

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS
ENGENHARIA AMBIENTAL

GABRIELA DE NADAI

Caracterização de solo tropical tratado com efluente de fossa
séptica biodigestora

São Carlos, SP
2012

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS
ENGENHARIA AMBIENTAL

CARACTERIZAÇÃO DE SOLO TROPICAL TRATADO
COM EFLUENTE DE FOSSA SÉPTICA BIODIGESTORA

Aluna: Gabriela De Nadai

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Valéria Guimarães S. Rodrigues

Co-orientador: Dr. Wilson Tadeu Lopes da Silva

Monografia apresentada ao curso de
graduação em Engenharia Ambiental da
Escola de Engenharia de São Carlos da
Universidade de São Paulo.

São Carlos, SP
2012

AUTORIZO A REPRODUÇÃO E DIVULGAÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.


Ficha catalográfica preparada pela Seção de Tratamento da Informação do Serviço de Biblioteca – EESC/USP

D278c	<p>De Nadai, Gabriela Caracterização de solo tropical tratado com efluente de fossa séptica biodigestora. / Gabriela De Nadai ; orientadora Valéria Guimarães Silvestre Rodrigues ; co-orientador Wilson Tadeu Lopes da Silva. -- São Carlos, 2012.</p> <p>Monografia (Graduação em Engenharia Ambiental) -- Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2012.</p> <p>1. Fossa séptica biodigestora. 2. Ensaio em coluna. 3. Efluente. 4. Solo tropical. 5. Lixiviado. Título.</p>
-------	---

FOLHA DE APROVAÇÃO

Candidato(a): **Gabriela de Nadai**

Monografia defendida e aprovada em: **31/07/2012** pela Comissão Julgadora:




Profa. Valéria Guimarães Silvestre Rodrigues



Prof. Osmi José Fejon



Prof. Luiz Antônio Daniel



Prof. Dr. Marcelo Zaiat

Coordenador da Disciplina 1800091- Trabalho de Graduação

*Aos meus pais, Mário e Suzana,
que sempre estiveram ao meu lado, nas
alegrias e nas dificuldades, que em toda sua
humildade nunca faltaram com bons
conselhos e correções, sempre com carinho
e muito amor, e que me ensinaram a buscar,
confiar e amar a Deus. Amo vocês e a vocês
dedico esse trabalho e meu diploma.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço acima de tudo a Deus que tanto nos dá a cada dia: ar, água, sol, lua, estrelas, solo, alimento, vida e tanta beleza, que nada deixa faltar a suas criaturas e filhos. E que me trouxe até aqui.

Aos meus pais e a cada pessoa da minha família, que me ajudaram em tantas dificuldades e que me fazem confiar que, independente das diferenças e desavenças, o amor está sempre lá e sempre prevalece.

Ao Cris, pelo grande companheiro e amigo que é, por tornar tranquilos meus dias mais difíceis, por me lembrar, a cada dia, o que realmente importa nessa vida e por sempre oferecer cuidado e amor. Para o que der e vier, amo você.

Aos grandes amigos da Engenharia Ambiental e tantos outros cursos, que fizeram dos momentos de estudos, trabalhos, projetos e descanso, momentos mais agradáveis e sempre muito divertidos. Grata pela intensa troca de saberes.

Aos grandes amigos de toda vida, que foram parte da minha história e de tantas lições aprendidas e que, perto ou distantes, me proporcionam tantas boas lembranças.

Aos professores que conheci até aqui, que dedicam parte de suas vidas a construir conhecimentos e a compartilhar experiências, grata por tanta dedicação e comprometimento.

À família USP Recicla, em especial a Pazu, que com muita paciência, esperança e amizade, acredita e trabalha por um mundo sócio e ambientalmente melhor e mais justo.

À professora Valéria e ao professor Wilson, que acreditaram em mim e nesse projeto e aceitaram me acompanhar e auxiliar no desenvolvimento desse Trabalho. Grata por todo apoio e paciência.

Ao Flavio que desenvolve um trabalho maravilhoso de educação ambiental e reflorestamento e que abriu as portas do Sítio São João para que pudéssemos fazer as coletas das amostras necessárias para o desenvolvimento desse Trabalho.

Aos técnicos do Departamento de Geotecnia da EESC, José Luiz, Oscar, Décio e, em especial, o Sr. Antonio, pelo auxílio da coleta ao desenvolvimento dos ensaios, pela paciência e dedicação ao me ensinarem tantas coisas novas, sempre com bom humor.

Ao Prof. Luiz Antonio Daniel, pelo auxílio material para quantificação em laboratório de coliformes totais e E. coli.

Aos técnicos, em especial ao Júlio, do Laboratório de Saneamento da EESC e também aos técnicos do Laboratório de Solos da EMBRAPA Pecuária Sudeste.

RESUMO

NADAI, G. **Caracterização de solo tropical tratado com efluente de fossa séptica biodigestora**. 108 p. Trabalho de Graduação (Engenharia Ambiental) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2012.

O reuso de efluentes na agricultura, além de ser alternativa para a disposição final de esgotos, contribui para a redução do consumo de água e de adubos químicos, devido à presença de macro e micronutrientes. Assim, esse trabalho teve como principal objetivo avaliar os efeitos da aplicação do efluente de fossa séptica biodigestora em colunas de solo. Para isso, foram analisadas amostras de efluente de uma fossa biodigestora e caracterizados, segundo parâmetros geológico-geotécnicos e químicos, 3 solos distintos provenientes de área de transição entre as Formações Botucatu e Serra Geral. O ensaio de percolação do efluente foi realizado em 2 colunas, com taxas médias de aplicação de 5,4 cm dia⁻¹ e 21,4 cm dia⁻¹, segundo a permeabilidade de cada coluna. Foi também utilizada uma coluna com aplicação de água deionizada, para servir de amostra controle. Foram caracterizados ainda os lixiviados das colunas e o solo dessas, após o término do ensaio de percolação. Os 3 solos analisados apresentaram pH ácido e predominância da fase arenosa e da caulinita como principal argilomineral. Os efluentes apresentaram alta salinidade e não atenderam aos padrões de corpos d'água classe 3, segundo Resolução CONAMA 357/2005, destinados a irrigação de culturas arbóreas, cerealíferas e forrageiras. Os lixiviados das colunas apresentaram redução nas concentrações de poluentes, quando comparados ao efluente aplicado. Por fim, a aplicação de efluente a uma taxa de 5,4 cm dia⁻¹ proporcionou, em relação à amostra controle, elevação de pH, CTC, e das concentrações de matéria orgânica, macronutrientes e bases trocáveis. Pelos resultados, a alta ou baixa utilização da fossa biodigestora, piora ou melhora, respectivamente, a qualidade do efluente. Já a presença de caminhos preferenciais nas colunas influencia de forma negativa a interação solo-efluente, resultando num lixiviado de pior qualidade. Por fim, nas condições estudadas, a aplicação do efluente da fossa séptica biodigestora melhorou as propriedades do solo e sua fertilidade.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Concentrações médias efluentes de tratamento por fossa séptica.....	25
Tabela 2 - Concentrações máximas e mínimas efluentes a fossas sépticas biodigestoras analisadas por Faustino (2007) e Ohnuma (2008).....	27
Tabela 3 - Alguns parâmetros de qualidade da água doce de corpos de água e lançamento de efluentes segundo a Resolução CONAMA 357.....	29
Tabela 4 - Datas de coleta e caracterização de amostras de efluente de fossa séptica biodigestora coletado no Sítio São João.....	33
Tabela 5 - Dados do ensaio de percolação de efluente tratado.....	58
Tabela 6 - Datas de coleta de amostras de lixiviado e líquido drenado das colunas.....	60
Tabela 7 - Granulometria das amostras de solo A, B e C.....	62
Tabela 8 - Caracterização geotécnica das amostras de solo A, B e C.....	63
Tabela 9 - Caracterização geológica e físico-química das amostras de solo A, B e C.....	64
Tabela 10 - Valores de CTC correspondentes aos principais argilominerais.....	65
Tabela 11 - Resultados de caracterização físico-química e geológica realizada no Laboratório de Solos da EMBRAPA.....	67
Tabela 12 - Resultados de quantificação de macronutrientes, fosfato e sódio realizada no Laboratório de Solos da EMBRAPA.....	68
Tabela 13 - Resultados de quantificação de micronutrientes realizada no Laboratório de Solos da EMBRAPA.....	69
Tabela 14 - Resultados dos valores de soma de bases trocáveis (S), porcentagem de saturação por bases (V) e porcentagem de saturação por Al^{+3} (m) realizada no Laboratório de Solos da EMBRAPA.....	69
Tabela 15 - Concentração de metais dos solos A, B e C.....	70
Tabela 16 - Resultados da caracterização físico-química dos efluentes.....	72
Tabela 17 - Classificação de salinidade para águas de irrigação.....	73
Tabela 18 - Resultados da caracterização quanto à presença de sólidos dos efluentes analisados.....	73
Tabela 19 - Caracterização de efluentes de biodigestores inoculados com esterco ovino e bovino.....	74
Tabela 20 - Resultados da caracterização química dos efluentes analisados.....	75

