S	0-10	$\hat{y} = 14,655 + 0,04609 \text{ } ^{\circ}x$	0,584
	10-20	$\hat{y} = 1,272 + 0,10659^{**}x$	0,815
	20-30	$\hat{y} = 26,298 + 0,1280^{**}x$	0,778
	30-55	$\hat{y} = 49,589 + 0,0382^*x$	0,230

1/ **, *, °: coeficiente significativo a 1, 5 e 10%, respectivamente.

2/ situação $\hat{y} = y$, onde \hat{y} valor estimado, e y valor médio do atributo na camadas seccionadas de 10 cm.

Quadro 16 - Equações de regressão dos atributos químicos do solo RQ_o em função de lâminas de aplicação do ETFC com a aplicação de chuvas simuladas (CC).

Parâmetro	Profundidade cm	Equação ajustada	R ²	
pH	0-10	$\hat{y} = 5,1569 + 0,00511^{**}x - 0,26497E-05^{**}x^2$	0,830	
	10-20	$\hat{y} = 5,0151 + 0,00511^{**}x - 0,28988E-05^{**}x^2$	0,854	
	20-30	$\hat{y} = 4,8197 + 0,00393^{**}x - 0,17978E-05^{**}x^2$	0,904	
	30-55	$\hat{y} = 4,70308 + 0,00396^{**}x - 0,17565E-05$	0,849	
EC	0-10	$\hat{y} = 0,57231 + 0,00103^{*}x$	0,681	
	10-20	$\hat{y} = 0,27711 + 0,00112^{**}x$	0,648	
	20-30	$\hat{y} = 0,45249 + 0,88012E-03^{*}x$	0,550	
	30-55	$\hat{y} = 0,45218 + 0,00107^{*}x$	0,565	
Argila Dispersa	0-55	$\hat{Y} = \bar{y}$	-	
	Na	0-10	$\hat{y} = 22,8624 + 0,10934^{**}x$	0,852
		10-20	$\hat{y} = 14,4987 + 0,1031^{**}x$	0,858
		20-30	$\hat{y} = 18,5966 + 0,1147^{**}x$	0,863
K	30-55	$\hat{y} = 14,9281 + 0,09615^{**}x$	0,780	
	0-10	$\hat{y} = 5,34664 + 0,01069^{**}x$	0,779	
	10-20	$\hat{y} = 3,07035 + 0,00689^{**}x$	0,789	
	20-30	$\hat{y} = 3,03275 + 0,00778^{**}x$	0,772	
P	30-55	$\hat{y} = 1,76161 + 0,00855^{**}x$	0,831	
	0-10	$\hat{y} = 16,9583 + 0,00492^{*}x$	0,916	
	10-55	$\hat{Y} = \bar{y}$	-	
Ca	0-10	$\hat{y} = 0,289124E+00 + 0,448909E-03^{**}x - 0,28715E-06^{*}x^2$	0,603	
	10-55	$\hat{Y} = \bar{y}$	-	
Mg	0-10	$\hat{y} = 0,01835 + 0,27597E-04^{*}x$	0,685	
	10-55	$\hat{Y} = \bar{y}$	-	
Cl ⁻¹	0-10	$\hat{Y} = \bar{y}$	-	
N	0-10	$\hat{Y} = \bar{y}$	-	
CO	0-10	$\hat{y} = 0,87237 + 0,0029x - 0,24678E-05^{**}x^2$	0,250	
	10-55	$\hat{Y} = \bar{y}$	-	
B	0-10	$\hat{Y} = \bar{y}$	-	
	10-20	$\hat{Y} = \bar{y}$	-	
	20-30	$\hat{y} = 0,33505 + 0,90162E-03^{*}x$	0,704	
	40-55	$\hat{Y} = \bar{y}$	-	
S	0-55	$\hat{Y} = \bar{y}$	-	

1/ **, *, °: coeficiente significativo a 1, 5 e 10%, respectivamente.

2/ situação $\hat{y} = y$, onde \hat{y} valor estimado, e y valor médio do atributo na camadas seccionadas de 10 cm.

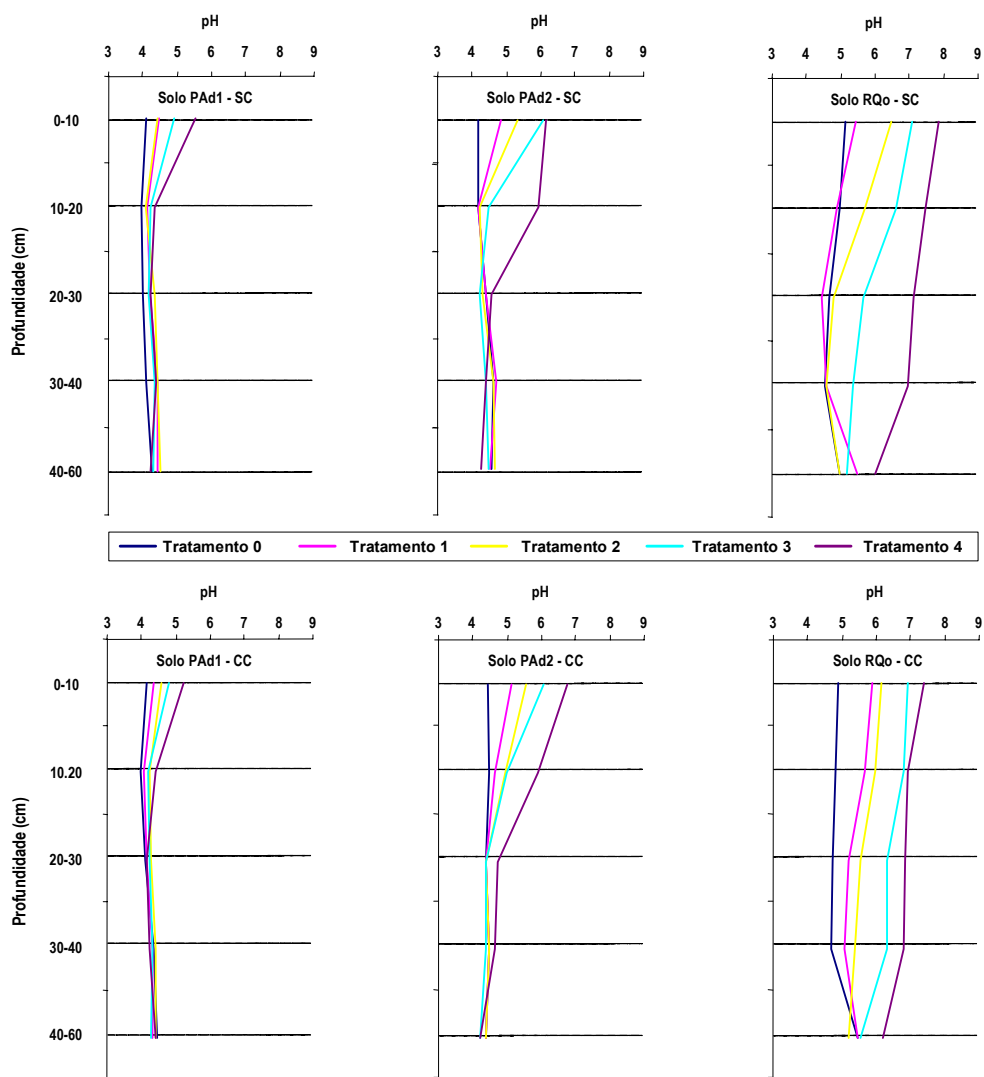


Figura 2 - Evolução do pH em cinco profundidades dos solos em estudo, PAD1, PAD2 e RQo, avaliada 180 dias após o plantio de mudas de eucalipto e de aplicação do ETFC, sendo Trat.0, Trat.1, Trat.2, Trat.3 e Trat.4 correspondente às lâminas aplicadas de 0mm, 114,6mm, 286,5mm, 515,7mm e 1146mm, considerando-se duas condições na condução do experimento: sem simulação de chuva e com simulação de chuva (valores médios de três repetições).

não houve variação significativa deste parâmetro em profundidades maiores, exceto no solo RQ₀, no qual houve aumento expressivo do pH, ao longo do perfil, em relação à testemunha (Quadro 13). As variações encontradas apresentaram dependentes da capacidade tamponante (acidez potencial) de cada solo (Quadro 7).

Tanto nas colunas de solo que receberam como nas que não receberam chuvas simuladas, houve uma maior elevação do pH nos solos de textura mais grossa (RQ₀), evidenciando seu menor poder tampão em relação ao pH. Nestes solos, o efeito da fertirrigação pode ser verificado, para as maiores taxas de aplicação do ETFC, em maiores profundidades. Houve pequeno efeito das chuvas simuladas no pH dos solos.

A condutividade elétrica no extrato de saturação e as concentrações de cloreto disponível e sódio trocável no solo (Figuras 3 a 5) apresentaram comportamento semelhante em todas as taxas de ETFC aplicadas e em todos os solos avaliados. Elevados valores de CE_{es} e altas concentrações de Na trocável e cloreto foram obtidas nas camadas superficiais dos solos das colunas.

Comparando-se os valores obtidos nas amostras coletadas em colunas que não receberam o ETFC com as que o receberam, observa-se que, na camada superficial (0-20), principalmente nas colunas que receberam as mais baixas taxas de aplicação, os valores de Na⁺, Cl⁻ e CE atingiram níveis próximos aos máximos observados na camada subsequente, podendo-se dizer que, no final do experimento, os horizontes superficiais do solo apresentaram concentrações próximas ou de saturação com Na⁺ e Cl⁻ e que, com o aumento da taxa de aplicação de ETFC, o mesmo ocorreu em camadas mais profundas. A razão dos valores de condutividade elétrica acompanharem as variações do Na⁺ e Cl⁻, está na maior contribuição desses íons na CE do extrato de saturação do solo do que outros íons também presentes, por estarem em maior concentração no ETFC. Nas colunas de solo que receberam as maiores lâminas de aplicação do ETFC, e assim também de sódio, houve, aumentos maiores na condutividade elétrica extrato de saturação do solo (Figura 3).

Considerando-se os solos que não receberam chuvas simuladas, pode-se verificar um aumento mais significativo na condutividade elétrica ou

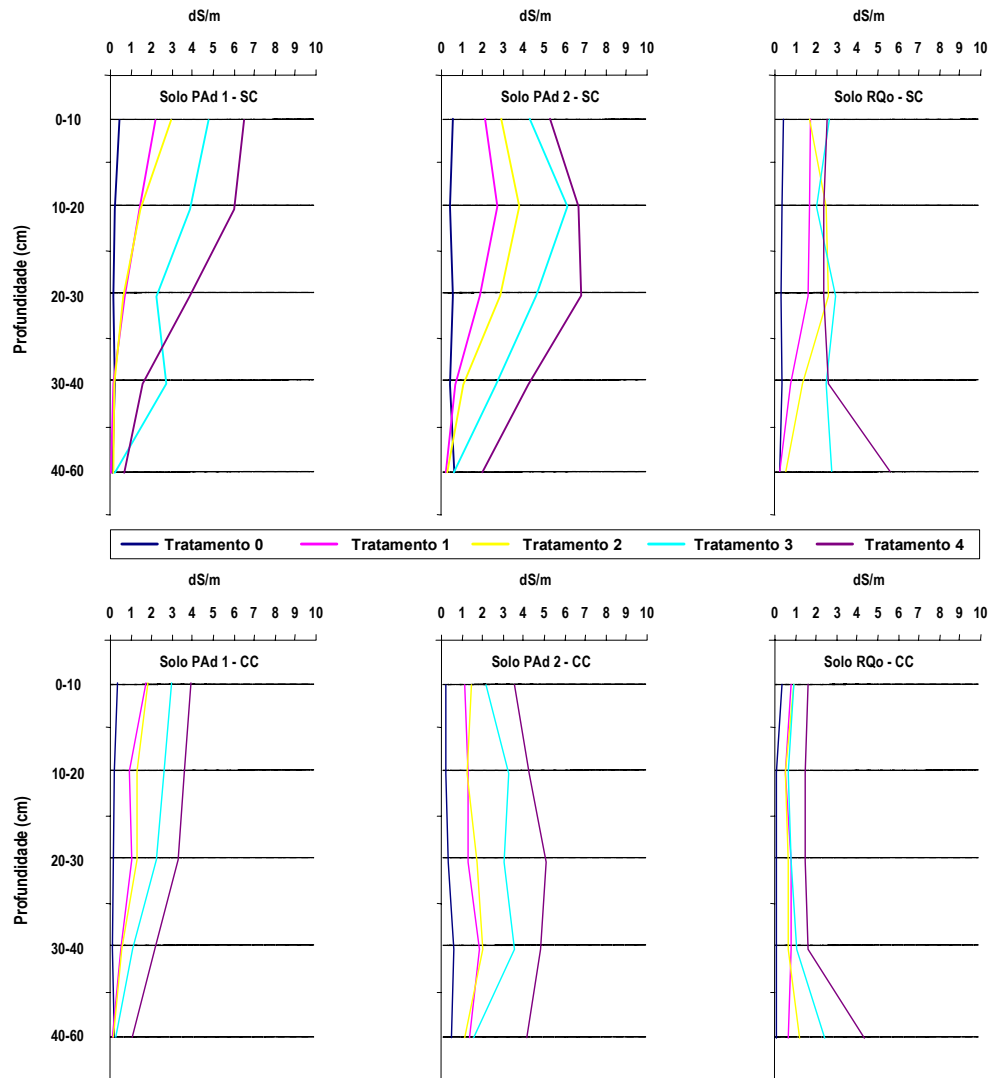


Figura 3 - Evolução da condutividade elétrica em cinco profundidades dos solos em estudo, PAd1, PAd2 e RQo, avaliada 180 dias após o plantio de mudas de eucalipto e de aplicação do ETFC, sendo Trat.0, Trat.1, Trat.2, Trat.3 e Trat.4 correspondente às lâminas aplicadas de 0mm, 114,6mm, 286,5mm, 515,7mm e 1146mm, considerando-se duas condições na condução do experimento: sem simulação de chuva e com simulação de chuva (valores médios de três repetições).

salinidade das camadas superficiais (0-40cm) dos solos de textura média/argilosa (PAd1) e arenosa/média (PAd2). Efeito menos expressivo foi observado no solo de textura arenosa (RQ_o).

A simulação de chuvas proporcionou redução nos valores de condutividade elétrica no extrato de saturação de amostras retiradas em todo o perfil dos solos. Isto vem demonstrar que, em períodos mais chuvosos, tal como os apresentados na região de Aracruz-ES, torna-se pequeno o risco de salinização dos solos, em decorrência da aplicação do ETFC como fertirrigação do eucalipto. Suspeita-se que a lixiviação do sódio trocável seja a principal responsável por estes resultados, podendo-se esperar que a utilização de métodos que possibilitem a remoção de sódio do perfil venha controlar, também, a condutividade elétrica no solo. Os valores máximos de CE atingidos no solo PAd1 foram de 6,5 e 3,9 dS m⁻¹, com concentração de 541 e 548 mg kg⁻¹ de Na, nas colunas que não receberam e nas que receberam chuvas simuladas, respectivamente. No solo PAd2, os valores máximos de CE e de Na, nos que receberam ou não chuvas simuladas foram, respectivamente 6,7 dS m⁻¹ e 482 mg kg⁻¹ e de 5 dS m⁻¹ e 365 mg kg⁻¹.

Avaliando-se as concentrações de sódio trocável, pode-se verificar que houve variação significativa das concentrações desse cátion em todo o perfil do solo nas colunas em que foi aplicado o efluente (Figura 4). As equações de regressão ajustadas em função das lâminas de aplicação de ETFC, para diferentes profundidades, mostram comportamentos diferentes dos solos estudados quanto ao sódio (Quadros 11 a 16). O solo PAd1 apresentou uma tendência de variação do sódio ajustada à função quadrática, enquanto os solos PAd2 e RQ_o apresentaram aumento linear nas concentrações de sódio com as taxas de aplicação de ETFC ao longo de cada profundidade. Os resultados de concentração de Na trocável obtidos nas amostras coletadas indicam que esse é o fator mais limitante para a disposição de efluente do secundário no solo, uma vez que há clara concentração desse cátion no perfil. Entretanto, em vista da facilidade com que o Na é, também, removido do perfil, acredita-se que a disposição do ETFC em solos arenosos ou com sistemas de drenagem artificial implantados possa ser suficiente para proporcionar maior controle da sodificação dos solos.

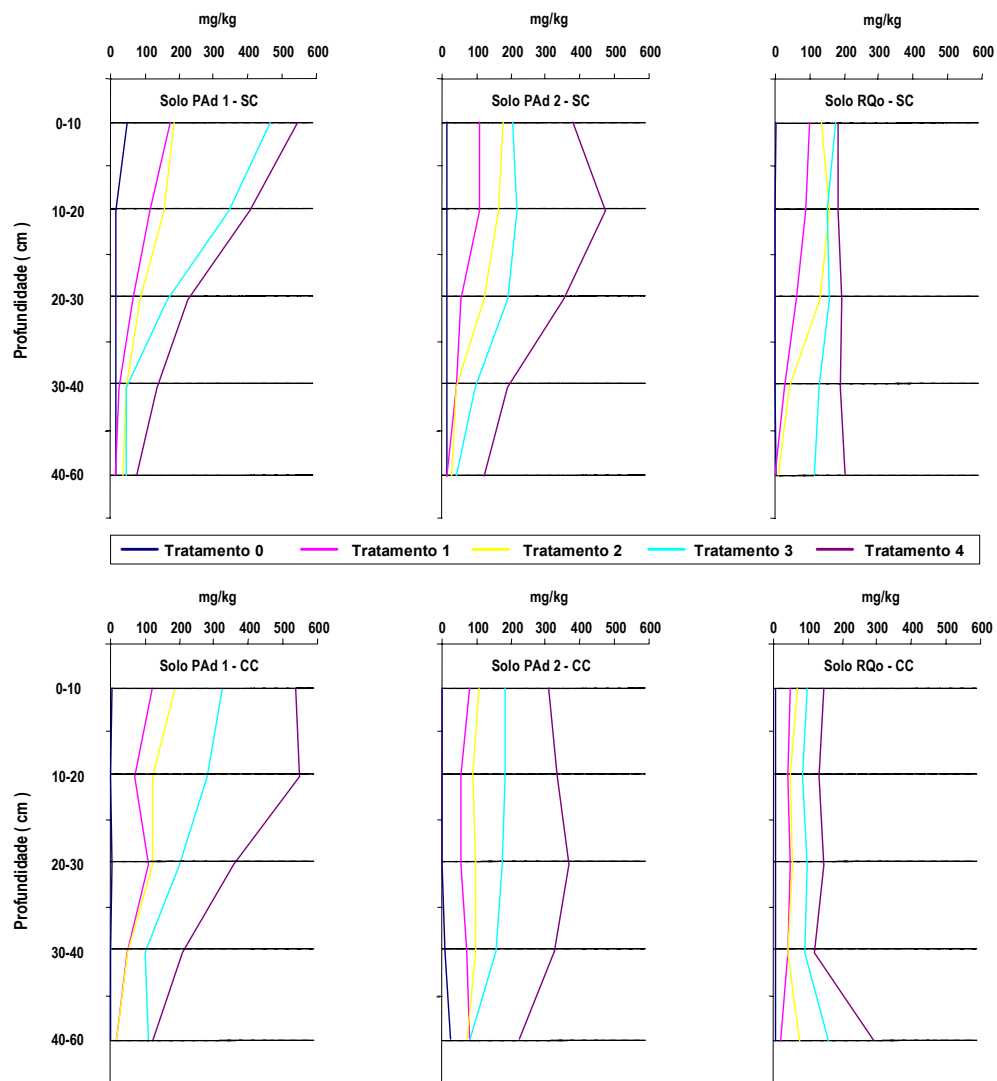


Figura 4 - Evolução dos teores de sódio em cinco profundidades dos solos em estudo, PAd1, PAd2 e RQo, avaliada 180 dias após o plantio de mudas de eucalipto e de aplicação do ETFC, sendo Trat.0, Trat.1, Trat.2, Trat.3 e Trat.4 correspondente às lâminas aplicadas de 0mm, 114,6mm, 286,5mm, 515,7mm e 1146mm, considerando-se duas condições na condução do experimento: sem simulação de chuva e com simulação de chuva (valores médios de três repetições).

No solo RQ₀ as concentrações de sódio no solo foram mantidas em níveis mais baixos que os encontrados nos solos PAd1 e PAd2, para todas as taxas de aplicação de ETFC, não variando ao longo do perfil do solo para os tratamentos com lâminas maiores (515,7 e 1146 mm). No experimento com a simulação de chuva, verificou-se tendência de lixiviação desse cátion, uma vez que houve aumento de sua concentração nas camadas mais profundas (Figura 4). Os maiores valores médios de CE e de concentração de sódio no perfil do solo RQ₀ foram 2,6 dS.m⁻¹ e 208 mg kg⁻¹ de Na, respectivamente, sendo a concentração média de sódio no perfil reduzida a cerca de 88 mg kg⁻¹ com a simulação de chuva. A fácil drenagem do solo RQ₀ possibilitou que efeitos severos de salinização e de redução na permeabilidade pudessem ser evitados, em decorrência da aplicação do efluente, tal como relatado em outros trabalhos com solos de textura arenosa (Cromer et al., 1984; Johnson & Ryder, 1988; Juwarkar & Subrahmanyam, 1986). Embora o sódio não seja elemento essencial às plantas, ele pode substituir algumas funções bioquímicas do potássio no metabolismo vegetal (Marschner, 1995). O sódio substitui o potássio, quando este estiver deficiente, nas propriedades osmóticas, e tem função no processo de controle hormonal e síntese de clorofila (Malavolta et al., 1997).

Quanto ao cloreto (Figura 5), observou-se um aumento na sua concentração no solo, para todas as taxas de ETFC aplicadas, quando comparados com a testemunha dos solos PAd1 e PAd2, reduzindo-se os valores ao longo do perfil dos solos. No solo RQ₀, a concentração de cloreto aumentou em relação à testemunha, porém as diferentes taxas de ETFC aplicadas não proporcionaram alterações significativas nas camadas superficiais (Quadro 13).

A ocorrência de chuvas simuladas proporcionou distribuição mais uniforme do Cl⁻ na camada superficial de 0-40 cm do perfil dos solos para todas as taxas de ETFC aplicadas, sendo que o solo PAd1 apresentou redução mais acentuada da concentração nas camadas superficiais.

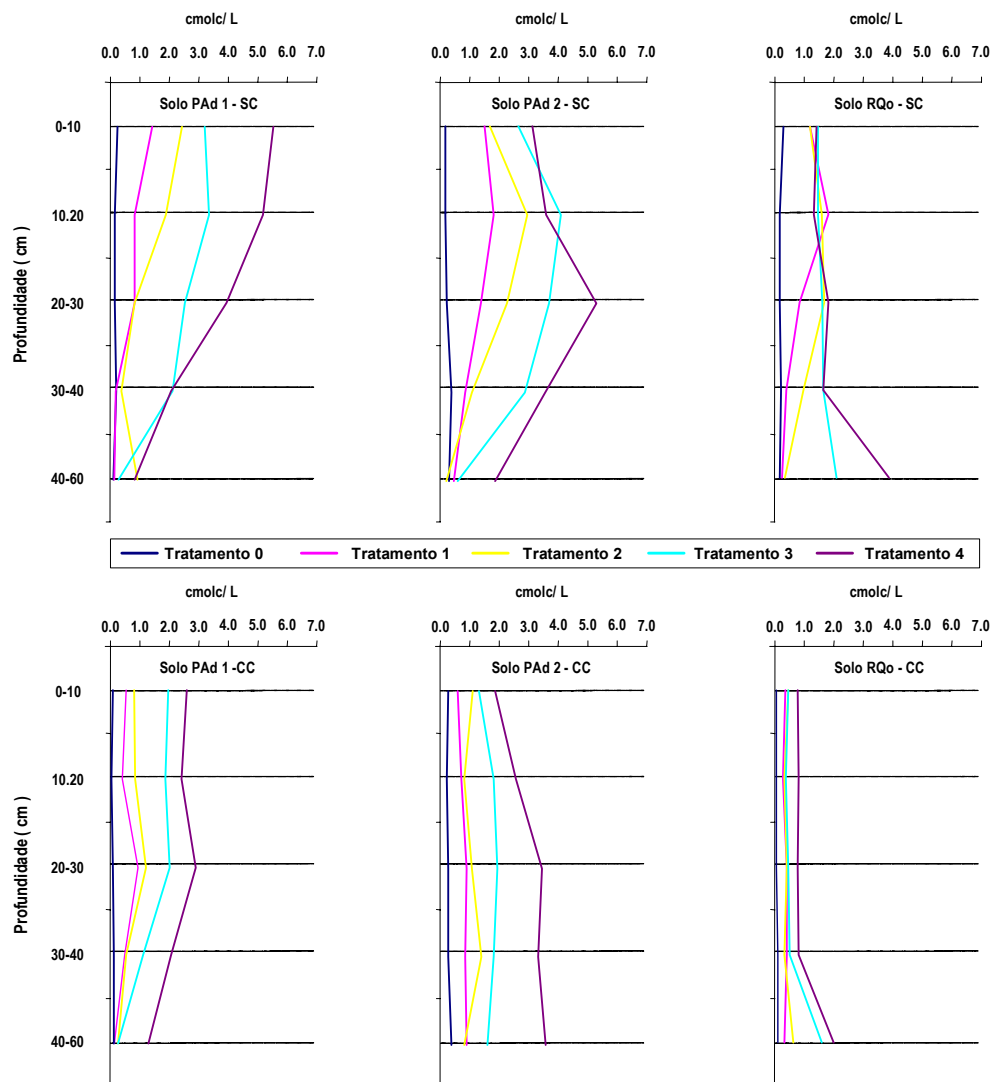


Figura 5 - Evolução dos teores de cloreto em cinco profundidades dos solos em estudo, PAd1, PAd2 e RQo, avaliada 180 dias após o plantio de mudas de eucalipto e de aplicação do ETFC, sendo Trat.0, Trat.1, Trat.2, Trat.3 e Trat.4 correspondente às lâminas aplicadas de 0mm, 114,6mm, 286,5mm, 515,7mm e 1146mm, considerando-se duas condições na condução do experimento: sem simulação de chuva e com simulação de chuva (valores médios de três repetições).

Embora o ETFC apresente altas concentrações de sódio (480 a 987 mg.L⁻¹) e, relativamente baixas de cálcio (28 a 102 mg.L⁻¹) e magnésio (4 a 11 mg.L⁻¹) o que lhe confere alta razão de adsorção de sódio (RAS), as elevadas condutividades elétricas minimizaram, de certa forma, os efeitos dispersivos de argila proporcionados pela aplicação desse efluente. A aplicação de ETFC não provocou alteração significativa na percentagem de argila dispersa dos solos PAd2 e RQo das colunas nas diferentes taxas de aplicação do ETFC e nem em decorrência dos solos receberem ou não chuvas simuladas. O solo de textura arenosa, RQo, em razão do pequeno conteúdo de argila que detém, foi o solo que apresentou menores valores de argila dispersa para qualquer taxa de aplicação de sódio. Variações na porcentagem de argila dispersa foram observadas no solo de textura média/argilosa, PAd1, nas camadas sub-superficiais (20- 30 cm) (Figura 6 e Quadro 11).

Quanto à alteração na concentração de metais pesados no perfil dos solos (Quadro 17), foram analisadas apenas os resultados encontrados em amostras de solo das testemunhas e naquelas das colunas que receberam lâmina de 1146 mm de ETFC, uma vez que as concentrações destes elementos no efluente aplicado foram insignificantes.

Constatou-se que Cd, Cr, Pb e Ni não chegaram a atingir a última camada nas colunas de solo que receberam a mais elevada taxa de aplicação, o que impossibilitou sua presença em solução na água percolada. A alteração nas concentrações de Cu, Cr, Pb e Ni nos solos submetidos às diferentes taxas de aplicação foi insignificante, tendo sido obtidas baixas concentrações, compreendidas na faixa de não detectável a 2 µg.dm⁻³. O chumbo apresentou valores pouco diferenciados entre os tratamentos analisados (testemunha e lâmina de 1146 mm), com concentrações variando entre 1 e 6,7 µg.dm⁻³. Apesar de se observarem algumas diferenças nas concentrações de metais pesados, pode-se creditar mais à variabilidade natural nas amostras ou à imprecisão nas análises do que propriamente a efeitos dos tratamentos.

De acordo com os dados apresentados no Quadro 17 e as cargas máximas de aplicação de metais pesados sugeridas pela Comunidade Econômica Européia, citado por Loehr (1984), Simon e Tedesco (1993) e adotados no Estado do Paraná (SANEPAR, 1997) para aplicação no solo, a

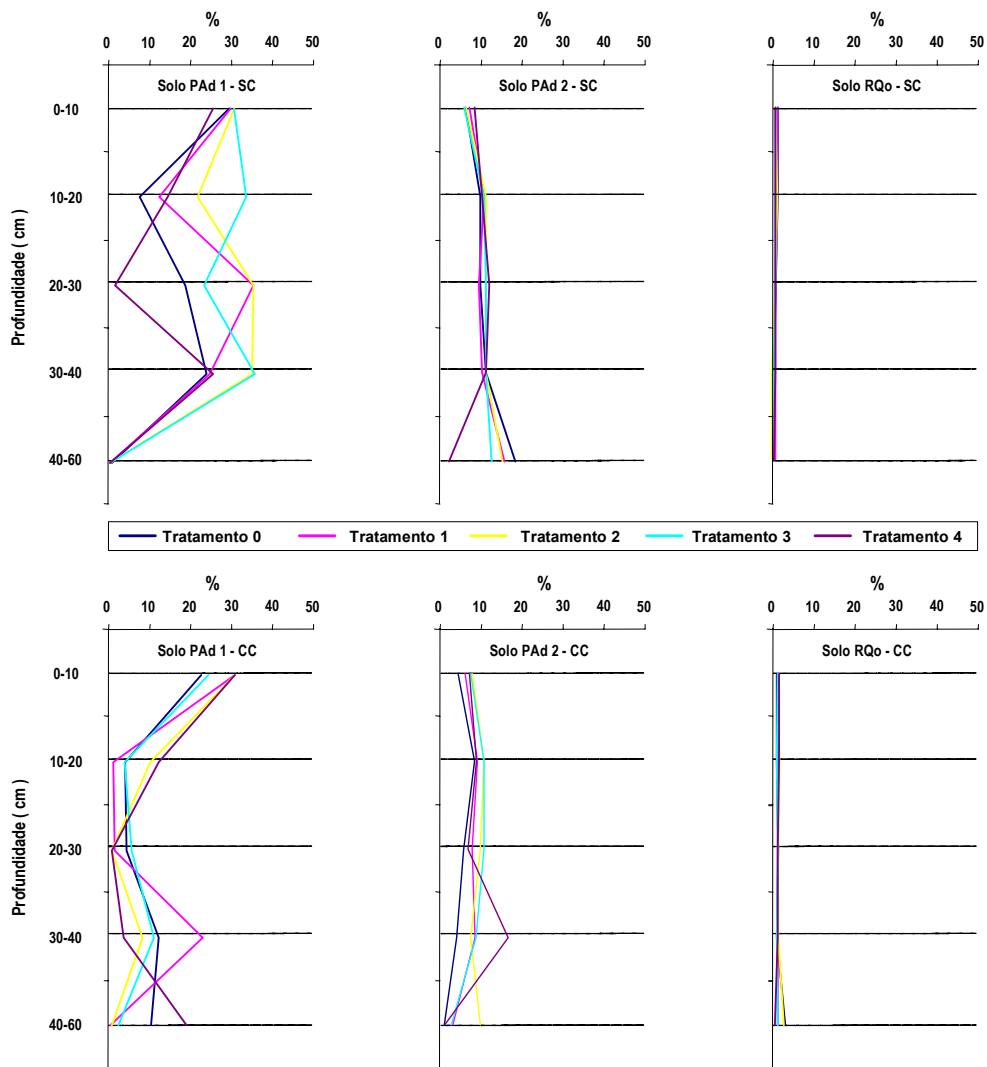


Figura 6 - Evolução dos teores de argila em cinco profundidades dos solos em estudo, PAd1, PAd2 e RQo, avaliada 180 dias após o plantio de mudas de eucalipto e de aplicação do ETFC, sendo Trat.0, Trat.1, Trat.2, Trat.3 e Trat.4 correspondente às lâminas aplicadas de 0mm, 114,6mm, 286,5mm, 515,7mm e 1146mm, considerando-se duas condições na condução do experimento: sem simulação de chuva e com simulação de chuva (valores médios de três repetições).

Quadro 17 - Concentração de metais pesados nos solos submetidos a diferentes taxas de aplicação do ETFC considerando-se duas condições climáticas na condução do experimento: sem simulação de chuva e com simulação de chuva (valores médios de três repetições).

Solo	Tratamento	Profundidade mm	Sem simulação de chuva				Com simulação de chuva			
			Cr	Cd	Ni	Pb	Cr	Cd	Ni	Pb
$\mu\text{g. dm}^{-3}$										
PAd2	testemunha	0 - 10	0	0.1	0	4.03	0	0	2	5.1
		10 - 20	0	0	0.12	5.24	0	0.09	0	5.93
		20 - 30	0	0	0	5.15	0	0.07	0	5.73
		30 - 40	0	0.1	0.01	6.69	0.08	0	0	3.65
		40 - 55	0	0.04	0	4.48	0.09	0	1.38	3.88
	1146 mm	0 - 10	0.03	0	0	3.47	0	0	0	4.42
		10 - 20	0	0	0.28	2.43	0	0	0.25	5.28
		20 - 30	0.33	0.09	0.63	3.97	0	0	0	3.77
		30 - 40	0	0	0.09	1.03	0	0.09	0	4.44
		40 - 55	0.1	0	0	6.2	0	0	0	6.86
PAd1	testemunha	0 - 10	0	0.04	0	2.42	0	0	0.61	5.18
		10 - 20	0	0.04	0	4.62	0	0.02	0	4.45
		20 - 30	0.23	0.04	0	3.09	0	0	0	5.03
		30 - 40	0.12	0.02	0.21	2.06	0	0.05	1.02	2.71
		40 - 55	0	0.04	0	3.12	0.05	0.05	0.33	4.43
	1146 mm	0 - 10	0.41	0.05	0	3.04	0.02	0.06	0	5.35
		10 - 20	0	0.02	0	3.19	0.12	0.08	0.37	7.47
		20 - 30	0.23	0.1	0	4.53	0	0	0.33	5.71
		30 - 40	0.28	0.08	0	4.07	0	0.03	0	7.15
		40 - 55	0.15	0.15	0	5.15	0	0.04	1.71	4.97
RQo	testemunha	0 - 10	0	0	0	3.83	0	0.01	0	2.87
		10 - 20	0	0.07	0.26	5.26	0	0.02	0.71	4.34
		20 - 30	0	0	0	3.59	0	0	0	3.98
		30 - 40	0	0	0	3.45	0	0.06	0.72	5.89
		40 - 55	0	0	0	2.96	0.17	0.02	0	5.94
	1146 mm	0 - 10	0.92	0.03	0.57	3.47	0.02	0	0	4.35
		10 - 20	0.2	0.08	0	5.95	0	0.07	0.66	2.92
		20 - 30	0.28	0.04	0.81	3.08	0	0	0	5.47
		30 - 40	0	0.08	0.35	1.24	0	0.17	0	3.45
		40 - 55	0.1	0.11	0	2.63	0	0	0	5.13

mais alta taxa de aplicação de ETFC não proporcionou a incorporação de quantidade de Cd, Cr, Ni e Pb superiores aos valores máximos propostos. Os limites máximos no solo de concentração de metais adotados pelo Estado do Paraná, adaptados da legislação espanhola, expressos em mg kg^{-1} , são: 1,0 ; 50; 100 e 30, para Cd, Pb, Cr e Ni, em solos de pH inferior a 7.

No que diz respeito à mobilidade, os metais analisados mostraram-se pouco móveis, mesmo com a aplicação de chuvas simuladas, refletindo sua grande afinidade com a fase sólida, mesmo em solos arenosos.

4.2.2.1 Efeitos da aplicação do ETFC na fertilidade do solo

A análise química dos solos antes do início do experimento na casa-de-vegetação (Figura 7) forneceu resultados que indicaram condição de baixa fertilidade dos solos estudados, principalmente pelas baixas concentrações de P e K disponíveis no meio.

A aplicação do ETFC não proporcionou significativa alteração na concentração de carbono orgânico nos solos estudados. Pequenos aumentos no conteúdo de carbono orgânico da camada mais superficial do solo, sem alteração em camadas mais profundas, são indicativos de se tratar de material orgânico de baixa mobilidade, talvez por ser o material constituído predominantemente de cadeias orgânicas longas.

Não houve efeito significativo, das taxas de aplicação de ETFC e nem da aplicação ou não de chuva simulada, na concentração de $\text{N}_{\text{Kjeldhal}}$ nas camadas dos solos. Um efeito maior na concentração de $\text{N}_{\text{Kjeldhal}}$ nos solos ocorreu com a adição do ETFC ao solo de textura média/argilosa (PAd1), tendo sido encontrados, para todos os tratamentos, valores da ordem de $1,0 \text{ dag.kg}^{-1}$ na camada superficial (0-10cm), inclusive no tratamento testemunha. Isto indica um incremento de $0,6 \text{ dag.kg}^{-1}$ em relação aos outros solos. A ocorrência de chuva simulada não foi capaz de alterar significativamente a concentração de $\text{N}_{\text{Kjeldhal}}$ nos solos estudados.

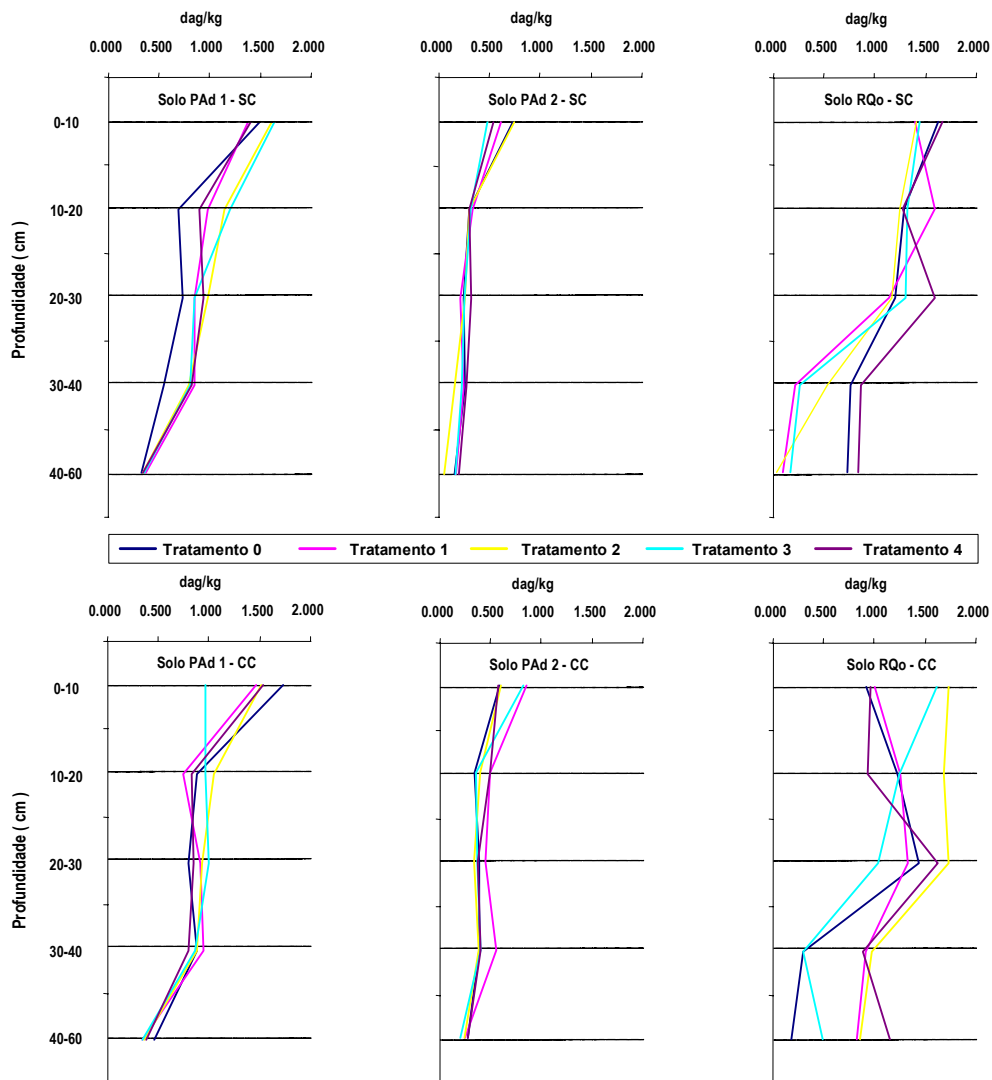


Figura 7 - Evolução dos teores de carbono em cinco profundidades dos solos em estudo, PAd1, PAd2 e RQo, avaliada 180 dias após o plantio de mudas de eucalipto e de aplicação do ETFC, sendo Trat.0, Trat.1, Trat.2, Trat.3 e Trat.4 correspondente às lâminas aplicadas de 0mm, 114,6mm, 286,5mm, 515,7mm e 1146mm, considerando-se duas condições na condução do experimento: sem simulação de chuva e com simulação de chuva (valores médios de três repetições).

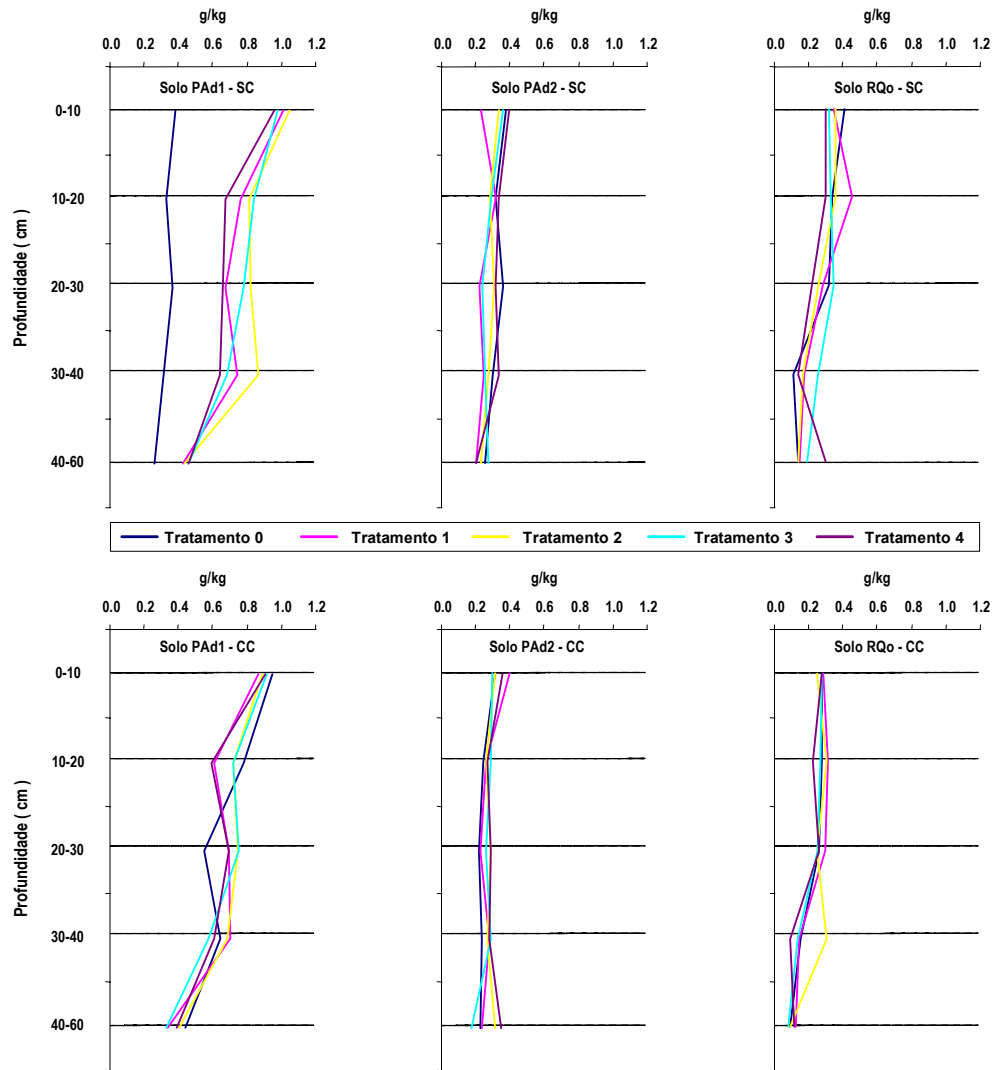


Figura 8 - Evolução do nitrogênio em cinco profundidades dos solos em estudo, PAd1, PAd2 e RQo, avaliada 180 dias após o plantio de mudas de eucalipto e de aplicação do ETFC, sendo Trat. 0, Trat. 1, Trat. 2, Trat. 3 e Trat. 4 correspondente às lâminas aplicadas de 0 mm, 114,6mm, 286,5mm, 515,7mm e 1146mm, considerando-se duas condições na condução do experimento: sem simulação de chuva e com simulação de chuva (valores médios de três repetições).

A aplicação do ETFC, mesmo apresentando concentrações de potássio relativamente baixas (de 13 a 57 mg L⁻¹), proporcionou aumentos significativos na concentração de potássio trocável no perfil dos solos analisados (Figura 9). Esse aumento de concentração foi verificado nos solos de textura média/argilosa, PAd1, e arenosa/média, PAd2, inclusive nas camadas superficiais de 0-30 cm não tendo sido observado efeito de lixiviação, mesmo com as chuvas simuladas. Quanto ao RQo, observa-se a movimentação de K ao longo do perfil até camadas mais profundas das colunas, tendo sido, inclusive, encontradas maiores concentrações na camada 40-60 cm em decorrência da mobilidade, relativamente alta, desse cátion no solo. Neste solo, para a taxa mais alta de aplicação, houve lixiviação de K.

Efeitos de maior magnitude para o experimento com chuva simulada foram observados no solo de textura arenosa (RQo), tendo sido verificada considerável remoção de potássio do perfil do solo das colunas que receberam a mais alta taxa de aplicação de ETFC. Com isto, acredita-se que a lixiviação natural, propiciada pelas chuvas, possa ser suficiente para a remoção desse cátion do perfil do solo.

Nos solos PAd1 e PAd2 com maior capacidade de troca de cátions, o potássio ficou adsorvido ao complexo de troca. A aplicação contínua e em altas taxas de ETFC nos solos de textura mais fina pode proporcionar mais rápida salinização destes solos do que os de textura média.

Em todos os tratamentos e solos, as concentrações de K trocável nas camadas superficiais suplantaram o nível crítico de 10mg dm⁻³, proposto por Novais et al. (1986), para mudas de eucalipto.

Não foram encontradas alterações significativas na concentração de P disponível ao longo do perfil em nenhum dos três solos estudados (Figura 10), em resposta a aplicação do ETFC, o que pode estar relacionado à baixa concentração de P no ETFC aplicado (1,052 mg.L⁻¹) e à rápida passagem do P aplicado da forma lábil para não lábil. As lâminas aplicadas de ETFC forneceram valores de P inferiores aos níveis críticos propostos por Novais et al., 1986, para solos de plantio de eucalipto de até 1 ano, tanto para solos arenosos (80 mg.dm⁻³) quanto para solos argilosos (60 mg.dm⁻³).

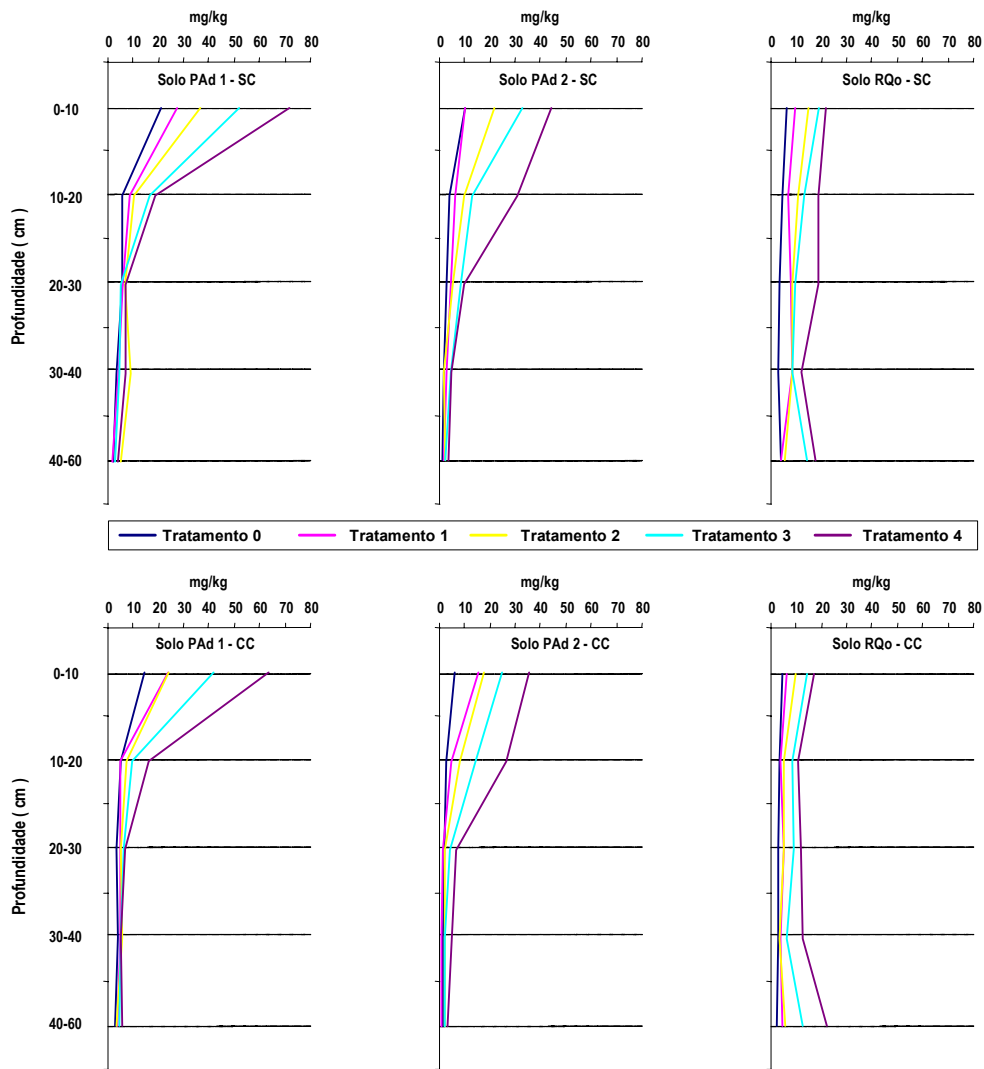


Figura 9 - Evolução do teor de potássio em cinco profundidades dos solos em estudo, PAd1, PAd2 e RQo, avaliada 180 dias após o plantio de mudas de eucalipto e de aplicação do ETFC, sendo Trat.0, Trat.1, Trat.2, Trat.3 e Trat.4 correspondente às lâminas aplicadas de 0mm, 114,6mm, 286,5mm, 515,7mm e 1146mm, considerando-se duas condições na condução do experimento: sem simulação de chuva e com simulação de chuva (valores médios de três repetições).

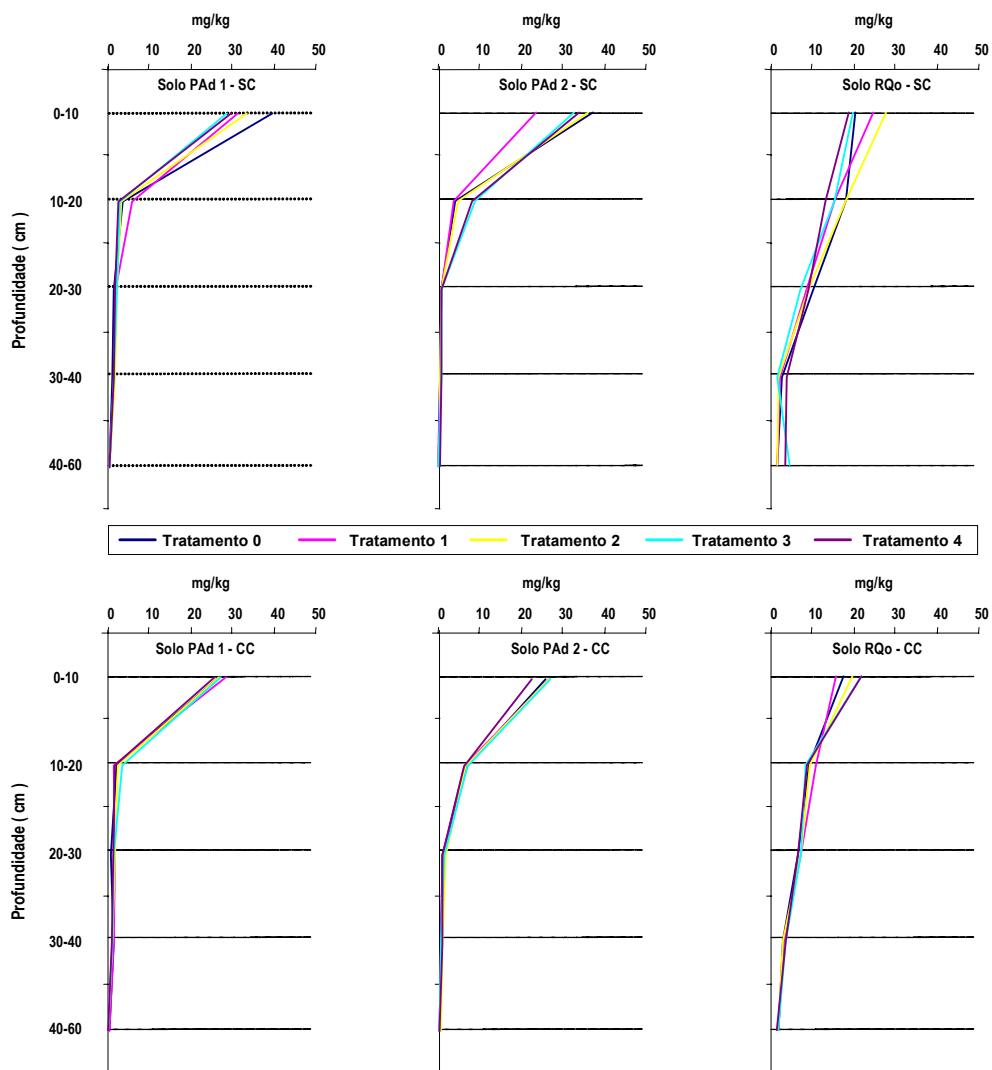


Figura 10 - Evolução do teor de fósforo em cinco profundidades dos solos em estudo, PAd1, PAd2 e RQo, avaliada 180 dias após o plantio de mudas de eucalipto e de aplicação do ETFC, sendo Trat 0 , Trat.1, Trat.2, Trat.3 e Trat.4 correspondente às lâminas aplicadas de 0mm, 114,6mm, 286,5mm, 515,7mm e 1146mm, considerando-se duas condições na condução do experimento: sem simulação de chuva e com simulação de chuva (valores médios de três repetições).

A simulação de chuva, nas colunas, provocou alterações observáveis na concentração de P-disponível na camada superficial dos solos de textura mais fina. Porém, no solo de textura mais grosseira pôde-se verificar tendência de redução do P-disponível do solo, talvez pela formação de complexos orgânicos, que são os de maior mobilidade no perfil de solo.

A aplicação do ETFC proporcionou aumentos significativos na concentração de enxofre nos solos de textura média e fina (Figura 11). No solo de textura média/argilosa (PAd1), aumentos na sua concentração de enxofre disponível foram verificados apenas até a profundidade de 20-30 cm. O solo de textura arenosa, RQo, reteve menor quantidade de enxofre que o solo PAd1, embora neste o enxofre tenha-se concentrado na camada superficial. A retenção de sulfato em sítios de carga positiva, presentes no material argiloso de solos oxídicos, pode ser a principal razão para o ocorrido. A simulação de chuva foi muito efetiva na remoção de S disponível dos solos.

Com a aplicação do ETFC verificou-se pouca alteração nas concentrações de Ca trocável na superfície e sub-superfície dos solos em relação à testemunha, mesmo em taxas de aplicação mais altas (Figura 12). Isto se deve, provavelmente, às baixas concentrações de Ca presentes no ETFC (28 e 75 mg L⁻¹), e à baixa mobilidade desse cátion no solo. Os valores encontrados nas camadas superficiais (0 -20 cm) suplantaram o nível crítico de 0,20 cmol_c.dm⁻³ de Ca no solo, proposto por Novais et al. (1986) para mudas de eucalipto.

Efeito significativo na concentração de Ca, decorrente das taxas de ETFC aplicadas no solo, foi verificado até 30 cm no solo PAd2 e apenas na camada de 0-10 cm no solo RQo (Quadros 12 e 13). No solo PAd1, os mesmos efeitos foram observados apenas na camada de 20-30 cm (Quadro 11). Houve perceptível remoção de Ca trocável com a simulação de chuvas nas colunas de solo de diferentes texturas, porém efeito significativo foi observado apenas na camada de 0-10 cm (Quadros 14 a 16).

No solo PAd1, não foram observados efeitos significativos de alteração na concentração de Mg nem com a taxa de aplicação e nem com a ocorrência de chuvas simuladas (Quadro 11 e Figura 13). No solo PAd2, variação significativa com as taxas de aplicação foi observada ao longo do perfil do solo,

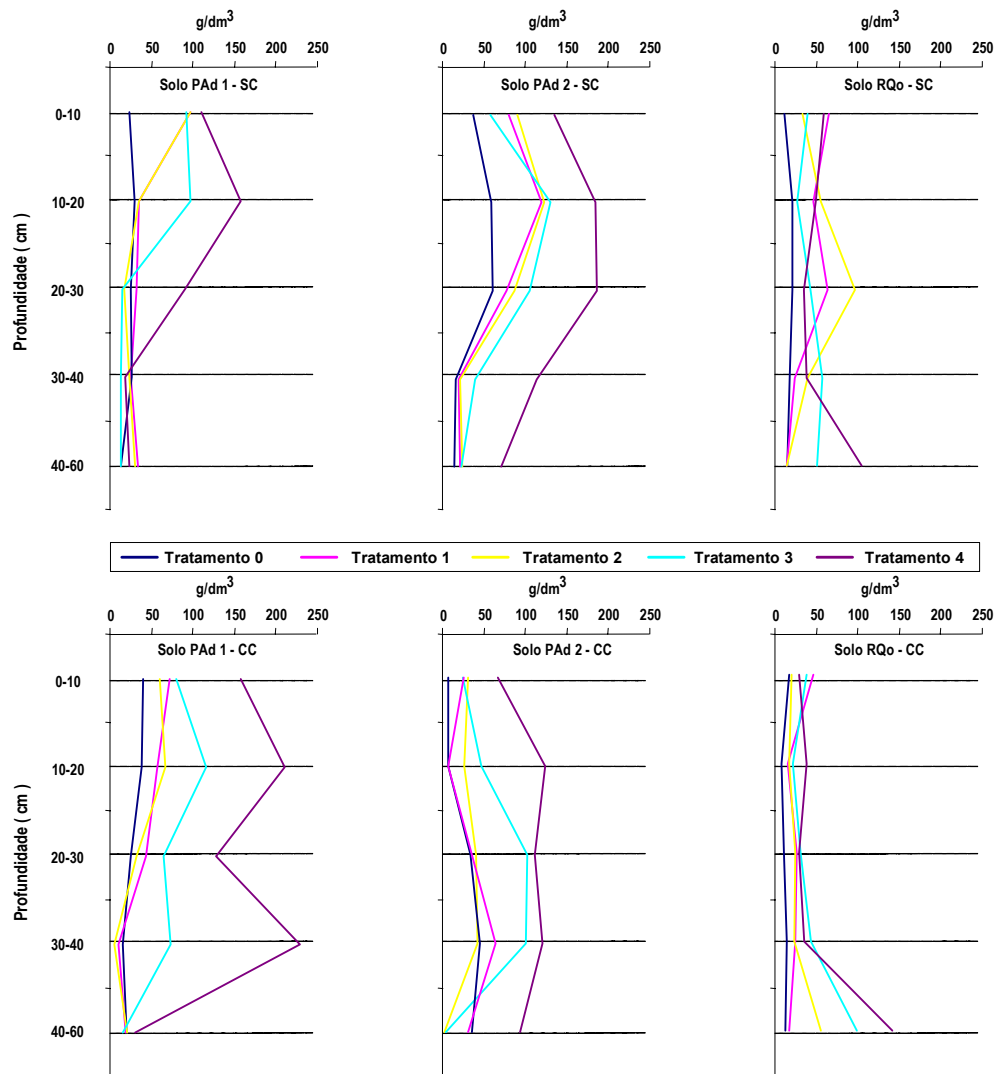


Figura 11 - Evolução do teor de enxofre em cinco profundidades dos solos em estudo, PAd1, PAd2 e RQo, avaliada 180 dias após o plantio de mudas de eucalipto e de aplicação do ETFC, sendo Trat.0, Trat.1, Trat.2, Trat.3 e Trat.4 correspondente às lâminas aplicadas de 0mm, 114,6mm, 286,5mm, 515,7mm e 1146mm, considerando-se duas condições na condução do experimento: sem simulação de chuva e com simulação de chuva (valores médios de três repetições).

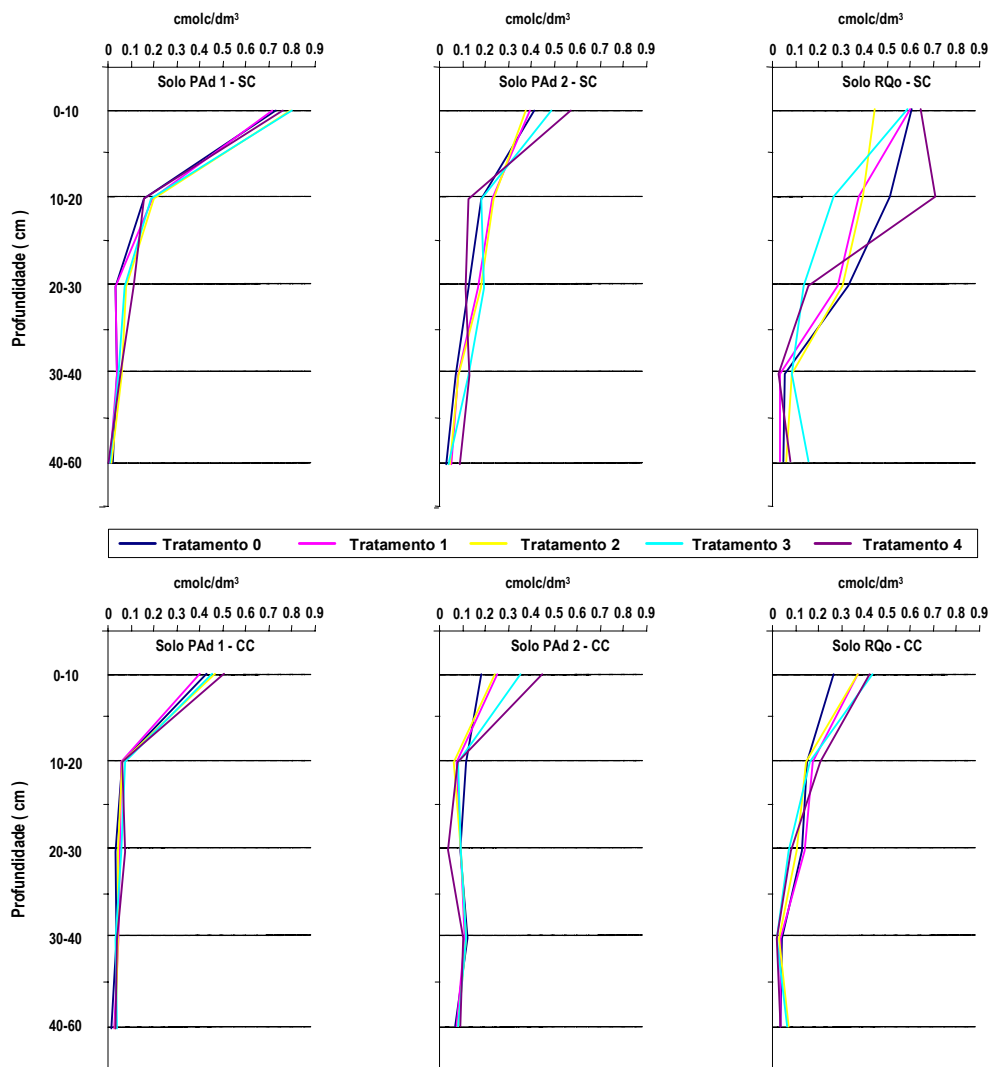


Figura 12 - Evolução do teor de cálcio em cinco profundidades dos solos em estudo, PAd1, PAd2 e RQo, avaliada 180 dias após o plantio de mudas de eucalipto e de aplicação do ETFC, sendo Trat.0, Trat.1, Trat.2, Trat.3 e Trat.4 correspondente às lâminas aplicadas de 0mm, 114,6mm, 286,5mm, 515,7mm e 1146mm, considerando-se duas condições na condução do experimento: sem simulação de chuva e com simulação de chuva (valores médios de três repetições).

enquanto que, no solo RQo esta variação ocorreu apenas na camada superficial de 0-10 cm. As baixas concentrações de magnésio presentes no ETCP (4,0 e 11,0 mg L⁻¹) são as principais razões para o observado. Observa-se na Figura 13, para o solo PAd2, a tendência, natural e com a simulação de chuva, de lixiviação de Mg presente no solo. Porém, esta lixiviação do magnésio pode estar associada à formação de pares iônicos com os sulfatos ou outros ânions, o que faz aumentar a mobilidade desse íon, ou à maior competição catiônica pelos sítios de troca.

Os valores encontrados de Mg nas camadas superficiais dos solos PAd2 e RQo foram inferiores ao nível crítico de 0,05 cmol_c.dm⁻³ para plantio de mudas de eucalipto, conforme proposto por Novais et al. (1986), à exceção daqueles decorrentes da aplicação da taxa de ETFC mais alta (1146mm). O solo de textura média/argilosa (PAd1),apresentou concentração de magnésio, nas camadas superficiais, acima do referido nível crítico, para todas as taxas de aplicação do ETFC.

Os efeitos mais claros de alteração na concentração de boro, como resultado da aplicação de ETFC em relação à testemunha, foram observados no solo arenoso, embora as concentrações encontradas não tenham suplantado as obtidas nos solos de textura média e fina (Figura 14). Porém, pode-se verificar nos Quadros 11 a 13, que os efeitos das lâminas de aplicação sobre as concentrações de boro ao longo do perfil dos solos não foram, em sua maioria, significativos, e quando o foram, baixa percentagem da variação (baixo R²) foi explicada pela equação de regressão correspondente.

Com a ocorrência de chuva simulada notou-se haver redução da concentração de boro na camada superficial do solo de textura arenosa, não ocorrendo acúmulo nas camadas mais profundas. Provavelmente, o boro tenha sido removido junto ao efluente das colunas. Isto demonstra que este micronutriente não deverá ficar acumulado, nas condições naturais de campo, em solos arenosos.

As faixas de concentração de boro consideradas adequadas para crescimento de *Eucalyptus*, sob condições de ausência ou baixo estresse hídrico, variam de médias (0,21 – 0,60 mg dm⁻³) a altas (>0,60 mg dm⁻³) (Raij et al., 1996). Os valores encontrados para os solos em estudo estão bem acima

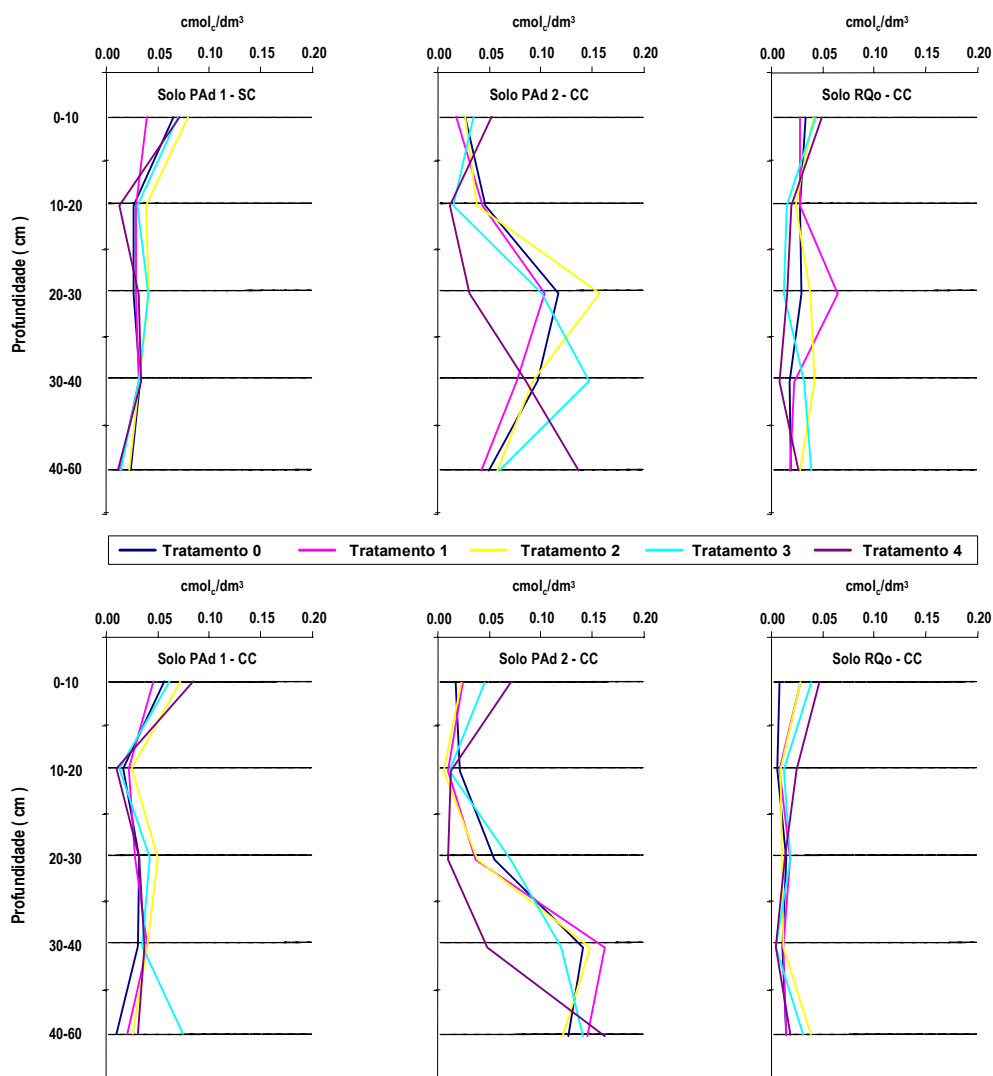


Figura 13 - Evolução do teor de magnésio em cinco profundidades dos solos em estudo, PAd1, PAd2 e RQo, avaliada 180 dias após o plantio de mudas de eucalipto e de aplicação do ETFC, sendo Trat.0, Trat.1, Trat.2, Trat.3 e Trat.4 correspondente às lâminas aplicadas de 0mm, 114,6mm, 286,5mm, 515,7mm e 1146mm, considerando-se duas condições na condução do experimento: sem simulação de chuva e com simulação de chuva (valores médios de três repetições).

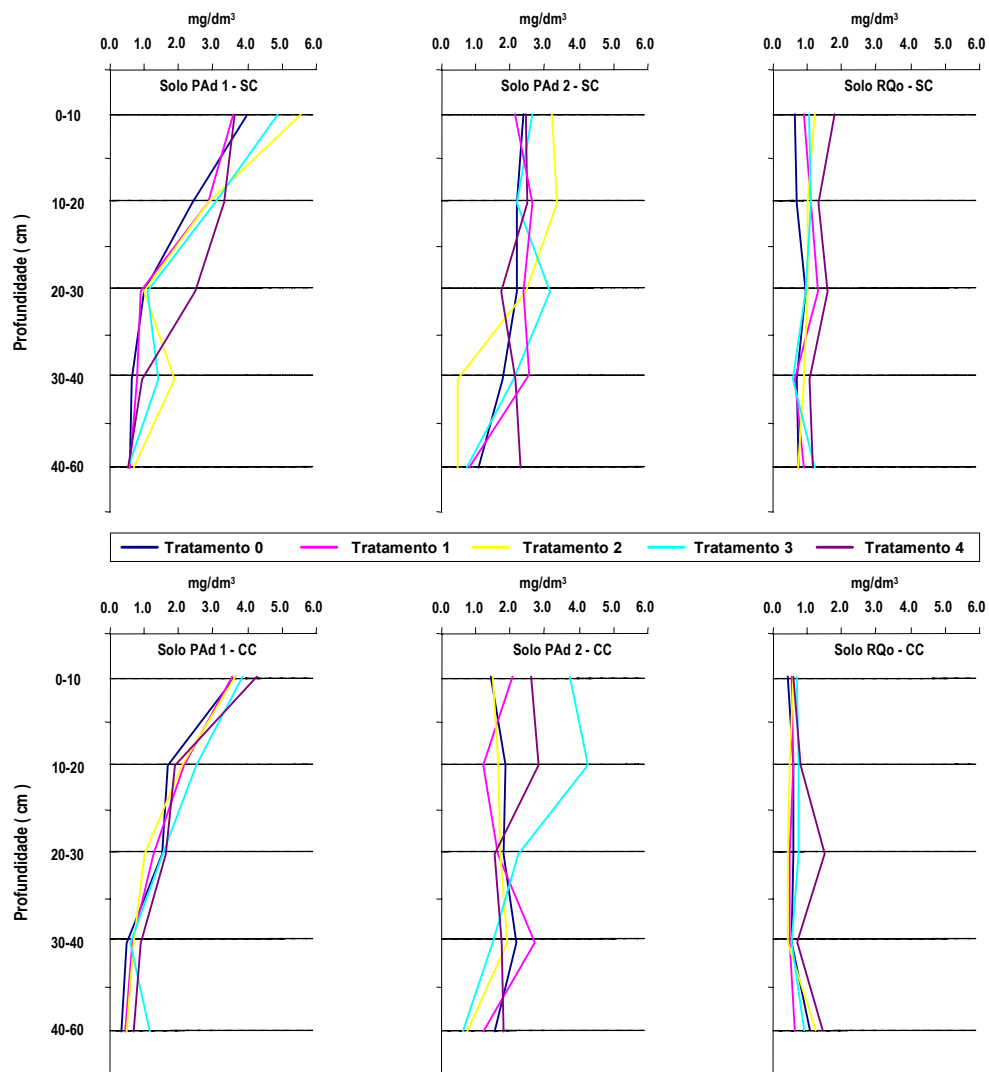


Figura 14 - Evolução do teor de boro em cinco profundidades dos solos em estudo, PAd1, PAd2 e RQo, avaliada 180 dias após o plantio de mudas de eucalipto e de aplicação do ETFC, sendo Trat 0 , Trat.1, Trat.2, Trat.3 e Trat.4 correspondente às lâminas aplicadas de 0mm, 114,6mm, 286,5mm, 515,7mm e 1146mm, considerando-se duas condições na condução do experimento: sem simulação de chuva e com simulação de chuva (valores médios de três repetições).

dos valores considerados altos, à exceção do solo RQo, quando submetido às chuvas simuladas.

O solo de textura/ argilosa (PAd1) apresentou, naturalmente, maior concentração de alumínio no perfil (Quadro 7), razão pela qual apresentou maiores valores após a aplicação do ETFC (Figura 15). Entretanto, verificou-se que houve tendência de redução no Al trocável em relação à testemunha, o que se deve, principalmente, à elevação do pH do solo proporcionado pela aplicação do ETFC. A incorporação de matéria orgânica com o ETFC pode, também, ter provocado complexação do alumínio trocável. A ocorrência de chuvas simuladas não proporcionou efeito aparente de remoção de alumínio trocável do solo.

Quanto aos micronutrientes: Fe, Zn, e Cu (Figuras 16 a 18), não houve alterações em suas concentrações, podendo-se afirmar que as diferentes taxas de aplicação do ETFC não influenciaram no incremento destes nutrientes no solo, após seis meses de experimentação. As concentrações de cobre na camada superficial (0-10 cm) apresentaram tendência de aumentar com o incremento das taxas.

Pode-se notar que as concentrações de ferro no solo diminuíram com a aplicação de chuvas simuladas, o que pode ser atribuído, à lixiviação do mesmo ao longo das colunas. Os valores das concentrações de Zn e Cu foram, em sua maioria, muito baixos ou não detectáveis (Quadro 1A a 6A, Apêndice 1), com exceção dos valores encontrados para o Zn no solo RQo. Ainda assim, não se verificou nenhuma tendência de variação definida pela taxa de ETFC aplicada.

As concentrações médias de Zn e Cu no solo, para todas as taxas de aplicação do ETFC foram bem menores que as consideradas adequadas para o crescimento de *Eucalyptus*.