Tabela 21 - Resultados dos parâmetros geotécnicos (colunas de solo do tipo C 76

Tabela 22 - Caracterização físico-química das amostras de lixiviado das Colunas 3 e 5 - 27/04/12	78
Tabela 23 - Caracterização físico-química das amostras de lixiviado das Colunas 3 e 5 - 2/05/12	79
Tabela 24 - Caracterização química das amostras de lixiviado das Colunas 3, 4 e 5 e do líquido drenado da Coluna 3 - 9/05/12.....	80
Tabela 25 - Quantificação de sólidos das amostras de lixiviado das Colunas 3 e 5 - 27/04/12	81
Tabela 26 - Quantificação de sólidos das amostras de lixiviado das Colunas 3 e 5 - 2/05/12...	82
Tabela 27 - Caracterização química das amostras de lixiviado das Colunas 3 e 5 - 27/04/12.	83
Tabela 28 - Caracterização química das amostras de lixiviado das Colunas 3 e 5 - 2/05/12...	84
Tabela 29 - Caracterização físico-química das amostras de lixiviado das Colunas 3, 4 e 5 e do líquido drenado da Coluna 3 - 9/05/12.....	85

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Esquema de fossa séptica biodigestora modelo EMBRAPA (OHNUMA, 2008) ..	26
Figura 2 – Localização do Sítio São João, local de coleta das amostras de solo e efluente de fossa séptica biodigestora (Obtido e adaptado de Google®)	30
Figura 3 - A – Fossa séptica biodigestora; B – Protótipo didático da fossa para as atividades de educação ambiental; C – Tubetes com mudas para reflorestamento onde é aplicado o efluente da fossa séptica biodigestora.....	31
Figura 4 - Caixa de acumulação de esgoto tratado, ponto de coleta do efluente de fossa séptica biodigestora	32
Figura 5 - A – solo em bandeja para secagem ao ar; B – peneira e destorroador de madeira utilizados no preparo das amostras; C – quarteamento; D – armazenamento das amostras preparadas.....	35
Figura 6 - Massa específica seca – amostras indeformadas em anéis de PVC e em bandejas de alumínio após secagem em estufa.....	36
Figura 7 - Massa específica dos sólidos - Balança utilizada e amostras de solo em contato com água destilada	37
Figura 8 - Massa específica dos sólidos - Dispersão em agitador mecânico e deairação em bomba de vácuo	37
Figura 9 - Massa específica dos sólidos – Aquecimento do picnômetro e homogeneização da suspensão.....	38
Figura 10 - Massa específica dos sólidos - Amostra antes e após secagem em estufa.....	38
Figura 11 - Granulometria conjunta – Adição de solução de defloculante e amostras em descanso	40
Figura 12 - Granulometria conjunta – amostra em dispensor e teste de sedimentação.....	41
Figura 13 - Granulometria conjunta – material retido em peneira 0,075 mm antes e após secagem em estufa	41
Figura 14 - Granulometria conjunta – amostra sendo peneirada e material retido em uma das peneiras	42
Figura 15 - ATD – Maceramento, peneira #200 e material peneirado	43
Figura 16 - ATD - Alto fornos do equipamento da BR Engenharia e compartimentos contendo alumina calcinada e amostra de solo.....	44

Figura 17 - Difractometria de raios X – recipientes plásticos com as lâminas com e sem solução.....	45
Figura 18 - Condutividade elétrica, pH e Eh – agitador mecânico e erlenmyers contendo as suspensões	46
Figura 19 - CTC e SE – peneiramento da amostra em peneira #100 e determinação da massa de solo	46
Figura 20 - CTC e SE - Titulação com azul de metileno e papel filtro contendo gostas da suspensão titulada	47
Figura 21 - A - Talude onde foram coletadas as amostras do solo C; B - Coleta de coluna de solo C	49
Figura 22 - Rasamento das colunas do solo tipo C.....	49
Figura 23 - Esquema de permeâmetro de parede fina, adaptado de Daniel (1994), e permeâmetro utilizado.....	51
Figura 24 - Esquema de sistema hidráulico de carga constante com reservatório de volume constante, modificado de Daniel (1994) e sistema utilizado.....	51
Figura 25 - Esquema de permeâmetro com corpo de prova e selante, modificado de Daniel (1994), e corpo de prova no interior do permeâmetro	52
Figura 26 - Esquema de sistema hidráulico de carga constante com reservatório de variação de volume irrelevante, modificado de Daniel (1994) e sistema utilizado	53
Figura 27 - Aplicação ascendente de água deionizada para saturação e lavagem das colunas	54
Figura 28 - Calibração do volume do reservatório de poliacetato e detalhe do tubo transparente contendo as marcações de nível.....	55
Figura 29 - Determinação da vazão de saída dos reservatórios.....	56
Figura 30 - Esquema e ensaio de percolação de efluente doméstico tratado	57
Figura 31 - Abertura de coluna após ensaio de percolação.....	58
Figura 32: Secagem e armazenamento das amostras de solo após ensaio de percolação.....	59
Figura 33 - Frasco de coleta e amostras de lixiviado.....	61
Figura 34 - Termogramas do solo A, B e C gerados pelo equipamento da BP Engenharia	66
Figura 35 - Difractograma do solo C.....	67
Figura 36 - pH das amostras de lixiviado das Colunas 3 e 5	86
Figura 37 - Turbidez e condutividade elétrica das amostras de lixiviado das Colunas 3 e 5...	87
Figura 38 - DBO e DQO das amostras de lixiviado das Colunas 3 e 5	87
Figura 39 - Nitrogênio total das amostras de lixiviado das Colunas 3 e 5.....	88
Figura 40 - Nitrito e nitrato das amostras de lixiviado das Colunas 3 e 5	88

Figura 41 - Fosfato e potássio das amostras de lixiviado das Colunas 3 e 5	89
Figura 42 - Sólidos suspensos e dissolvidos das amostras de lixiviado das Colunas 3 e 5	90
Figura 43 - Sulfato das amostras de lixiviado das Colunas 3 e 5	91
Figura 44 - Ferro e alumínio das amostras de lixiviado das Colunas 3 e 5.....	91
Figura 45 - Manganês, magnésio, sódio, zinco, chumbo e cobre presentes nas amostras de lixiviado das Colunas 3 e 5	92
Figura 46 - pH em H ₂ O e em CaCl ₂ das Colunas 3 (após percolação do efluente) e 4(amostra controle, após percolação de água deionizada)	94
Figura 47 - CTC e acidez potencial das Colunas 3 Colunas 3 (após percolação do efluente) e 4(amostra controle, após percolação de água deionizada)	94
Figura 48 - Cálcio, magnésio e potássio trocáveis nas Colunas 3 (após percolação do efluente) e 4(amostra controle, após percolação de água deionizada)	95
Figura 49 - Fósforo assimilável e matéria orgânica nas Colunas 3 (após percolação do efluente) e 4(amostra controle, após percolação de água deionizada).....	96
Figura 50 - Soma de bases trocáveis e porcentagem de saturação por bases das Colunas 3 (após percolação do efluente) e 4(amostra controle, após percolação de água deionizada)....	96
Figura 51 - Sulfato solúvel nas Colunas 3 (após percolação do efluente) e 4(amostra controle, após percolação de água deionizada).....	97
Figura 52 - Potássio, cálcio e magnésio nas Colunas 3 (após percolação do efluente) e 4(amostra controle, após percolação de água deionizada).....	98
Figura 53 - Ferro, manganês, zinco e cobre nas Colunas 3 (após percolação do efluente) e 4(amostra controle, após percolação de água deionizada).....	99
Figura 54: Alumínio, chumbo, cádmio, níquel e cromo nas Colunas 3 (após percolação do efluente) e 4(amostra controle, após percolação de água deionizada).....	100
Figura 55 - Sódio trocável nas Colunas 3 (após percolação do efluente) e 4(amostra controle, após percolação de água deionizada).....	101

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
APP	Área de Preservação Permanente
ATD	Análise Térmica Diferencial
CETESB	Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental
CONAMA	Conselho Nacional de Meio Ambiente
CP	Corpo de prova
CTC	Capacidade de troca catiônica
DRX	Difratometria de Raios X
EESC	Escola de Engenharia de São Carlos
EFSB	Efluente de Fossa Séptica Biodigestora
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
ETE	Estação de Tratamento de Esgoto
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IPT	Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo
SE	Superfície específica
USP	Universidade de São Paulo

LISTA DE SÍMBOLOS

cm	Centímetros
e	Índice de vazios
Eh	Potencial de oxido-redução
g	Gramas
k	Condutividade hidráulica
mEq	Miliequivalentes
min	Minutos
mL	Mililitros
mm	Milímetros
M_{p+w}	Massa do picnômetro + água
M_{p+w+s}	Massa do conjunto picnômetro + água + sólidos
M_s	Massa de sólidos
°C	Graus centígrados
pH	Potencial hidrogeniônico
V_s	Volume de sólidos
V_v	Volume de vazios
w	Teor de umidade
η	Porosidade
ρ_d	Massa específica seca
ρ_s	Massa específica de sólidos
ρ_w	Massa específica da água

SUMÁRIO

1.INTRODUÇÃO	21
2.OBJETIVOS.....	23
2.1. Objetivo geral	Erro! Indicador não definido.
2.2. Objetivos específicos.....	Erro! Indicador não definido.
3.REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	24
3.1. Fossas Sépticas.....	24
3.2. Fossa Séptica Biodigestora	25
3.3. Aplicação de efluentes e alterações no solo	27
3.4. Legislação e Normas	28
4.DESCRIÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	30
5.MATERIAIS E MÉTODOS.....	32
5.1. Efluente de Fossa Séptica Biodigestora	32
5.1.1. <i>Coleta.....</i>	32
5.1.2. <i>Caracterização</i>	32
5.2. Solo.....	33
5.2.1. <i>Coleta.....</i>	33
5.2.2. <i>Caracterização</i>	34
5.3. Colunas	48
5.3.1. <i>Coleta e rasamento das colunas.....</i>	48
5.3.2. <i>Caracterização</i>	50
5.3.3. <i>Lavagem e saturação.....</i>	53
5.4. Sistema de percolação de efluente tratado em colunas	54
5.4.1. <i>Calibração do volume dos reservatórios.....</i>	54
5.4.2. <i>Montagem e percolação do efluente.....</i>	56

5.4.3.	<i>Desmontagem dos sistemas de percolação.....</i>	58
5.4.4.	<i>Caracterização do solo C após percolação de efluente</i>	59
5.5.	Lixiviado da percolação de efluente doméstico tratado	60
5.5.1.	<i>Coleta.....</i>	60
5.5.2.	<i>Caracterização do lixiviado das colunas de percolação.....</i>	61
6.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	62
6.1.	Caracterização geológica-geotécnica dos solos A, B e C	62
6.2.	Caracterização do efluente de fossa séptica biodigestora	71
6.3.	Sistema de percolação e solo de efluente doméstico tratado	76
6.3.1.	<i>Caracterização das Colunas do solo C</i>	76
6.3.2.	<i>Caracterização de lixiviado e drenado das colunas</i>	77
6.3.3.	<i>Caracterização do solo após percolação</i>	93
7.	CONCLUSÕES.....	102
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	103
	APÊNDICES.....	107
	APÊNDICE A – Curvas granulométricas dos solos A, B e C.....	107
	APÊNDICE B – Caracterização das amostras de solo tipo C presente na Coluna 3 (aplicação de EFSB 2-A) e na Coluna 4 (aplicação de água deionizada) após ensaio de percolação.....	108

1. INTRODUÇÃO

No Brasil, segundo o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE (2010a), em 2008, por volta de 55 % dos municípios tinham rede coletora de esgoto, resultando em aproximadamente 34,8 milhões de brasileiros sem acesso a esse serviço. Porém, o mesmo estudo apresenta um dado ainda mais alarmante: em 2008, apenas 28,5% dos municípios brasileiros trataram seus esgotos. Isso demonstra que grande parte dos esgotos gerados no Brasil não é tratada adequadamente, poluindo corpos d'água e expondo a população brasileira aos riscos decorrentes dessa contaminação, além de provocar o encarecimento do tratamento de água.

Segundo os “Indicadores de Desenvolvimento Sustentável” (IBGE, 2010b), a falta de saneamento é um dos maiores problemas social e ambiental do Brasil. E, se na área urbana o Brasil ainda tem muito que melhorar, na área rural a situação é ainda pior. Segundo dados de 2008, 58,9 % da população urbana tinha acesso à rede coletora de esgotos, 21,8 % tinha acesso à fossa séptica e 14,9 % ainda utilizavam fossas rudimentares. Já na área rural, a porcentagem da população com acesso a rede era de 5,8 % e de 18,3 % com acesso a fossa séptica, porém 46,3 % da população ainda utilizavam fossas rudimentares.

Adicionalmente à questão dos esgotos no Brasil, há também a problemática da escassez hídrica, que, para Gonçalves (2009), pode ser de origem quantitativa (secas, alta demanda) e/ou qualitativa (devido à poluição, causada em partes pela falta de tratamento dos esgotos). Apesar disso, a agricultura, que é o setor que mais consome água, desperdiça cerca de 60% de toda essa água, segundo Rebouças (2003),.

Além do alto consumo hídrico, o setor agrícola ainda é responsável pelo crescente consumo de fertilizantes químicos que, em 2008, segundo IBGE (2010b), foi de um total de 143,7 kg ha⁻¹ de área plantada. Esses dados se referem aos fertilizantes ricos em nitrogênio, fósforo e potássio, os quais, ao serem carregados para corpos d'água, podem também comprometer sua qualidade, devido à eutrofização.

Uma das opções para o setor agrícola é o reuso de esgotos, que sendo aplicado de forma segura e eficiente, possibilita, entre outras coisas, que a água de melhor qualidade seja destinada a fins mais nobres. Segundo Mancuso e Santos (2003), estima-se que na região do Alto Tietê se poderia disponibilizar cerca de três metros cúbicos por segundo de água de boa qualidade adicionais para o abastecimento público, apenas com a utilização na agricultura dos esgotos dos municípios dessa região.

Ainda segundo Mancuso e Santos (2003), o reuso de esgotos na agricultura apresenta vantagens econômicas, ambientais e sociais, entre elas: o incremento da produção agrícola; a redução da necessidade de emprego de fertilizantes, pois os esgotos contêm macro e micronutrientes; a redução da deposição de esgotos em corpos d'água; a melhoria das condições de conservação do solo, pelo aumento de húmus e matéria orgânica e o aumento do nível nutricional das populações e a maior disponibilidade de empregos, pelo aumento da produção de alimentos.

Visando à melhoria do saneamento rural e o desenvolvimento da agricultura orgânica, pelo reuso de esgoto tratado na agricultura, a EMBRAPA (Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária), desenvolveu a fossa séptica biodigestora, que possibilita o tratamento de esgotos sanitários domésticos, por processo de biodigestão, e a aplicação do efluente desse tratamento no solo, como adubo orgânico (NOVAES et al., 2002). Porém, ainda são poucos os estudos que analisam os efeitos da aplicação desse efluente em diferentes tipos de solo.

Nesse contexto, foi desenvolvido experimento para aplicação, em colunas de solo, de efluente da fossa séptica biodigestora e análise de seus efeitos em um latossolo vermelho-amarelo associado a areias quartzosas, de uma propriedade rural do município de São Carlos. Nessa propriedade já se realiza a aplicação desse efluente, de forma não controlada, em mudas de árvores para reflorestamento. Os ensaios de aplicação do efluente foram realizados em colunas, possibilitando sua aplicação controlada e segura e a análise da influência do efluente nas características dos solos, bem como as variações em profundidade desses efeitos.