As concentrações de Mn no solo PAd2 foram inferiores aos valores considerados adequados para plantio de *Eucalyptus*, enquanto, no solo PAd1, as concentrações atingiram estes valores na camada superficial (0-10 cm) e no solo RQo suplantaram os valores médios apresentando valores classificados como altos ($>5,0 \text{ mg.dm}^{-3}$). As concentrações de Fe, para todos os solos estudados e taxas de aplicação de ETFC, foram bem superiores às

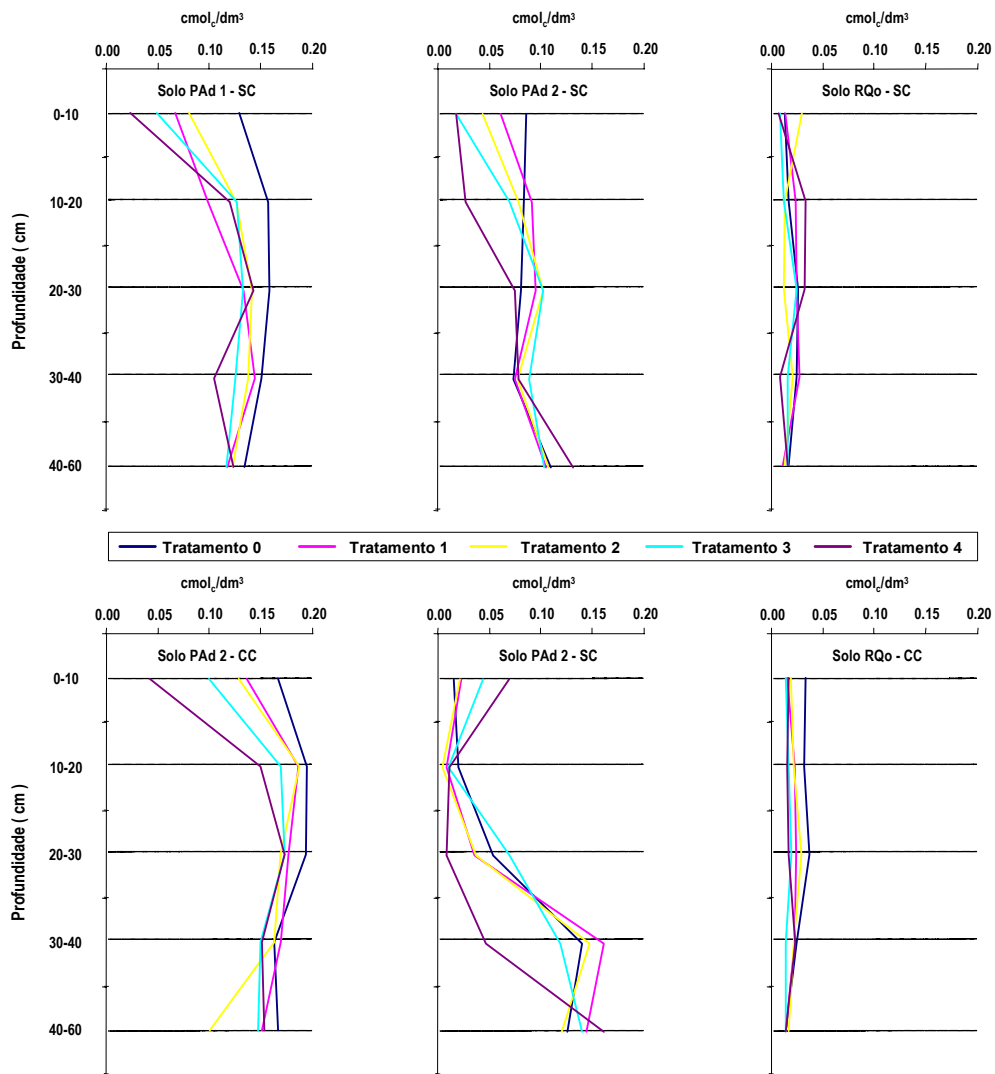


Figura 15 - Evolução do teor de alumínio em cinco profundidades dos solos em estudo, PAd1, PAd2 e RQo, avaliada 180 dias após o plantio de mudas de eucalipto e de aplicação do ETFC, sendo Trat 0 , Trat.1, Trat.2, Trat.3 e Trat.4 correspondente às lâminas aplicadas de 0mm, 114,6mm, 286,5mm, 515,7mm e 1146mm, considerando-se duas condições na condução do experimento: sem simulação de chuva e com simulação de chuva (valores médios de três repetições).

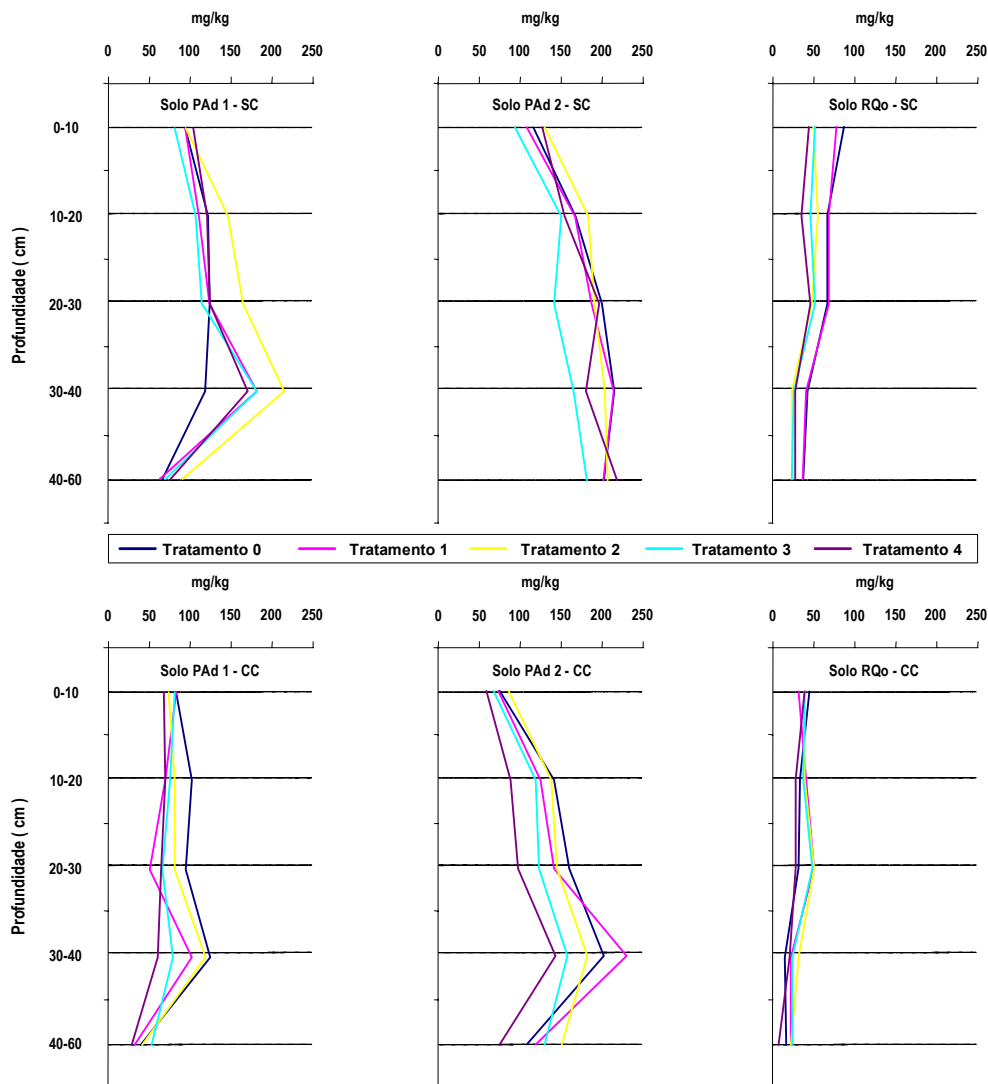


Figura 16 - Evolução do teor de ferro em cinco profundidades dos solos em estudo, PAd1, PAd2 e RQo, avaliada 180 dias após o plantio de mudas de eucalipto e de aplicação do ETFC, sendo Trat.0, Trat.1, Trat.2, Trat.3 e Trat.4 correspondente às lâminas aplicadas de 0mm, 114,6mm, 286,5mm, 515,7mm e 1146mm, considerando-se duas condições na condução do experimento: sem simulação de chuva e com simulação de chuva (valores médios de três repetições).

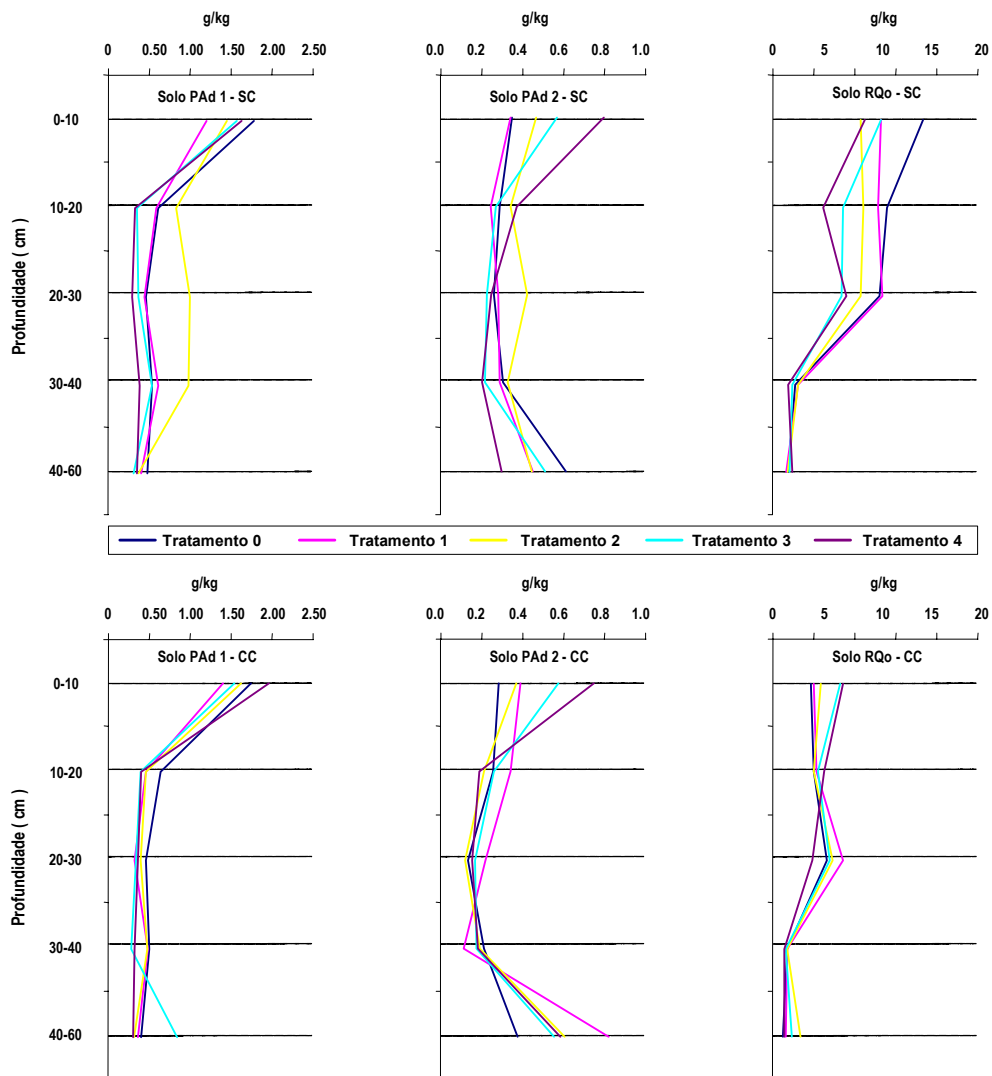


Figura 17 - Evolução do teor de manganês em cinco profundidades dos solos em estudo, PAd1, PAd2 e RQo, avaliada 180 dias após o plantio de mudas de eucalipto e de aplicação do ETFC, sendo Trat 0, Trat.1, Trat.2, Trat.3 e Trat.4 correspondente às lâminas aplicadas de 0mm, 114,6mm, 286,5mm, 515,7mm e 1146mm, considerando-se duas condições na condução do experimento: sem simulação de chuva e com simulação de chuva (valores médios de três repetições).

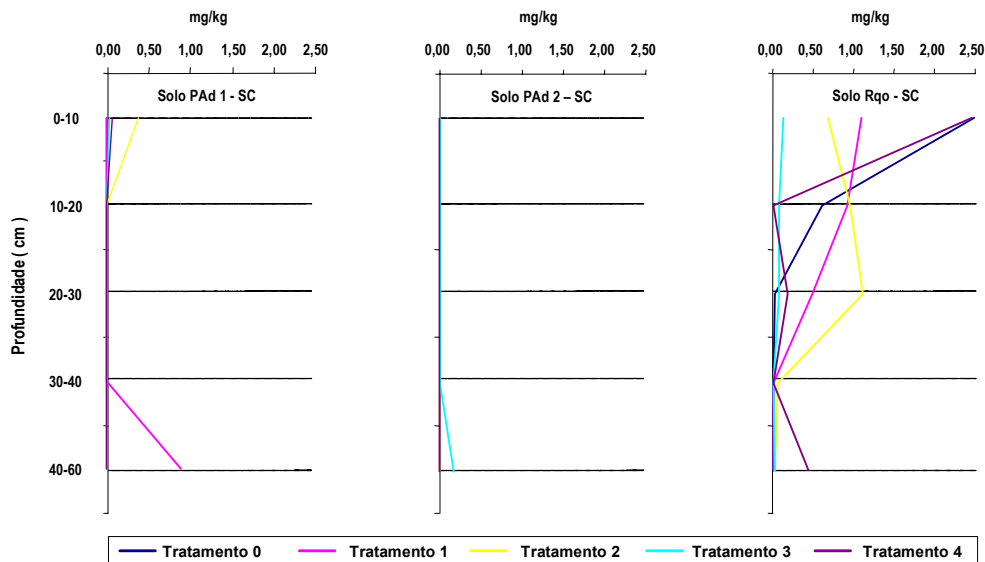


Figura 18 - Evolução do teor de alumínio em cinco profundidades dos solos em estudo, PAd1, PAd2 e RQo, avaliada 180 dias após o plantio de mudas de eucalipto e de aplicação do ETFC, sendo Trat.0, Trat.1, Trat.2, Trat.3 e Trat.4 correspondente às lâminas aplicadas de 0mm, 114,6mm, 286,5mm, 515,7mm e 1146mm, considerando-se na condução do experimento a condição sem simulação de chuva (valores médios de três repetições).

4.3. Lixiviação de sais e possíveis riscos de contaminação de águas subterrâneas com a fertirrigação com ETFC

A simulação da precipitação pluviométrica foi empregada, neste experimento, com o intuito de avaliar a capacidade de chuvas naturais em lixiviar os sais retidos no solo em decorrência da aplicação do ETFC. Analisando-se a qualidade das amostras do líquido percolado, coletadas nos drenos das colunas de solo, avaliou-se o risco que a prática da fertirrigação com ETFC pode trazer em termos de contaminação de águas subterrâneas.

A profundidade atingida pelo EPTC nos solos PAd1 e PAd2 foi verificada avaliando-se os dados de concentração de sódio e cloretos, e de condutividade elétrica no solo, utilizando estes elementos, de certa forma, como traçadores. Nos solos PAd1 e PAd2, após 180 dias de aplicação do ETFC, as alterações em relação à testemunha foram verificadas até a profundidade de 40 cm, à

exceção das colunas que receberam a maior taxa de aplicação, nas quais as alterações atingiram a profundidade de 50 cm.

Nas colunas que receberam chuva simulada houve geração de percolado apenas nas colunas preenchidas com o solo arenoso (RQo), para todas as taxas de aplicação do ETFC. Nestas colunas, a aplicação da chuva simulada, do ETFC e das lâminas de água para compensação das perdas por evapotranspiração, suplantou a umidade do solo na capacidade de campo (θ_{cc}), produzindo, desta forma, percolado. A produção de percolado apenas no solo arenoso está associada à sua menor capacidade de armazenamento de água (Quadro 8). A aplicação da chuva simulada elevou mais rapidamente o teor de água no solo até sua capacidade de campo e a água adicionada a partir daí constituiu o percolado da coluna de solo. Infere-se, com base nas quantidades aplicadas de chuva e ETFC e na capacidade de armazenamento do solo, que a chuva simulada tenha sido o fator preponderante na lixiviação de sais contidos no solo.

O potencial de contaminação de águas subterrâneas depende, dentre outros fatores, da profundidade do lençol freático e das características físico-hídricas do meio poroso. O poluente, ao ser incorporado às águas subterrâneas de aquíferos de natureza granular, se dispersa e se difunde, de modo generalizado, juntamente com as águas, podendo se estender por longas distâncias, abrangendo extensas áreas. No caso das quantidades incorporadas serem baixas, a diluição dos poluentes nas águas subterrâneas poderá resultar em concentrações permissíveis, de baixa toxicidade para homens e animais. Dependendo da natureza física e química do poluente, alguns podem ser adsorvidos pelo material sólido do aquífero, ficando adsorvido às argilas (Matos, 2001).

Ainda que a profundidade de solo monitorada (55 cm) seja relativamente pequena, os resultados encontrados podem ser utilizados para análise da vulnerabilidade das águas subterrâneas, no caso da aplicação de diferentes taxas de ETFC no solo arenoso (RQo). O grande potencial de lixiviação nesse solo, maximizado pela baixa interação da fração areia com íons presentes na água do solo, indica que o parcelamento da fertirrigação seja recomendável no caso da necessidade de aplicação de taxas mais elevadas de ETFC.

As características do percolado das colunas (Quadro 18) de solo RQo, indicam que as amostras coletadas nas colunas que receberam chuvas simuladas apresentaram valores mais baixos de alguns parâmetros como DBO e Ca. Por outro lado, houve tendência de aumento da concentração de outros elementos no percolado, com sódio, cloreto e potássio.

Comparando-se os valores de concentração obtidos no percolado com aqueles estabelecidos pela Resolução do CONAMA n°20, de 18/06/86 (CONAMA, 1986), para corpo d'águas Classe 1, com os padrões de potabilidade estabelecidos pela PORTARIA N° 1469, de 29/12/2000, do Ministério da Saúde (FUNASA, 2000), e com valores típicos encontrados em águas subterrâneas (Mathess & Harzey, 1982; Szikszay, 1993), verifica-se que os mesmos são semelhantes ou suplantam os valores referenciais.

Nas análises de cor do percolado, coletado em um período de 90 dias de experimentação, observou-se atenuação da concentração de cor para as mais baixas taxas de aplicação de ETFC (114,6 mm e 286,5 mm). Porém, na aplicação da taxa de 1146 mm, a cor do percolado chegou a superar a cor do ETFC aplicado (1369 mg L^{-1}). Estas concentrações elevadas de cor, tendendo do amarelo ao marrom, podem indicar lixiviação de material orgânico, especificamente de ácidos húmicos, uma vez que os valores de carbono orgânico no percolado também se elevaram. Isto pode ser tomado, também, como um complicador para a utilização de solos arenosos como receptores de ETFC, em vista da demonstrada baixa capacidade depurativa desse solo quando da aplicação de altas taxas de ETFC. Nessas condições, existe a possibilidade de depreciação da qualidade das águas do lençol freático por alteração da sua cor. Comumente as águas subterrâneas apresentam valores de coloração inferiores a 5 mg L^{-1} , mas de forma anômala, podem atingir até 30 mg L^{-1} (CONAMA, 1986). Com isto, pode-se inferir que, as lâminas aplicadas, exceto a lâmina de 114,6 mm, interferem na qualidade da água subterrânea no que se refere à cor. Geralmente, para ser potável, a água deve estar isenta de coloração perceptível a olho "nú".

O valor de pH do percolado proveniente de colunas de solo que receberam as mais baixas taxas de aplicação do ETFC permaneceu, ao longo do período de cultivo das mudas de eucalipto, em torno de 5,0. Nas maiores taxas de aplicação (515,7 e 1146 mm) observou-se tendência ao aumento dos

valores de pH ao longo do tempo, embora não tenha sido atingido o valor da solução afluyente (ETFC), ou seja, 7,49. O valor de pH no percolado insere-se na faixa normal de ser encontrada em águas subterrâneas, isto é, de 5,5 a 8,5.

De uma forma geral, pode-se observar que houve um aumento gradativo nos valores de condutividade elétrica e das concentrações de sódio no percolado ao longo do tempo de aplicação do ETFC, sendo que as maiores taxas de aplicação proporcionaram aumentos mais significativos nos valores destes parâmetros, quando comparados aos obtidos no percolado das colunas testemunhas.

O sódio constitui um dos metais alcalinos mais abundantes nas águas subterrâneas, sendo o principal responsável pelo aumento da salinidade das águas naturais. A concentração de sódio varia, em geral, entre 0,1 e 100 mg L⁻¹ nas águas subterrâneas. As aplicações de ETFC em taxas de 515 mm proporcionaram concentrações de sódio no percolado que chegaram a suplantar a concentração afluyente, que era de 743 mg L⁻¹. Credita-se o aumento da concentração no percolado, quando comparada à do ETFC, à lixiviação de parte de sais anteriormente retida no solo.

As altas concentrações de sódio no percolado dão indicativos de que o solo arenoso possui permeabilidade suficiente para permitir rápida lixiviação do sódio no perfil. Pode-se verificar, também, tendência das concentrações de sódio, no percolado das colunas que receberam a lâmina de aplicação de ETFC de 1146 mm, de se estabilizarem em um valor abaixo da concentração afluyente.

A diluição da solução do solo com a aplicação de chuvas simuladas proporcionou contínua remoção de sódio por lixiviação, indicando que a pluviosidade local pode ser suficiente para promover lixiviação adequada do sódio do perfil do solo.

Na fertirrigação, o nitrogênio constitui o elemento mais sujeito à lixiviação no solo. Entretanto, enquanto o nitrogênio estiver em sua forma de cátion amônio (NH₄⁺), a possibilidade de sua perda por lixiviação é baixa. Em condições normais de solo cultivado, o amônio é oxidado a nitrato (NO₃⁻), íon de carga negativa, que move mais livremente com a água do solo. A lixiviação pode ocorrer se o nitrato estiver presente em grandes quantidades no solo antes do plantio, o que não é o caso, ou quando a cultura não estiver utilizando

esse nutriente, ou ainda quando a irrigação ou a chuva exceder a capacidade de retenção do solo e o requerimento de umidade da cultura.

As águas subterrâneas apresentam geralmente concentrações de nitrato no intervalo de 0,1 a 10 mg L⁻¹. Portanto, o ETFC não apresenta limitações de aplicação quanto a este parâmetro. No experimento, as baixas concentrações de N_{Kjeldahl} e insignificantes, ou não detectáveis, de NO₃⁻, presentes no ETFC, induziram baixas ou insignificantes concentrações no percolado.

O potássio apresentou comportamento no solo muito semelhante ao do sódio (Quadro 18), ou seja, acumulou-se até certo ponto, porém ficou susceptível à forte remoção, apresentando tendência de ter sua concentração no percolado das colunas estabilizada com o tempo de aplicação do ETFC. As elevadas concentrações de potássio no percolado das colunas indicam ser relativamente grande a remoção deste nutriente do perfil do solo de textura arenosa, como é o caso do RQo avaliado, principalmente no período chuvoso.

O potássio ocorre em pequenas quantidades ou está quase ausente nas águas subterrâneas, apresentando, em geral, concentrações inferiores a 10 mg L⁻¹ ou, mais freqüentemente, entre 1 e 5 mg L⁻¹, devido à sua participação intensa em processos de troca catiônica, além da facilidade de ser adsorvido por minerais de argila ou ser absorvido pelas plantas. Os valores de concentração de potássio no percolado suplantaram, no entanto, em muito estes valores.

A mobilidade do fósforo no solo é pequena por ser adsorvido fortemente ao complexo argilo-húmico do solo e não apresenta um grave perigo para contaminação das águas subterrâneas. Porém, em solos arenosos, em vista de sua elevada macroporosidade e baixa capacidade de retenção desse nutriente, este quadro pode mudar, havendo riscos de contaminação das águas subterrâneas. O fósforo encontra-se, normalmente, em baixas concentrações em águas subterrâneas, estando os valores na faixa de 0,01 a 1 mg L⁻¹, podendo-se atingir 10 mg L⁻¹ em condições relativamente raras. O valor médio de concentração de P encontrado no ETFC foi 1,75 mg L⁻¹, e no percolado variou de 0,111 a 5,17 mg L⁻¹ para as lâminas de aplicação de 114,6 mm e 1146 mm, respectivamente, sugerindo que houve movimentação de P ao longo do perfil. Estes valores estão dentro da faixa típica para água subterrânea.

Quadro 18 - Características do percolado das colunas de solo RQo submetidas a diferentes taxas de aplicação do efluente secundário do processo de fabricação de celulose branqueada (ETFC), com simulação de chuva.

Parâmetros	ETFC ^{1/}	Período de aplicação (dias) ^{2/}																			
		Tratamentos ^{3/}																			
		Testemunha				114,6 mm				286 mm				515,7 mm				1146 mm			
		90	120	150	180	90	120	150	180	90	120	150	180	90	120	150	180	90	120	150	180
pH	7,49±0,47	5,1	5,71	4,24	5,7	5,1	6,38	5,05	6,07	6,08	4,45	5,58	6,02	5,54	4,06	5,84	5,84	4,97	4,24	6,66	6,19
Cor (mg.L ⁻¹)	1369±251	-	-	-	90	-	-	-	-	-	123	136	140	90	192	240	259	530	1295	2556	3120
CE (dS. m ⁻¹)	3,41±0,63	0,58	0,66	0,87	0,26	0,45	0,45	1,07	1,07	0,43	0,81	1,57	1,26	0,87	0,87	2,50	2,38	1,44	2,19	1,73	1,90
Na ⁺ (mg.L ⁻¹)	667±105	23,5	19	12,6	5	16	27	120	271 ^{4/}	26	70	220	504 ^{4/}	72	193	522	1410 ^{4/}	272	357	397	365 ^{4/}
Ca ⁺² (mg.L ⁻¹)	33,6±8,4	11,65	-	-	14,45	10,23	-	-	35,09	49,67	-	-	47,15	55,74	-	-	42,77	35,93	-	-	4,5
Mg ⁺² (mg.L ⁻¹)	6,1±3,3	6,37	-	-	7,69	7,03	-	-	16,31	28,44	-	-	17,71	22,31	-	-	23,16	12,38	-	-	0,392
Cl ⁻ (mg.L ⁻¹)	648±90	55,9	64,5	46,5	2,7	56	136	227	187	164	-	186	448	216	-	495	1095	685	667	894	1293
N (mg.L ⁻¹)	10,1±2,8	44,1	43,75	32,13	13,1	-	-	31,08	15,84	35,84	23,94	21,95	-	47,32	20,19	11,27	10,29	50,82	27,02	15,50	11,06
P (mg.L ⁻¹)	1,75±0,255	-	0,151	0,167	0,053	0,165	-	0,184	0,25	0,111	-	0,175	0,526	-	0,118	0,195	0,200	-	4,27	6,6	5,17
K (mg.L ⁻¹)	54,16±23,45	-	13	25	20	15,69	-	25	85	19	-	46	-	50	165	190	-	150	207	200	
Cu (µg.L ⁻¹)	0,003±0,001	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Fe (µg.L ⁻¹)	1,03±0,68	5,37	4,552	-	0,722	1,70	-	-	12,08	1,109	6,18	-	12,30	5,32	-	-	5,197	1,15	2,62	-	2,298
Zn (µg.L ⁻¹)	0,047±0,019	0,009	-	-	0,028	0,027	-	-	0,033	0,086	-	-	0,050	0,016	-	-	0,083	0,039	0,070	-	0,026
Mn (µg.L ⁻¹)	0,312±0,054	3,87	-	-	1,79	6,39	-	-	4,49	2,908	-	-	6,83	2,746	-	-	5,547	2,486	-	-	0,331
CO (mg.L ⁻¹)	225±106	36,02	37,42	28,95	8,50	-	80,06	48,5	62,3	32,85	-	-	131,9	33,03	55,7	71,5	101,3	82,7	130,9	152,5	155
DBO (mg.L ⁻¹)	68,46±16,33	-	-	-	19,04	30,9	31,14	37,24	24,57	36,66	-	-	32,14	32,77	28,9	-	24,21	30,85	34,67	31,11	31,37
AOX (mgCl.L ⁻¹)	4,58±0,77	-	-	-	-	-	14,55	4,23	4,23	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3,4	4,0	6,0

1/ valores médios monitorados ao longo do experimento. 2/ dias contados a partir do início de aplicação do ETFC. 3/ Lâminas aplicadas, correspondendo a 0, 0,85; 2,1; 3,8 e 8,45 ton.ha⁻¹ de Na.

O zinco e o cobre são tolerados em água para consumo humano em concentrações inferiores a 5 mg L^{-1} e $1,0 \text{ mg L}^{-1}$, respectivamente. Diante destes valores, o ETFC pode ser aplicado sem restrições no que se refere ao Cu e Zn. As concentrações de cobre e zinco foram, em geral, baixas no percolado das colunas de solo que receberam o ETFC (Quadro 18). Sabe-se que os principais mecanismos de retenção desses metais no solo consistem da precipitação, adsorção, troca de cátions e da diluição, sendo mais fortemente retidos em solos argilosos. O zinco, dentre os metais pesados comumente associados a problemas de contaminação ambiental, está entre os mais solúveis, ocorrendo nas águas subterrâneas em concentrações inferiores a $10 \text{ } \mu\text{g L}^{-1}$, enquanto o cobre tem baixa solubilidade e ocorre nas águas subterrâneas com teores inferiores a $1 \text{ } \mu\text{g L}^{-1}$.

O cloreto constitui um ânion altamente móvel, mesmo em solos argilosos, estando presente em todas as águas naturais doces, com valores entre 10 e 250 mg L^{-1} . As águas subterrâneas apresentam, geralmente, concentrações de cloreto inferiores a 100 mg L^{-1} . As concentrações de cloreto encontradas no percolado das colunas de solo, para as taxas de aplicação acima de 515 mm foram muito altas (216 a 1293 mg L^{-1}), chegando, em alguns momentos, a suplantarem os valores encontrados no ETFC. O cloreto sendo bastante solúvel e estável em solução, e dificilmente forma precipitados, acredita-se que o aumento observado na sua concentração no percolado pode estar associado a uma possível substituição aniônica no complexo de troca do solo.

A DBO_5 possibilita uma quantificação do conteúdo de material essencialmente orgânico, passível de degradação por microrganismos. A DBO_5 , diferentemente de outros parâmetros, tem seus valores associados a grupos de compostos orgânicos, ou mesmo inorgânicos (no caso da DQO), que podem ser oxidados biologicamente ou quimicamente. Os principais mecanismos de atenuação dessa carga orgânica constituem a biodegradação, a diluição e a filtração. Observou-se redução nos valores de DBO_5 , da ordem de 50% , em relação aos encontrados no ETFC, sendo obtidos, respectivamente, valores médios inferiores a 30 mg L^{-1} .

Os valores de DBO_5 nas águas subterrâneas encontram-se inferiores a 1 mg L^{-1} , sendo os limites estabelecidos pelo CONAMA para águas de

Classe 1, menores do que 3 mg L⁻¹. Isto permite inferir que mesmo sendo baixas, as concentrações de DBO podem alterar a qualidade das águas subterrâneas.

Nos ensaios de AOX realizados, observou-se não haver variação na concentração destes compostos no ETFC aplicado e no percolado (Quadro 18), podendo-se inferir que o solo RQo não reteve, de forma eficiente, os compostos organoclorados contidos no efluente. Porém, pela experiência já demonstrada em vários ensaios experimentais (Kookana & Rogers, 1991), sabe-se que estes compostos são fortemente retidos no solo. Acredita-se que, por ser o RQo um solo muito arenoso, de baixa capacidade de interação iônica e baixo teor de material orgânico, os compostos organoclorados presentes no EPTC não encontraram sítios de retenção, o que fez com que passassem pelo solo sem grandes alterações em sua concentração.

4. 4. Efeitos da aplicação do ETFC nas plantas

4.4.1. Características dendrométricas e produção de matéria seca vegetal

As características de crescimento e produção de biomassa em mudas de eucalipto cultivadas em casa-de-vegetação, avaliadas após 180 dias de aplicação do ETFC, com e sem simulação de chuva, nos solos PAd1, PAd2 e RQo, estão apresentadas no Quadro 19 e 20 e Figuras 19 a 24.

Embora não tenha havido diferença estatística para algumas variáveis, houve tendência a um aumento nos valores dos parâmetros altura de planta, diâmetro do lenho, matéria seca da parte aérea (MSPA) e matéria seca de raiz (MSR) com o incremento da taxa de ETFC aplicada, notadamente nos solos PAd1 e PAd2, constatando-se, assim, satisfatória tolerância das mudas de eucalipto à aplicação desse efluente no solo.

Atribui-se o maior crescimento e produção de biomassa de plantas nas colunas de solo que receberam as maiores taxas de aplicação de ETFC, ao maior acúmulo de macro e micronutrientes contidos no ETFC, apesar do também maior acúmulo de sódio no solo. Aparentemente, o aumento da concentração de sódio no solo, ao menos em curto prazo, não proporcionou

efeitos negativos ao crescimento das plantas de eucalipto. Como mostrado no Quadro 19, verificou-se que o solo Pad₁ foi o que apresentou melhor desempenho na produção de biomassa, analisando-se as variáveis MSPA, e a relação parte aérea:raiz. Porém, no solo RQ_o, estas taxas inibiram o crescimento das plantas, tendo sido obtidos valores menores de diâmetro de lenho, altura e biomassa da parte aérea, o que pode ser relacionado à maior força iônica que os íons presentes no ETFC têm no solo arenoso.

Nos solos estudados, foi marcante o aumento na salinidade quando foi simulada a aplicação de ETFC no solo em períodos mais secos do ano (Figura 3). A resposta das plantas a este aumento de salinidade dos solos, geralmente mostrada pela redução do uso da água e aumento do estresse hídrico, foi avaliada aqui por meio dos atributos de crescimento da planta, produção de biomassa e relação parte aérea: raiz, respectivamente.

No período de experimentação de 180 dias, o acúmulo de sais nos solos não prejudicou o desenvolvimento das mudas nos solos PAd1 e PAd2, porém, como a lixiviação de sais é mais difícil nesses solos, poderá ocorrer maior estresse nas plantas para períodos maiores de aplicação de ETFC, caso sistemas de drenagem artificial não sejam implantados nestes solos.

Não foi constatada redução no consumo de água ou aumento do estresse hídrico nas plantas em crescimento com o incremento da taxa aplicada, fato evidenciado pelo volume de água acrescentado aos solos para restabelecimento das condições de umidade controlada nas colunas de solo. Não houve, entretanto, evidência de efeitos da salinidade do solo nas plantas com respeito às variáveis de crescimento e produção de biomassa.

Caso fosse maior o período de monitoramento do experimento, efeitos maiores no crescimento e produtividade das plantas de eucalipto ficariam mais evidentes. Extrapolando-se os resultados obtidos, ao que tudo indica, em períodos de tempo superiores a seis meses, ainda haveriam ganhos no crescimento das plantas, apesar do crescente acúmulo de sais na zona radicular, principalmente nas colunas de solos de textura mais argilosa (PAd1 e PAd2) (Figuras 3 e 4). Porém, acredita-se que a partir de certo ponto, decréscimos nessas variáveis podem ocorrer, quando o aporte de nutrientes for menos benéfico do que o acúmulo de sais.

Com base nos dados apresentados no Quadro 20, onde está apresentada uma análise conjunta de todos os tratamentos e experimentos, percebe-se que, o fator água de chuva simulada influenciou significativamente, de forma benéfica, os atributos altura, massa seca de parte aérea - MSPA (biomassa) e massa seca de raiz das plantas cultivadas.

Com relação à partição parte aérea: raiz, indicativo de estresse hídrico ou nutricional, a redução nesta relação com a aplicação de chuva simulada, indica que, com a lavagem do perfil e drenagem do lixiviado, há possibilidade de minimização dos efeitos salinos neste solo. Benyon et al. (1996) verificaram que plantas de eucalipto apresentaram alto estresse hídrico após períodos de fertirrigação com efluente salino, em meios de cultivo que apresentavam dificuldades para lixiviação de sais, indicando que, apesar da abundância de água e nutrientes, as plantas tornaram-se levemente estressadas com o acúmulo de sais na zona radicular, proporcionado com a aplicação do efluente. Os mesmos autores citam que as condições do meio voltaram a ser favoráveis ao crescimento da planta após ser o solo submetido à lixiviação.

4.4.1.1. Altura de plantas

O crescimento em altura não diferiu significativamente em relação às classes de solo estudadas, quando comparado ao obtido nas colunas de solo testemunhas, as quais não receberam ETFC, mas simplesmente água “limpa” para reposição da água evapotranspirada. Por isso, pode-se dizer que a aplicação do ETFC não inibiu o crescimento das mudas.

A altura de plantas de eucalipto não foi afetada significativamente pela aplicação de ETFC nos solos. Exceção a essa constatação ocorreu nas colunas de solo de textura média/argilosa (PAd1), que, quando submetido à aplicação de chuvas simuladas, houve decréscimo de altura com o aumento da taxa de ETFC aplicada. O solo PAd2 apresentou melhor rendimento em altura independente do tratamento, sendo afetadas pela aplicação de chuva simulada (valores médios mais altos) (Quadro 19 e Figura 19).

Quadro 19 - Valores médios de diâmetro do lenho, altura da planta, matéria seca da parte aérea, matéria seca de raiz e relação parte aérea: raiz de plantas de eucalipto para diferentes solos, submetidos a diferentes taxas de aplicação de ETFC.

Variável	Solo	Lâminas (mm.ano ⁻¹) ^{3/}											
		0		114,6		286,5		515,7		1146			
		SC ^{1/}	CC ^{2/}	SC	CC	SC	CC	SC	CC	SC	CC ^{1/}		
Diâmetro (cm)	PAd1	0,81 A a	0,93 A a	0,84 A a	0,90 A a	0,85 A a	0,92 A a	0,87 A a	0,97 A a	0,97 A a	0,98 A a		
	PAd2	0,73 A a	0,82 A a	0,77 AB a	0,88 A a	0,82 AB a	0,81 AB a	0,93 A a	0,84 A a	1,03 A a	0,95 A a		
	RQ ₀	0,67 A a	0,60 B a	0,67 B a	0,68 B a	0,67 B a	0,73 B a	0,64 B a	0,67 B a	0,60 B a	0,60 B a		
Altura (cm)	PAd1	65,2 A b	92,0 A a	80,0 A a	98,0 A a	80,5 A a	98,2 A a	79,3 A a	92,4 A a	77,7 A a	62,7 B a		
	PAd2	73,7 A a	86,3 AB a	75,9 A a	92,0 A a	83,1 A a	89,2 AB a	82,5 A a	86,1 A a	73,3 A a	92,0 A a		
	RQ ₀	64,7 A a	61,7 B a	67,0 A a	49,2 B a	70,7 A a	71,7 B a	65,2 A a	69,7 A a	61,0 A a	64,3 B a		
MS parte aérea (g)	PAd1	28,77 A b	46,50 A a	36,85 A b	52,13 A a	42,87 A b	55,75 A a	43,97 A b	54,02 A a	47,77 A b	64,37 A a		
	PAd2	29,07 A b	43,70 A a	31,80 A b	41,82 B a	32,75 B b	42,60 B a	38,37 A b	48,20 A a	44,95 A b	58,22 A a		
	RQ ₀	23,97 A a	23,03 B a	29,82 A a	30,52 C a	28,65 B a	33,25 B a	23,56 B a	27,63 B a	17,10 B a	21,62 B a		
MS raiz (g)	PAd1	10,45 A a	14,43 A a	8,62 A a	16,73 A a	13,83 A a	18,18 A a	16,20 A a	23,78 A a	18,41 A a	24,2 AB a		
	PAd2	10,07 A a	15,13 A a	15,40 A a	19,70 A a	18,72 A a	19,10 A a	17,85 A a	22,62 A a	21,45 A b	32,43 A a		
	RQ ₀	14,83 A a	10,98 A a	17,73 A a	18,60 A a	18,45 A a	21,13 A a	18,23 A a	26,53 A a	15,88 A a	18,18 B a		
Parte aérea: raiz	PAd1	3,24 A a	3,23 A a	4,54 A a	3,13 A b	3,25 A a	3,10 A a	2,73 A a	2,36 A a	2,60 A a	2,69 A a		
	PAd2	2,94 A a	2,90 AB a	2,13 B a	2,17 AB a	1,80 B a	2,26 AB a	2,23 AB a	2,20 A a	2,22 A a	1,84 AB a		
	RQ ₀	1,72 B a	2,19 B a	1,71 B a	1,65 B a	1,62 B a	1,58 B a	1,26 B a	1,08 B a	1,08 B a	1,26 B a		

As médias seguidas de pelo menos uma mesma letra maiúscula na coluna, e minúscula na linha para cada lâmina de ETFC não diferem entre si em nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey, valores médios de três repetições. 1/ aplicação continua de ETFC sem chuva simulada; 2/ aplicação de ETFC com chuva simulada. 3/ lâminas de ETFC correspondentes às taxas de aplicação 0; 0,84; 2,11; 3,80 e 8,45 t. ha⁻¹ de Na, respectivamente.