2. OBJETIVOS

O objetivo principal desta pesquisa foi avaliar os efeitos da aplicação de esgoto tratado em solos tropicais, através de ensaios em coluna, visando obter um conhecimento mais amplo sobre os riscos e benefícios dessa prática.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. Fossas Sépticas

Jordão (2005) define a fossa séptica como sendo um dispositivo de tratamento de esgotos sanitários, constituído por câmara construída para reter o esgoto por tempo determinado, permitindo a sedimentação dos sólidos, transformando-os bioquimicamente em substâncias e compostos mais estáveis e simples. Os diferentes processos, definidos pelo mesmo autor, que ocorrem em uma fossa séptica são os seguintes:

- Retenção: o esgoto é detido na fossa por um período de 12 a 24 horas;
- Decantação: ocorre simultaneamente à retenção, onde 60 a 70% dos sólidos em suspensão sedimentam, dando origem ao lodo, os sólidos não sedimentados, misturados com gases, emergem dando origem a espuma;
- Digestão anaeróbia: lodo e espuma são degradados por bactérias anaeróbias, destruindo total ou parcialmente o material volátil e os organismos patogênicos;
- Redução do volume de lodo: em consequência da digestão anaeróbia, ocorre a formação de gases e líquidos e a redução de volume de sólidos retidos, os quais adquirem características estáveis.

Para Batalha (1989) a fossa séptica representa um sistema individual de disposição de esgotos domésticos, muito utilizada em áreas sem a rede coletora de esgoto, recebendo e tratando todos os despejos domésticos. O mesmo autor afirma que o efluente da fossa séptica necessita de disposição adequada no solo, pois esse é altamente contaminado, devendo-se manter distância vertical mínima das águas subterrâneas, e que, em relação à saúde pública, um aspecto fundamental para disposição no solo é a remoção de bactérias, vírus e outros causadores de doenças.

Como disposição do efluente líquido da fossa séptica, Jordão (2005) aponta os processos de diluição em corpo d'água receptor, sumidouro, vala de infiltração, vala de filtração e filtro de areia, sendo que para a escolha do processo é necessário considerar a natureza e uso do solo, a profundidade do lençol freático, a permeabilidade do solo, a localização de poços e o volume e taxa de renovação das águas de superfície.

A Tabela 1 apresenta as concentrações médias, segundo Von Sperling (2005), dos principais poluentes presentes no efluente de uma fossa séptica.

Tabela 1 - Concentrações médias efluentes de tratamento por fossa séptica

Parâmetros	Concentrações
DBO (mg L ⁻¹)	200 – 250
DQO (mg L ⁻¹)	400 – 450
Sólidos suspensos (mg L ⁻¹)	100 – 150
Nitrogênio amoniacal (mg L ⁻¹)	> 20
Nitrogênio total (mg L ⁻¹)	>30
Fósforo total (mg L ⁻¹)	>4
Coliformes fecais (NMP/100 mL)	10 ⁷ - 10 ⁸
Ovos (ovo L ⁻¹)	>1

Adaptado de Von Sperling (2005)

3.2. Fossa Séptica Biodigestora

Segundo NOVAES et al. (2002) a Fossa Séptica Biodigestora desenvolvida pela EMBRAPA visa substituir as fossas sépticas, negras e o esgoto a céu aberto e utilizar o efluente como adubo orgânico, de forma a minimizar os gastos com adubação química. O processo de biodigestão, segundo o mesmo autor, ocorre pela decomposição anaeróbia da matéria orgânica, resultando na geração de biogás e de um efluente estabilizado, sem odores e livre de organismos patogênicos, o qual pode ser aplicado na agricultura.

Este sistema trata apenas o esgoto proveniente do vaso sanitário e é composto por 3 caixas de fibrocimento em série (Figura 1 **Erro! Fonte de referência não encontrada.**), com volume de 1000 litros cada uma, sendo que a tubulação do vaso sanitário está ligada diretamente a primeira caixa. As três caixas são enterradas no solo como forma de isolar termicamente o sistema. Este sistema conta ainda com alimentação da primeira caixa com mistura de esterco bovino com água, e de sistema de alívio de gases, para saída dos gases gerados.

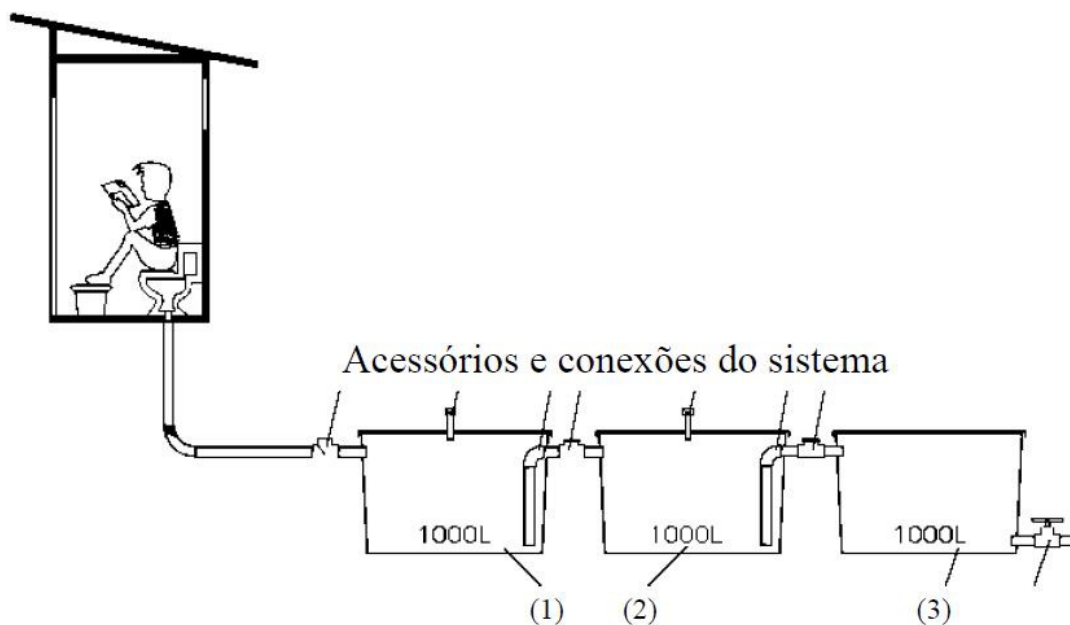


Figura 1 - Esquema de fossa séptica biodigestora modelo EMBRAPA (OHNUMA, 2008)

Novaes et al. (2002) analisou amostras mensais da 3ª caixa de uma fossa séptica biodigestora quanto à presença de coliformes totais e fecais, obtendo valores de, respectivamente, 1100 NMP/100 mL para todas as análises e 3 NMP/100 mL nos dois primeiros meses e ausente nos demais. Já Ohnuma (2008) analisou o efluente de uma fossa séptica biodigestora, contendo areia e brita na terceira caixa, e obteve resultados que variaram de $1,1 \times 10^5$ a $8,0 \times 10^5$ UFC/100 mL para coliformes totais e de $2,0 \times 10^2$ a $7,0 \times 10^2$ NMP/mL para coliformes fecais, apesar de terem sido alcançadas eficiências de remoção de mais de 99% para coliformes fecais.

A Tabela 2 apresenta as concentrações máximas e mínimas efluentes a fossas sépticas biodigestoras, analisadas por Ohnuma (2008) e Faustino (2007), sendo que a segunda autora analisou os efluentes de duas fossas sépticas biodigestoras inoculadas com esterco bovino e uma com esterco ovino.

Tabela 2 - Concentrações máximas e mínimas efluentes a fossas sépticas biodigestoras analisadas por Faustino (2007) e Ohnuma (2008)

Parâmetros	Resultados Faustino (2007)	Resultados Ohnuma (2008)
pH	7,73 – 8,67	7,62 – 7,72
DQO (mg L ⁻¹)	252 – 638	296 – 341
DBO (mg L ⁻¹)	153 – 411	63 – 88
Nitrato (mg L ⁻¹)	0,66 – 3,31	0,29 – 0,94
Nitrogênio amoniacal (mg L ⁻¹)	269 – 562	282 – 416
Fosfato total (mg L ⁻¹)	7 – 78	28 – 80
Sólidos Suspensos Totais (mg L ⁻¹)	66 – 134	33 – 175
Sólidos Suspensos Voláteis (mg L ⁻¹)	64 – 122	29 -139
Sólidos Suspensos Fixos (mg L ⁻¹)	2 -28	4 - 36

3.3. Aplicação de efluentes e alterações no solo

Ao analisar os efeitos da aplicação de efluente nas propriedades físicas e hídras de um latossolo, comparando-se uma área testemunha com uma área irrigada com água rica em sódio e outra irrigada com efluente de lagoa de estabilização, Gloaguen (2005), verificou que a ocorrência de alteração na condutividade hidráulica nas duas áreas irrigadas, evidenciando-se que não apenas a aplicação de efluente tem a capacidade de alterar a condutividade hidráulica do solo. Os resultados de condutividade hidráulica em meio não saturado das áreas irrigadas diminuiram nas umidades mais elevadas e aumentaram nas umidades baixas e os resultados de condutividade hidráulica em meio saturado apresentaram diminuição para as duas áreas, em todo perfil de solo analisado.