Quadro 20 - Média geral^{1/} de diâmetro do lenho, altura da planta, massa seca da matéria seca da parte aérea e da raiz de plantas de eucalipto para diferentes solos, submetidos a diferentes condições experimentais (sem e com simulação de chuva), incluindo todas as taxas de aplicação do ETFC.

Variável	Experimento ^{2/}	Solo		
		PAd1	PAd2	RQ _o
Diâmetro (cm)	SC	0,87 Ba	0,85 A a	0,68 Ab
	CC	0,94 Aa	0,86 Ab	0,66 Ac
Altura (cm)	SC	76,58 Bab	77,70 Ba	65,71 Ab
	CC	88,64 A a	89,10 A a	63,31 Ab
Massa seca parte aérea (g)	SC	40,04 Ba	35,38 B b	24,62 Ac
	CC	54,55 A a	46,91 Ab	27,21 Ac
Massa seca raiz (g)	SC	13,50 Ba	16,68 Ba	17,03 A a
	CC	19,48 A a	21,79 A a	19,09 A a
Relação Parte aérea : raiz	SC	3,27 A a	2,26 Ab	1,47 Ac
	CC	2,90 Ba	2,27 Ab	1,55 Ac

1/As médias seguidas de pelo menos uma mesma letra maiúscula nas colunas e minúscula, nas linhas, para cada solo não diferem entre si em nível de 5% de probabilidade, pelo teste de Tukey (valores médios de três repetições). 2/ SC, aplicação contínua do ETFC sem chuva simulada; CC , aplicação do ETFC com chuva simulada.

4.4.1.2. Diâmetro do lenho

O diâmetro de lenho das plantas cultivadas nas colunas de solo PAd1 e PAd2 mostrou variação significativa com as taxas de aplicação de ETFC (Figura 20). Verificou-se tendência de aumento do diâmetro de lenho das plantas, com o aumento na taxa de aplicação de ETFC para estes solos que não receberam chuvas simuladas. O solo PAd2 apresentou maior taxa de aumento no diâmetro de lenho com o aumento da taxa de aplicação de ETFC, com base no coeficiente angular da equação linear. No solo arenoso (RQ_o), não houve diferença estatística no diâmetro das plantas, por efeito das taxas de ETFC aplicadas.

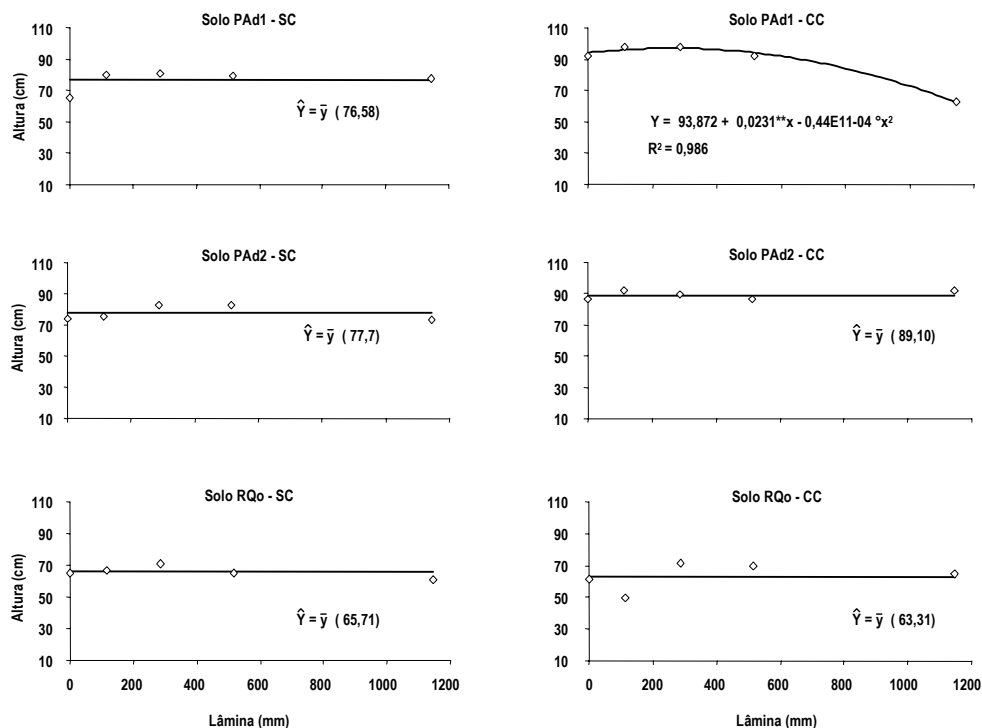


Figura 19 - Altura das plantas de eucalipto nos solos PAD1, PAD2, e RQ_o submetidos, por um período de 180 dias, à aplicação contínua de ETFC, sendo: SC, sem a aplicação de chuvas simuladas e CC - com a aplicação de chuvas simuladas (* *, *, °: F significativo a 1, 5 e 10%, respectivamente).

Os resultados obtidos, no que se refere ao diâmetro do lenho, dão indicativos de que as plantas de eucalipto responderam à maior disponibilização de nutrientes com o aumento da taxa de aplicação de ETFC. No caso do RQ_o, que é um solo muito arenoso, a lixiviação de outros nutrientes e o aumento da força iônica da solução do solo podem ter contrabalançado, negativamente, o maior aporte de nutrientes.

O fato do solo ter recebido chuvas simuladas proporcionou aumento do diâmetro do lenho das plantas do solo PAD2 e, no caso do solo RQ_o proporcionou, a partir de uma lâmina de 519 mm, efeito contrário (Figura 20). Acredita-se que, por ser o RQ_o um solo de baixa CTC e capacidade de retenção de nutrientes, o efeito de lavagem do perfil, promovendo a remoção

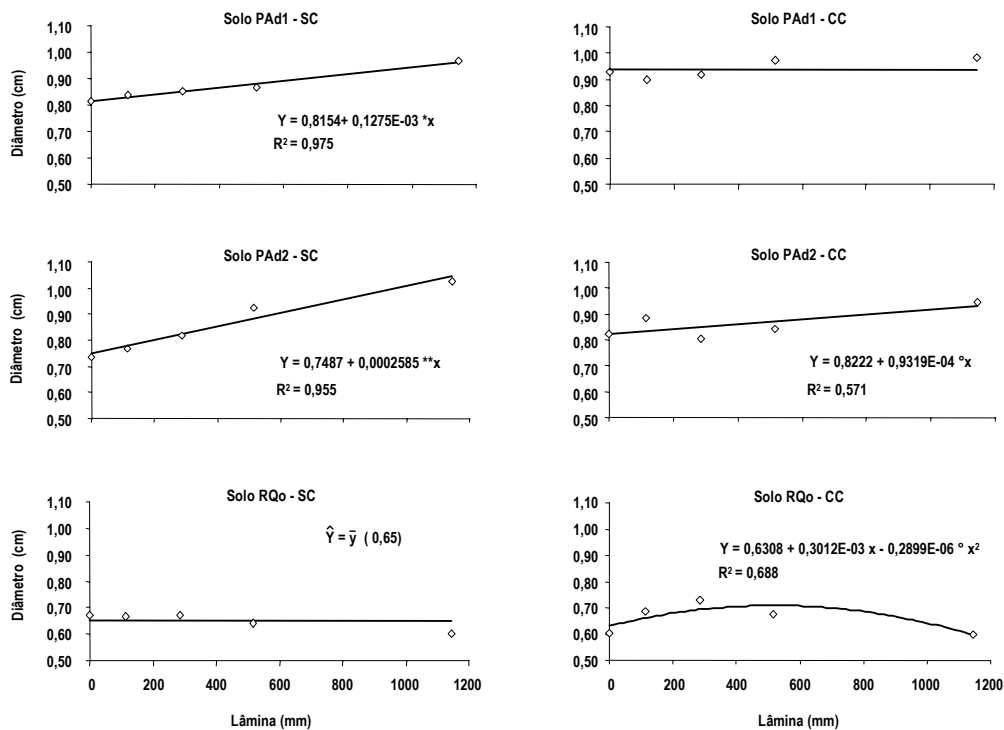


Figura 20 - Diâmetro de lenho das plantas de eucalipto nos solos PAd1, PAd2, e RQ_o submetidos, por um período de 180 dias, à aplicação contínua de ETFC, sendo: SC, sem a aplicação de chuvas simuladas e CC, com a aplicação de chuvas simuladas (**, *, °: F significativo a 1, 5 e 10%, respectivamente).

de nutrientes importantes possa ter sido um fator de grande influência nesses resultados.

4.4.1.3. Produção de biomassa da parte aérea

Verificou-se efeito das taxas de aplicação na produção de biomassa, avaliada por meio da MSPA, sendo que as plantas cultivadas nos solos PAd1 e PAd2 apresentaram ganhos de produtividade com a fertirrigação com ETFC, tanto quando receberam como quando não receberam chuvas simuladas (Figura 21). No solo RQ_o houve produtividade decrescente com o aumento da taxa de aplicação, ainda que com a aplicação da chuva simulada tenha havido

uma melhora no crescimento das plantas, notadamente para as taxas de aplicação intermediárias (em torno de 630 mm).

Entende-se que o fornecimento crescente de nutrientes via ETFC, tal como verificado para outras variáveis de crescimento das plantas, tenha sido fator fundamental para que se obtivesse esse comportamento. O solo arenoso (RQ₀), em virtude de apresentar menor capacidade de acumulação de nutrientes e, por outro lado, por apresentar menor poder tampão para os sais presentes na solução do solo, proporcionou condições menos adequadas ao desenvolvimento das plantas.

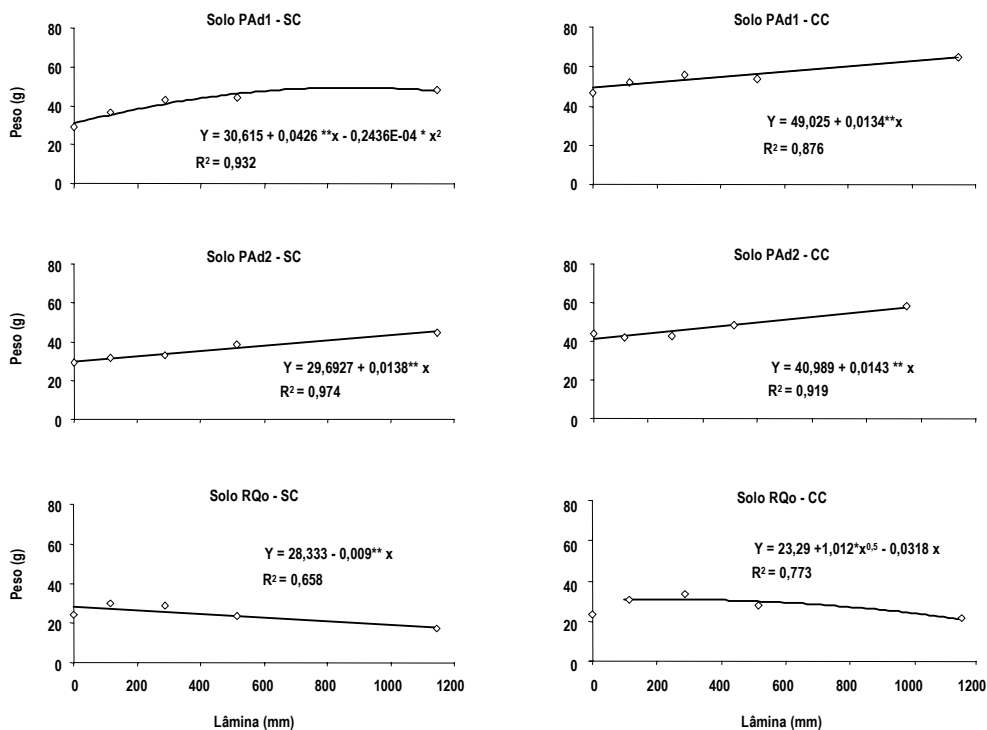


Figura 21 - Matéria seca da parte aérea das plantas de eucalipto nos solos PAd1, PAd2 e RQ₀ submetidos, por um período de 180 dias, à aplicação contínua de ETFC, sendo: SC, sem a aplicação de chuvas simuladas e CC - com a aplicação de chuvas simuladas (* *, *, °: F significativo a 1, 5 e 10%, respectivamente).

As maiores produções de biomassa foram obtidas nos solos PAd1 e PAd2, sendo que, no solo PAd2, o melhor desempenho foi alcançado com a aplicação de 1146 mm de ETFC, enquanto no solo PAd1, desempenho semelhante foi atingido com a aplicação de lâminas em torno de 875 mm, correspondente à taxa de aplicação de sódio de 6,5 ton ha⁻¹.

4.4.1.4. Biomassa radicular

Pode-se verificar, analisando os resultados apresentados na Figura 22, que a biomassa de raízes nos solos PAd1 e PAd2 aumentou linearmente com o incremento da lâmina de ETFC aplicada. Nestes solos, de estrutura mais densa, as plantas apresentaram crescimento de raízes concentrado nas camadas mais superficiais da coluna, com mudança na direção que, naturalmente deveria ser vertical descendente, passando a apresentar um crescimento horizontal nos primeiros centímetros da coluna de solo, conforme pode ser visualizado na Figura 23. Já no solo arenoso (RQo), as plantas apresentaram sistema radicular mais desenvolvido, com raízes mais pivotantes, e a relação parte aérea-raiz decresceu com o aumento das taxas de aplicação de ETFC (Figura 25), porém não se verificou diferença estatística na biomassa de raízes com as taxas de aplicação (Figura 22), e sim redução linear da massa seca da parte aérea. Em princípio, espera-se que a redução da relação parte aérea:raiz seja uma indicação de que a planta esteve submetida a ambiente de estresse.

Nos solos de textura média/argilosa (PAd1) e arenosa/média (PAd2) houve incremento de massa de raízes com o aumento da taxa de aplicação de ETFC (Figura 22). O maior aporte de nutrientes, ao que tudo indica, proporcionou efeito favorável, capaz de suplantar o efeito deletério da salinidade do solo. Os efeitos das taxas de aplicação no desenvolvimento radicular não foram significativos quando o cultivo ocorreu em solos de textura grosseira (RQo).

Houve efeito da aplicação de chuvas na produção de matéria seca de raiz nas mudas de eucalipto, verificando-se um incremento na matéria seca de 35% e 42%, respectivamente, para os solos PAd1 e PAd2. Porém, não fica

evidente que a condição salina do solo foi fator decisivo no desenvolvimento radicular dessas plantas. No solo de textura mais arenosa (RQ_o), houve efeito benéfico, ao menos para as taxas intermediárias de aplicação de ETFC (114,6 mm a 650 mm) da aplicação de chuvas simuladas. Obteve-se um incremento máximo na matéria seca de 55%, correspondente à lâmina de aplicação do ETFC de 650 mm (Figura 22). Acredita-se que a diluição proporcionada e a lixiviação de parte dos sais presentes possam estar associadas aos resultados encontrados.

Numa avaliação da distribuição das raízes das plantas de eucalipto nos diferentes solos estudados, quando submetidos à aplicação de ETFC, em diferentes taxas, verificou-se mais homogênea distribuição das raízes no solo arenoso (RQ_o) do que nos solos de textura arenosa/média e textura média/argilosa (Figura 24). A maior macroporosidade do solo arenoso (Quadro 8) foi, sem dúvida, um grande facilitador para que houvesse expansão e crescimento das raízes. Nos solos de textura arenosa/média e média/argilosa, as elevadas densidades do solo aliada às menores macroporosidades concorreram para que houvesse impedimento de melhor distribuição radicular das plantas.

Por outro lado, avaliando-se o efeito das taxas de aplicação do ETFC no desenvolvimento e aprofundamento radicular (Figura 24), verifica-se nos solos PAd1 e PAd2, principalmente no segundo, que houve aumento da massa radicular em maiores profundidades do solo, quando comparado ao que foi observado no tratamento testemunha. As mais altas taxas de aplicação proporcionaram significativos aumentos da massa de raízes nestes solos, o que se credita à maior disponibilidade de nutrientes em profundidade, notadamente de nitrogênio e enxofre.

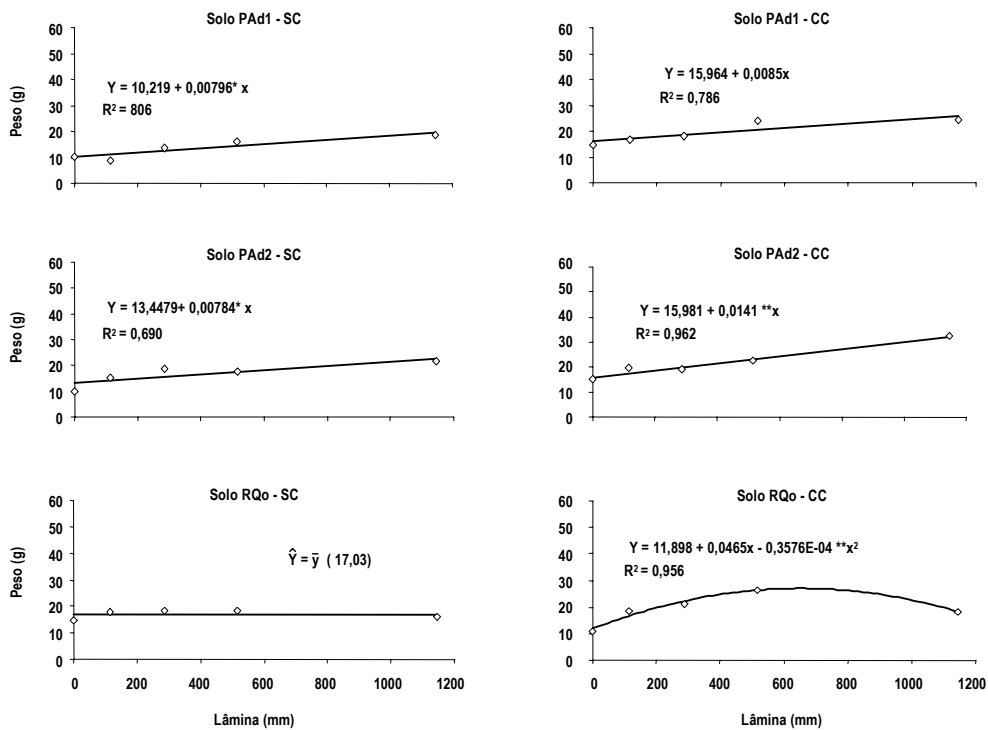


Figura 22 - Matéria seca da raiz das plantas de eucalipto nos solos PAd1, PAd2 e RQ₀ submetidos, por um período de 180 dias, à aplicação contínua de ETFC, sendo: SC, sem a aplicação de chuvas simuladas e CC - com a aplicação de chuvas simuladas (*, **, °: F significativo a 1, 5 e 10%, respectivamente).

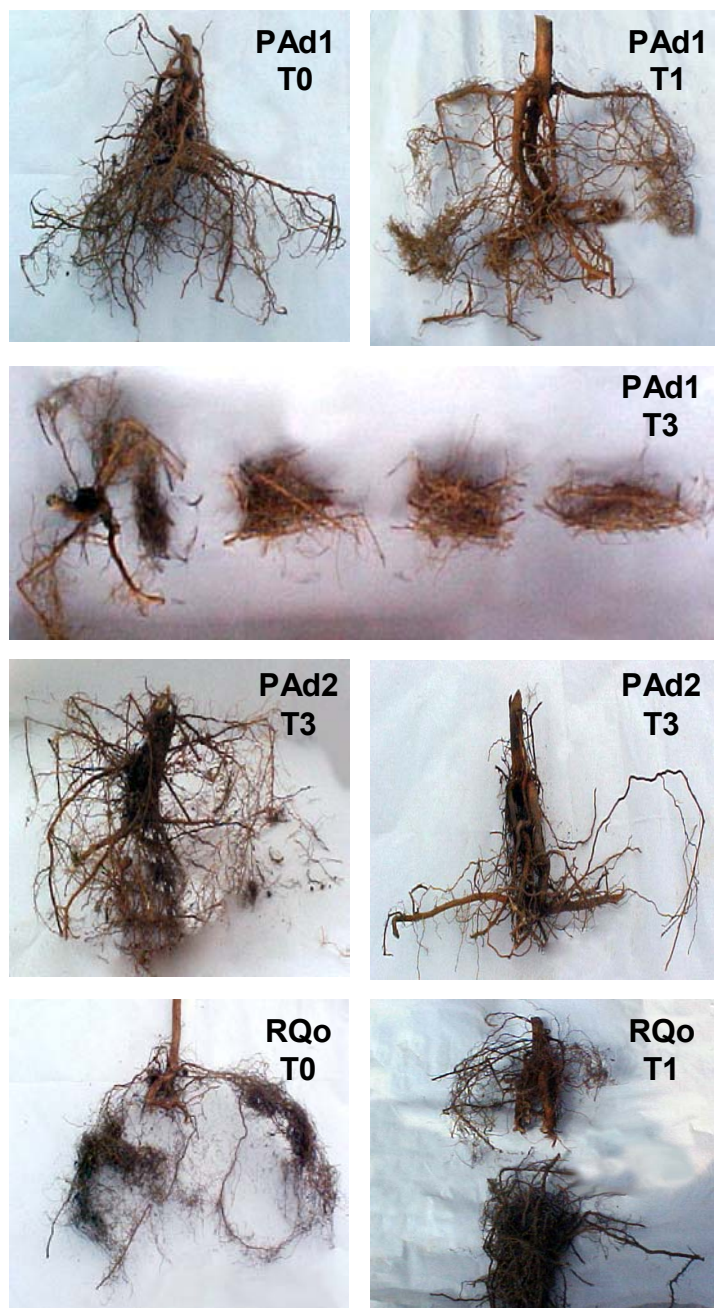


Figura 23 - Aparência do sistema radicular das plantas de eucalipto nos Argissolos (PAd1 e PAd2) e no Neossolo RQ_o submetidos, por um período de 180 dias, à aplicação contínua de ETFC.

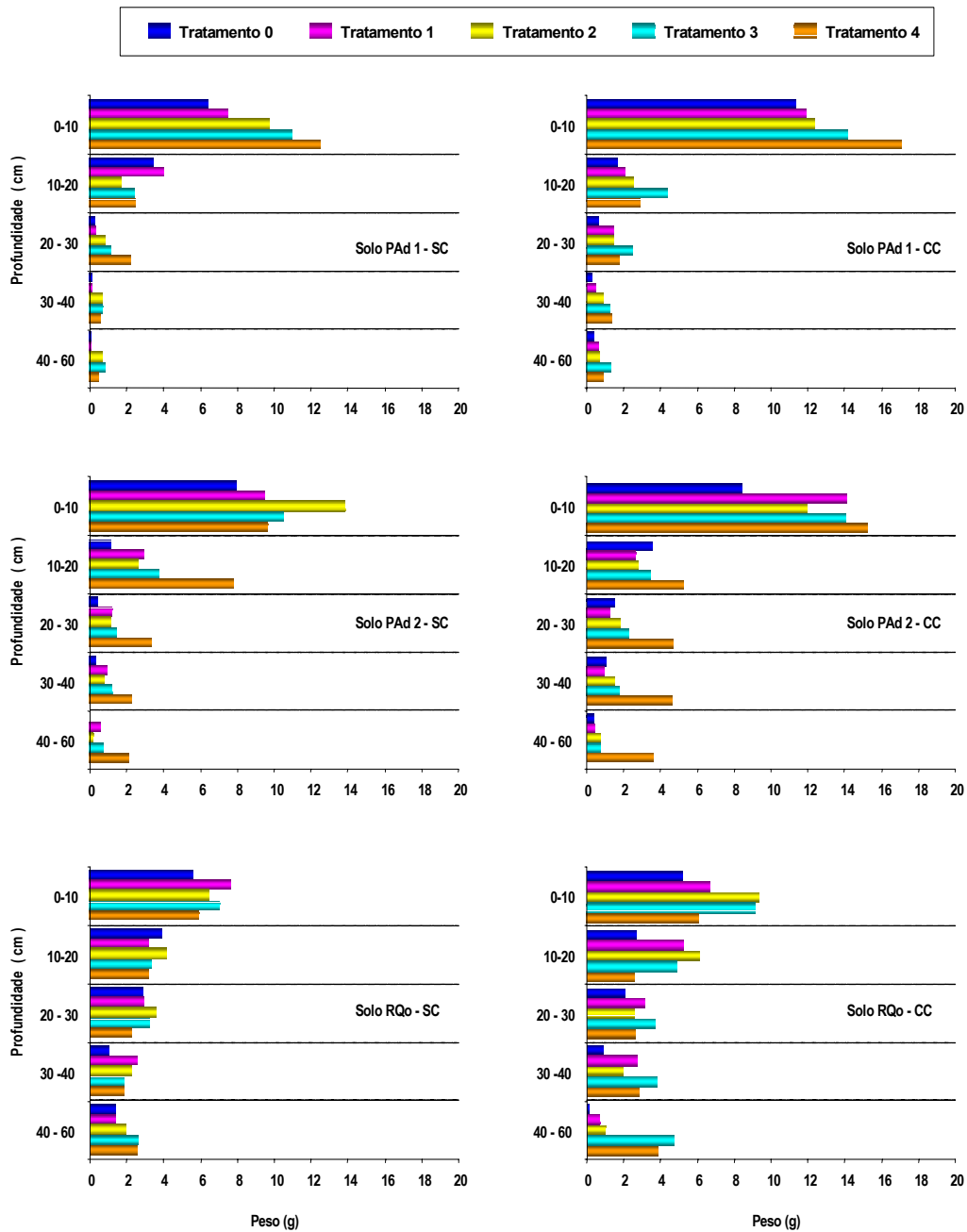


Figura 24 - Distribuição das raízes de mudas de eucalipto em cinco profundidades dos solos em estudo, PAd1, PAd2 e RQo, avaliada 180 dias após o plantio de mudas de eucalipto e de aplicação do ETFC, sendo Trat.0, Trat.1, Trat.2, Trat.3 e Trat.4 correspondente às lâminas aplicadas de 0mm, 114,6mm, 286,5mm, 515,7mm e 1146mm, considerando-se duas condições na condução do experimento: SC, sem simulação de chuva e CC, com simulação de chuva (valores médios de três repetições).

4.4.1.5. Relação parte aérea: raízes

O crescimento considerado “ótimo” de uma planta, em determinado local, depende de sua habilidade em manter um “balanço funcional” entre crescimento de raízes e o da parte aérea. Partindo do pressuposto de que o que acontece dentro do solo, de alguma forma, se reflete na parte aérea e vice-versa, determinou-se uma relação entre crescimento de raízes e da parte aérea. Segundo Davidson e outros, citados em Barros et al. (2000), a absorção de água e de nutrientes por unidade de massa radicular deve ser proporcional à absorção de carbono pela parte aérea, porém, a relação destas duas partes da planta varia com as condições ambientais. Plantas sob estresse hídrico e, ou, nutricional direcionam preferencialmente mais carbono às raízes do que à parte aérea, podendo a relação massa de parte aérea/massa de raízes passar a ser próxima de 1,0 (Barros et al., 2000).

De forma geral, houve redução na relação massa da parte aérea em relação à massa de raízes das plantas de eucalipto com o aumento da taxa de aplicação de ETFC (Figura 25). Como se associa redução dessa relação com estresse das plantas (Barros et al., 2000), pode-se concluir que o aumento das taxas de aplicação de ETFC proporcionou aumento do estresse nas plantas. Dentre as formas de estresse, a que as plantas podem ter ficado sujeitas, acredita-se que o hídrico, decorrente da diminuição do potencial osmótico da água no solo, possa ter sido o fator de maior importância, já que a planta respondeu positivamente à maior disponibilidade de nutrientes proporcionada com o aumento da taxa de ETFC aplicada.

4.4.2. Análise nutricional

4.4.2.1. Análise geral dos resultados obtidos

As concentrações médias de nutrientes no tecido foliar, após aplicação do ETFC nas diferentes taxas, estão apresentadas no Quadro 21 e o resumo da análise de variância conjunta dos resultados são apresentados no Quadro 22. As equações de regressão ajustadas representando a variação destas

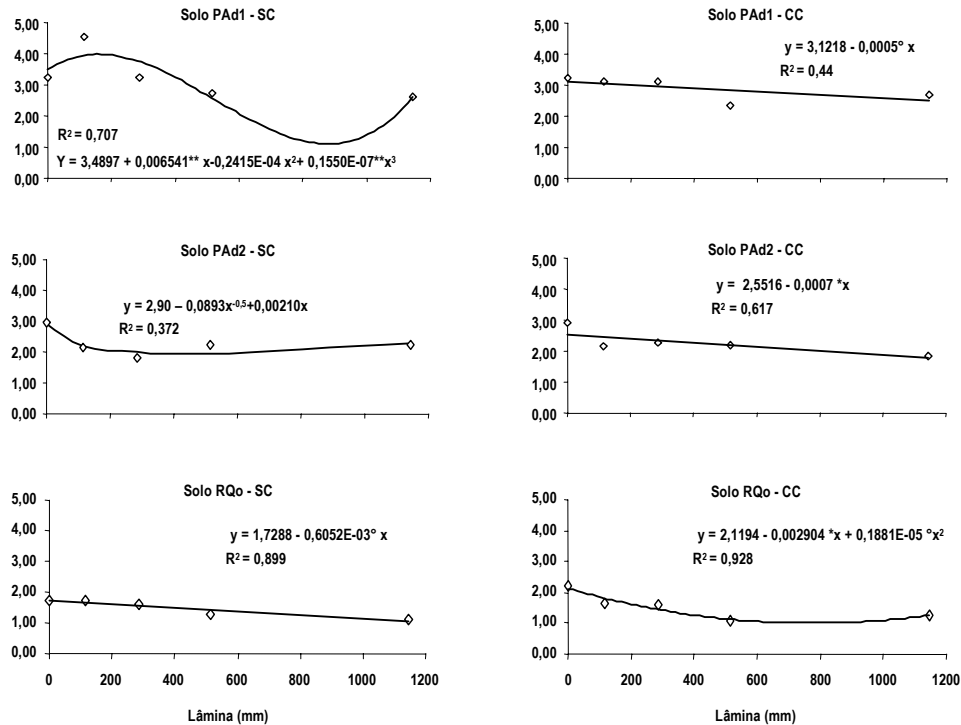


Figura 25 - Relação massa seca da parte aérea: massa seca da raiz das plantas de eucalipto nos solos PAd1, PAd2 e RQ_o submetidos, por um período de 180 dias, à aplicação contínua de ETFC, sendo: SC, sem a aplicação de chuvas simuladas e CC - com a aplicação de chuvas simuladas (* *, *, °: F significativo a 1, 5 e 10%, respectivamente).

concentrações com as taxas estão apresentadas nas Figuras 26 a 29 e Quadros 23 a 25. A análise comparativa destas concentrações com alguns valores de referência de níveis críticos e faixa de suficiência para a cultura do eucalipto, referidas na literatura (Novais et al., 1990; Dell et al., 1995; Gonçalves, 1995; Judd et al. 1996; Malavolta et al., 1997; Wadt et al., 1997), permite afirmar que, em geral, houve algum desajuste nutricional, mais genérico, não decorrente da aplicação do ETFC.

Pelo que se pode observar nos dados apresentados no Quadro 22, o efeito da aplicação de chuva simulada, no geral, não proporcionou efeitos significativos na concentração da maioria dos nutrientes no tecido foliar das plantas.

Quadro 21 - Característica^{1/} do material foliar das plantas de eucalipto para os diferentes solos, submetidos a diferentes taxas de aplicação do ETFC, submetidas ou não à aplicação de chuvas simuladas

Experimento ^{2/}	Solo	Taxa de aplicação (mm) mm. ano ⁻¹	N	P	K	Ca	Mg	S	Cl	Na	Cu	Fe	Mn	Zn	B
			dag kg ⁻¹								mg kg ⁻¹				
SC	PAd1	0	2.167	0.176	1.194	0.461	0.168	0.044	0.702	0.746	1.73	153.83	652.30	18.93	57.85
		114.6	1.946	0.148	0.993	0.503	0.112	0.035	0.585	0.753	2.87	160.50	734.43	19.97	47.88
		286.5	1.914	0.138	0.819	0.400	0.101	0.042	0.923	0.698	2.27	173.43	505.27	12.00	39.91
		515.7	1.360	0.164	0.868	0.345	0.108	0.032	0.676	0.760	2.07	258.90	550.73	13.43	23.13
	1146	1.517	0.115	0.847	0.307	0.098	0.033	0.559	0.802	1.80	273.53	543.77	10.70	33.54	
	PAd2	0	1.675	0.190	1.068	0.492	0.165	0.042	0.546	0.698	2.73	186.33	623.33	18.47	111.44
		114.6	1.480	0.171	1.096	0.376	0.131	0.026	0.741	0.844	1.90	155.00	361.53	17.13	77.12
		286.5	1.317	0.169	1.017	0.357	0.106	0.029	0.800	0.895	1.60	202.70	283.07	11.27	90.20
		515.7	1.568	0.153	1.152	0.304	0.099	0.033	0.689	1.018	2.83	204.57	543.03	11.10	44.32
	1146	1.186	0.104	0.886	0.271	0.097	0.027	0.832	0.917	1.33	279.33	319.73	7.93	30.71	
	RQo	0	1.168	0.189	0.992	0.613	0.198	0.035	0.858	0.580	1.63	150.07	1335.03	21.67	222.52
		114.6	1.160	0.192	0.993	0.365	0.139	0.039	0.650	0.892	2.07	155.77	1912.90	25.60	152.95
286.5		1.163	0.200	1.055	0.382	0.132	0.040	0.650	0.990	1.67	191.23	1915.10	15.90	185.31	
515.7		1.087	0.277	1.220	0.374	0.123	0.036	0.793	1.213	3.50	244.77	1667.60	16.13	144.05	
1146	1.083	0.306	1.323	0.428	0.099	0.033	1.092	1.422	3.20	312.33	1280.77	14.63	60.31		
CC	PAd1	0	1.552	0.150	0.850	0.496	0.148	0.038	0.572	0.498	1.67	144.43	510.40	19.33	45.22
		114.6	1.371	0.132	0.795	0.491	0.116	0.030	0.780	0.652	1.50	216.83	477.77	15.67	36.79
		286.5	1.274	0.143	0.857	0.412	0.117	0.032	0.481	0.631	2.57	235.03	589.97	18.57	21.33
		515.7	1.095	0.121	0.733	0.376	0.090	0.043	0.754	0.631	1.27	189.20	514.43	13.40	26.16
	1146	1.390	0.122	0.754	0.321	0.085	0.027	0.507	0.723	1.33	210.27	419.83	11.97	21.99	
	PAd2	0	0.967	0.153	0.719	0.397	0.129	0.021	0.663	0.456	1.30	155.67	449.53	21.07	78.76
		114.6	1.117	0.143	0.664	0.295	0.092	0.019	0.702	0.512	0.53	155.97	260.33	6.37	79.98
		286.5	1.149	0.177	0.850	0.417	0.135	0.027	0.754	0.638	0.93	262.70	483.63	8.50	49.37
		515.7	0.929	0.174	0.829	0.374	0.113	0.024	0.936	0.730	1.13	164.90	339.53	7.83	41.43
	1146	1.014	0.146	0.809	0.297	0.111	0.023	1.040	0.821	0.77	211.27	323.40	7.10	53.65	
	RQo	0	0.533	0.251	0.795	0.495	0.148	0.018	0.806	0.414	0.37	59.70	822.43	15.80	157.86
		114.6	0.502	0.255	0.733	0.359	0.113	0.017	0.572	0.666	0.53	136.17	1307.53	11.57	100.63
286.5		0.710	0.220	0.919	0.380	0.095	0.029	0.936	0.821	0.47	85.30	1427.43	13.00	91.54	
515.7		0.860	0.284	0.919	0.331	0.095	0.030	0.897	0.968	1.07	149.63	1528.45	12.23	103.53	
1146	1.676	0.511	1.249	0.360	0.081	0.033	0.988	1.249	1.87	296.17	1380.50	16.80	86.83		

1/Valores médios de três repetições; 2/ SC, sem aplicação de chuva simulada; CC, com aplicação de chuva simulada.

Quadro 22 - Resumo da análise de variância conjunta dos resultados obtidos de concentração de nutrientes no material vegetal de plantas de eucalipto cultivadas, com aplicação do efluente ETFC, sem a aplicação de chuvas simuladas e com a aplicação das mesmas, após 6 meses de plantio.

Fontes de Variação	GL	Quadrados Médios												
		N	P	K	Ca	Mg	S	Cl	Na	B	Cu	Fe	Mn	Zn
Repetição/experimento	4	0.03074ns	0.00750 ns	0.05741 *	0.31547 *	0.00049 ns	0.00002 ns	0.21196 **	0.03738 **	2704.992 °	1.03327ns	4045.12 ns	182098.9ns	23.48444ns
Experimento	1	3.19642 **	0.00838 ns	0.93156 **	0.27001 ns	0.00428 **	0.00132 **	0.00856 ns	0.79454 **	10637.25 **	25.27040**	18409.82 *	572844.3 *	127.2111*
Solo	2	2.40178 **	0.14429 **	0.17947 **	0.70176 **	0.00046 ns	0.00055 **	0.22725 **	0.43148 **	70920.70 **	1.24853 ns	4774.14 ns	9843606.**	182.0014**
Tratamento	4	0.09788 ns	0.00588 ns	0.02492 ns	0.14063 **	0.01091 **	0.00012 ns	0.08446 ns	0.46978 **	10380.84 **	0.55639 ns	38739.10 **	99297.84ns	178.8013**
Experimento x solo	2	0.05912 ns	0.01570 *	0.02895 ns	0.00778 ns	0.00181 *	0.00014 ns	0.50350 ns	0.02652 °	3028.62 ns	2.19987 °	7843.00 ns	164505.2ns	62.85878ns
Experimento x tratamento	4	0.36863 **	0.00621 ns	0.05370 *	0.00551 ns	0.00098 °	0.00013 ns	0.02757 ns	0.00977 ns	2626.79 ns	0.96162 ns	5679.56 ns	81650.14ns	82.50194*
Solo x tratamento	8	0.28980 **	0.01959 **	0.10845 **	0.01449 *	0.00041 ns	0.00007 ns	0.08858 °	0.12236 **	1972.10 ns	2.31213 *	7231.13 ns	169416.3°	23.47019ns
Experimento x solo x tratamento	8	0.10443 ns	0.00276 ns	0.00962 ns	0.00386 ns	0.00056 ns	0.00008 ns	0.06418 ns	0.00606 ns	744.131 ns	0.21363 ns	3351.16 ns	58003.27ns	14.27253ns
Resíduo	56	0.07613	0.00483	0.02142	0.00524	0.00046	0.000089	0.045296	0.008869	1295.351	0.898446	4375.201	91326.29	27.94802
CV ^{1/} (%)		21.8	36.7	15.6	18.4	18.1	30.1	28.4	11.95	46.6	56.3	34.3	37.6	36.5

1/ coeficiente de variação; 2/ ns, **, *, °: F não significativo a 5%, significativo a 1, 5 e 10%, respectivamente.

4.4.2.2. Macronutrientes

Analisando-se as concentrações de macronutrientes encontrados no tecido foliar observou-se que, em geral, os valores de nitrogênio situaram-se dentro da faixa típica da cultura de eucalipto no campo, referida na literatura (Gonçalves, 1995; Judd et al., 1996) nos solos PAd1 e PAd2, sendo que no solo RQo as concentrações foliares apresentaram valores baixos, sugerindo uma restrição nutricional. Os teores de potássio e fósforo situaram-se dentro das respectivas faixas de suficiência referidas na literatura para árvore de eucalipto, sendo encontrado para o P concentrações um pouco acima da faixa de referência. No caso de enxofre, cálcio e magnésio, as concentrações ficaram abaixo da faixa típica (Judd et al., 1996; Novais et al., 1990), sendo que os teores de Ca situaram-se próximos ao limite inferior dos valores já encontrados para plantio de eucalipto (Judd et al., 1997), o fato de não ter sido feita calagem inicial dos solos pode ter contribuído para a restrição deste nutriente. Quanto ao S, seus teores foliares foram aproximadamente um terço dos teores tidos como adequados (Judd et al., 1996). Este fato sugere ter havido alguma limitação quanto a esse nutriente, o que não é compatível com seu aporte via aplicação do ETFC (Quadro 10).

Verificou-se pequeno decréscimo na concentração de N no tecido das plantas nos argissolos de média/argilosa (PAd1) e arenosa/média (PAd2) com a aplicação de ETFC, o que pode ser atribuído à necessidade de distribuição na maior massa aérea e radicular produzida nesses solos. No solo de textura grosseira (RQ_o), a massa da parte aérea decresceu e a massa de raízes manteve-se constante com as taxas de ETFC aplicadas, não havendo significativa alteração na concentração de N no tecido foliar.

A concentração de fósforo no tecido foliar das plantas cultivadas em solos de média/argilosa (PAd1) e arenosa/média (PAd2) não foi influenciada pelas taxas de aplicação de ETFC. No caso do solo arenoso (RQ_o), observa-se ganho em concentração de P no tecido foliar decorrente de maior disponibilidade desse nutriente com a aplicação de taxas crescentes de ETFC. No solo arenoso, como a adsorção de P foi baixa, praticamente todo o P aplicado via ETFC ficou disponível para as plantas, razão pela qual a

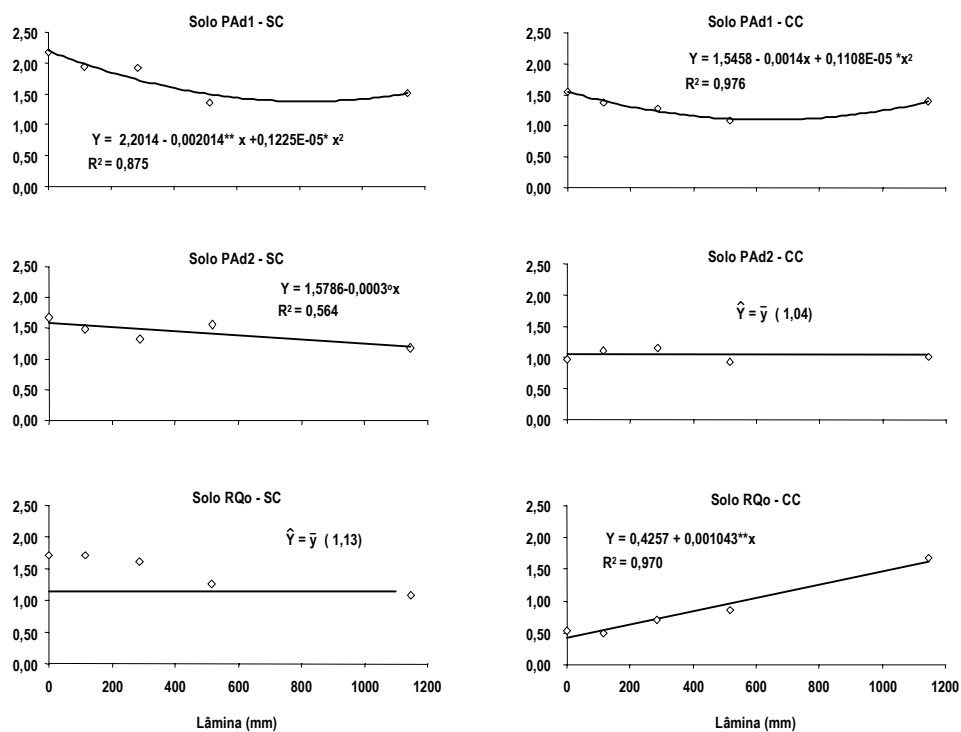


Figura 26 - Concentração de nitrogênio total (dag.kg^{-1}) na folha de plantas de eucalipto cultivadas nos solos PAD1, PAD2 e RQ_o submetidos, por um período de 180 dias, à aplicação contínua de ETFC, sendo: SC, sem a aplicação de chuvas simuladas e CC - com a aplicação de chuvas simuladas (* *, *, °: F significativo a 1, 5 e 10%, respectivamente).

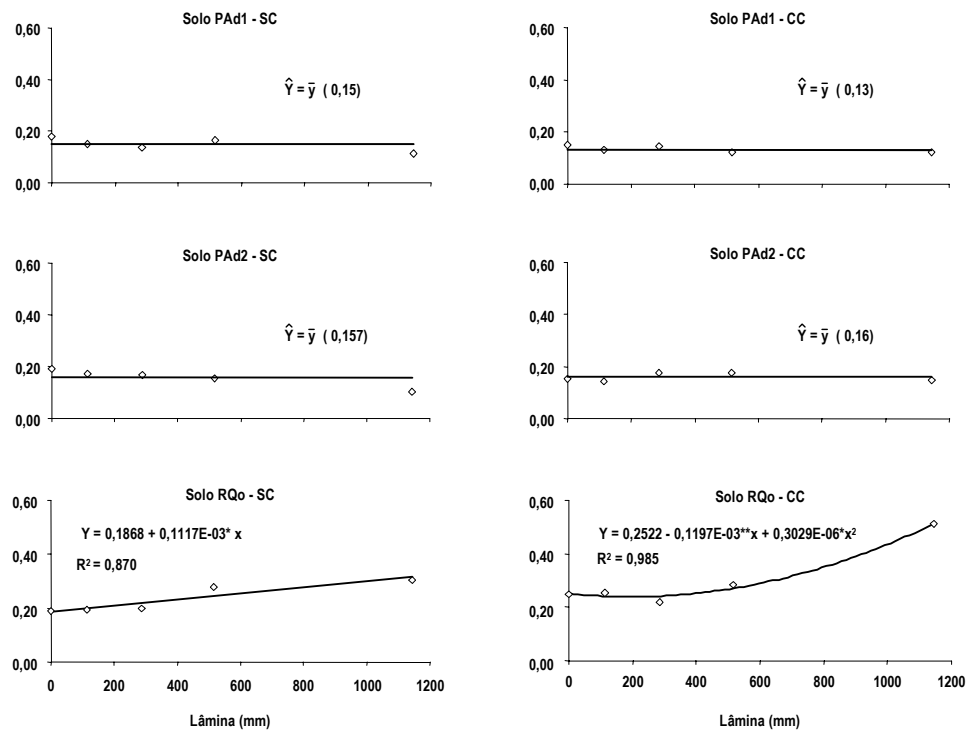


Figura 27 - Concentração de fósforo (dag.kg^{-1}) nas folhas de plantas de eucalipto cultivadas nos solos PAd1, PAd2 e RQ_o submetidos, por um período de 180 dias, à aplicação contínua de ETFC, sendo: SC, sem a aplicação de chuvas simuladas e CC - com a aplicação de chuvas simuladas (* *, *, °: F significativo a 1, 5 e 10%, respectivamente).

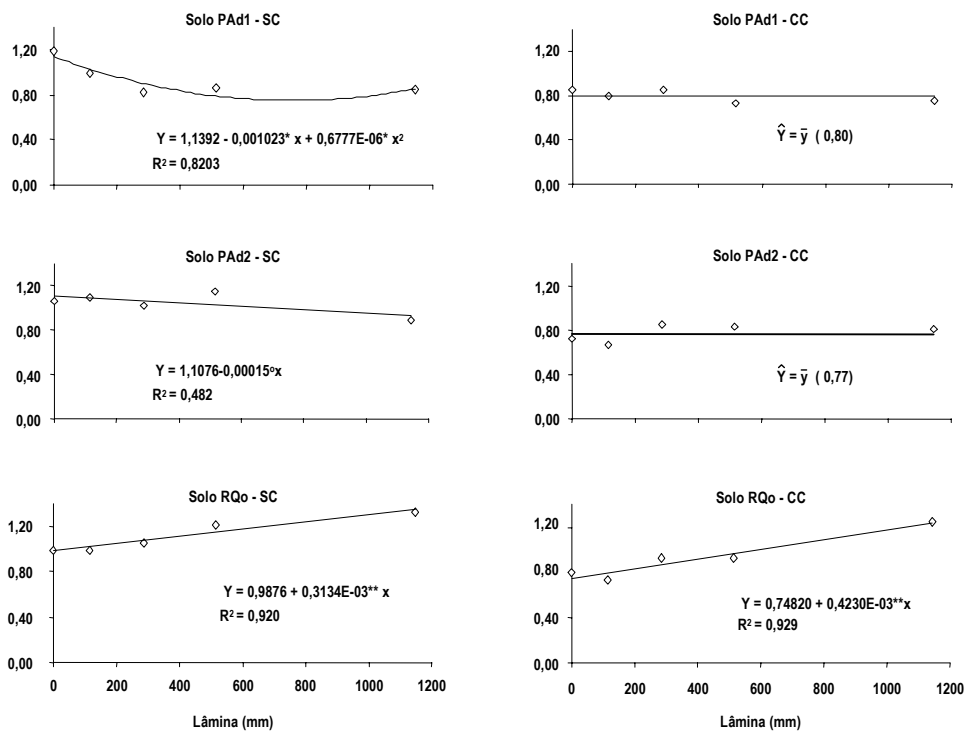


Figura 28 - Concentração de potássio (dag.kg^{-1}) nas folhas das plantas de eucalipto cultivadas nos solos PAd1, PAd2 e RQ_o submetidos, por um período de 180 dias, à aplicação contínua de ETFC, sendo: SC, sem a aplicação de chuvas simuladas e CC - com a aplicação de chuvas simuladas (* *, *, °: F significativo a 1, 5 e 10%, respectivamente).

concentração de P nas folhas das plantas de eucalipto podem ter aumentado. O efeito chuva simulada contribuiu também com aumento da disponibilidade do P, elevando as concentrações deste no material foliar do solo RQo.

A maior adsorção e rápida indisponibilidade do fósforo aplicado nos solos de textura fina e média pode ser a principal razão para que não se tenha observado proporcional aumento na concentração de P no tecido vegetal, considerando-se que a quantidade aplicada aumentou com o incremento da taxa de ETFC.

Pequena variação foi observada na concentração de potássio no tecido foliar das plantas cultivadas nos solos de textura média/argilosa (PAd1) e arenosa/média (PAd2), que tenderam a decrescer. Aumentos significativos na concentração de K foram observados no solo de textura grosseira (RQ_o). A maior disponibilidade de K, decorrente do aporte proporcionado pela aplicação de taxas crescentes de ETFC, pode ser a principal razão para os resultados encontrados.

Sabe-se que potássio em excesso pode ser prejudicial à absorção de magnésio pelas plantas (Borket et al., 2001), o que pode ser um dos fatores que concorreram para a deficiência de magnésio no tecido foliar.

4.4.2.3. Micronutrientes

Em relação aos micronutrientes, as concentrações de zinco e cobre no tecido foliar (Quadro 21) situaram-se abaixo da faixa de suficiência considerada por Judd et al. (1996). As concentrações de ferro encontradas estão dentro da faixa típica, que é de 150 a 200 mg kg⁻¹, enquanto para manganês os valores estiveram acima dos valores da base de dados considerada por Judd et al. (1996) e Novais et al. (1990), que é de 100 a 600 mg kg⁻¹. A concentração de boro, em geral, suplantou os valores de referência (25 a 50 mg kg⁻¹), com exceção do encontrado em plantas que receberam mais altas taxas de ETCP, nos solos de textura média/argilosa (PAd1) e arenosa/média (PAd2).

A concentração de cloreto no material foliar pode ser considerada alta embora os valores normalmente encontrados sejam de 35 mg kg⁻¹. Marschner (1995) assume 1,0 mg kg⁻¹ de Cl na matéria seca da parte aérea como

deficiência crítica. Segundo Malavolta et al. (1997), para exercer suas funções as plantas, em geral, não necessitam mais do que 100 g kg^{-1} de Cl^- na matéria seca, e por isso o elemento está na lista de micronutrientes. Entretanto segundo o autor, o tecido vegetal freqüentemente apresenta 20-200 vezes mais, indicação de que o cloro, ao contrário do que acontece com outros micronutrientes, não é tóxico em concentrações relativamente elevadas.

4.4.2.4. Sódio

A concentração de sódio no tecido foliar foi mais significativamente alterada nas plantas cultivadas no solo de textura grosseira, quando se verificou valores quase três vezes maiores que os naturalmente obtidos nesse solo. Estas altas concentrações de Na no tecido foliar das plantas podem ser uma das principais razões por terem sido obtidas menores produções de massa seca de parte aérea e raízes, diâmetro de lenho e altura de planta nos solos de textura grosseira.

A aplicação de chuvas simuladas proporcionou concentrações mais baixas de Na no tecido foliar das plantas de eucalipto em todos os solos. Os teores foliares de sódio situaram acima do valor médio da faixa típica verificada por Judd et al. (1996), para plantios de eucaliptos. A relação entre os teores foliares de K e Na foi em torno de 1, evidenciando assim, a possibilidade de haver contribuição de Na em algumas funções exercidas pelo K na planta, notadamente funções de regulação osmótica.

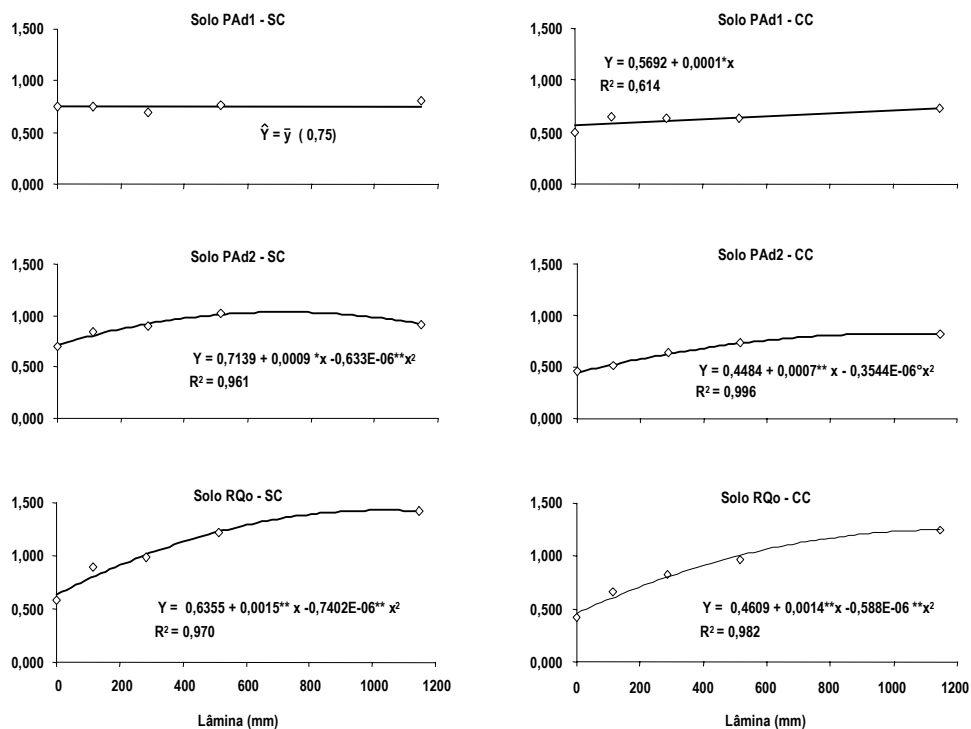


Figura 29 - Concentração de sódio (dag.kg⁻¹) nas folhas das plantas de eucalipto nos solos PAd1, PAd2 e RQ_o submetidos, por um período de 180 dias, à aplicação contínua de ETFC, sendo: SC, sem a aplicação de chuvas simuladas e CC - com a aplicação de chuvas simuladas (* *, *, °: F significativo a 1, 5 e 10%, respectivamente).

Quadro 23 - Equações de regressão ajustadas para os teores de nutrientes e de sódio nas folhas das plantas de eucalipto no solo PAd1 submetido, por um período de 180 dias, à aplicação contínua de ETFC.

Variável	Tratamento ^{1/}	Equação ajustada ^{2/}	R ²
Nitrogênio	SC	$\hat{Y}=2,2014 - 0,002014^{**}x + 0,1225E-05x^2$	0,875
	CC	$\hat{Y}=1,5458 - 0,001407x + 0,1108E-05x^2$	0,975
Fósforo	SC	$\hat{Y} = \bar{y}$	-
	CC	$\hat{Y} = \bar{y}$	-
Potássio	SC	$\hat{Y}=1,1392 - 0,001023x + 0,6777E-6x^2$	0,820
	CC	$\hat{Y} = \bar{y}$	-
Cálcio	SC	$\hat{Y}=0,4681 - 0,1574E-03^{**}x$	0,787
	CC	$\hat{Y}=0,4836 - 0,1565E-03^{**}x$	0,890
Magnésio	SC	$\hat{Y}=0,1650 - 0,5128E-03^{**}x + 0,1107E-05x^2 - 0,6197E-09x^3$	0,965
	CC	$\hat{Y}=0,1426 - 0,1374E-03x + 0,7618E-07x^2$	0,905
Enxofre	SC	$\hat{Y} = \bar{y}$	-
	CC	$\hat{Y}=0,0381 - 0,9392E-04x + 0,3089E-09x^2$	0,995
Cloreto	SC	$\hat{Y} = \bar{y}$	-
	CC	$\hat{Y} = \bar{y}$	-
Sódio	SC	$\hat{Y} = \bar{y}$	-
	CC	$\hat{Y}=0,5692 + 0,1404x$	0,614
Boro	SC	$\hat{Y} = \bar{y}$	-
	CC	$\hat{Y} = \bar{y}$	-
Cobre	SC	$\hat{Y} = \bar{y}$	-
	CC	$\hat{Y} = \bar{y}$	-
Ferro	SC	$\hat{Y}=156,85 + 0,1144^{**}x$	0,816
	CC	$\hat{Y} = \bar{y}$	-
Manganês	SC	$\hat{Y} = \bar{y}$	-
	CC	$\hat{Y} = \bar{y}$	-
Zinco	SC	$\hat{Y}=18,0327 - 0,007335x$	0,632
	CC	$\hat{Y} = 18,2045 - 0,005860x$	0,696

1/SC, sem a aplicação de chuvas simuladas e CC com a aplicação de chuvas simuladas.

2/ (* *, *, ° : F significativo a 1, 5 e 10%, respectivamente).

Quadro 24 - Equações de regressão ajustadas para os teores de nutrientes e de sódio nas folhas de eucalipto no solo PAd2 submetido, por um período de 180 dias, à aplicação contínua de ETFC.

Variável	Tratamento ^{1/}	Equação ajustada	R ²
Nitrogênio	SC	$\hat{Y}=1,5785 - 0,0003232^{\circ}x$	0,564
	CC	$\hat{Y}=\bar{y}$	-
Fósforo	SC	$\hat{Y}=\bar{y}$	-
	CC	$\hat{Y}=\bar{y}$	-
Potássio	SC	$\hat{Y}=1,1076 - 0,000154^{\circ}x$	0,482
	CC	$\hat{Y}=\bar{y}$	-
Cálcio	SC	$\hat{Y}=0,4659 - 0,0004706^{**}x + 0,2638E-6^{\circ}x^2$	0,918
	CC	$\hat{Y}=\bar{y}$	-
Magnésio	SC	$\hat{Y}=0,1580 - 0,1921E-03^{**}x + 0,1218E-06^{**}x^2$	0,938
	CC	$\hat{Y}=\bar{y}$	-
enxofre	SC	$\hat{Y}=0,04059 - 0,1309E-03x + 0,3341E-06x^2 - 0,2006E-09^{\circ}x^3$	0,850
	CC	$\hat{Y}=\bar{y}$	-
Cloreto	SC	$\hat{Y}=\bar{y}$	-
	CC	$\hat{Y}=0,6779 + 0,3419E-03^*$	0,919
Sódio	SC	$\hat{Y}= 0,7139 + 0,9031E-03^*x - 0,6336E-06^{**}x^2$	0,961
	CC	$\hat{Y}= 0,4484 + 0,7311E-03^{**}x - 0,3544E-06^{\circ}x^2$	0,996
Boro	SC	$\hat{Y} = 97,4239 - 0,06464^{**}x$	0,786
	CC	$\hat{Y}=\bar{y}$	-
Cobre	SC	$\hat{Y}= 2,768 - 0,01203x + 0,3499E-04x^2 - 0,2233E-07^*x^3$	0,992
	CC	$\hat{Y}=\bar{y}$	-
Ferro	SC	$\hat{Y}= 166,826 + 0,09395^*x$	0,867
	CC	$\hat{Y}=\bar{y}$	-
Manganês	SC	$\hat{Y}=\bar{y}$	-
	CC	$\hat{Y}=\bar{y}$	-
Zinco	SC	$\hat{Y}=16,7775 - 0,008719^*x$	0,792
	CC	$\hat{Y}=19,4405 - 0,1051^*x + 0,2309E-03^*x^2 - 0,1298E-06^*x^3$	0,806

1/ SC, sem a aplicação de chuvas simuladas e CC com a aplicação de chuvas simuladas (**, * , ° : F significativo a 1, 5 e 10%, respectivamente).

Quadro 25 - Equações de regressão ajustadas para os teores de nutrientes e de sódio nas folhas de eucalipto no solo RQ₀ submetido, por um período de 180 dias, à aplicação contínua de ETFC

Variável	Tratamento ^{1/}	Equação ajustada	R ²
Nitrogênio	SC	$\hat{Y} = \bar{y}$	-
	CC	$\hat{Y} = 0,4257 + 0,001043^{**}x$	0,970
Fósforo	SC	$\hat{Y} = 0,1868 + 0,1117E-03^{*}x$	0,869
	CC	$\hat{Y} = 0,2522 - 0,1197E-03^{**}x + 0,3029E-06^{*}x^2$	0,985
Potássio	SC	$\hat{Y} = 0,9875 + 0,3134E-03^{**}x$	0,920
	CC	$\hat{Y} = 0,7482 + 0,4230E-03^{**}x$	0,929
Cálcio	SC	$\hat{Y} = 0,5879 - 0,001848x + 0,3944E-05^{**}x^2 - 0,2141E-08^{*}x^3$	0,837
	CC	$\hat{Y} = 0,4605 - 0,4185E-03x + 0,2904E-06^{*}x^2$	0,705
Magnésio	SC	$\hat{Y} = 0,1927 - 0,4665E-03^{**}x + 0,9152E-06^{**}x^2 - 0,5059E-09^{*}x^3$	0,952
	CC	$\hat{Y} = 0,1384 - 0,1465E-03^{**}x + 0,8479E-07^{0}x^2$	0,872
Enxofre	SC	$\hat{Y} = \bar{y}$	-
	CC	$\hat{Y} = 0,01976 + 0,1317E-04^{*}x$	0,697
Cloreto	SC	$\hat{Y} = 0,6818 + 0,3074E-03^{*}x$	0,583
	CC	$\hat{Y} = 0,7415 + 0,2383E-03^{0}x$	0,436
Sódio	SC	$\hat{Y} = 0,6355 + 15,3176^{**}x - 0,7402E-06^{**}x^2$	0,970
	CC	$\hat{Y} = 0,4609 + 0,001356^{**}x - 0,5875E-06^{**}x^2$	0,982
Boro	SC	$\hat{Y} = 203,951 - 0,1234^{**}x$	0,862
	CC	$\hat{Y} = 124,257 - 0,03921^{0}x$	0,386
Cobre	SC	$\hat{Y} = 1,8079 + 0,001467^{*}x$	0,575
	CC	$\hat{Y} = 0,3052 + 0,001346^{*}x$	0,958
Ferro	SC	$\hat{Y} = 149,763 + 0,1480^{**}x$	0,972
	CC	$\hat{Y} = 66,8850 + 0,1903^{**}x$	0,882
Manganês	SC	$\hat{Y} = 1374 + 5,2795x - 0,01295^{*}x^2 + 0,7222E-05^{*}x^3$	0,954
	CC	$\hat{Y} = 938,746 + 2,0357^{0}x - 0,001449^{*}x^2$	0,856
Zinco	SC	$\hat{Y} = 21,8801 - 0,007498^{*}x$	0,530
	CC	$\hat{Y} = \bar{y}$	-

1/SC, sem a aplicação de chuvas simuladas e CC com a aplicação de chuvas simuladas (*, **, ° : F significativo a 1, 5 e 10%, respectivamente).

4.4.3. Avaliações visuais das plantas

No acompanhamento do desenvolvimento das plantas, por avaliações visuais durante o período experimental, foram observadas algumas injúrias que não podem, porém, ser atribuídas a efeitos da aplicação do ETFC, visto que tais injúrias ocorreram, também, no tratamento testemunha (sem aplicação do ETFC) e que foram amenizadas com a aplicação de chuvas simuladas. Os principais sintomas observados foram mudança de cor e deformações na parte aérea (Figura 30, 31 e 32).

Não foi observada nenhuma anormalidade visual nas plantas que caracterizassem sintomas provocados por doenças abióticas cujas causas estão relacionadas com temperatura, umidade, ou luminosidade adversa, e nem por doenças bióticas de causas parasitológicas, conforme descrito por Ferreira (1989).

As injúrias reportadas pareceram estar mais bem associadas a deficiências nutricionais, decorrentes de uma adubação inicial deficiente do que, propriamente, à toxicidade proporcionada por um possível excesso de sais no meio. Pelo princípio do método de avaliação visual, cada nutriente executa função ou funções específicas na planta, e sua deficiência provoca sintomas característicos. Por serem parcialmente móveis (cobre, ferro, manganês e molibdênio e zinco) e imóveis (boro) dentro da planta, os sintomas visuais de deficiência desses nutrientes aparecem nos tecidos mais novos, terço superior das copas e ponta de galhos. Efeitos tóxicos podem ocorrer, de forma direta, pela presença de íons presentes em excesso. Estes efeitos estão ligados a desarranjos no funcionamento de sistemas enzimáticos das plantas.

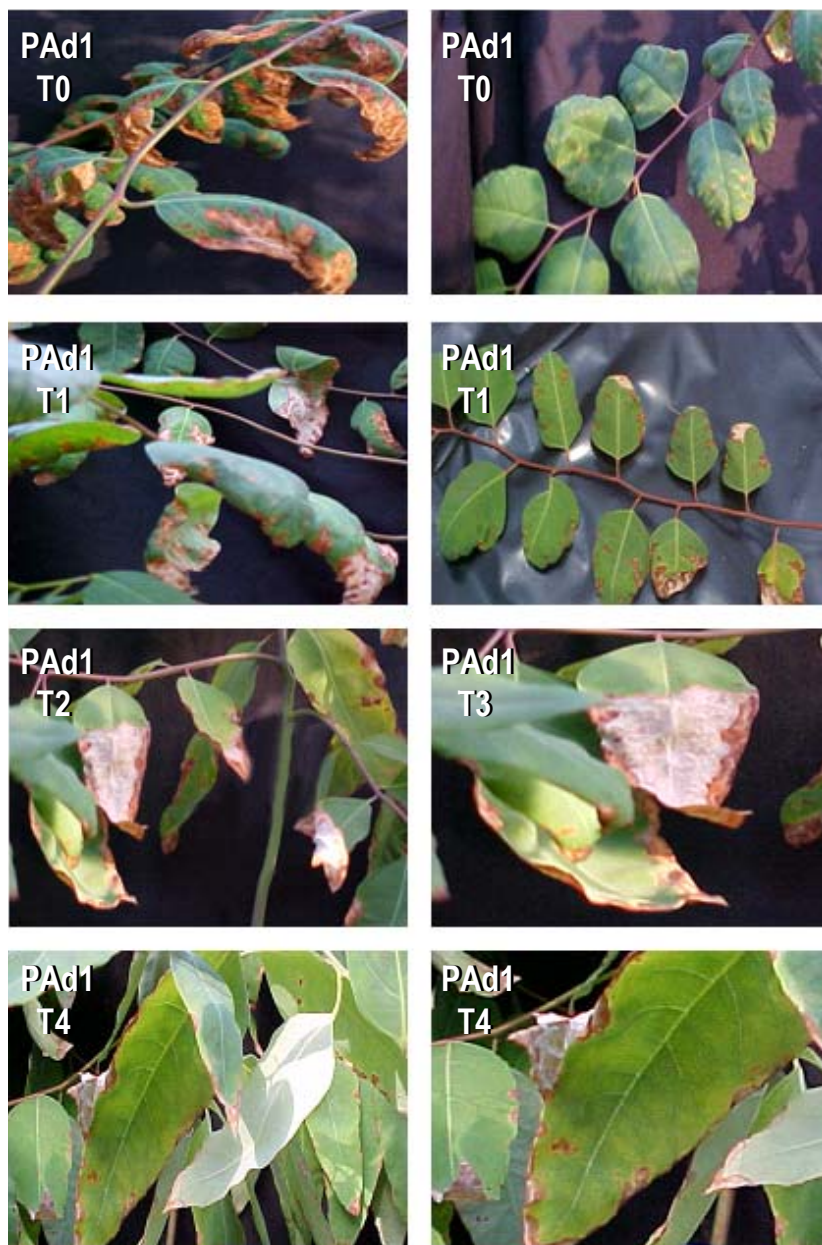


Figura 30 - Sintomas visuais nas plantas de eucalipto no solo PAd1 submetido, por um período de 180 dias, à aplicação contínua de ETFC, sendo os tratamentos T₀ (testemunha), T₁ (lâmina de 114,6 mm), T₂ (lâmina de 286,5 mm), T₃ (lâmina de 515,7 mm), e T₄ (lâmina de 1146 mm).

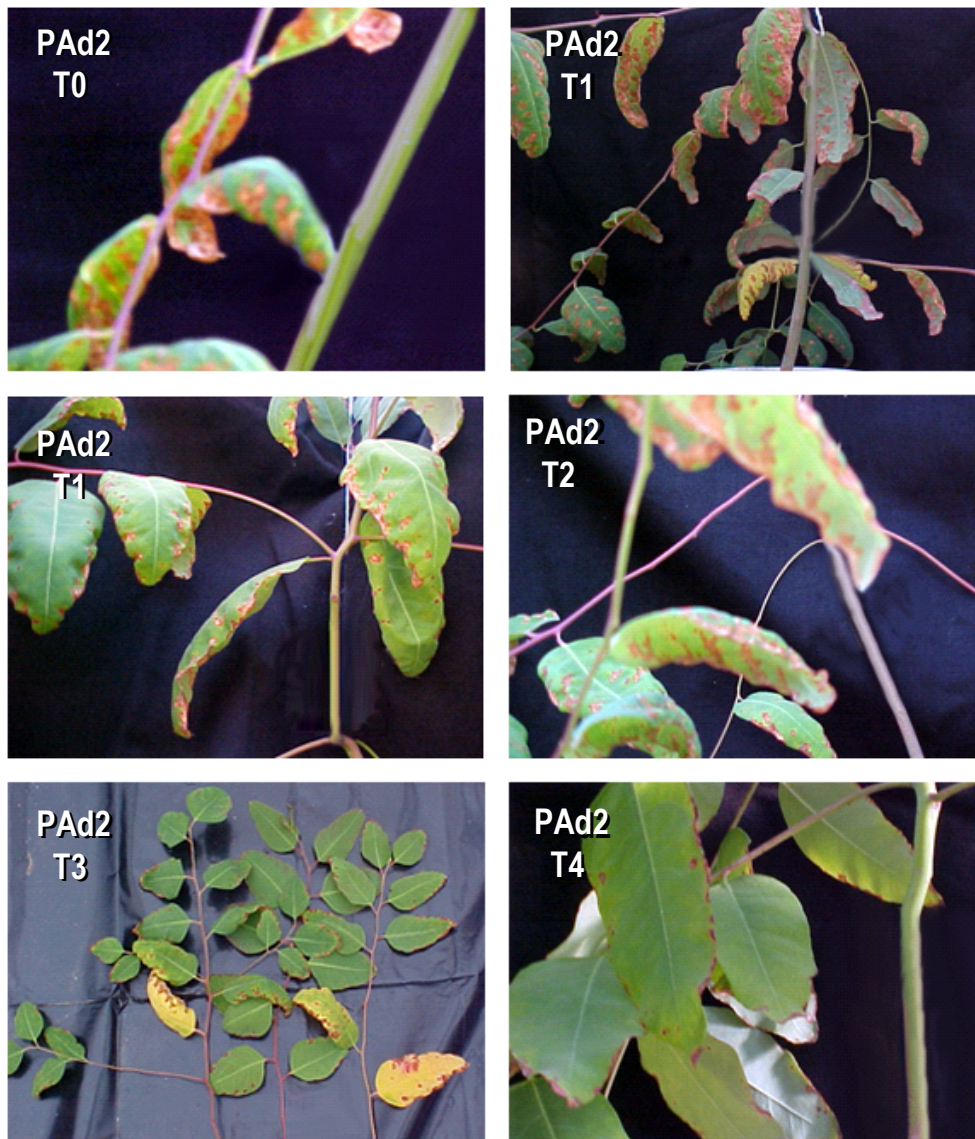


Figura 31 - Sintomas visuais nas plantas de eucalipto no solo PAd2 submetido, por um período de 180 dias, à aplicação contínua de ETFC, sendo os tratamentos T₀ (testemunha), T₁ (lâmina de 114,6 mm), T₂ (lâmina de 286,5 mm), T₃ (lâmina de 515,7 mm), e T₄ (lâmina de 1146 mm).

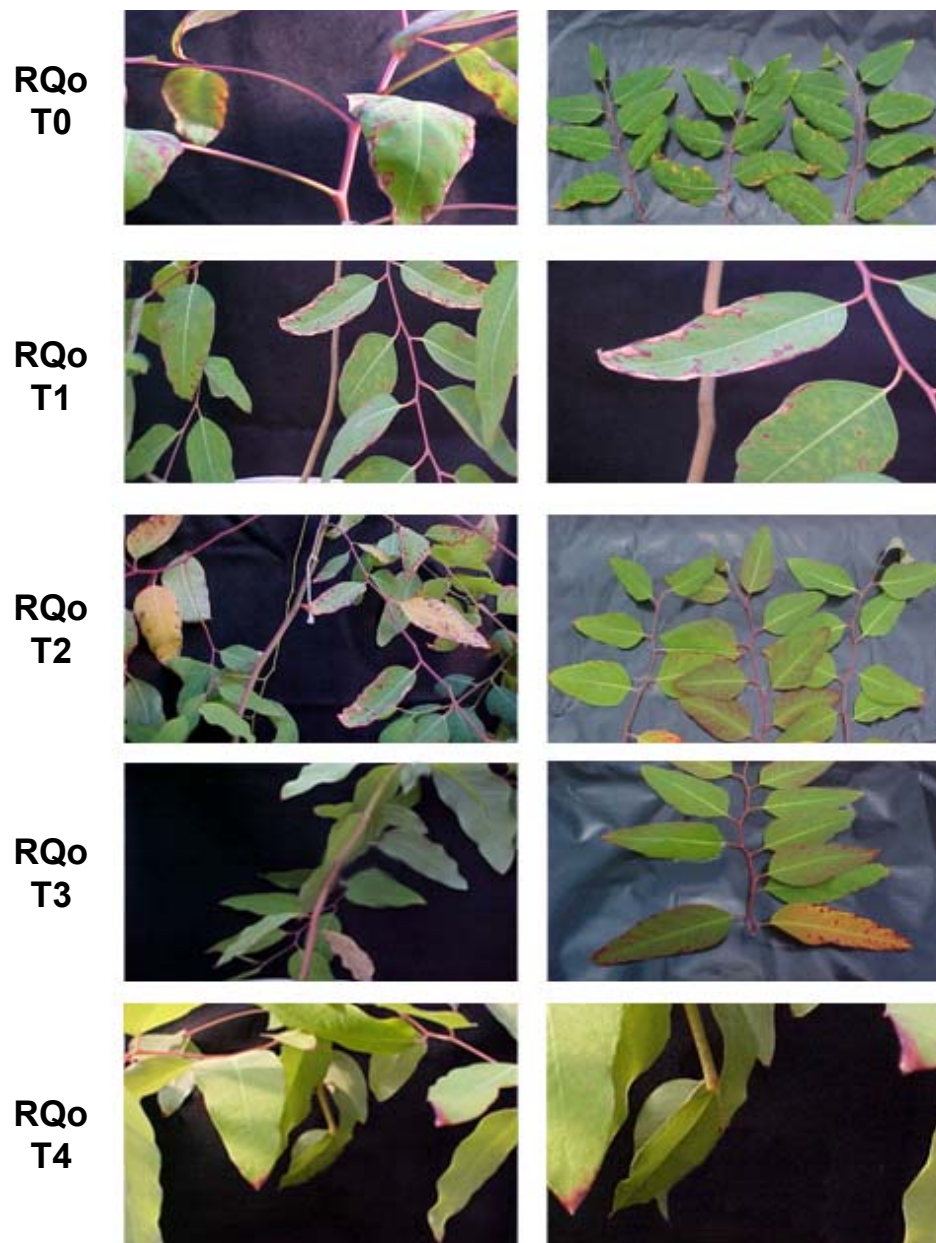


Figura 32 - Sintomas visuais nas plantas de eucalipto no solo RQo submetido, por um período de 180 dias, à aplicação contínua de ETFC, sendo os tratamentos T0 (testemunha), T1 (lâmina de 114,6 mm), T2 (lâmina de 286,5 mm), T3 (lâmina de 515,7 mm), e T4 (lâmina de 1146 mm).

5. CONCLUSÕES

Este estudo, conduzido por meio de experimentos em ambientes controlados (casa-de-vegetação), teve como objetivo a investigação e análise dos efeitos da fertirrigação de eucalipto com efluente tratado do processo de fabricação da celulose branqueada (ETFC) sobre o sistema solo-água-planta de eucalipto.

As principais conclusões do estudo foram as seguintes:

- Com base nas características físico-químicas do ETFC, a maior parte dos parâmetros encontra-se com valores dentro dos limites aceitos para uso como água de irrigação. Entretanto, a avaliação do efluente como água de irrigação apresentou restrições no que se refere à condutividade elétrica ou salinidade do solo, com base nos dados de sólidos totais dissolvidos; aos efeitos na permeabilidade do solo, através da avaliação conjunta dos valores de condutividade elétrica e da razão de adsorção de sódio (RAS); e ao tipo de irrigação, aplicação por aspersão e superficial, considerando-se efeitos tóxicos dos cloretos e sódio em culturas sensíveis. A concentração de sólidos em suspensão, acima do limite de 50 mg L^{-1} , exige uma filtração preliminar do ETFC para aplicação em irrigação por gotejamento;
- O ETFC apresentou níveis baixos de alguns nutrientes, como Mg, indicando, com isso, a necessidade de complementação destes nutrientes

na fertirrigação, enquanto as baixas concentrações de metais pesados não devem ser fatores de limitação para o uso do ETFC como fertirrigação;

- Houve expressivo aumento na salinidade dos solos estudados, notadamente nas maiores taxas de ETFC aplicadas, correspondentes à taxas de 4 e 8 t ha⁻¹ de sódio. Embora o ETFC apresente RAS elevada, a alta condutividade elétrica contrabalançou o seu efeito dispersante da argila do solo;
- Os Argissolos de textura média/argilosa (PAd1) e arenosa/média (PAd2) apresentaram maior capacidade de retenção de água, não apresentando percolado, procedente tanto da aplicação do ETFC quanto da aplicação de chuvas simuladas;
- O solo de textura arenosa (RQ_o) apresentou vulnerabilidade para contaminação da água subterrânea, apesar das características físicas e químicas da água percolada indicarem que houve atenuação de alguns parâmetros do efluente aplicado, como redução da DBO de 60 para 30 mg L⁻¹, e concentrações mais baixas de micronutrientes e nitrato. Observou-se, para este solo, ganho expressivo na cor do percolado, bem como aumento nas concentrações de elementos como potássio, sódio, cloreto na taxa de aplicação mais alta, correspondente à lâmina de ETFC de 1146 mm, ou seja, 8 t ha⁻¹ de sódio, que suplantaram aqueles valores típicos encontrados nas águas subterrâneas;
- Houve efeito da aplicação do ETFC na produção de biomassa e no crescimento das plantas de eucalipto na idade de 240 dias. As melhores respostas da planta com respeito a estes parâmetros, em geral, ocorreram no Argissolo de textura média/argilosa (solo PAd1) para a lâmina de aplicação estimada de ETFC de 880 mm, correspondente à taxa de aplicação de sódio estimado de 6,49 t ha⁻¹. No Argissolo de textura arenosa/média, solo PAd2, as variáveis de crescimento de planta e produção de biomassa variaram linearmente com as taxas de ETFC, sendo assim, a melhor resposta ocorreu para a maior taxa (lâmina de 1146 mm de

ETFC). O Neossolo Quartzarênico (solo RQo) apresentou os menores valores de crescimento de planta e produção de biomassa, obtendo melhor desempenho nas menores taxas;

- Quanto ao aspecto nutricional das plantas, no geral, as concentrações encontradas nos solos que receberam a aplicação de ETFC foram compatíveis com valores de referência de níveis críticos e faixa de suficiência para a cultura do eucalipto;
- O estudo indicou que ocasionais descargas dos sais acumulados na zona radicular seriam necessárias para minimizar seus efeitos na disponibilidade de água e de toxicidade para as plantas. As lâminas aplicadas de chuva simulada mostraram-se suficientes para permitir lixiviação do sódio e cloreto do perfil dos solos estudados. Assim, a aplicação intermitente do efluente, intercalada por períodos com aplicação de água não salina (chuva ou irrigação), deverá possibilitar a remoção de grande quantidade de sais, especialmente nos solos mais arenosos.