Anami et al. (2008) com o objetivo de avaliar a lixiviação de íons nitrato e fosfato em colunas de solo, verificou que a aplicação de águas residuárias da suinocultura, após tratamento em reatores anaeróbios, apresenta grande potencial de contaminação dos lençóis freáticos por nitrato, diferente do fosfato, que apresentou potencial de contaminação baixo, devido a sua alta reatividade.

Também com o objetivo de analisar os riscos de contaminação do lençol freático, Andrade et al. (2005) estudou as características químicas do lixiviado de colunas de solos do tipo Gleissolo e Argissolo, cultivadas com milho e irrigadas com diferentes tipos de água

(água de abastecimento, água com fertilizante, efluente de esgoto e efluente de esgoto modificado com KCl a $0,1 \text{ mol L}^{-1}$). Através dessa análise, os autores concluíram que os níveis de nitrato, condutividade elétrica e sódio no lixiviado das colunas de Argissolo foram superiores aos das colunas de Gleissolo.

Ao avaliar os efeitos de um sistema de infiltração rápida em área de Latossolo Vermelho-escuro com a aplicação de efluente de uma fossa séptica, Correa, Filho e Bernardes (2000) verificaram que o sistema atingiu eficiência de 88,3% na remoção de fósforo e melhorias ambientais e ecológicas na área irrigada, gerando condições necessárias ao estabelecimento de cobertura vegetal no local estudado.

Duarte et al. (2008), avaliaram os efeitos em um Latossolo vermelho-amarelo da aplicação de efluente de uma Estação de Tratamento de Esgoto (ETE), em sistema de gotejamento em um cultivo de pimentão. Ao final do experimento, concluíram que o efluente utilizado mostrou-se física e quimicamente adequado para a irrigação, porém, com exceção da concentração de matéria orgânica, não ocorreram alterações significativas nas concentrações de fósforo, potássio e pH do solo.

Por fim, Novaes et al. (2002), ao comparar os efeitos da aplicação do efluente de fossa séptica biodigestora com adubação química (NPK), nas camadas de 0 a 10 e de 10 a 20 cm, concluiu que aplicação do efluente resultou em maiores valores de matéria orgânica, fósforo extraível e acidez potencial na primeira camada. Porém provocou aparente lixiviação de potássio e cálcio para a camada de 10-20 cm. Foram também realizadas análises foliares para determinação de macro e micronutrientes, constatando-se que a aplicação do efluente provocou aumento de cálcio, magnésio, fósforo, ferro, cobre e manganês nas plantas analisadas.

3.4. Legislação e Normas

A Resolução nº 357 do Conselho Nacional de Meio Ambiente (CONAMA, 2005) classifica os corpos de água em cinco classes distintas, de acordo com seus usos. As cinco classes são as seguintes:

Classe especial: destinada ao consumo humano (após desinfecção), à preservação de comunidades aquáticas e de ambientes aquáticos em unidades de conservação de proteção integral;

Classe 1: destinada ao abastecimento humano (após tratamento simplificado); proteção comunidades aquáticas; recreação de contato primário (natação, esqui aquático);

irrigação de hortaliças consumidas cruas e de frutas que se desenvolvam rentes ao solo e que sejam ingeridas cruas sem remoção de película e à proteção das comunidades aquáticas em Terras Indígenas;

Classe 2: destinada ao abastecimento para consumo humano (após tratamento convencional); à proteção das comunidades aquáticas, à recreação de contato primário; irrigação de hortaliças, plantas frutíferas e de parques, com os quais o público possa vir a ter contato direto e à aquicultura e à atividade de pesca;

Classe 3: abastecimento para consumo humano (após tratamento convencional ou avançado), irrigação de culturas arbóreas, cerealíferas e forrageiras, à pesca amadora, à recreação de contato secundário e à dessedentação de animais;

Classe 4: destinada à navegação e à harmonia paisagística.

Tabela 3 - Alguns parâmetros de qualidade da água doce de corpos de água e lançamento de efluentes segundo a Resolução CONAMA 357

Parâmetro	Classe 1	Classe 2	Classe 3	Classe 4	
Coliformes fecais (NMP/100mL)	≤200	≤1000	≤200	-	
DBO (mg L ⁻¹)	≤3	≤5	≤3	-	
Turbidez (NTU)	≤40	≤100	≤40	-	
pH	6,0 a 9,0	6,0 a 9,0	6,0 a 9,0	6,0 a 9,0	
Sólidos Dissolvidos Totais (mg L ⁻¹)	≤500	≤500	≤500	-	
Nitrato (mg L ⁻¹)	≤10,0	≤10,0	≤10,0	-	
Nitrito (mg L ⁻¹)	≤1,0	≤1,0	≤1,0	-	
Nitrogênio Amoniacal Total (mg L ⁻¹)	pH ≤ 7,5	3,7	3,7	3,7	-
	7,5 ≤ pH ≤ 8,0	2,0	2,0	2,0	-
	8,0 ≤ pH ≤ 8,5	1,0	1,0	1,0	-
	8,5 ≤ pH	0,5	0,5	0,5	-
Fósforo Total (mg L ⁻¹)	ambiente lêntico	≤0,020	≤0,020	≤0,020	-
	ambiente intermediário	≤0,025	≤0,025	≤0,025	-
	ambiente lótico	≤0,10	≤0,10	≤0,10	-

Adaptado de CONAMA (2005)

4. DESCRIÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

As amostras utilizadas, tanto de efluente quanto de solos, foram coletadas no Sítio São João, localizado na área rural do município de São Carlos, estado de São Paulo, na divisa de São Carlos com o município de Itirapina (Figura 2).

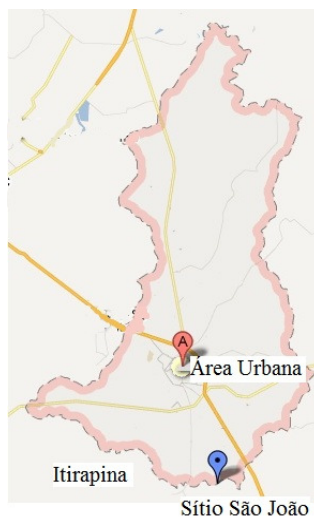


Figura 2 – Localização do Sítio São João, local de coleta das amostras de solo e efluente de fossa séptica biodigestora (Obtido e adaptado de Google®)

A região de São Carlos apresenta clima quente com inverno seco, dentro de zona tropical de altitude, no domínio de clima Cwa segundo a classificação de Köppen. As temperaturas médias diárias variaram de 5,5 a 28,1°C, as mensais de 17,3 a 23,6°C e as médias anuais de 20,8 a 21,7°C. A precipitação máxima diária foi de 104,6 mm e a máxima mensal de 470 mm, somando até 26 dias chuvosos, sendo que os valores anuais acumulados variaram de 1138 e 1593 mm, com concentração entre os meses de outubro a março. (MIRANDA¹, 2005 apud VELOZO, 2006, p. 33-34).

Segundo o Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo – IPT (1998), a região está localizada em área de transição entre as Formações Botucatu e Serra Geral, em área de Latossolo Vermelho-Amarelo associado a Areias Quartzosas.

¹ MIRANDA E. E. (Coord.). Sistema de gestão territorial para ABAG/RP. EMBRAPA Monitoramento por satélite, Campinas, 2005. Disponível em <<http://www.cdbrasil.cnpn.embrapa.br>>. Acesso em 2 de fevereiro de 2006.

O sítio São João localiza-se na Bacia do ribeirão Feijão, a jusante de uma das captações de água do município de São Carlos. Ali é desenvolvido um Programa de Educação Ambiental, com o desenvolvimento de visitas monitoradas com crianças, com atividades relacionadas às temáticas de tratamento de efluentes, reciclagem, compostagem, contando ainda com visitas a Área de Preservação Permanente (APP) da propriedade, com realização de plantios de mudas para recomposição da mata local.

A fossa séptica biodigestora, presente no sítio, foi instalada há mais de três anos e está ligada a todos os vasos sanitários do sítio, tratando um volume médio de 1000 litros a cada cinco dias. Essa fossa biodigestora é constituída por quatro caixas d'água de 1000 litros cada, sendo que a aplicação de esterco bovino é realizada apenas na primeira caixa e as duas últimas foram instaladas para o armazenamento do efluente tratado. Essa fossa é também utilizada no roteiro de visita das atividades de educação ambiental do sítio e o efluente tratado é aplicado nos tubetes de mudas e nos berços de reflorestamento (Figura 3).



Figura 3 - A – Fossa séptica biodigestora; B – Protótipo didático da fossa para as atividades de educação ambiental; C – Tubetes com mudas para reflorestamento onde é aplicado o efluente da fossa séptica biodigestora

5. MATERIAIS E MÉTODOS

5.1. Efluente de Fossa Séptica Biodigestora

5.1.1. Coleta

Foram realizadas duas coletas de Efluente de Fossa Séptica Biodigestora (EFSB) no Sítio São João, município de São Carlos, uma em agosto de 2011 e outra em abril de 2012 (EFSB 1 e EFSB 2, respectivamente). O efluente foi coletado, utilizando-se um recipiente plástico de 5 litros. A coleta foi realizada na caixa de acumulação do esgoto tratado, a última caixa da fossa séptica biodigestora (Figura 4), e em seguida o efluente foi transferido para uma bombona plástica de 60 litros.



Figura 4 - Caixa de acumulação de esgoto tratado, ponto de coleta do efluente de fossa séptica biodigestora

5.1.2. Caracterização

Para caracterização do EFSB, foram coletadas amostras em frascos plásticos de 500 mL, diretamente nas bombonas. Os frascos utilizados foram previamente lavados com água destilada e com o próprio efluente. As amostras foram enviadas para caracterização no Laboratório de Saneamento do Departamento de Hidráulica e Saneamento, no campus de São Carlos da Universidade de São Paulo (USP).

As datas de coleta e análise das amostras são apresentadas na Tabela 4. Os frascos contendo as amostras de efluente foram conservados fechados, em estufa, a temperatura média de 18 °C, até a data da caracterização.

Tabela 4 - Datas de coleta e caracterização de amostras de efluente de fossa séptica biodigestora coletado no Sítio São João

Amostra	Data da Coleta	Data da Caracterização
EFSB 1	01/08/2011	02/08/2011
EFSB 2 - A	03/04/2012	23/04/2012
EFSB 2 - B	03/04/2012	07/05/2012

Seguindo os métodos apresentados pelo *Standard methods for the examination of water and wastewater* (APHA, 2005), as amostras de efluente foram caracterizadas segundo os seguintes parâmetros:

- pH, turbidez e condutividade elétrica;
- Coliformes totais e *E. coli*;
- DBO e DQO;
- Fosfato e fósforo total;
- Nitrogênio total, amoniacal, nitrato e nitrito;
- Sólidos sedimentáveis, totais, suspensos e dissolvidos;
- Sulfato e sulfeto;
- Potássio, ferro, manganês, magnésio, alumínio e sódio;
- Zinco, chumbo, cobre e cromo.

5.2. Solo

5.2.1. Coleta

As coletas de amostras de solo foram realizadas também no Sítio São João, em duas datas distintas, a primeira, em agosto de 2011, quando foram coletados os solos A e B, e a segunda, em abril de 2012, quando foi coletado o solo C, o qual foi utilizado para a aplicação do efluente tratado, durante ensaios em colunas.

As amostras do solo A foram coletadas em uma área dentro do Sítio São João, com cobertura de gramínea onde, até a data da coleta, não havia sido aplicado nenhum tipo de adubo ou agrotóxico. As amostras do solo B foram coletadas em propriedade vizinha ao Sítio São João, em área de pastagem, em local sem presença visível de fezes bovinas. Para a coleta das amostras dos solos A e B, retirou-se aproximadamente 20 cm da camada superficial, de

forma a evitar a presença de raízes. Para cada solo foi coletada amostra para determinação da massa específica seca, além de amostra deformada para caracterização geológica-geotécnica.

As amostras do solo C foram coletadas em talude sem cobertura vegetal, em local onde não havia plantações e também não havia sido aplicado nenhum tipo de adubo ou agrotóxico, em área dentro do Sítio São João. Foram coletadas duas amostras indeformadas para determinação da massa específica seca, além de amostra deformada para caracterização geológica-geotécnica, todas a uma profundidade de aproximadamente 40 cm.

Para a coleta de amostras indeformadas, para determinação da massa específica seca, foram utilizados anéis de PVC de aproximadamente 7,5 cm de diâmetro interno e altura variável para cada anel utilizado. As amostras deformadas foram coletadas a partir do emprego de uma pá.

5.2.2. *Caracterização*

Buscando a preparação das amostras deformadas para sua posterior caracterização, essas foram secas ao ar em bandejas metálicas, destorroadas, peneiradas para retirada de raízes, quarteadas e, em seguida, foram colocadas em sacos plásticos identificados para armazenamento, como apresentado na Figura 5.



Figura 5 - A – solo em bandeja para secagem ao ar; B – peneira e destorroador de madeira utilizados no preparo das amostras; C – quartejamento; D – armazenamento das amostras preparadas

Os parâmetros analisados para caracterização das amostras, bem como os métodos utilizados são apresentados a seguir.

Teor de umidade

Para a determinação do teor de umidade (w) das amostras, no Laboratório de Mecânica de Solos do Departamento de Geotecnia da Escola de Engenharia de São Carlos (EESC) - USP, procedeu-se como descrito por Nogueira (1995). Determinou-se a massa de três cápsulas metálicas contendo solo quartejamento, antes e após essas serem secas em estufa a 100°C por 24 horas. O teor de umidade da amostra é a relação entre a massa de água (diferença entre as massas inicial e seca) e a massa de sólidos (massa seca).

O teor de umidade das amostras foi determinado antes do início de qualquer outro ensaio de caracterização, sempre que necessário conhecer a massa de sólidos.

Massa específica seca

Para a determinação da massa específica seca (ρ_d), também no Laboratório de Mecânica de Solos do Departamento de Geotecnia da EESC-USP, foram utilizadas as amostras indeformadas coletadas em anéis de PVC de volumes conhecidos. Após o rasamento dos anéis, de forma a igualar o volume de solo ao volume interno desses, as amostras foram transferidas para bandejas de alumínio de massa conhecida e foram armazenadas em estufa a 100 °C por 24 horas (Figura 6). Por fim, após esfriamento, determinou-se a massa seca das amostras em balança de precisão de 0,01 g (Geaka BG 4000).

Para os solos A e B a determinação foi realizada através de amostras simples e para o solo C, a determinação foi através da média entre as 2 amostras coletadas.



Figura 6 - Massa específica seca – amostras indeformadas em anéis de PVC e em bandejas de alumínio após secagem em estufa

Por fim, a massa específica seca (ρ_d), segundo Nogueira (1995), é dada pela relação entre a massa da amostra seca e o volume do anel de PVC.

Massa específica dos sólidos

Baseado no método apresentado por Nogueira (1995), em balança de precisão de 0,01 g (Geaka BG 4000), foi determinada a massa de amostras simples (50,55 g para o solo A, 60,14 g para o solo B e 50,25 g para o solo C). Após tal determinação, adicionou-se água destilada ao béquer contendo as amostras de solo, homogeneizando a mistura. Com o béquer tampado, manteve-se o solo em contato com a água destilada por 12 horas (Figura 7).



Figura 7 - Massa específica dos sólidos - Balança utilizada e amostras de solo em contato com água destilada

Após esse período de contato, realizou-se a dispersão das amostras em agitador mecânico (Solotest) por aproximadamente 10 minutos. Com auxílio de funil de vidro, as amostras foram transferidas para picnômetros devidamente identificados. Em seguida, procedeu-se a retirada de ar das suspensões em bomba de vácuo (Figura 8).



Figura 8 - Massa específica dos sólidos - Dispersão em agitador mecânico e deairação em bomba de vácuo

Após a retirada de ar, completou-se o volume dos picnômetros com água destilada e deairada e os picnômetros foram resfriados até atingir temperatura entre 15 e 25 °C. Em seguida, as amostras foram homogeneizadas com misturador plástico e, com auxílio de termômetro, foram determinadas as temperaturas em 3 pontos diferentes no interior da amostra. Determinada a temperatura média, determinou-se a massa do picnômetro, do solo e da água. Esse procedimento foi repetido até a obtenção de 5 medidas de massa em 5 temperaturas diferentes, entre 15 e 25 °C (Figura 9). Cuidou-se também para manter o

menisco na marca do volume útil do picnômetro, adicionando água destilada deairada ou retirando o excesso.