Em geral, o comportamento relativamente bom do sistema solo-planta, quando submetido a diferentes taxas de aplicação do efluente, confirma a possibilidade do aproveitamento agrícola do ETFC.

Considerando-se que o estudo conduzido foi realizado com plantas jovens (de 220 dias de idade) e em período de avaliação relativamente curto, os resultados de comportamento agrônômico devem ser tomados com certa cautela, apesar dos dados obtidos não evidenciarem efeitos negativos da aplicação do ETFC no estresse hídrico e nas taxas de crescimento das mudas de eucalipto. Estudos futuros devem verificar a influência, da aplicação de fertirrigação, em longo prazo, com ETFC nos índices de crescimento do eucalipto, na qualidade do lenho e no rendimento da celulose.

O presente trabalho de pesquisa permitiu avançar no estudo de viabilidade de uso da fertirrigação com água residuária tratada do processo kraft de fabricação da celulose branqueada no manejo de florestas plantadas de eucalipto, de forma a garantir sua sustentabilidade, tendo em vista seu potencial de uso no atual cenário nacional: tendência à escassez de recursos

hídricos, grande volume de efluentes gerado na fabricação da celulose, extensas áreas de plantio de eucalipto próximas à geração de efluentes, grande demanda hídrica e nutricional dos plantios, e necessidade constante de melhoria do desempenho ambiental das empresas. As informações obtidas neste estudo fornecem subsídios para um melhor entendimento do comportamento do ETFC, quando aplicado em plantios de eucalipto em Argissolos e Neossolos quartzarênicos, contribuindo para que se possa estabelecer condições seguras de manejo de acordo com a capacidade de assimilação do sistema solo-planta.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABTCP, Associação Brasileira de Celulose e Papel. Indicadores. In: **O Papel**, São Paulo, n.8, p. 115, agosto. 2003.
- ABASHEYEVA, N. Y.; REVENSKIY, V. A.; KORSUNOVA, T. M. Irrigation of East-Siberian soil with purified paper-mill effluents and the effect on soil properties and plants. **Eurasian Soil Sci.**, v. 25, n. 10, p. 112-120. 1993.
- ABASHEYEVA, N. Y.; REVENSKIY, V. A.; KORSUNOVA, T. M. Influence of industrial effluence of the Selenga Pulp and Paper Mill on soil and plants. **Eurasian Soil Sci.**, v. 28, n. 6, p. 122-130. 1995.
- ABREU, C. A. de; ABREU, M. F. de; RAIJ, B. VAN; BATAGLIA, O. C.; ANDRADE, J. C. Extraction of boron from soil by microwave heating for ICP-AES determination. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 25, n. 19 e 20, p. 3321-3333. 1994.
- ADIN, A.; SACKS, M. Dripper-clogging factors in wastewater irrigation. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v. 117, n. 6, p. 813-826. 1991.
- ADISESHA, H. T.; PURWATI, S.; PANGGABEAN, P. R.; SARIEF, S. E. Utilization of small soda pulp and paper mill effluent for rice field irrigation. **Wat. Sci. Tech.**, v. 35, n. 2, p. 205-212. 1997.
- ALLEN, D. G.; LIU, H. W. Pulp mill effluent remediation methods. In: **Encyclopedia of Environmental Analysis and Remediation**, submitted, ed., John Wiley & Sons. 1997.
- ALVAREZ, V. H.; DIAS, L. E.; RIBEIRO JR., E. S.; SOUZA, R. B.; FONSECA, C. A. **Métodos de análises de enxofre em solos e plantas**. Viçosa: Editora UFV, Universidade Federal de Viçosa, 2001.

- AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION. **Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater**. 19 ed. New York : APHA, AWWA, WPCR, 1995.
- AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION. **Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater**. 20 ed. New York : APHA, AWWA, WPCR, 1997.
- AYERS, R.S.; WESTCOT, D.W. **A qualidade da água na agricultura**. Campina Grande: Universidade Federal da Paraíba, 1991. 218p.
- AW, M.** Saline pulp and paper mill wastewater reclamation using woody species. **MS. Thesis. Arizona, USA: Northern Arizona University, 1994.**
- AW, M.; WAGNER, M; R., TECLE; A., AVERY, C. Land application system to treat pulp and paper mill wastewater in Arizona. In: PULPMILL WASTE UTILIZATION IN THE FOREST. **Proceedings...** Edmonton, Alberta, Canada, 1993.
- BARROS, N.F. **Sustentabilidade da produção de florestas plantadas na região tropical**. Gainesville, Florida: University of Florida, 2000. 123p.
- BARROS, N. F; NOVAIS, R. F. (Ed.). **Relação solo-eucalipto**. Viçosa: Editora Folha de Viçosa, 1990.
- BARROS, N. F.; NOVAIS, R. F.; NEVES, J. C. L. Fertilização e correção do solo para plantio de eucalipto. In: BARROS, N. F. E NOVAIS, R. F. (Ed.). **Relação solo-eucalipto**. Viçosa: Folha de Viçosa, 1990. p. 127-186.
- BARROS, N. F.; NEVES, J. C. L.; NOVAIS, R. F. Recomendação de fertilizantes minerais em plantios de eucalipto. In: GONÇALVES, J.L.M. E BENEDETTIL, W. (Ed.) **Nutrição e fertilização florestal**. Piracicaba: IPEF, 1995. p. 269 – 286.
- BARROS, N.F.; COMERFORD, N.B. Sustentabilidade da produção de florestas plantadas na região tropical. In: ALVAREZ V. et al. (Ed.). **Tópicos em Ciência do Solo**. v. 2. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2002. p. 487-592.
- BARROS, N.F.; NOVAIS, R.F. Eucalypt nutrition and fertilizer regimes in Brazil. In: ATTIWILL, P.M. & ADAMS, M. A. (Ed.). **Nutrition of Eucalypts**. Collingwood: CSIRO Publishing, 1996. p. 335-356.
- BENYON, R.G. et al. Effects of salinity on water use, water stress and growth of effluent-irrigated Eucalyptus grandis. In: POLGLASE, P.J.; TUNNINGLEY, W.M. (Ed.). Land application of wastes in Australia and New Zealand: research and practice. 14th LAND TREATMENT COLLECTIVE MEETING, Canberra, 30 September - 1 October. **Proceedings...** Canberra: CSIRO Forestry and Forest Products, 1996.

- BLOSSER, R. O.; CARON, A. L. Recent Progress in land disposal of mill effluents. **TAPPI**, v.48, n.5, p. 42A. 1965.
- BLOSSER, R. O.; OWENS, E. L. Irrigation and land disposal of pulp mill effluents. **Water and Sewage Works**, v. 9, n.11, p. 424- 426. 1964.
- BORKET, C.M.; PAVAN, M.A.; BATAGLIA, O. C. Disponibilidade de elementos catiônicos: ferro e manganês. In: FERREIRA, M. E.; CRUZ, M. C. P.; RAIJ, B. VAN; ABREU, C. A. (Ed.). **Micronutrientes e elementos tóxicos na agricultura**. Jaboticabal: CNPq/FAPESP/POTAFOS, 2001. p.187-212.
- BRAILE, P.M.; CAVALCANTE, J.E. **Manual de tratamento de águas residuárias industriais**. São Paulo: CETESB, 1979. 764p.
- BRYANT, C. W.; BARKLEY, W. A. Biological dehalogenation of kraft mill wastewaters. **Water Sci. Technology**, v. 24, p. 287-293,1991.
- CAMPOS, J. R. (org.). **Tratamento de esgotos sanitários por processo anaeróbio e disposição controlada no solo**. Rio de Janeiro: ABES, 1999. 464p.
- CARTER, D. N.; GLEADOW, P. Water use reduction in chemical pulp mills. In: WILLIAMSON, P. N. (Ed.). **Water Use Reduction in the Pulp and Paper Industry** - A monograph. Vancouver, B.C.: TAPPI, 1994. p. 53-79.
- COLLINS, T.; ALLEN, D.G. A bench scale aerated lagoon for studying the removal of chlorinated organics. **Tappi J**. April. 1991. p. 231-234.
- COMISSÃO DE FERTILIDADE DO SOLO DO ESTADO DE MINAS GERAIS-CFSEMG. **Recomendação para uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais, 5ª aproximação**. Viçosa, Minas Gerais, 1999.
- CONAMA. CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE (BRASIL). Resolução nº 20, de 18 de junho de 1986. Classifica as águas doces, salobras e salinas do território Nacional, em nove classes, segundo seus usos preponderantes. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil**, Brasília,1986.
- COSTA, E.F.; BRITO R.A.L. Métodos de aplicação de produtos químicos e biológicos na irrigação pressurizada. In: COSTA, E.F.; VIEIRA, R.F.; VIEIRA P. A. (Ed.). **Quimigação, aplicação de produtos químicos e biológicos via irrigação**. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, Centro Nacional de Pesquisa de Milho e Sorgo. Brasília: EMBRAPA-SPI, 1994. 315p.
- CRAWFORD, S. C. Spray irrigation of certain sulfate pulp mill wastes. **Sewage and Industrial Wastes**, v.30, n.20, p. 2306- 2309. 1958.

- CRITES, R.W.; REED, S.C. Technology and costs of wastewater application to forest systems. In: **The forest alternative for treatment and utilization of municipal and industrial wastes**. Washington : University of Washington Press, 1986. p. 349-355.
- CROMER, R. N.; TOMPKINS, D.; BARR, N. J. Intraspecific variation in the response of Pinus radiata to saline and wastewater. **Australian Forest Research**, v.12, p.203-215. 1982.
- CROMER, R. N.; TOMPKINS, D.; BARR, N. J.; HOPMANS, P. Irrigation of Monterey Pine with wastewater: effect on soil chemistry and groundwater composition. **Journal Environmental Quality**, v.13, n.4, p.539 – 542.1984.
- DEEMER, D.; PRESLEY, R. High rate land application for treatment of pulp and paper mill wastewater. In: 1983 TAPPI INTERNATIONAL ENVIRONMENTAL CONFERENCE, Atlanta, USA. **Proceedings...** Atlanta: Tappi, 1983.
- DELL, B.; MALAJACZUK, N.; GROVE, T.S. **Nutrient disorders in plantation eucalypts**. Canberra: Australian Centre for International Agricultural Research, 1995. 104p.
- DOWNES, G.M. et al. Sampling plantation eucalyptus. Australia: CSIRO, 1997.132p.
- DELL, B.; POWER, F.; DONALD, R.; MCINTOSH, J.; PARK, S.; PANG, L. Monitoring environmental effects and regulating pulp and paper discharges: Bay of Plenty, New Zealand. In: SERVOS, M. R. et al. (Ed.). **Environmental Fate and Effects of Pulp and Paper Mill Effluents**, Delray Beach, FL, USA: St. Lucie Press, 1996. p. 627-636.
- EMBRAPA. **Manual de métodos de análise do solo**. 2 ed. Rio de Janeiro: EMBRAPA - Centro Nacional de Pesquisa de Solos, 1997. 247p.
- _____. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. Rio de Janeiro: EMBRAPA - Centro Nacional de Pesquisa de Solos, 1999a. 412p.
- _____. Embrapa Informática Agropecuária. **Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes**. Brasília: Embrapa Comunicação para Transferência de Tecnologia, 1999b. 370p.
- _____. **Levantamento generalizado e semidetalhado de solos da Aracruz Celulose S.A. no Estado do Espírito Santo e no extremo sul do Estado da Bahia e sua aplicação aos plantios de eucalipto** - Boletim de Pesquisa, 1. Rio de Janeiro: EMBRAPA-CNPS, 2000. 111 p.

- FABRES, A.S.; COUTO, C.; CONCEIÇÃO, D. A. Uso de resíduo industrial de celulose em florestas. In: GUERRINI, I.A.; BELLOTE, A.F.J.; BUL, L. T. (Ed.). **Uso de resíduos industriais e urbanos em florestas**. Botucatu: Universidade Estadual Paulista, 1994. p. 121 – 140.
- FAZELI, M. S.; SATHYANARAYAN, S.; SATISH, P. N.; MUTHANNA, L. Effect of paper mill effluents on accumulation of heavy metals in coconut trees near Nanjangud, Mysore District, Karnataka, India. **Environ. Geol. Water Sci.**, v. 17, n. 1, p. 47-50. 1991.
- FEIGIN, A.; RAVINA, I.; SHALHEVET, J. **Irrigation with treated sewage effluent: management for environmental protection**. Berlin: Springer-Verlag, 1991.
- FERREIRA, F. A. **Patologia Florestal: principais doenças florestais no Brasil**. Viçosa: Sociedade de Investigações Florestais, 1989. 570p.
- FERREIRA, M. E.; CRUZ, M. C. P. Micronutrientes na agricultura. In: RAIJ, B; van BATAGLIA O. C. (Ed.). **Análise química de solo**. Piracicaba: POTAFOS/CNPq, 1991. p. 333-356.
- FERREIRA, G. B. **Interferências de matéria orgânica e ferro na dosagem de borro com azometina-H e comparação de extratores para boro disponível no solo**. 1998. 97f. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) - Programa de Pós-Graduação em Solos e Nutrição de Planta, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 1998.
- FLOWER, W. A. Spray irrigation for the disposal of effluents containing deinking waste. **TAPPI**, v. 52, n.7, p.1267. 1969.
- FULLER, W. H.; WARRICK, A. W. **Soils in waste treatment and utilization**. Boca Raton, Florida: CRC Press, Inc., 1985.
- FUNASA. **Portaria nº 1469/2000, de 29 de dezembro de 2000: aprova o controle e vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade**. Brasília: Fundação Nacional de Saúde, 2001. 32p.
- FUNARBE. **SAEG – Sistema para análises estatísticas – versão 5.0**. Viçosa: Fundação Arthur Bernardes. 1993.80p.
- GELLMAN, I. BOD reduction of paper, paperboard and weak pulping wastes by irrigation. **Pulp and Paper Magazine of Canada**, v.61, n.3, T-221.1960.
- GHASSEMI, F. **Salinisation of land and water resources: human causes, extent, management and case studies**. Center for Resource and Environmental Studies. Wallingford: CAB International, 1995. 526p.

- GHEYI, H. R.; QUEIROZ, J. E., MEDEIROS, J. F. (Ed.). Manejo e controle da salinidade na agricultura irrigada. In: SIMPÓSIO MANEJO E CONTROLE DA SALINIDADE NA AGRICULTURA IRRIGADA. **Anais...** Campina Grande: UFPB, 1997. 383p.
- GONÇALVES, J. L. Recomendações de adubação para Eucalyptus, Pinus e espécies típicas da Mata Atlântica. **Documentos Florestais**, v.15, p. 1-23. 1995.
- GONÇALVES, J. L.; VALERI, S. V. Eucalipto e Pínus. In: FERREIRA, M. E.; CRUZ, M. C. P.; RAIJ, B. van; ABREU, C. A. (Ed.). **Micronutrientes e elementos tóxicos na agricultura**. Jaboticabal: CNPq/FAPESP/POTAFOS, 2001. p. 393-423.
- HANSEN, E. A.; DAWSON, D. H.; TOLSTED, D. N. Irrigation of intensively cultured plantations with paper mill effluent. **Tappi**, v.63, n.11, p.139-143. 1980.
- HARRISON, R.B. et al. Mechanisms of negative impacts of three forest treatments on nutrient availability. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, v. 60, p. 1622-1628. 1996.
- HAYMAN, J. P.; SMITH, L. Disposal of saline effluent by controlled-spray irrigation. **Journal Water Pollution Control Federation**, v. 51, n. 3, p. 526- 530. 1979.
- HOEFT, R. G.; WALSH, L. M., AND KEENEY, D. R. Evaluation of various extractants for available sulfur. **Soil Sci. Soc. Am. Proc.** 1973, v. 37, p. 401-404. 1973.
- HOWE, J.; WAGNER, M. The effect of papermill wastewater and organic amendments on sodium accumulation by potted cottonwoods. **Environ. Pollut.**, v. 92, n. 2, p. 13-118. 1996.
- JOKELA, J.K.; LAINE, M; SALKINOJA-SALONEN, M. Effect of biological treatment on halogenated organics on bleached kraft pulp mill effluents studied by molecular weight distribution analysis. **Environ. Sci. Technol.** v. 27, p. 547-557. 1993.
- JOHNSON, B.; RYDER, I. The disposal of pulp and paper mill effluents by spray irrigation onto farmland. In: **Alternative Waste Treatment Systems**, Bhamidimarri, ed., 1988, p 55- 65.
- JUDD, T.S.; ATTIWILL, P. M.; ADAMS, M.A. Nutrient concentrations in Eucalyptus: a synthesis in relation to differences between rate, sites and components. In: ATTIWILL, P.M.; ADAMS, M.A. (Ed). **Nutrition of Eucalyptus**. Camberra: CSIRO, 1996, p. 133-153.
- JUWARKAR, A. S.; SUBRAHMANYAM, P. V. R. Impact of pulp and paper mill wastewater on crop and soil. **Wat. Sci. Tech.**, v. 19, p. 693-700. 1986.

- KANNAN, K.; OBLISAMI, G. Influence of irrigation with pulp and paper mill effluent on soil chemical and microbiological properties. **Biology and Fertility of Soils**, v.10, p.197-201. 1990a
- KANNAN, K.; OBLISAMI, G. Influence of paper mill effluent irrigation on soil enzyme activities. **Soil Biol. Biochem.**, v.22, n. 7, p.923-925, 1990b.
- KEENAN, R. E.; KNIGHT, J. W.; RAND, E. R.; SAUER, M. M. Assessing potential risks to wildlife and sportsmen from exposure to dioxin in pulp and paper mill sludge spread on managed woodlands. **Chemosphere**, v.20, n.10-12, p.1763-1769. 1990.
- KLUTE, A. Laboratory measurement of hydraulic conductivity of saturated soil. In: BLACK, C.A. (Ed). **Methods of soil analysis**. Madison: American Society of Agronomy, 1965. 770p.
- KOOKANA, R. S.; ROGERS, S. L. Effects of pulp mill effluent disposal on soil. **Reviews of Environmental Contamination and Toxicology**, v.142, p.13- 64.1995.
- KULKARNII, U. D. Waste water for irrigation. **Recent Researches in Ecology, Environment and Pollution**, v.1, p. 57-60. 1988.
- LANDON, J. R. (Ed.). **Booker tropical soil manual**. London: Booker, 1984. 450p.
- LEON, S.G.; CAVALLINI, J.M. **Tratamento e uso de águas residuárias industriais**. trad. Campina Grande: Universidade Federal da Paraíba, 1999.110p.
- LOEHR, R.A. **Pollution control for agriculture**. New York: Academic Press, Inc., 1984. 455p.
- MALAVOLTA, E.; VITTI, G. C.; OLIVEIRA, S. A. DE. **Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações**. 2 ed., Piracicaba, SP: POTAFOS, 1997.319 p.
- MARSCHNER, H. **Mineral nutrition of higher plants**. 2ed. London: Academic Press, 1995. 889p.
- MATHESS, G.; HARZEY, A. **The proper of groundwater**. 1st ed. 1982
- MATOS, A. T. **Poluição e seus efeitos**. Brasília: ABEAS/DEA –UFV, 2001. 121p.
- MATOS, A. T.; REZENDE, A.A. Projeto Fertirrigação de Eucaliptus com Efluente Secundário da Indústria de Celulose, Relatório parcial elaborado para Aracruz Celulose. Não publicado. 2002.

- MATOS, A.T. Tratamento e destinação final de resíduos gerados no beneficiamento do fruto do cafeeiro. In: ZAMBOLIN, L. (Ed.). **Produção Integrada de Café**. Viçosa: UFV; DFP, 2003. p. 647-708.
- MATOS, A.T.; BRASIL, M.S.; FONSECA, S.P.P. Aproveitamento de efluentes líquidos domésticos e agroindustriais na agricultura. In: III ENCONTRO DE PRESERVAÇÃO DE MANANCIAS DA ZONA DA MATA MINEIRA, Viçosa, 2003. **Anais...** Viçosa: ABES, 2003. p.25 –79.
- MCKAGUE, A. B.; CARLBERG, G. Effluent characteristics and composition. In: DENCE; REEVE, D. W. (Ed.). **Pulp Bleaching - Principles and Practice**. Atlanta, Georgia: TAPPI Press, 1996. p. 749-765.
- MCNEAL, B. L. Evaluation and Classification of Water Quality for Irrigation. In: YARON D. (Ed.). **Salinity in Irrigation and Water Resources**, New York: Marcel Dekker Inc., 1981. p. 21-45.
- METCALF & EDDY. **Wastewater engineering: treatment, disposal, and reuse**, McGraw - Hill Inc., 1991.
- MYERS, B.; WARREN, B.; FALKINER, R.; OBRIEN, N.; POLGLASE, P.; SMITH, C.; THEIVEYANATHAN, S. **Effluent irrigated plantations: design and management**. CSIRO. Division of Forestry. Technical Paper No. 2. Australia: CSIRO, 1995.
- NAKAYAMA, F.S. Water analysis and treatment techniques to control emitter plugging. In: IRRIGATION ASSOCIATION CONFERENCE, 21-23 February, 1982. **Proceeding ...** Portland, Oregon, 1982.
- NARUM, Q. A. **Disposal of an integrated pulp-paper mill effluent by irrigation**. EPA-600/2-79-033, Cincinnati, OH: USEPA, 1979.
- NCASI. **The land application of wastewater in the forest products industry**. 459, New York, N.Y.: National Council of the Paper Industry for Air and Stream Improvement INC., 1985.
- NEVALAINEN, J.; RANTALA, P.R.; JUNNA, J.; LAMMI, R. Activated sludge treatment of kraft mill effluents from conventional and oxygen bleaching, **Water Sci. Technol.**, v. 24, p. 427-430. 1991.
- NEVES, J.C.L. **Produção e partição de biomassa, aspectos nutricionais e hídricos em plantios clonais de eucalipto na região litorânea do Espírito Santo**. Tese (Doutorado em Produção Vegetal) – Centro de Ciências Agropecuárias. UENF. Campos dos Goytacazes, RJ. 2000.
- NEVES, J.C.L.; BARROS, N.F.; NOVAIS, R. F; ANJOS, J. L. Efeito do alumínio em amostras de dois latossolos sob cerrado sobre o crescimento e a absorção de nutrientes de mudas de *Eucalyptus* spp. **Revista Árvore**, v.6, p. 17-20. 1982.

- NEVES, J.C.L.; NOVAIS, R.F.; BARROS, N.F. Efeito do alumínio em solução nutritiva no crescimento e absorção de nutrientes por *Eucalyptus* spp. **Revista Árvore**, v.6, p. 1-17. 1982.
- NOVAIS, R.F.; BARROS, N.F.; NEVES, J.C.L. Interpretação de análise química do solo para o crescimento de *Eucalyptus* spp.- níveis críticos de implantação e de manutenção. **Revista Árvore**, v.10, p.105-111. 1986.
- NOVAIS, R.F.; BARROS, N.F.; NEVES, J.C.L. Nutrição mineral do eucalipto. In: NOVAIS, R.F.; BARROS, N.F. (Ed.). **Relação solo-eucalipto**. Viçosa: Editora Folha de Viçosa, 1990. p. 25-98.
- NUTTER, W. L.; RED, J. T. Treatment of wastewater by application to forest land. **TAPPI Journal**, n. 68, p. 114-117.1985.
- NUTTER, W. L.; RED, J. T. Future directions: forest wastewater application. In: **The forest alternative for treatment and utilization of municipal and industrial wastes**. Washington : University of Washington Press, 1986. p. 55-61.
- OGDEN, L.; NUTTER, W. U.S. experiences with pulp mill waste water and sludge application in forests. In: PULPMILL WASTE UTILIZATION IN THE FOREST, **Proceedings...** Edmonton, Alberta, Canada, 1993. p. 45-50.
- ORGANIZACIÓN MUNDIAL DE LA SALUD. **Diretrizes sanitarias sobre el uso de aguas residuales en agricultura y acuicultura**. Ginebra: OMS, 1989. 90p. (série Informes Técnicos, 78).
- ORON et al. Storm water and reclaimed effluent in trickle irrigation. **Journal of Irrigation and Drainage Division**. ASCE, v.106, n.104, p. 299-310. 1980.
- OVERCASH, M. R.; PAL, D. **Design of land treatment systems for industrial wastes** – theory and practice. Ann Arbor, Mich.: Ann Arbor Science Publishers Inc., 1979.
- PESCOD, M.B. Wastewater treatment and use in agriculture. FAO. **Irrigation and Drainage Paper**, 47. Rome: FAO, 1992. 125p.
- PEZZUTTI, R.V.; SCHUMACHER, M.V.; HOPPE, J.M. Crescimento de mudas de *Eucalyptus globulus* em resposta à fertilização NPK. **Ciência Florestal**. Universidade Federal de Santa Maria, v.9, n.2, p. 117-125. 1999.
- PHUNG, T. Land cultivation of industrial wastes and solid wastes: state of art, v.1. **Technical Summary and Literature Review**. EPA-600/2-788-140a. Cincinnati, Ohio: Environmental Protection Agency, 1978.

- POLGLASE, P.J.; TUNNINGLEY, W.M. (Ed.). Land application of wastes in Australia and New Zealand: Research and Practice. 14th LAND TREATMENT COLLECTIVE MEETING, Canberra, 30 September - 1 October. **Proceedings...** Canberra: CSIRO Forestry and Forest Products, 1996.
- PRIHA, M. Bioavailability of pulp and paper mill effluent phosphorus. **Wat. Sci. Tech.** v. 29, n.5-6, p.93-103. 1994.
- RAIJ, B. van; QUAGGIO, J.A.; CANTARELLA, H.; ABREU, C.A. Interpretação de resultados de análise de solo. Micronutrientes. In: RAIJ, B. et al. (Ed.). **Recomendações de adubação e calagem para o estado de São Paulo.** 2 ed. Campinas: Instituto Agrônomo e Fundação IAC, 1996. p.12.
- RAJANNAN, G.; OBLISMANI, G. Effect of paper factory effluents on soil and crop plants. **Indian Journal of Environmental Health**, v. 21, n. 2, p.120-130.1979.
- RAV-ACHA, M.; KUMMEL, I.; SALAMON, A. A. The effects of chemical oxidants on effluent constituents for drip irrigation. **Wat. Res.**, v. 29, n.1, p.119-129, 1995.
- REZENDE, A.A. **An overview on land application of bleached pulp and paper mill effluent.** Thesis (Master of Engineering) – Graduate Department of Civil Engineering. University of Toronto. Canada. 1999.
- RHOADES, J.D. Overview: diagnosis of salinity problems and selection of control practices. In: TANJI, K.K. (Ed.) **Agricultural salinity assessment and management.** New York: ASCE, 1990. Cap.2, p. 18-41.
- RHOADES, J.D., KANDIAH, A., MASHALL, A.M. The use of saline waters for crop production. FAO. **Irrigation and Drainage Paper.** v. 48. Rome: FAO, 1992. 133p.
- RIBEIRO JUNIOR, J.I. **Análises estatísticas no SAEG.** Viçosa: UFV, 2001. 301 p.
- RICHARDS, L.A. **Diagnosis and improvement of saline and alkali soils.** Washington D.C.: US Department of Agriculture, 1954.160p.
- ROWE, D. R.; ABDEL-MAGID, I. M. **Handbook for Wastewater Reclamation and Reuse.** Boca Raton, Florida: CRC Press, Inc., 1995.
- SANDRI, D. et al. Efeito do uso de água residuária em sistemas de irrigação por gotejamento superficial e subterrâneo. In: XXX CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, CONBEA, Foz do Iguaçu. **Anais ...** Foz do Iguaçu: CONBEA, 2001.

- SANEPAR. COMPANHIA DE SANEAMENTO DO PARANÁ. **Manual técnico para a utilização agrícola do lodo de esgoto do Paraná**. Curitiba: SANEPAR, 1997. 96p.
- SANKS, R. L.; ASANO, T. **Land treatment and disposal of municipal and industrial wastewater**. Ann Arbor, Michigan: Ann Arbor Science Publishers Inc., 1976.
- SANTOS, A.C. Noções de hidroquímica. In: FEITOSA, F.A.C.; MANOEL FILHO, J. (Ed.). **Hidrogeologia, conceitos e aplicações**. Fortaleza; CPRM, LABFID-UFPE, 1997. p. 81-108.
- SCHOLOTZHAVER, S.D.; LITTELL, R.C. **SAS System for Elementary Statistical Analysis**. 2 ed., Cary, NC: SAS Inst. Inc., 1997.
- SILVA, C.M. Fechamento de circuitos na indústria de celulose e papel. **O Papel**. p. 35-37, Julho. 1997.
- SILVA, C.M. O controle preventivo da poluição: efluentes industriais. **Ação Ambiental**. Viçosa, UFV, n 16, p.19-21. 1999
- SIMON, Z.; TEDESCO, M.J. Uma abordagem ampla sobre tratamento de resíduos semilíquidos em solos agriculturáveis – discussão sobre critérios de controle ambiental. In: 17º CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 1993, Natal. **Anais...** Natal: ABES, 1993.
- SMITH, C. T. et al. Land application of CTMP effluent in New Zealand: from research to practice. In: THIRD INTERNATIONAL CONFERENCE ON ENVIRONMENTAL FATE AND EFFECTS OF PULP AND PAPER MILL EFFLUENTS, Rotorua. **Proceedings...** Rotorua, New Zealand: CSIRO, 1997.
- SMOOK, G.A. **Manual para técnicos de pulpa y papel**. Atlanta : Tappi Press, 1990. 396p.
- SPANGENBERG, J. K. Sustainable development: from catchworks to benchmarks and operational concepts. In: CHARTER, M.; TISCHNER, U. (Ed). **Sustainable solutions: developing products and services for future**. 1 ed. Sheffield: Greenleaf Publishing, 2001. p. 24-48.
- SPRINGER, A. M. **Industrial Environmental Control - Pulp and Paper Industry**. Atlanta, GA: TAPPI Press, 1993.
- SULLIVAN, M. J.; MCCAWE, P. ; HOMES, R. L.; SEWALL, C. H.; SURGENOR, S. D. Multiple exposure pathway risk assessment for dioxin at a bleached pulp mill. **Chemosphere**, v. 20, n. 10-12, p. 1771-1778. 1990.
- SZIKSZAY, M. **Geoquímica das águas**. São Paulo: Boletim IG. n.5. 1993.

- TANJI, K.K. **Agricultural salinity assessment. Manuals and Reports on Engineering Practice.** Davis, California, New York, NY: ASCE, American Society of Civil Engineers, 1990.
- THACKER, W. E. **The land application of wastewater in the forest products industry.** New York, NY: NCASI – National Council of the Paper Industry for Air and Stream Improvement, 1985a.
- THACKER, W. E. Silvicultural land application of wastewater and sludge from the pulp and paper industry. In: **The Forest Alternative for Treatment and Utilization of Municipal Wastes**, Washington D.C.: University of Washington Press, 1985b. p. 41-54.
- TOMÉ JR., J. B. **Manual para interpretação de análise de solo.** Guaíba: Livraria e Editora Agropecuária Ltda, 1997. p. 212.
- UNEP. **Environmental management in the pulp and paper industry.** Technical Report n. 34. France: United Nations Environment Program, Industry & Environment Office, 1996.
- UNIVERSITY OF CALIFORNIA COMMITTEE OF CONSULTANTS. **Guidelines for interpretation of water quality for agriculture.** Davis: University of California, 1974. 13p.
- URIE, D.H. The status of wastewater irrigation of forests, 1985. In: **The forest alternative for treatment and utilization of municipal and industrial wastes.** Washington : University of Washington Press, 1986. p. 26-40.
- U.S.EPA. **Process design manual for land treatment of municipal wastewater.** EPA 625/1-81-013, U.S. Cincinnati, OH.: Environmental Protection Agency, Technology Transfer, 1981.
- U.S.EPA. **Development document for effluent limitation guidelines and standards for pulp, paper and paperboard point source category.** EPA 440/1-82-025. Washington, D.C: U.S. Environmental Protection Agency, 1982.
- U.S.EPA. **Guidelines for water reuse.** U.S. Environmental Protection Agency. Technical Report No. EPA/625/R-92/004. Washington, DC: USEPA, 1992.
- VASCONCELOS, E.; CABRAL. Use and environmental implications of pulp mill sludge as an organic fertilizer. **Environmental Pollution**, v.80, n.1, p.159-162. 1993.
- VIEIRA, D.B. **As técnicas de irrigação.** 2 ed. São Paulo: Globo, 1995. 263p.

- VIEIRA, R. F.; RAMOS, M. M. Fertirrigação. In: RIBEIRO, A. et al. (Ed.) **Recomendação para uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais- 5ª aproximação**. Viçosa, MG: Comissão de Fertilidade do Solo do Estado de Minas Gerais – CFSEMG, 1999. p. 111-130.
- von SPERLING, M. **Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos**. 2 ed. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Minas Gerais, 1996. 243p.
- WADT, P.G.S; NOVAIS, R.F.; FONSECA, S. DRIS: Normas preliminares para clones de *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus urophylla*. In: IUFRO CONFERENCE ON SILVICULTURE NA IMPROVEMENT OF EUCALYPTS, 3, 1997. **Proceedings**...Colombo: EMBRAPA/CNPF, 1997. p. 147-153.
- WESTENHOUSE, R. Irrigation disposal of wastes. **TAPPI**, v.46, n. 8, p.160A. 1960.

APÊNDICE

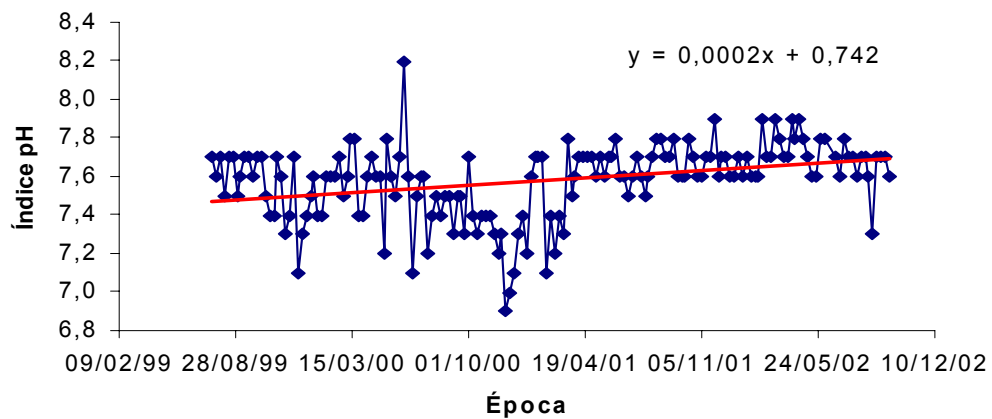
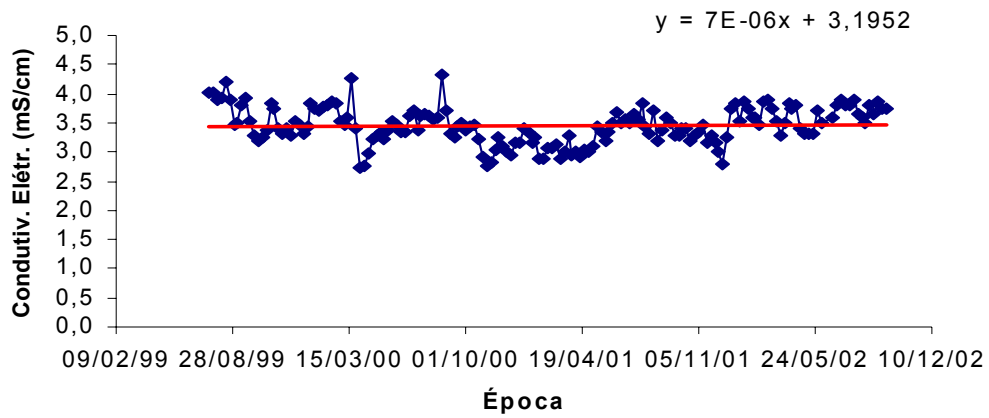
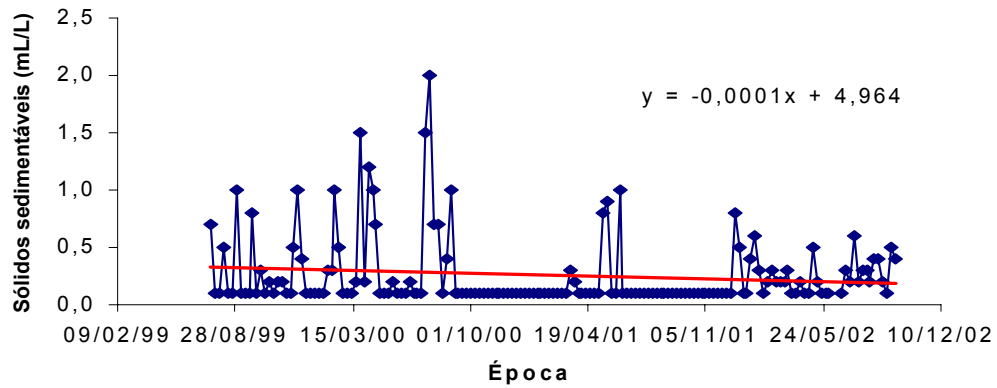


Figura 1A - Variação de atributos físicos e químicos: sólidos sedimentáveis, condutividade elétrica e pH do efluente tratado do processo de fabricação da celulose (ETFC) durante um período de monitoramento de trinta e nove meses.