Figura 9 - Massa específica dos sólidos – Aquecimento do picnômetro e homogeneização da suspensão

Após as 5 determinações de massas, as suspensões foram transferidas para pirex identificados e secou-se o material a 100 °C em estufa por 24 horas. Por fim, determinou-se a massa seca, que corresponde à massa de sólidos (Figura 10).



Figura 10 - Massa específica dos sólidos - Amostra antes e após secagem em estufa

A massa específica de sólidos (ρ_s) da amostra é dada pela média entre as massas específicas de sólidos calculadas em cada temperatura de cada uma das 5 determinações do experimento. O cálculo do ρ_s é dado pela Equação 1, onde M_s é a massa de sólidos, M_{p+w+s} é a massa do conjunto picnômetro + água + sólidos, M_{p+w} é a massa de picnômetro + água obtida

através da curva de calibração do picnômetro e ρ_w é a massa específica da água, todos relativos a uma mesma temperatura.

$$\rho_s = \frac{M_s}{M_s - M_{p+w+s} + M_{p+w}} \rho_w \quad \text{Equação 1}$$

Índice de vazios

O índice de vazios (e) foi calculado seguindo o apresentado por Nogueira (1995), através da Equação 2, onde V_v é o volume de vazios e V_s , o volume de sólidos.

$$e = \left(\frac{\rho_s}{\rho_d} \right) - 1 = \frac{V_v}{V_s} \quad \text{Equação 2}$$

Porosidade

A porosidade (η) foi calculada seguindo a Equação 3, também apresentada por Nogueira (1995), onde V é o volume da amostra.

$$\eta = \frac{e}{1+e} = \frac{V_v}{V} \quad \text{Equação 3}$$

Análise Granulométrica

O ensaio de granulometria conjunta foi realizado seguindo recomendações da norma da Associação Brasileira de Normas Técnicas NBR 7181 (ABNT, 1984), no Laboratório de Mecânica dos Solos do Departamento de Geotecnia da EESC-USP, em março de 2012 para os solos A e B e em abril de 2012 para o solo C.

Determinou-se a massa inicial de solo, em balança de precisão de 0,01 g (Geaka BG 4000), sendo de aproximadamente 75,07 g de solo A, 158,80 g de solo B e 65,15 g de solo C, todas de amostras quarteadas. Determinou-se também o teor de umidade das amostras no início dos experimentos, a fim de se determinar a massa de sólidos de cada amostra.

Adicionou-se às amostras 125 mL de solução de hexametáfosfato de sódio, a uma concentração de 45,7 g L⁻¹. As suspensões foram em seguida homogeneizadas com bastão de vidro e deixadas em contato com o defloculante por 24 horas (Figura 11).



Figura 11 - Granulometria conjunta – Adição de solução de defloculante e amostras em descanso

Após o período de contato, transferiu-se a suspensão para dispersor e deixou-se dispersar por 15 minutos. Ao final, transferiu-se a suspensão para proveta de 1000 mL, cuidando-se para não perder material. Devido à presença de espuma, completou-se o volume da proveta apenas após o desaparecimento dessa, mantendo-se a proveta fechada com filme plástico.

Após o desaparecimento da espuma, completou-se o volume das provetas com água destilada e homogeneizou-se a suspensão por aproximadamente 1 minuto e, em seguida, introduziu-se o densímetro para determinação dos primeiros valores de densidade, após 30 e 60 segundos do início da sedimentação, retirando-se o densímetro em seguida.

Alguns segundos antes de se completar 2 minutos de sedimentação, introduziu-se novamente o densímetro na suspensão e anotou-se a densidade, cuidando-se para provocar mínima perturbação no sistema, retirando o densímetro da suspensão em seguida. Procedendo-se dessa maneira, realizou-se a leitura da densidade em 4, 8, 15, 30, 60, 120, 240 e 480 minutos, após o início da sedimentação (Figura 12).

As leituras da densidade foram realizadas na parte superior do menisco formado junto à haste do densímetro e, entre uma leitura e outra, o densímetro foi deixado em proveta contendo água destilada. Para controle do tempo, utilizou-se um cronômetro e para determinação da temperatura, mediu-se a temperatura, a cada leitura de densidade, em termômetro de bulbo, deixado também em proveta contendo água destilada.

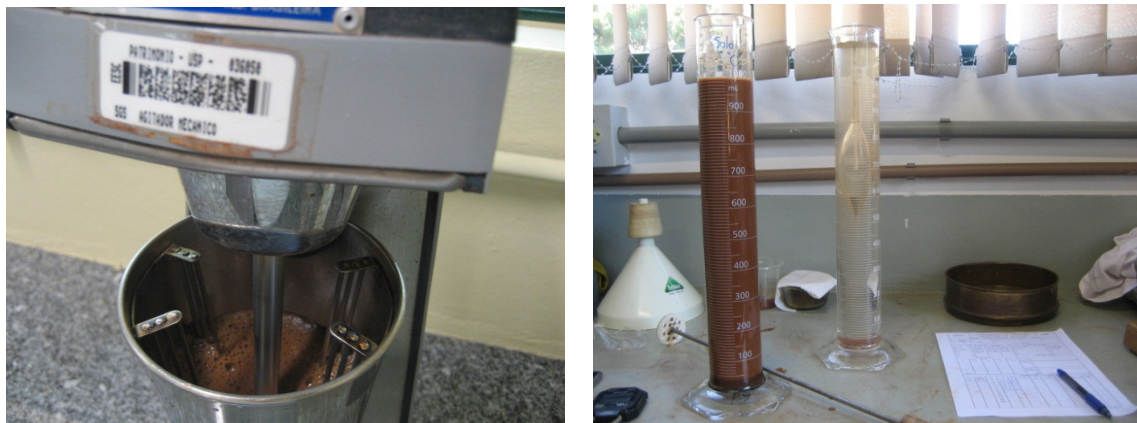


Figura 12 - Granulometria conjunta – amostra em dispersor e teste de sedimentação

Ao término da sedimentação, lavou-se a suspensão em peneira de 0,075 mm (#200) em água corrente de torneira. Retirou-se o material da peneira com auxílio de água destilada, transferindo-o para pirex. O material peneirado foi então seco em estufa a 100 °C (Figura 13).



Figura 13 - Granulometria conjunta – material retido em peneira 0,075 mm antes e após secagem em estufa

Após a secagem, transferiu-se o material retido na peneira #200 para conjunto de peneiras, após o prévio maceramento da amostra. O conjunto de peneiras foi montado na seguinte sequência: #4 (4,8 mm), #10 (2,0 mm), #16 (1,2 mm), #30 (0,60 mm), #50 (0,30 mm), #100 (0,15 mm), #200 (0,075 mm) e o prato. O conjunto contendo a amostra foi peneirado por 15 minutos (Figura 13).

Após o peneiramento, determinou-se a massa de material retido em cada uma das peneiras, inclusive no prato, em balança de precisão 0,01 g (Geaka BG 4000).



Figura 14 - Granulometria conjunta – amostra sendo peneirada e material retido em uma das peneiras

No peneiramento, a porcentagem de solo retido em cada peneira e no prato (P_r) é dada pela Equação 4, onde M_s (#i) é a massa retida em cada peneira ou no prato e $\sum M_s$ (#i) é o somatório de massa de sólidos retido em cada peneira e no prato.

$$P_r(\#i) = \frac{M_s(\#i)}{\sum M_s(\#i)} 100 \quad \text{Equação 4}$$

Na sedimentação, o diâmetro equivalente das partículas em suspensão é determinado pela Fórmula de Stokes, calculada pela Equação 5, resultante do uso de unidades mais apropriadas ao experimento.

$$D_i = 0,00530 \left(\frac{\mu}{\rho_s - \rho_w} * \frac{z}{t_i} \right)^{\frac{1}{2}} = 0,00530 \left(\frac{\mu}{\rho_s - 1} * \frac{z}{t_i} \right)^{\frac{1}{2}} \quad \text{Equação 5}$$

A porcentagem de partículas com diâmetro equivalente menor que aquele calculado pela Equação 5, é dada pela Equação 6:

$$P(< D_i) = \frac{100}{M_s} * \frac{\rho_s}{\rho_s - 1} [r(H) - r_w(H)] \quad \text{Equação 6}$$

Onde:

- μ (Pa.s) é a viscosidade da água, corrigida para a temperatura no momento da leitura;
- ρ_s (g cm^{-3}) é a massa específica dos sólidos, determinada em ensaio próprio;
- ρ_w (g cm^{-3}) é a massa específica da água, considerada como aproximadamente igual a 1;
- z (cm) é a distância entre o centro de volume do bulbo do densímetro e a superfície da suspensão calculada através da curva de calibração do densímetro, considerando a correção devido à leitura no menisco;
- t_i (min) é o tempo decorrido do início da sedimentação;
- M_s é a massa de sólidos da amostra quarteada no início do ensaio de granulometria;
- $[r(H) - r_w(H)]$ é a densidade da suspensão considerando as correções devido à leitura no menisco, à temperatura no momento da leitura e à adição de defloculante.