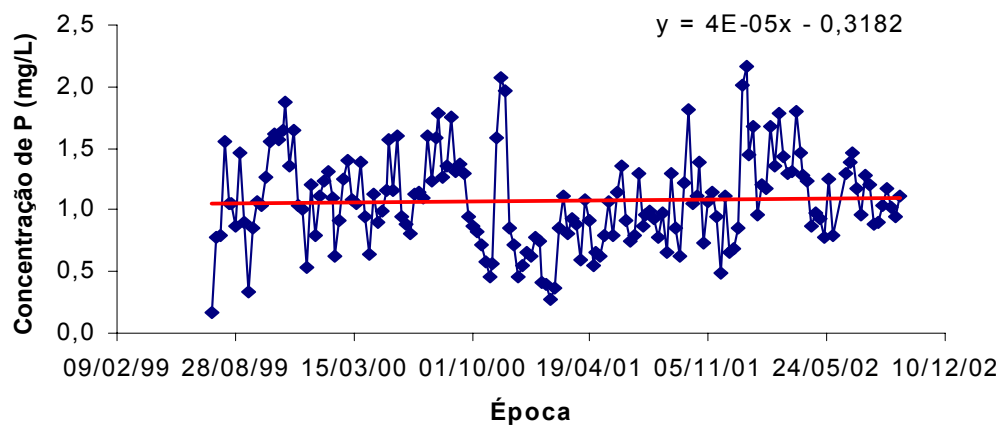
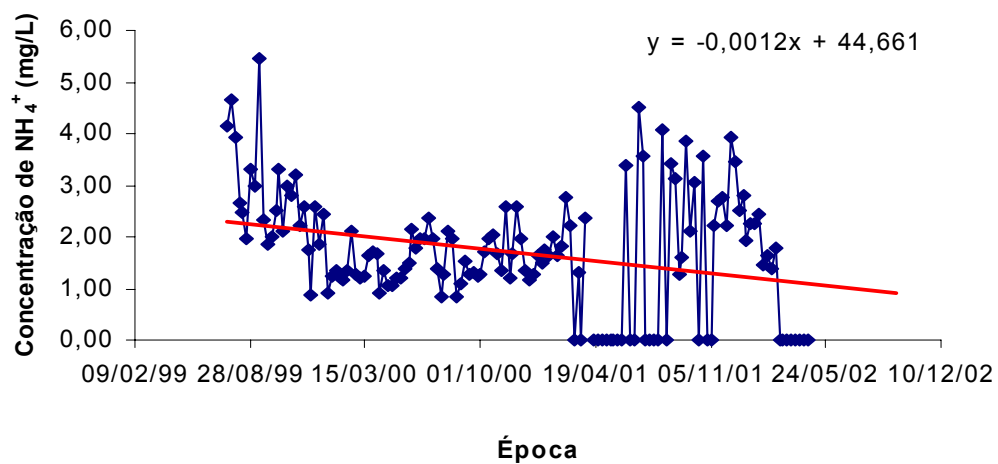
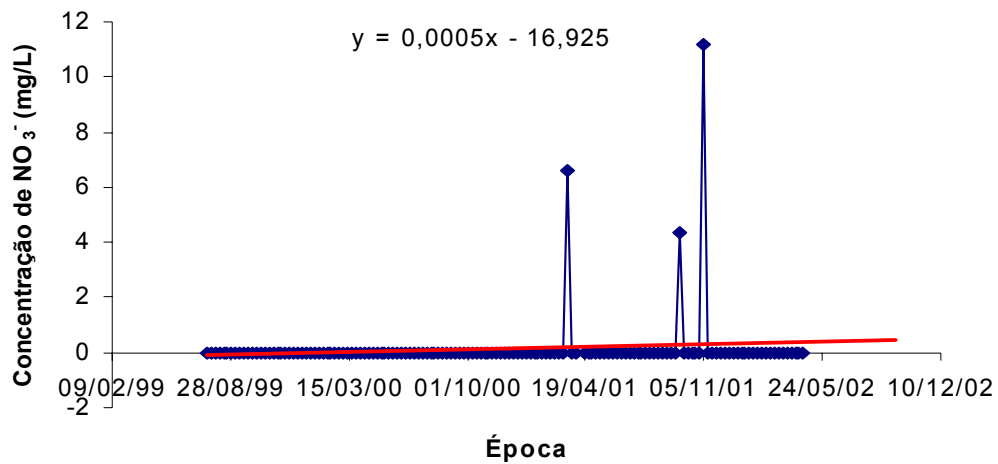


Figura 2A -Variação nas concentrações de nitrato, amônio e fósforo do efluente tratado do processo de fabricação da celulose (ETFC) durante um período de monitoramento de trinta e nove meses.

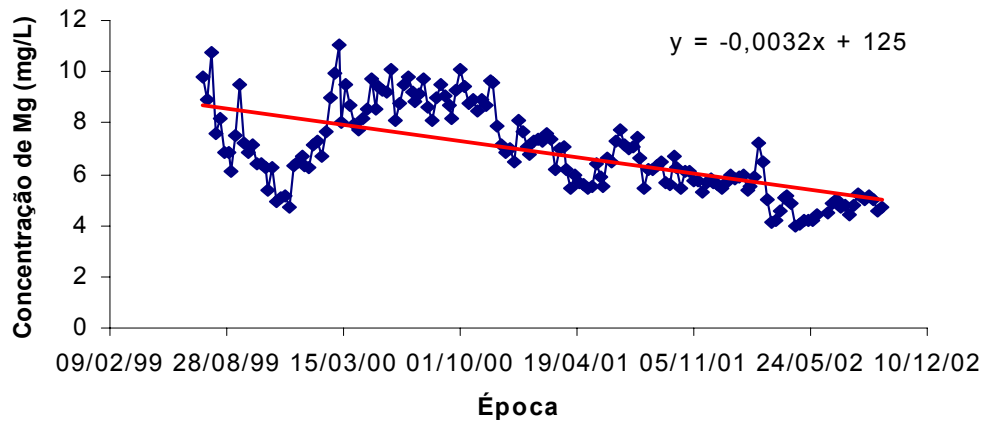
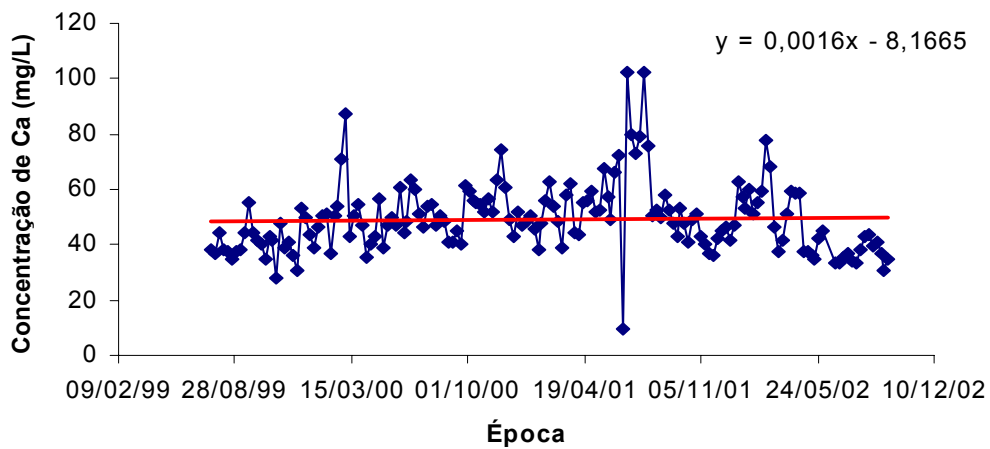
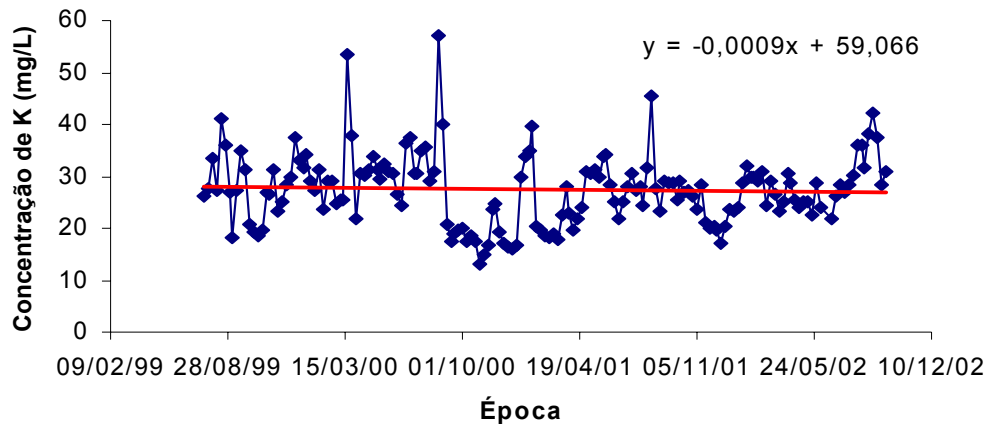


Figura 3A - Variação nas concentrações de potássio, cálcio e magnésio do efluente tratado do processo de fabricação da celulose (ETFC) durante um período de monitoramento de trinta e nove meses.

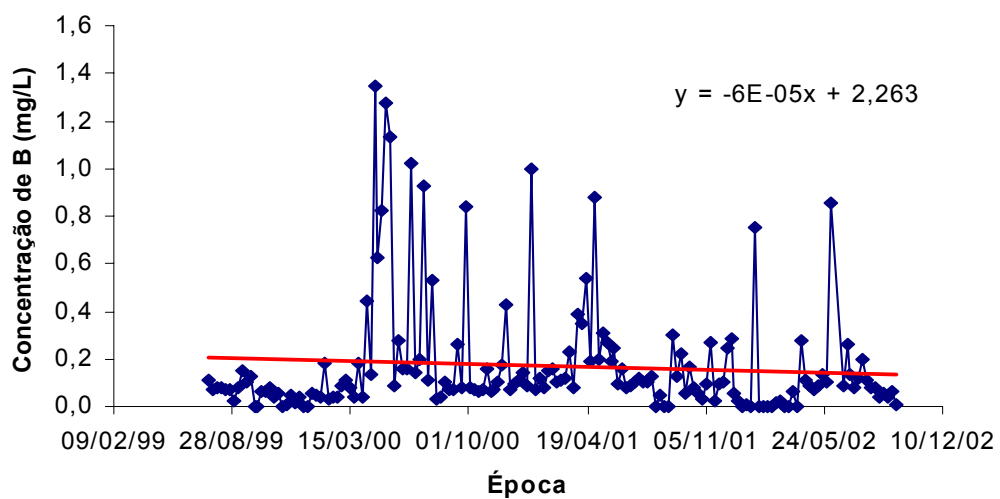
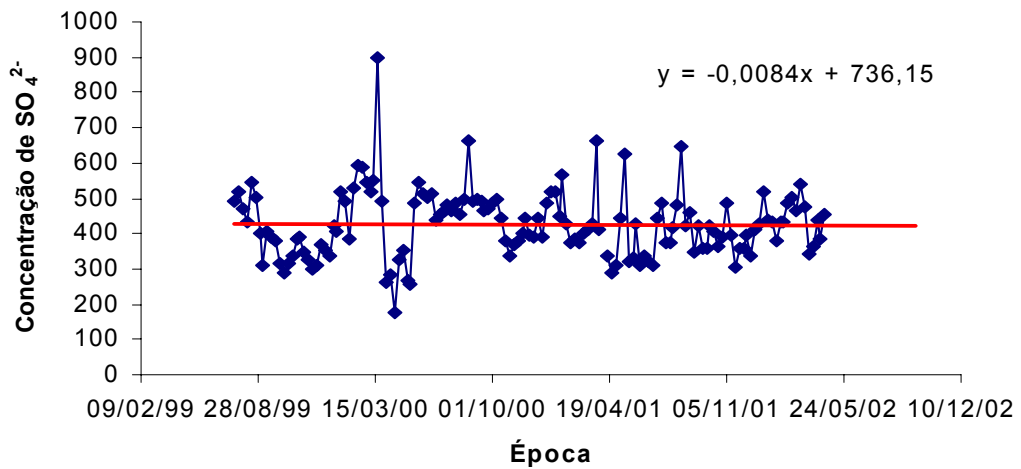
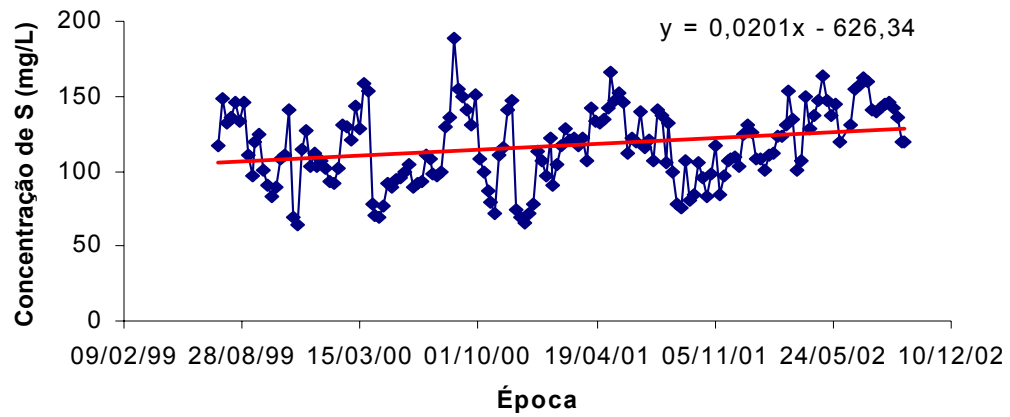


Figura 4A - Variação nas concentrações de enxofre, sulfato e boro do efluente tratado do processo de fabricação da celulose (ETFC) durante um período de monitoramento de trinta e nove meses.

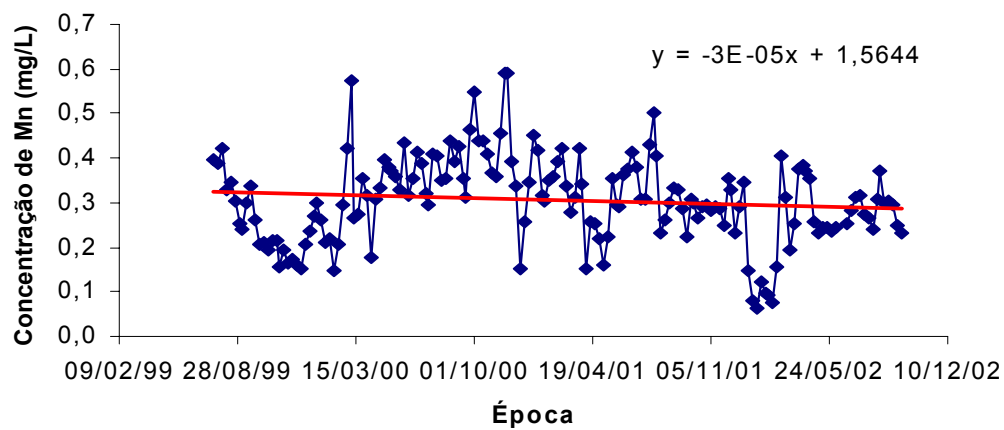
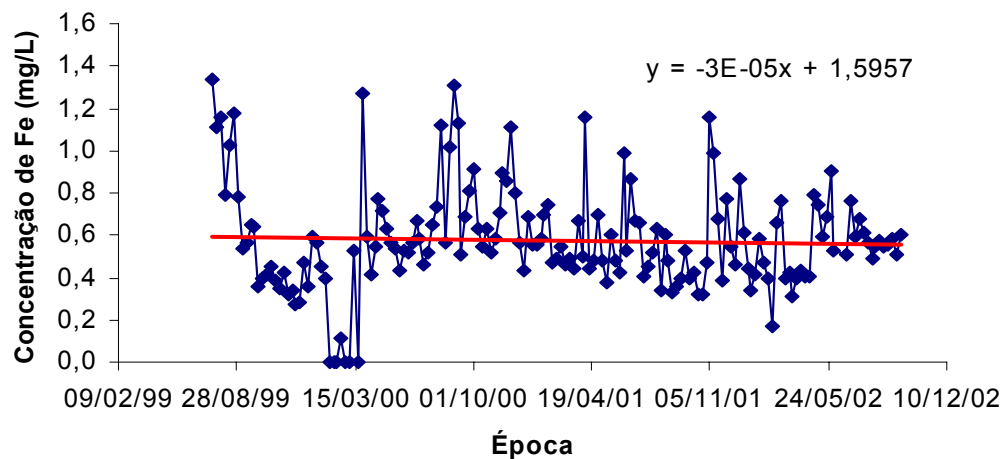
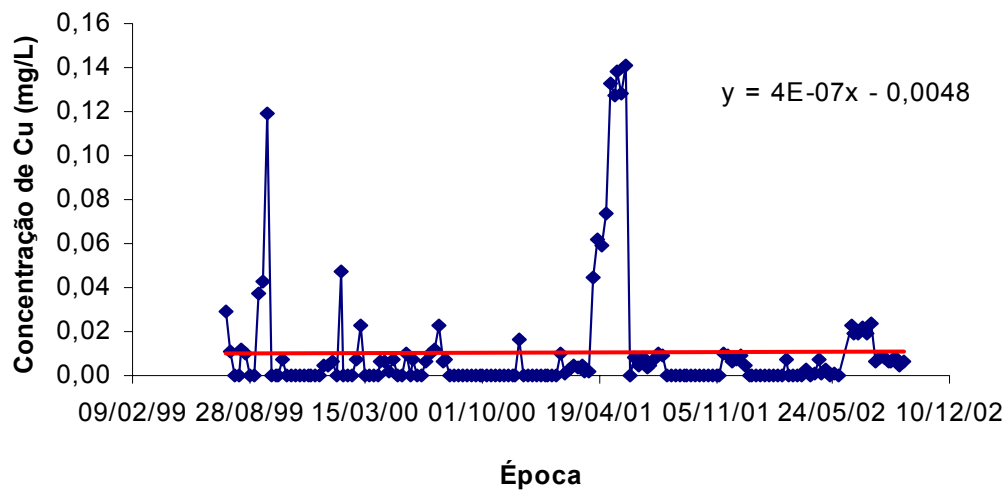


Figura 5A - Variação nas concentrações de cobre, ferro e manganês do efluente tratado do processo de fabricação da celulose (ETFC) durante um período de monitoramento de trinta e nove meses.

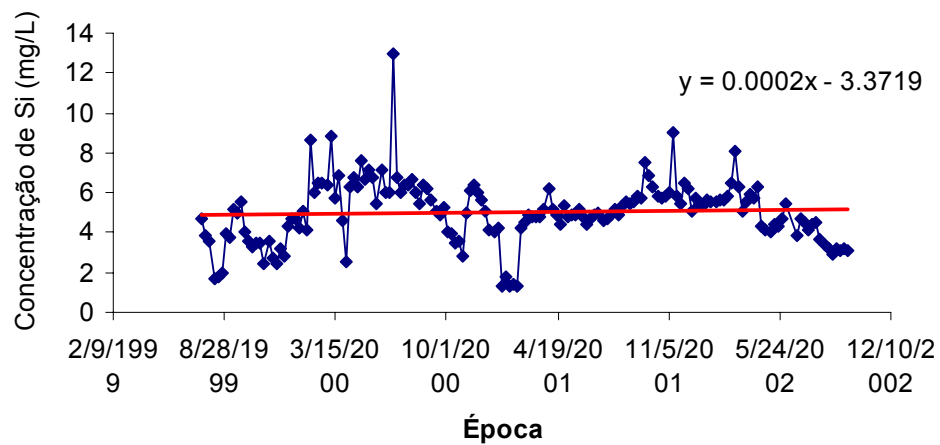
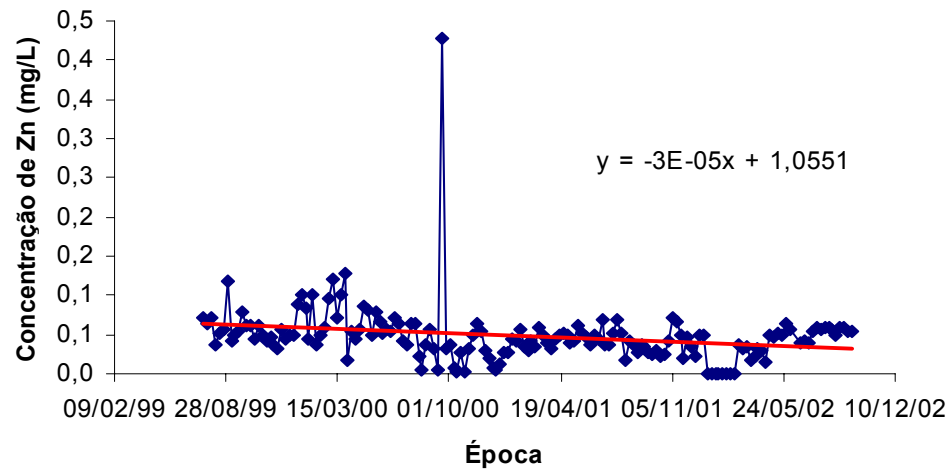
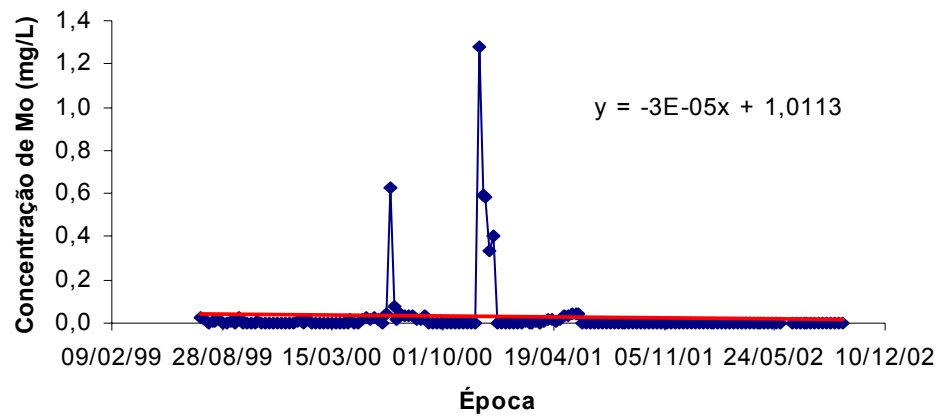


Figura 6A - Variação nas concentrações de molibdênio, zinco e silício do efluente tratado do processo de fabricação da celulose (ETFC) durante um período de monitoramento de trinta e nove meses.

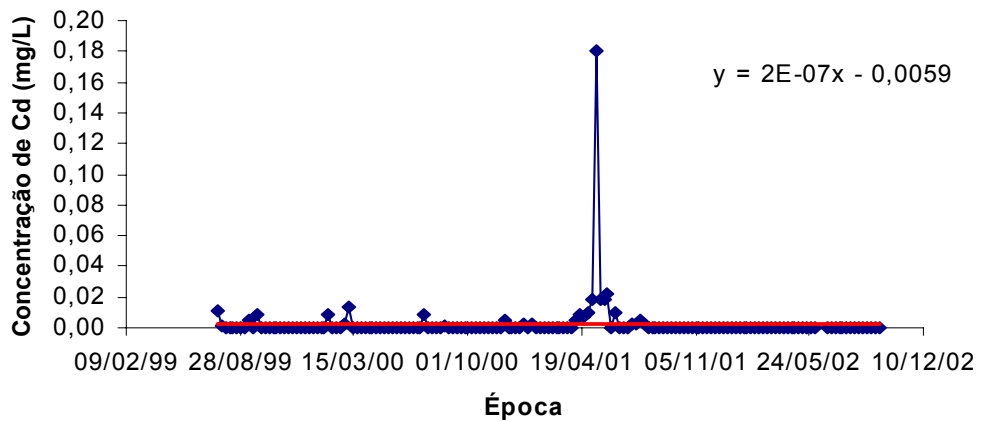
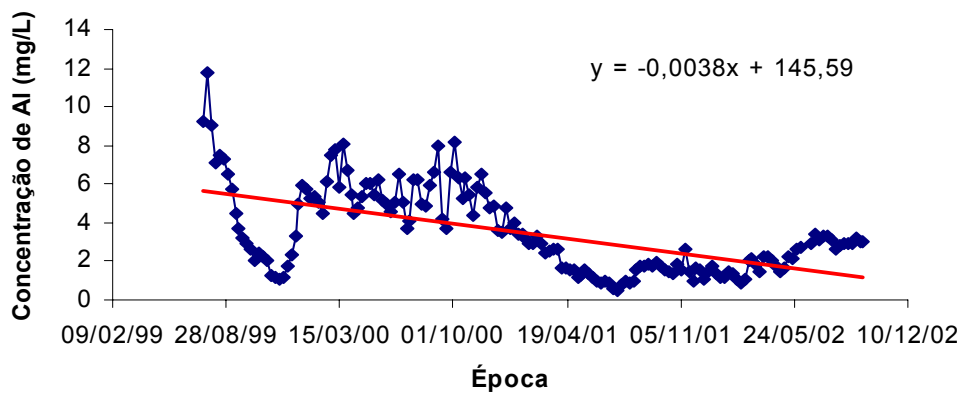
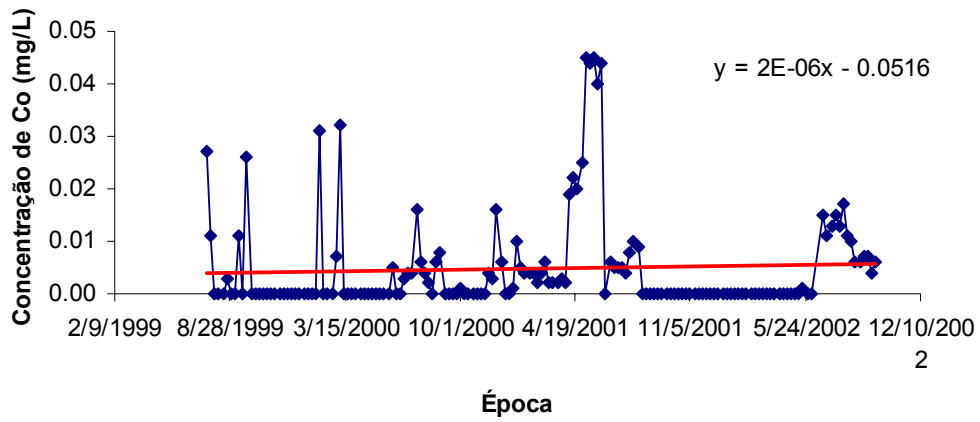


Figura 7A - Variação nas concentrações de cobalto, alumínio e cádmio do efluente tratado do processo de fabricação da celulose (ETFC) durante um período de monitoramento de trinta e nove meses.

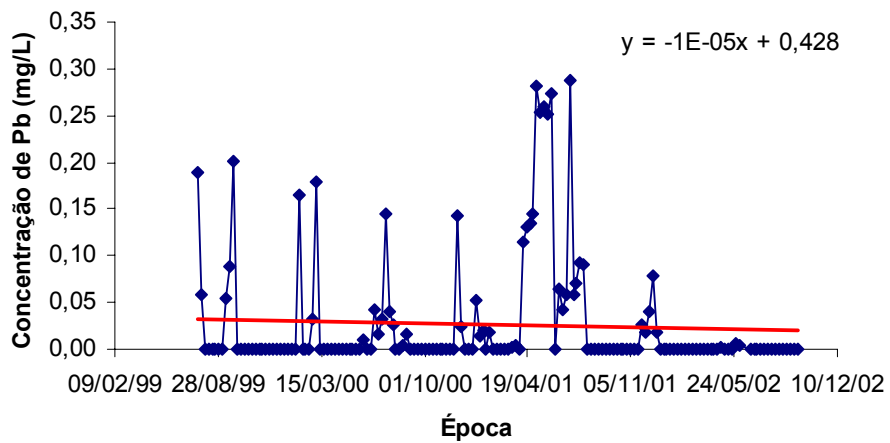
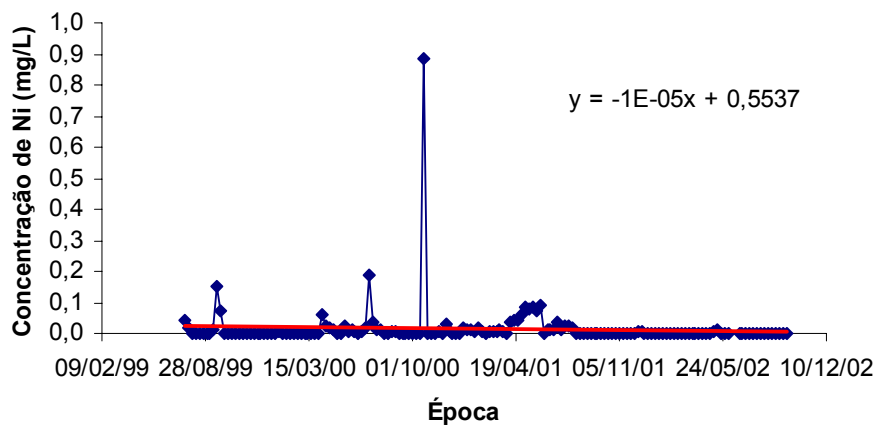
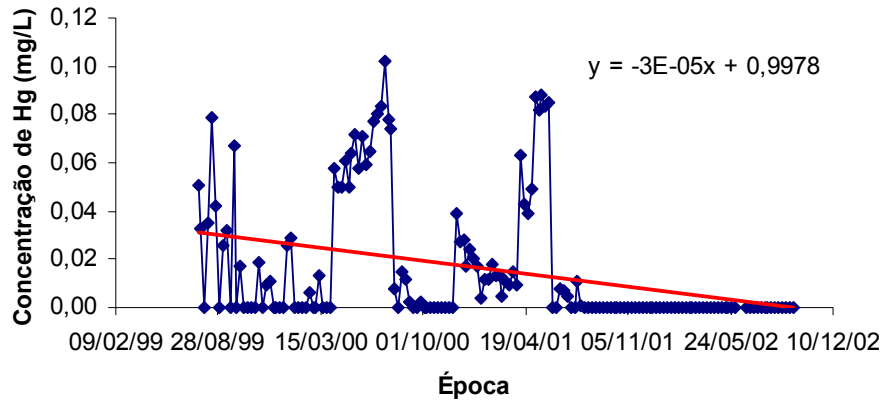


Figura 8A - Variação nas concentrações de mercúrio, níquel e chumbo do efluente tratado do processo de fabricação da celulose (ETFC) durante um período de monitoramento de trinta e nove meses.

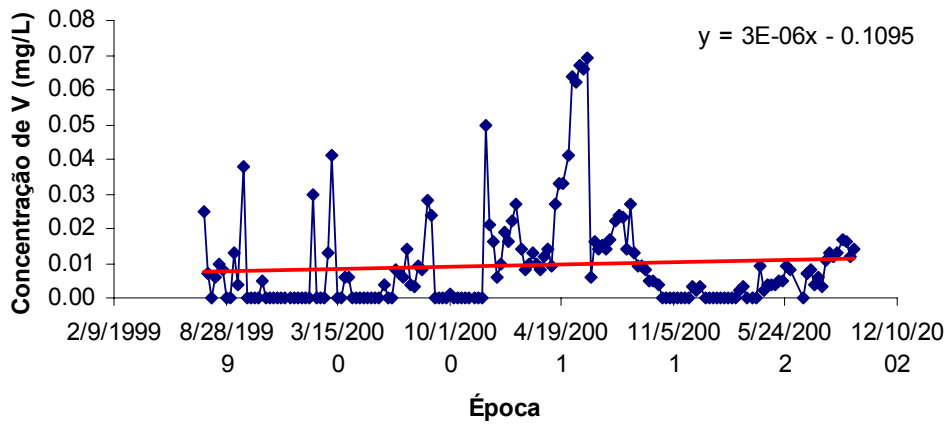
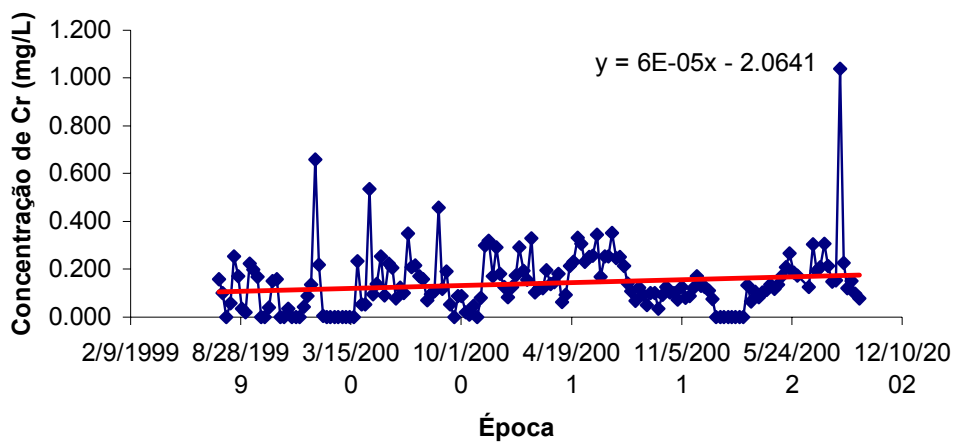


Figura 9A - Variação nas concentrações de crômio e vanádio do efluente tratado do processo de fabricação da celulose (ETFC) durante um período de monitoramento de trinta e nove meses.

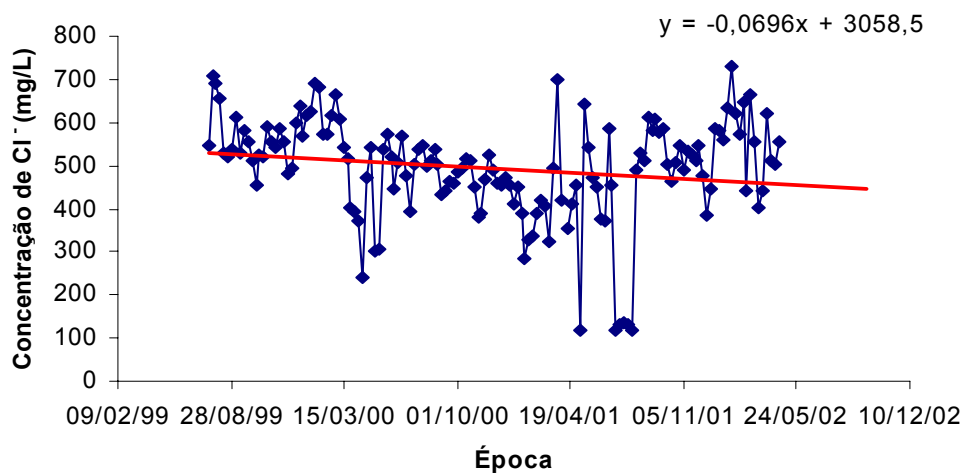
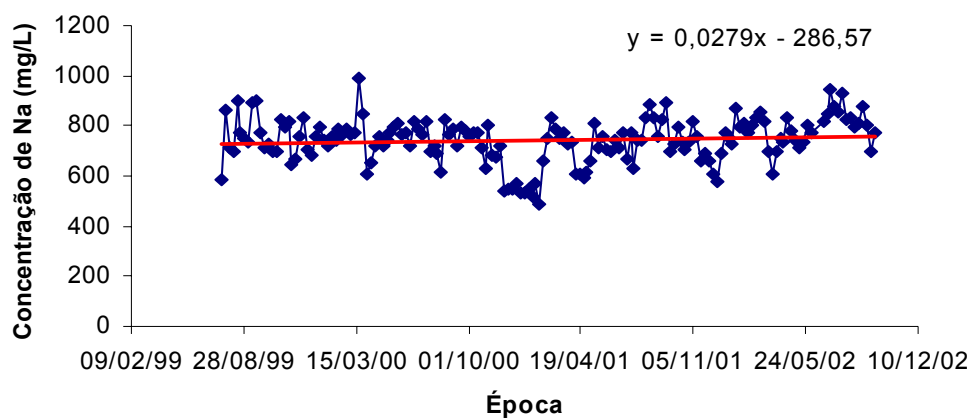


Figura 10A - Variação nas concentrações de sódio e cloreto do efluente tratado do processo de fabricação da celulose (ETFC) durante um período de monitoramento de trinta e nove meses.

Quadro 1A - Atributos químicos^{1/} do solo PAD1 submetido a diferentes taxas de aplicação do ETFC sem chuvas simuladas.

Lâmina ^{2/} mm	Profundidade cm	pH	CE _{es} dS.m ⁻¹	Argila dispersa %	Na	K	P	Cu	Fe	Mn	Zn	Ca	Mg	Al	Cl	N	CO	Mat. Org.	B	S
					mg kg ⁻¹							cmolc.dm ⁻³				g.kg ⁻¹	dag.kg ⁻¹	mg.dm ⁻³		
testemunha	0 - 10	4,12	0,500	29,753	23,254	21,229	39,716	0,000	94,343	1,770	0,000	0,742	0,064	1,277	0,291	1,073	1,486	2,562	3,951	24,849
	10 - 20	3,99	0,262	7,573	11,223	6,213	3,183	0,000	122,287	0,593	0,000	0,166	0,026	1,547	0,184	0,677	0,681	1,174	2,345	31,125
	20 - 30	4,02	0,199	18,993	10,026	5,878	1,166	0,000	124,767	0,440	0,000	0,042	0,026	1,557	0,166	0,747	0,731	1,261	0,961	25,750
	30 - 40	4,13	0,220	24,100	8,231	3,878	0,764	0,000	117,667	0,530	0,000	0,054	0,032	1,483	0,213	0,766	0,539	0,929	0,593	27,739
	40 - 55	4,28	0,104	1,007	7,620	2,878	0,092	0,000	66,450	0,460	0,000	0,032	0,023	1,327	0,124	0,391	0,320	0,551	0,547	15,465
114,6	0 - 10	4,51	2,245	30,387	168,321	26,910	31,404	0,030	94,840	1,203	0,000	0,729	0,038	0,653	1,444	1,007	1,375	2,370	3,562	97,435
	10 - 20	4,17	1,424	12,647	112,606	8,884	5,362	0,033	110,187	0,577	0,000	0,203	0,028	0,967	0,864	0,756	0,984	1,696	2,835	36,760
	20 - 30	4,25	0,701	35,660	55,427	6,214	1,342	0,003	123,220	0,420	0,000	0,042	0,027	1,313	0,872	0,677	0,845	1,456	0,855	33,221
	30 - 40	4,48	0,180	25,127	15,799	4,546	1,274	0,003	181,433	0,597	0,000	0,050	0,031	1,427	0,249	0,742	0,851	1,467	0,721	26,304
	40 - 55	4,46	0,072	11,533	6,536	2,210	0,145	0,017	62,400	0,393	0,897	0,021	0,012	1,160	0,173	0,426	0,368	0,635	0,521	34,271
286,5	0 - 10	4,46	3,040	31,060	180,618	36,000	33,395	0,120	93,623	1,440	0,373	0,800	0,078	0,787	2,442	1,044	1,605	2,767	5,519	98,816
	10 - 20	4,13	1,524	21,887	152,602	10,667	2,939	0,000	147,080	0,813	0,000	0,211	0,037	1,247	1,921	0,815	1,146	1,976	2,834	35,575
	20 - 30	4,37	0,684	35,587	79,317	7,333	1,789	0,000	165,547	0,990	0,000	0,093	0,040	1,397	0,884	0,822	0,977	1,684	0,922	18,178
	30 - 40	4,47	0,263	35,480	39,021	9,333	1,548	0,000	215,507	0,973	0,000	0,072	0,030	1,363	0,391	0,859	0,786	1,355	1,813	24,024
	40 - 55	4,56	0,963	0,573	27,002	5,333	0,172	0,000	90,720	0,350	0,000	0,027	0,021	1,210	0,947	0,436	0,334	0,576	0,607	31,586
515,7	0 - 10	4,94	4,840	30,847	456,176	50,932	28,773	0,023	81,133	1,573	0,037	0,811	0,069	0,483	3,237	0,974	1,641	2,830	4,857	93,408
	10 - 20	4,26	3,920	34,113	338,975	16,560	2,434	0,013	107,673	0,333	0,000	0,196	0,029	1,243	3,351	0,834	1,192	2,054	3,031	97,805
	20 - 30	4,21	2,283	23,713	159,420	5,546	2,005	0,000	115,340	0,357	0,000	0,085	0,040	1,313	2,554	0,773	0,854	1,472	1,057	16,089
	30 - 40	4,37	2,790	36,013	43,208	5,216	1,159	0,020	180,700	0,517	0,000	0,061	0,030	1,237	2,120	0,686	0,807	1,391	1,339	14,008
	40 - 55	4,32	0,230	0,447	35,818	3,545	0,171	0,013	70,337	0,300	0,000	0,022	0,013	1,150	0,325	0,459	0,351	0,605	0,479	15,044
1146	0 - 10	5,55	6,557	25,733	541,844	70,000	29,914	0,000	103,643	1,623	0,070	0,769	0,070	0,223	5,530	0,958	1,406	2,424	3,588	111,264
	10 - 20	4,39	6,077	14,500	398,879	18,667	2,310	0,000	121,163	0,310	0,000	0,164	0,012	1,177	5,163	0,670	0,896	1,545	3,305	159,275
	20 - 30	4,22	3,907	1,540	220,851	7,333	1,405	0,000	124,257	0,273	0,000	0,124	0,030	1,410	3,949	0,653	0,938	1,617	2,475	91,192
	30 - 40	4,42	1,627	25,680	130,884	7,000	0,994	0,000	170,057	0,373	0,000	0,062	0,033	1,037	2,093	0,639	0,822	1,417	0,886	20,168
	40 - 55	4,26	0,720	0,593	72,535	4,667	0,103	0,000	75,890	0,337	0,000	0,012	0,011	1,217	0,874	0,457	0,334	0,576	0,482	23,732

1/médias de três repetições; 2/ lâminas correspondentes às taxas de aplicação de 0; 0,85; 2,11; 3,80; e 8,45 t.ha⁻¹ de Na, respectivamente.

Quadro 2A - Atributos químicos^{1/} do solo PAD1 submetido a diferentes taxas de aplicação do ETFC com chuvas simuladas.

Lâmina ^{2/} mm	Profundidade cm	pH	CE _{es} dS.m ⁻¹	Argila dispersa %	Na	K	P	Cu	Fe	Mn	Zn	Ca	Mg	Al	Cl	N	CO	Mat. Org.	B	S
					mg kg ⁻¹						cmolc.dm ⁻³				g.kg ⁻¹	—dag.kg ⁻¹ —	—mg.dm ⁻³ —			
testemunha	0 -10	4,16	0,597	6,453	16,818	10,217	37,560	0,003	113,287	0,360	0,000	0,411	0,024	0,797	0,174	0,384	0,726	1,251	2,390	38,932
	10 -20	4,14	0,466	9,720	11,433	3,877	4,204	0,010	165,557	0,300	0,000	0,183	0,045	0,837	0,166	0,326	0,306	0,528	2,211	61,160
	20 -30	4,38	0,590	9,733	19,211	2,544	0,559	0,000	198,347	0,267	0,000	0,129	0,114	0,707	0,214	0,363	0,247	0,426	2,200	62,693
	30 -40	4,60	0,462	11,153	19,810	1,877	0,503	0,000	214,083	0,317	0,000	0,071	0,095	1,003	0,375	0,307	0,266	0,458	1,802	17,270
	40 -55	4,54	0,674	18,527	12,630	1,210	0,150	0,010	200,213	0,623	0,000	0,031	0,047	0,980	0,300	0,258	0,163	0,282	1,092	17,148
114,6	0 -10	4,83	2,153	7,053	112,822	10,000	23,750	0,003	107,140	0,350	0,000	0,391	0,015	0,500	1,533	0,239	0,616	1,062	2,132	82,131
	10 -20	4,16	2,747	10,807	115,873	5,884	3,617	0,000	165,897	0,257	0,003	0,228	0,041	0,780	1,834	0,326	0,339	0,585	2,641	121,148
	20 -30	4,36	1,868	9,313	55,377	4,218	0,715	0,000	185,680	0,293	0,000	0,172	0,101	0,630	1,379	0,225	0,224	0,386	2,390	79,215
	30 -40	4,71	0,742	10,400	45,809	2,545	0,448	0,007	213,767	0,297	0,000	0,082	0,074	0,627	0,870	0,253	0,247	0,426	2,491	21,509
	40 -55	4,52	0,270	15,760	18,640	1,544	0,077	0,000	199,630	0,460	0,000	0,052	0,040	0,683	0,489	0,207	0,169	0,292	0,715	23,749
286,5	0 -10	5,30	2,893	6,320	177,251	20,909	36,295	0,007	127,760	0,477	0,000	0,377	0,024	0,430	1,673	0,340	0,743	1,281	3,201	92,807
	10 -20	4,19	3,750	10,960	168,757	9,553	4,797	0,000	182,593	0,353	0,000	0,235	0,035	0,807	2,942	0,290	0,309	0,532	3,343	125,209
	20 -30	4,31	2,873	11,193	117,780	5,212	0,556	0,000	189,933	0,430	0,000	0,180	0,154	0,693	2,233	0,309	0,258	0,445	2,447	89,229
	30 -40	4,61	1,092	10,953	43,292	1,877	0,481	0,013	202,877	0,337	0,000	0,082	0,090	0,727	1,094	0,281	0,159	0,274	0,454	23,289
	40 -55	4,63	0,311	15,060	31,152	2,209	0,211	0,013	206,230	0,453	0,000	0,046	0,056	1,003	0,208	0,232	0,061	0,105	0,465	26,136
515,7	0 -10	6,08	4,290	5,953	208,811	32,333	32,961	0,000	92,817	0,577	0,000	0,486	0,033	0,153	2,628	0,363	0,486	0,837	2,626	59,210
	10 -20	4,47	6,120	10,693	211,828	13,000	8,981	0,000	148,427	0,280	0,000	0,180	0,013	0,543	4,047	0,295	0,323	0,556	2,173	130,927
	20 -30	4,21	4,607	11,173	192,556	8,333	0,699	0,000	140,520	0,237	0,000	0,193	0,099	0,733	3,652	0,241	0,265	0,456	3,166	107,136
	30 -40	4,36	2,687	10,947	94,926	4,667	0,739	0,000	164,413	0,227	0,000	0,128	0,144	0,573	2,845	0,258	0,238	0,410	2,060	41,896
	40 -55	4,46	0,628	12,633	46,165	2,333	0,074	0,000	180,047	0,520	0,160	0,042	0,057	0,897	0,590	0,274	0,174	0,299	0,729	24,951
1146	0 -10	6,16	5,287	8,560	381,435	43,268	34,076	0,023	124,887	0,803	0,000	0,565	0,050	0,130	3,119	0,396	0,535	0,923	2,425	136,087
	10 -20	5,91	6,615	10,340	482,627	29,912	8,183	0,017	153,363	0,380	0,000	0,124	0,010	0,215	3,605	0,340	0,302	0,521	2,474	186,223
	20 -30	4,55	6,727	12,040	348,553	9,218	0,662	0,003	194,267	0,257	0,000	0,112	0,029	0,687	5,273	0,323	0,317	0,547	1,706	187,590
	30 -40	4,39	4,217	11,213	194,469	4,216	0,650	0,013	178,363	0,213	0,000	0,135	0,082	0,690	3,555	0,337	0,278	0,480	2,148	114,884
	40 -55	4,26	1,994	2,087	123,851	3,213	0,514	0,023	216,770	0,303	0,000	0,089	0,135	0,987	1,850	0,208	0,211	0,364	2,298	73,025

1/médias de três repetições; 2/ lâminas correspondentes às taxas de aplicação de 0; 0,85; 2,11; 3,80; e 8,45 t.ha⁻¹ de Na, respectivamente.

Quadro 3A - Atributos químicos^{1/} do solo RQ₀ submetido a diferentes taxas de aplicação do ETFC sem chuvas simuladas.

Lâmina ^{2/} mm	Profundidade cm	pH	CE _{es} dS.m ⁻¹	Argila dispersa %	Na	K	P	Cu	Fe	Mn	Zn	Ca	Mg	Al	Cl	N	CO	Mat. Org.	B	S
					mg kg ⁻¹							cmolc.dm ⁻³				dag.kg ⁻¹			mg.dm ⁻³	
testemunha	0-10	5,26	0,457	1,587	7,244	5,216	20,126	0,037	88,503	14,670	2,477	0,607	0,032	0,150	0,277	0,398	1,563	2,695	0,569	11,563
	10-20	5,09	0,383	1,520	3,653	3,548	17,991	0,030	68,067	11,063	0,607	0,512	0,026	0,193	0,156	0,328	1,240	2,138	0,617	20,543
	20-30	4,79	0,362	1,453	4,850	2,213	9,797	0,017	67,820	10,417	0,013	0,331	0,028	0,280	0,144	0,311	1,159	1,997	0,904	21,755
	30-40	4,63	0,367	0,987	4,252	1,544	2,142	0,000	42,023	2,320	0,000	0,056	0,017	0,267	0,168	0,103	0,737	1,270	0,651	17,622
	40-55	5,07	0,295	0,940	5,449	2,880	1,176	0,013	37,217	1,550	0,000	0,048	0,018	0,187	0,157	0,124	0,695	1,199	0,699	14,931
114,6	0-10	5,57	1,748	1,540	103,141	8,552	24,780	0,023	79,003	10,587	1,090	0,597	0,027	0,153	1,181	0,340	1,339	2,308	0,832	66,212
	10-20	4,99	1,677	1,533	94,017	5,881	15,173	0,023	69,077	10,350	0,910	0,377	0,027	0,250	1,802	0,443	1,532	2,640	1,091	47,375
	20-30	4,57	1,645	1,360	65,607	6,888	8,506	0,013	69,090	10,663	0,490	0,284	0,063	0,267	0,825	0,272	1,101	1,898	1,271	64,575
	30-40	4,70	0,770	1,460	32,229	7,217	2,063	0,017	41,240	2,583	0,000	0,040	0,021	0,287	0,384	0,159	0,202	0,349	0,587	24,459
	40-55	5,62	0,263	1,200	4,200	2,878	1,258	0,017	37,913	1,460	0,000	0,040	0,017	0,130	0,243	0,136	0,088	0,152	0,832	15,291
286,5	0-10	6,65	1,712	1,327	137,003	13,557	27,660	0,043	49,487	8,653	0,670	0,448	0,039	0,313	1,195	0,349	1,350	2,328	1,164	34,764
	10-20	5,83	2,477	1,600	161,297	9,888	17,986	0,043	55,510	8,827	0,957	0,394	0,022	0,147	1,591	0,347	1,202	2,072	0,946	56,415
	20-30	4,90	2,573	1,233	133,228	7,214	8,525	0,017	48,793	8,610	1,097	0,308	0,036	0,140	1,683	0,246	1,131	1,949	0,985	99,271
	30-40	4,67	1,372	0,460	46,009	7,220	1,608	0,003	23,433	2,600	0,050	0,089	0,041	0,230	0,950	0,155	0,510	0,879	0,848	41,123
	40-55	5,08	0,581	0,580	14,283	4,548	0,953	0,013	24,087	1,543	0,017	0,062	0,026	0,150	0,303	0,124	0,031	0,054	0,704	15,336
515,7	0-10	7,28	2,678	1,400	178,484	17,896	19,729	0,017	52,357	10,550	0,120	0,588	0,041	0,097	1,456	0,309	1,391	2,398	1,035	40,499
	10-20	6,80	2,023	1,173	155,628	12,226	15,252	0,017	46,243	6,943	0,067	0,269	0,015	0,140	1,427	0,318	1,274	2,197	1,047	27,792
	20-30	5,80	2,925	1,107	163,398	8,556	6,763	0,017	52,997	6,770	0,067	0,140	0,011	0,263	1,595	0,340	1,249	2,153	0,934	44,313
	30-40	5,47	2,465	0,960	130,120	7,217	1,138	0,000	26,570	1,990	0,000	0,088	0,030	0,180	1,643	0,248	0,248	0,427	0,547	57,701
	40-55	5,32	2,747	0,967	118,296	13,333	4,206	0,003	24,720	1,680	0,013	0,160	0,038	0,170	2,059	0,178	0,164	0,282	1,203	52,278
1146	0-10	8,05	2,523	1,387	186,313	20,900	18,668	0,040	44,427	9,047	2,453	0,644	0,048	0,083	1,414	0,295	1,612	2,779	1,778	59,590
	10-20	7,68	2,400	1,370	187,189	18,000	12,730	0,003	36,275	4,880	0,000	0,705	0,018	0,350	1,305	0,288	1,219	2,102	1,298	50,588
	20-30	7,31	2,397	1,427	196,002	17,561	8,757	0,043	46,793	7,200	0,180	0,157	0,014	0,337	1,795	0,211	1,528	2,634	1,571	36,361
	30-40	7,12	2,623	1,107	193,696	11,218	3,317	0,017	28,250	1,507	0,000	0,031	0,007	0,100	1,606	0,129	0,832	1,434	1,032	38,266
	40-55	6,17	5,553	0,893	208,071	27,904	2,909	0,017	28,557	2,027	0,433	0,082	0,025	0,177	3,888	0,288	0,797	1,373	1,118	107,359

1/ médias de três repetições; 2/ lâminas correspondentes às taxas de aplicação de 0; 0,85; 2,11; 3,80; e 8,45 t.ha⁻¹ de Na, respectivamente.

Quadro 4A - Atributos químicos ^{1/} do solo PAd1 submetido a diferentes taxas de aplicação do ETFC com chuvas simuladas.

Lâmina ^{2/} mm	Profundidade cm	pH	CE _{es} dS.m ⁻¹	Argila dispersa %	Na	K	P	Cu	Fe	Mn	Zn	Ca	Mg	Al	Cl	N g.kg ⁻¹	CO	Mat. Org.	B	S
					mg kg ⁻¹															
testemunha	0 -10	4,18	0,359	22,480	2,610	14,179	26,830	0,000	82,717	1,740	0,000	0,429	0,057	1,657	0,143	0,944	1,712	2,952	3,750	41,852
	10 - 20	4,00	0,205	3,920	1,610	4,684	2,118	0,000	101,433	0,637	0,000	0,065	0,017	1,943	0,091	0,777	0,860	1,483	1,730	39,936
	20 -30	4,16	0,160	4,127	1,943	3,356	0,799	0,000	93,777	0,470	0,000	0,038	0,032	1,920	0,143	0,548	0,783	1,350	1,547	26,834
	30 -40	4,38	0,118	12,073	1,277	3,684	1,235	0,000	123,807	0,500	0,000	0,044	0,030	1,613	0,179	0,639	0,871	1,501	0,485	15,990
	40 -55	4,50	0,204	10,247	1,277	2,688	0,190	0,000	40,063	0,410	0,000	0,015	0,010	1,653	0,193	0,440	0,442	0,762	0,346	20,998
114,6	0 -10	4,41	1,732	30,880	124,474	23,665	28,408	0,000	81,417	1,397	0,000	0,399	0,047	1,343	0,583	0,859	1,449	2,498	3,640	73,037
	10 - 20	4,11	0,933	1,000	75,755	5,121	1,370	0,000	68,943	0,467	0,000	0,061	0,022	1,853	0,464	0,611	0,731	1,261	2,209	58,014
	20 -30	4,18	1,060	1,487	90,830	5,020	1,600	0,000	49,860	0,323	0,000	0,053	0,028	1,750	0,981	0,693	0,893	1,540	1,291	44,916
	30 -40	4,38	0,534	22,833	53,752	5,121	1,473	0,000	100,113	0,490	0,000	0,048	0,040	1,683	0,533	0,703	0,941	1,622	0,626	11,651
	40 -55	4,34	0,121	0,527	20,133	3,804	0,205	0,000	31,877	0,363	0,000	0,032	0,020	1,493	0,157	0,335	0,337	0,582	0,423	20,036
286,5	0 -10	4,63	1,835	30,827	188,769	23,491	26,626	0,000	72,963	1,627	0,053	0,465	0,072	1,277	0,865	0,888	1,493	2,574	3,767	61,256
	10 - 20	4,26	1,295	10,107	125,800	7,314	2,497	0,000	80,190	0,453	0,000	0,064	0,024	1,863	0,902	0,719	1,028	1,772	2,139	66,782
	20 -30	4,31	1,307	0,753	124,474	5,003	1,612	0,000	80,873	0,403	0,000	0,045	0,050	1,680	1,262	0,747	0,910	1,569	1,025	32,940
	30 -40	4,43	0,598	8,240	55,079	5,333	0,945	0,000	118,363	0,480	0,000	0,044	0,040	1,623	0,586	0,684	0,861	1,485	0,678	7,307
	40 -55	4,45	0,138	0,590	20,678	3,353	0,058	0,000	40,270	0,330	0,000	0,034	0,025	0,993	0,292	0,405	0,358	0,617	0,488	20,735
515,7	0 -10	4,84	3,025	24,207	325,739	40,889	27,040	0,000	80,990	1,537	0,000	0,452	0,062	0,973	2,004	0,916	0,945	1,628	3,961	80,439
	10 - 20	4,24	2,617	3,760	285,563	9,429	3,407	0,000	73,850	0,397	0,000	0,075	0,013	1,683	1,923	0,721	0,953	1,642	2,574	117,537
	20 -30	4,26	2,270	5,560	203,436	6,118	1,403	0,000	66,170	0,337	0,000	0,057	0,042	1,710	2,039	0,752	0,988	1,703	1,563	66,573
	30 -40	4,37	1,126	10,960	105,454	5,125	0,924	0,000	78,667	0,290	0,000	0,036	0,035	1,487	1,149	0,578	0,846	1,459	0,602	74,722
	40 -55	4,31	0,274	2,667	113,823	4,128	0,084	0,000	52,277	0,847	0,000	0,044	0,074	1,453	0,305	0,330	0,329	0,568	1,168	16,747
1146	0 -10	5,29	3,927	30,760	537,746	61,778	25,654	0,000	67,447	1,953	0,017	0,504	0,085	0,397	2,628	0,904	1,511	2,605	4,411	158,096
	10 - 20	4,45	3,625	12,167	548,825	15,569	1,698	0,000	68,673	0,407	0,000	0,067	0,010	1,477	2,448	0,595	0,809	1,394	1,951	211,136
	20 -30	4,19	3,290	0,613	357,732	6,324	1,297	0,000	63,910	0,370	0,000	0,077	0,033	1,717	2,930	0,691	0,841	1,450	1,655	127,844
	30 -40	4,27	2,227	3,747	213,132	5,003	0,912	0,000	59,857	0,330	0,000	0,041	0,037	1,497	2,096	0,609	0,779	1,343	0,918	227,975
	40 -55	4,45	1,094	19,040	125,483	5,334	0,001	0,000	27,583	0,300	0,000	0,038	0,031	1,520	1,321	0,391	0,368	0,635	0,672	31,271

1/ médias de três repetições; 2/ lâminas correspondentes às taxas de aplicação de 0; 0,85; 2,11; 3,80; e 8,45 t.ha⁻¹ de Na, respectivamente.

Quadro 5A - Atributos químicos^{1/} do solo PAd2 submetido a diferentes taxas de aplicação do ETFC com chuvas simuladas.

Lâmina ^{2/} mm	Profundidade cm	pH	CE _{es} dS.m ⁻³	Argila dispersa %	Na	K	P	Cu	Fe	Mn	Zn	Ca	Mg	Al	Cl	N	CO	Mat. Org.	B	S
					mg kg ⁻¹							cmol _c .dm ⁻³				g.kg ⁻¹	—dag.kg ⁻¹ —		—mg.dm ⁻³ —	
testemunha	0 - 10	4,46	0,230	4,347	0,943	5,751	26,277	0,000	71,687	0,287	0,000	0,183	0,015	0,837	0,205	0,311	0,581	1,001	1,432	9,320
	10 - 20	4,50	0,192	8,280	0,555	2,774	6,729	0,000	138,147	0,263	0,000	0,120	0,019	0,807	0,167	0,251	0,335	0,578	1,874	10,405
	20 - 30	4,40	0,348	5,647	4,069	2,111	0,623	0,000	157,753	0,143	0,000	0,092	0,053	0,787	0,192	0,218	0,375	0,646	1,822	37,001
	30 - 40	4,49	0,597	4,000	10,132	1,372	0,346	0,000	199,407	0,217	0,000	0,123	0,139	0,713	0,222	0,239	0,376	0,648	2,171	48,101
	40 - 55	4,41	0,457	0,980	24,810	1,372	0,000	0,000	105,720	0,380	0,000	0,069	0,124	1,073	0,345	0,232	0,262	0,451	1,529	39,067
114,6	0 - 10	5,17	1,150	5,927	87,101	15,389	26,743	0,000	71,210	0,397	0,000	0,252	0,022	0,587	0,560	0,403	0,847	1,460	2,113	28,332
	10 - 20	4,67	1,294	9,067	56,414	4,791	6,099	0,000	122,593	0,343	0,000	0,077	0,008	0,880	0,666	0,265	0,491	0,846	1,255	9,648
	20 - 30	4,39	1,299	7,607	56,414	1,813	0,839	0,000	138,270	0,223	0,000	0,095	0,036	0,913	0,852	0,232	0,432	0,745	1,650	38,188
	30 - 40	4,50	1,802	8,553	72,418	0,819	0,659	0,000	227,067	0,117	0,000	0,114	0,160	0,727	0,803	0,281	0,543	0,936	2,734	67,563
	40 - 55	4,40	1,348	2,927	79,741	1,150	0,281	0,000	117,233	0,820	0,000	0,079	0,142	1,013	0,845	0,241	0,227	0,392	1,246	33,336
286,5	0 - 10	5,60	1,438	7,853	111,227	17,633	26,900	0,000	83,820	0,377	0,000	0,242	0,021	0,413	1,041	0,311	0,591	1,019	1,476	32,945
	10 - 20	4,99	1,239	10,660	95,466	8,006	6,542	0,000	135,880	0,220	0,000	0,067	0,004	0,753	0,749	0,267	0,398	0,687	1,641	29,077
	20 - 30	4,42	1,712	9,960	103,093	2,354	1,381	0,000	142,697	0,127	0,000	0,096	0,037	0,993	1,007	0,288	0,325	0,561	1,740	42,686
	30 - 40	4,49	1,972	7,293	99,869	2,356	0,589	0,000	180,243	0,197	0,000	0,120	0,146	0,750	1,344	0,269	0,367	0,633	1,903	45,223
	40 - 55	4,43	1,145	9,827	71,273	2,022	0,298	0,000	147,523	0,607	0,000	0,082	0,119	1,040	0,743	0,318	0,239	0,412	0,730	5,013
515,7	0 - 10	6,14	2,153	7,593	182,879	24,641	27,353	0,000	64,227	0,577	1,327	0,355	0,043	0,157	1,277	0,297	0,817	1,409	3,747	27,458
	10 - 20	5,05	3,205	10,653	179,889	14,355	6,845	0,000	116,243	0,267	0,053	0,085	0,010	0,677	1,755	0,290	0,349	0,601	4,283	49,646
	20 - 30	4,42	2,995	10,807	177,248	4,360	1,118	0,000	119,457	0,173	0,000	0,097	0,069	0,993	1,877	0,262	0,355	0,612	2,243	105,084
	30 - 40	4,43	3,507	8,913	157,724	2,023	0,473	0,000	155,687	0,180	0,000	0,121	0,117	0,863	1,781	0,290	0,387	0,667	1,520	103,515
	40 - 55	4,26	1,541	2,773	84,814	2,019	0,129	0,000	127,270	0,553	0,000	0,082	0,138	1,003	1,565	0,183	0,191	0,328	0,624	6,261
1146	0 - 10	6,82	3,503	7,027	307,500	34,917	22,854	0,000	55,190	0,747	0,073	0,452	0,068	0,157	1,825	0,358	0,559	0,963	2,631	70,302
	10 - 20	5,94	4,220	8,873	333,009	25,985	5,898	0,000	85,280	0,197	0,000	0,081	0,011	0,253	2,542	0,272	0,491	0,847	2,853	127,459
	20 - 30	4,76	5,020	6,800	365,978	6,464	0,789	0,000	93,600	0,163	0,000	0,041	0,008	0,727	3,413	0,290	0,362	0,623	1,552	172,618
	30 - 40	4,69	4,737	16,493	325,817	4,803	0,575	0,000	140,827	0,187	0,000	0,105	0,046	0,760	3,289	0,281	0,394	0,679	1,788	124,361
	40 - 55	4,25	4,100	0,867	226,210	3,464	0,150	0,000	71,780	0,583	0,000	0,094	0,159	1,280	3,551	0,347	0,272	0,469	1,807	97,096

1/ médias de três repetições; 2/ lâminas correspondentes às taxas de aplicação de 0; 0,85; 2,11; 3,80; e 8,45 t.ha⁻¹ de Na, respectivamente.

Quadro 6A - Atributos químicos^{1/} do solo RQo submetido a diferentes taxas de aplicação do ETFC com chuvas simuladas.

Lâmina 2/ mm	Profundidade cm	pH	CE _{es} dS.m ⁻¹	Argila dispersa %	Na	K	P	Cu	Fe	Mn	Zn	Ca	Mg	Al	Cl	N g.kg ⁻¹	CO	Mat. Org.	B	S
					mg kg ⁻¹						cmolc.dm ⁻³				—dag.kg ⁻¹ —		— mg.dm ⁻³ —			
testemunha	0-10	4,99	0,361	1,073	1,943	4,128	17,144	0,000	45,537	3,700	0,193	0,268	0,008	0,320	0,110	0,272	0,918	1,583	0,402	13,805
	10-20	4,92	0,145	0,920	0,944	2,803	8,411	0,000	33,083	3,953	0,000	0,155	0,005	0,313	0,104	0,272	1,216	2,096	0,554	4,763
	20-30	4,82	0,193	1,400	0,278	2,143	5,917	0,000	31,283	5,253	0,000	0,132	0,014	0,360	0,105	0,258	1,422	2,452	0,516	7,618
	30-40	4,77	0,203	1,053	0,944	2,143	2,187	0,000	15,307	1,467	0,000	0,039	0,011	0,240	0,152	0,155	0,294	0,507	0,479	11,292
	40-55	5,57	0,162	3,107	1,277	1,480	1,295	0,000	17,003	0,970	0,000	0,038	0,015	0,133	0,140	0,087	0,170	0,292	1,047	8,830
114,6	0-10	6,01	0,821	1,400	44,266	5,875	15,322	0,000	30,967	3,943	0,007	0,376	0,028	0,147	0,396	0,286	1,003	1,728	0,467	43,560
	10-20	5,78	0,613	1,447	32,918	3,552	10,368	0,000	40,717	4,220	0,000	0,176	0,012	0,220	0,317	0,307	1,255	2,164	0,535	11,938
	20-30	5,31	0,879	1,287	44,266	4,552	6,778	0,000	49,773	6,793	0,000	0,140	0,017	0,237	0,437	0,290	1,322	2,280	0,459	23,780
	30-40	5,15	0,819	1,300	33,585	3,549	2,569	0,000	23,030	1,430	0,000	0,036	0,012	0,223	0,473	0,143	0,917	1,581	0,414	22,628
	40-55	5,55	0,663	1,373	16,897	3,885	1,038	0,000	22,600	1,297	0,000	0,034	0,014	0,133	0,383	0,124	0,825	1,423	0,582	14,192
286,5	0-10	6,27	1,037	1,247	62,735	9,012	19,285	0,000	39,013	4,667	0,000	0,377	0,029	0,187	0,481	0,248	1,719	2,963	0,534	17,797
	10-20	6,07	0,604	1,640	44,879	4,685	9,116	0,000	38,463	3,937	0,000	0,145	0,009	0,207	0,362	0,304	1,681	2,897	0,436	13,627
	20-30	5,66	0,739	1,393	49,866	4,681	6,881	0,000	50,043	5,810	0,000	0,103	0,011	0,290	0,442	0,253	1,722	2,969	0,393	21,903
	30-40	5,47	0,700	1,227	35,869	3,016	2,360	0,000	31,670	1,393	0,000	0,027	0,011	0,213	0,383	0,300	0,973	1,678	0,359	19,875
	40-55	5,28	1,245	2,680	71,766	5,024	1,009	0,000	22,777	2,763	0,000	0,072	0,038	0,167	0,673	0,087	0,847	1,460	1,170	53,468
515,7	0-10	7,08	1,041	1,507	91,114	13,397	21,510	0,000	39,717	6,593	0,113	0,443	0,039	0,133	0,517	0,272	1,606	2,769	0,626	35,808
	10-20	6,93	0,750	1,073	80,436	8,105	8,011	0,000	36,887	4,410	0,260	0,163	0,012	0,160	0,421	0,262	1,230	2,121	0,726	18,448
	20-30	6,45	0,799	1,447	92,779	8,433	6,652	0,000	48,373	5,510	0,230	0,071	0,018	0,193	0,515	0,248	1,035	1,784	0,710	27,812
	30-40	6,45	1,138	0,940	86,450	5,788	2,870	0,000	23,837	1,307	0,083	0,019	0,004	0,143	0,563	0,131	0,301	0,518	0,477	41,395
	40-55	5,66	2,433	1,247	154,842	11,742	1,153	0,000	23,373	1,803	0,000	0,062	0,031	0,143	1,633	0,080	0,489	0,844	0,854	97,187
1146	0-10	7,54	1,723	1,593	139,808	16,378	21,682	0,000	39,187	6,880	0,000	0,427	0,046	0,157	0,806	0,276	0,961	1,657	0,550	27,366
	10-20	7,06	1,590	1,780	126,138	10,423	8,086	0,000	28,797	4,933	0,000	0,211	0,025	0,147	0,849	0,222	0,924	1,592	0,759	36,197
	20-30	6,95	1,468	1,373	142,488	11,413	6,075	0,000	28,750	3,827	0,000	0,080	0,013	0,157	0,814	0,260	1,623	2,797	1,457	27,272
	30-40	6,92	1,610	1,313	116,135	11,952	3,135	0,000	20,930	1,177	0,000	0,017	0,004	0,230	0,876	0,087	0,882	1,521	0,675	32,734
	40-55	6,33	4,475	0,670	292,815	21,800	0,872	0,000	6,690	1,127	0,000	0,035	0,018	0,137	2,059	0,119	1,147	1,977	1,395	142,101

1/ médias de três repetições; 2/ lâminas correspondentes às taxas de aplicação de 0; 0,85; 2,11; 3,80; e 8,45 t.ha⁻¹ de Na, respectivamente

Quadro 7A - Resumo da análise de variância conjunta do Experimento 1 e Experimento 2, com e sem aplicação de chuvas simuladas, para as variáveis de caracterização dos solos, após 6 meses de aplicação de efluente ETFC.

Fontes de Variação	GL	Quadrado médio											
		pH	EC	AD	Na	K	P	Cu	Fe	Mn	Zn	Ca	Mg
Experimento	1	1.41176 **	37,87516**	1939,1085**	3141,195ns	626,42661**	336,0752**	0,01644**	151566,41**	100,943**	2,35011**	1,02922**	0,00004ns
Solo	2	91.35331**	33,88332**	7825,40783**	122873,55**	776,4863**	137,20712**	0,00173*	431094,17**	986,265**	2,4491**	0,11165**	0,075991**
Tratamento	4	15.92119**	139,28816**	78,59852ns	904354,02**	2535,4736**	8,42141ns	0,0004ns	6423,90**	2,6320*	0,01184ns	0,01108*	0,00119*
Repetição	2	1.82647**	2,343792**	11,84868ns	2731,04ns	5,11075ns	31,5669°	0,01077**	22235,98**	1,9977ns	0,55557°	0,02543**	0,001837*
Experimento x repetição	2	0.09587 ns	0,9885 °	289,0694*	1473,65ns	18,9745ns	32,5923°	0,01077**	61011,947**	3,38529*	1,38247**	0,012098*	0,002080*
Experimento x solo	2	0.34712**	0,90370 °	943,4575**	21199,38**	14,7058ns	18,7693ns	0,00172*	12055,96**	93,7599**	2,44042**	0,06022**	0,002339**
Experimento x tratamento	4	0.17965*	3,66647 **	111,88397°	4648,42**	25,65995ns	10,27506ns	0,00040ns	2360,02**	5,9021**	0,4475°	0,001647ns	0,0004299ns
Solo x tratamento	8	4.43577**	4,25224**	38,62678ns	29613,37**	2,00556ns	7,56545ns	0,00049ns	1661,26**	2,56264**	0,21346ns	0,00451ns	0,0003549ns
Exp. x solo x tratamento	8	0.32565**	0,190928 ns	120,60184*	4527,46**	7,59736ns	10,54776ns	0,00049ns	2449,54**	5,40347**	0,161089ns	0,00534ns	0,00039ns
Exp. x solo x trat. x rep.	56	0.15202**	0,67573 **	40,91446ns	2185,671**	17,78262ns	13,18167ns	0,00104**	5006,07**	2,41388**	0,31002*	0,00784**	0,00061ns
Profundidade	4	9.75148**	18,46430**	743,0885**	176313,07**	5507,0029**	10541,57**	0,00124*	25469,59**	111,0764**	1,20199**	2,84119**	0,01562**
Repetição x profundidade	8	0.11011 ns	0,99199**	36,06710ns	2601,98*	8,67491ns	33,22833*	0,00041ns	1315,71**	0,86899ns	0,07115ns	0,00902**	0,00037ns
Experimento x profund.	4	0.10794 ns	10,5770**	205,39012**	30901,32**	73,5109**	111,86175**	0,00124*	997,69°	13,16749**	0,41800°	0,21746**	0,00846**
Solo x profundidade	8	1.21066 **	12,35075**	905,87967**	58043,55**	1218,3030**	459,4418**	0,000452ns	20532,64**	85,61886**	0,65697**	0,19347**	0,02159**
Tratamento x profund.	16	1.48545**	1,61549**	41,70623ns	18378,07**	342,4018**	8,73288ns	0,00035ns	591,11ns	1,815386*	0,13280ns	0,01409**	0,002188**
Exp. x solo x profund.	8	0.39430**	2,794812**	353,60641**	5960,79**	16,70119ns	35,14903**	0,00045ns	4173,73**	13,06009**	0,88192**	0,026603**	0,004851**
Exp. X trat. X profund.	16	0.10536 ns	0,71217*	49,42859ns	2129,92**	9,2350ns	9,4557ns	0,00034ns	356,86ns	1,5357*	0,25071ns	0,00439ns	0,00099*
Solo x trat. X profund.	32	0,38724**	3,19084**	67,35093°	14439,42**	134,4281**	7,7931ns	0,00035ns	536,03ns	1,28331°	0,27143ns	0,01096**	0,00124**
Exp. X solo x trat. x profund.	32	0,07127 ns	0,666880**	53,80217ns	2671,39**	6,9850ns	11,4731ns	0,00035ns	320,91ns	1,51201*	0,18948ns	0,00543*	0,00073*
Resíduo	232	0,06589	0,35921	47,29234	1226,537	14,3773	13,2229	0,00042	484,143	0,90208	0,20497	0,00331	0,00048
CV ^{1/} (%)		0.962557	33,73436	79,53595	29,56744	38,60170	46,74609	340,5857	23,4438	47,5253	433,6533	31,30386	52,61092

1/ coeficiente de variação de médias; 2/ ns, **, *, °: F não significativo a 5%, significativo a 1, 5 e 10%, respectivamente.

Quadro 7A, Cont.

Fontes de Variação	GL	Quadrado Médio					
		AI	CI	N	CO	B	S
Experimento	1	2,5772**	37,68740**	0,22227**	0,434933*	6,17316**	3576,82ns
Solo	2	49,6332**	20,0100**	9,55783**	17,38563**	63,54332**	33685,51**
Tratamento	4	0,804430**	75,7058**	0,01079ns	0,1653ns	3,06519**	73346,8532**
Repetição	2	0,90961**	3,359403**	0,11096**	0,209993ns	0,59648ns	4634,4098*
Experimento x repetição	2	0,12529*	4,96646**	0,06271**	0,88899**	0,27981ns	34484,87**
Experimento x solo	2	1,33713**	0,026328ns	0,03322**	0,14467ns	0,29060ns	17087,95**
Experimento x tratamento	4	0,05037ns	3,21793**	0,00575ns	0,19919°	0,73708ns	5250,67**
Solo x tratamento	8	0,14277**	3,70771**	0,01656**	0,14357ns	0,58549ns	5738,69**
Exp. x solo x tratamento	8	0,038863ns	0,31579ns	0,00856ns	0,32994**	0,30576ns	1967,88ns
Exp. x solo x trat. x rep.	56	0,05445**	0,67173**	0,01351**	0,37372**	0,60190ns	2113,69*
Profundidade	4	1,9543**	5,93152**	0,86921**	8,21719**	35,04637**	13091,86**
Repetição x profundidade	8	0,02177ns	0,946618**	0,00628ns	0,05131ns	0,79711ns	2227,18ns
Experimento x profund.	4	0,0316875ns	5,5744207**	0,00534ns	0,23532°	1,12989°	9487,80**
Solo x profundidade	8	0,76239**	4,999494**	0,25381**	1,26869**	18,4876**	13640,43**
Tratamento x profund.	16	0,192789**	0,75168**	0,00936ns	0,09402ns	0,60668ns	1528,74ns
Exp. x solo x profund.	8	0,07185*	1,34554**	0,00801ns	0,08778ns	0,61513ns	5680,94**
Exp. X trat. X profund.	16	0,03499ns	0,542429*	0,00889ns	0,04353ns	0,59611ns	692,71ns
Solo x trat. X profund.	32	0,085832**	1,58277**	0,00636ns	0,08191ns	0,726857°	3316,35**
Exp. X solo x trat. x profund.	32	0,02247ns	0,55874**	0,0066901	0,08718ns	0,78706*	1363,09ns
Resíduo	232	0,02809	0,29892	0,0064	0,09117	0,51126	1432,376
CV%		22,15941	43,36743	19,64445	39,90214	45,70128	70,94191

1/ coeficiente de variação de médias; 2/ ns, **, *, °: F não significativo a 5%, significativo a 1, 5 e 10%, respectivamente.

Quadro 8A - Resumo da análise de variância conjunta dos resultados obtidos no cultivo das plantas de eucalipto, sem a aplicação de chuvas simuladas e com a aplicação das mesmas para as variáveis de crescimento e produção do material vegetal, após 6 meses de plantio com aplicação do efluente ETFC.

Fontes de Variação	GL	Quadrados Médios				
		Diâmetro	Altura	Parte aérea	Raiz	Relação parte aérea / raiz
Repetição/experimento	4	0.005708 ns ^{2/}	1423.696 **	109.760 **	30.8547 ns	0.419700 ns
Experimento	1	0.018204°	1108.318 *	2049.288 **	432.1748 **	0.205627 ns
Solo	2	0.531160**	3424.056 **	3635.136 **	56.9461 ns	18.51382 **
Tratamento	4	0.021038*	305.505 ns	238.653 **	245.6201 **	2.056984 **
Experimento x solo	2	0.010684 ns	499.927 °	288.578 **	31.7191 ns	0.431163 ns
Experimento x tratamento	4	0.004860 ns	59.295 ns	8.8961 ns	23.6054 ns	0.280924 ns
Solo x tratamento	8	0.019421**	138.524 ns	214.199 **	44.7441 ns	0.548153 *
Experimento x solo x tratamento	8	0.006932 ns	253.287 ns	11.360 ns	15.8960 ns	0.250953 ns
Resíduo	56	0.006105	173.2838	25.45949	26.35373	0.2477411
CV ^{1/} (%)		9,7	17.1	13.2	28.6	21.7

1/ coeficiente de variação de médias; 2/ ns, **, *, °: F não significativo a 5%, significativo a 1, 5 e 10%, respectivamente.