Análise Térmica Diferencial

Para a determinação dos argilominerais presente nas amostras foi realizado o ensaio de Análise Térmica Diferencial (ATD), no Laboratório de Geotecnia Ambiental do Departamento de Geotecnia da EESC, em março de 2012 para os solos A e B e maio de 2012 para o solo C.

Macerou-se a amostra quarteada e peneirou-se o material em peneira #200. Em seguida, secou-se o material peneirado em estufa a 60°C por 24 horas (Figura 15).



Figura 15 - ATD – Maceramento, peneira #200 e material peneirado

Após a secagem da amostra, transferiu-se o material para o alto forno (BP Engenharia), preenchendo-se 1 dos compartimentos de níquel, que contem o sensor, com a

amostra de solo e os outros 2 com alumina calcinada, cuidando para não misturar os diferentes materiais. Em seguida, programou-se o equipamento e iniciou-se o experimento (Figura 16). O aquecimento foi de 0 a 1000°C, com velocidade de 12,5°C por minuto, no laboratório de Geotecnia da EESC-USP. A interpretação dos resultados foi feita de acordo com (Mackenzie, 1957).

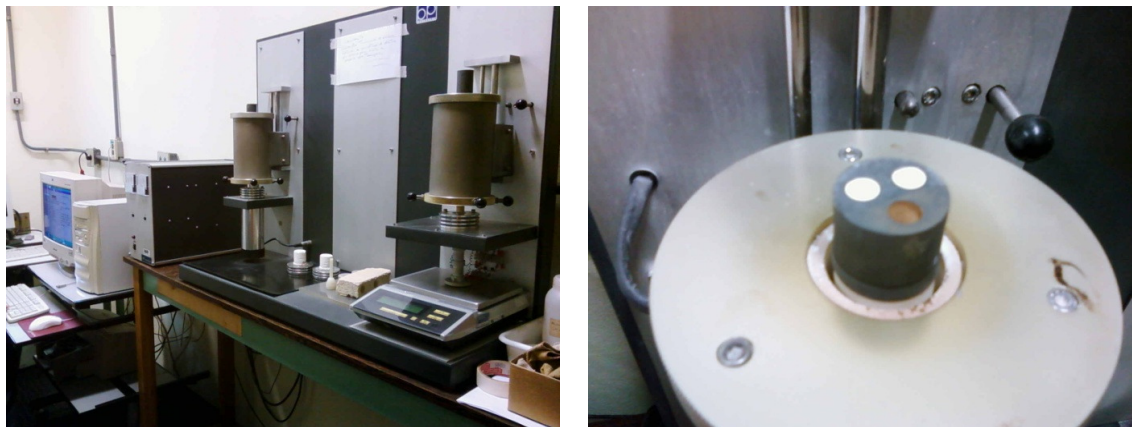


Figura 16 - ATD - Alto fornos do equipamento da BP Engenharia e compartimentos contendo alumina calcinada e amostra de solo

Difratometria de raios X

A preparação das lâminas para a Difratometria de Raios X (DRX) foi realizada no Laboratório de Geoquímica do Departamento de Geotecnia da EESC, em dezembro de 2011 para os solos A e B e em maio de 2012 para o solo C. As amostras foram maceradas e peneiradas em peneira #400 (0,037 mm).

Colocou-se aproximadamente 0,6 g do material peneirado em béquer de 500 mL, medido em balança de precisão de 0,01 g e adicionou-se 500 mL de água destilada, medidos em proveta graduada. Em seguida, adicionou-se 100 mL de solução de hexametáfosfato de sódio, a uma concentração de 45,7 g L⁻¹ em cada béquer, também medidos em proveta graduada, e homogeneizou-se suspensão com bastão de vidro. Essa suspensão foi levada ao dispersor por 15 minutos e transferida novamente para béquer.

Transferiu-se então, cuidadosamente, aproximadamente 200 mL da suspensão para cada um dos 3 recipientes plásticos contendo as lâminas devidamente identificadas sobre anéis plásticos, em seguida, as suspensões foram deixadas tampadas e em descanso por 12 horas, para a deposição das partículas sobre as lâminas (Figura 17).

Após a sedimentação retirou-se o líquido dos recipientes plásticos com auxílio de uma bomba de vácuo e secaram-se as lâminas ao ar. As lâminas completamente secas foram enviadas para análise em Difratorômetro Siemens/Bruker D5000 com radiação $\text{CuK}(\alpha)$ e com tensão de 40 kW e 40 μA , no Instituto de Física de São Carlos da USP.

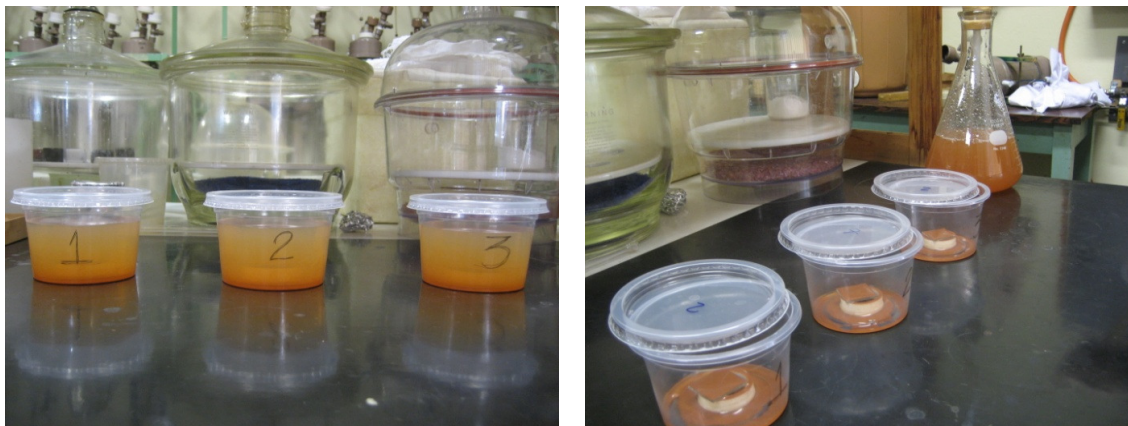


Figura 17 - Difratometria de raios X – recipientes plásticos com as lâminas com e sem solução

Condutividade elétrica, potencial hidrogeniônico (pH) e potencial de oxidação-redução (Eh)

Seguindo metodologia apresentada por Leite (2001), no Laboratório de Geotecnia Ambiental do Departamento de Geotecnia da EESC - USP, foram determinados pH, condutividade elétrica e Eh de amostras em duplicata dos solos A e B, em dezembro de 2011, e do solo C, em maio de 2012.

Para isso, transferiram-se 20,00 g de solo, determinados em balança de precisão 0,01 g, para erlenmyer de 125 mL. Em seguida, adicionou-se 50 mL de água deionizada, de modo a atingir a saturação do solo e a liberação de íons, seguindo a proporção 1:2,5 (solo:água) e agitou-se a amostra em misturador mecânico por 30 minutos (Figura 18).

Após a agitação, procedeu-se a leitura do pH, em pHmetro Digimed DM 21, a leitura do Eh, com eletrodo de Eh micromonal B374 e a determinação da condutividade elétrica, com Condutivímetro Analyser 650. Todas as determinações foram realizadas com a introdução dos eletrodos dos aparelhos no sobrenadante das suspensões.



Figura 18 - Condutividade elétrica, pH e Eh – agitador mecânico e erlenmeyers contendo as suspensões

Capacidade de troca catiônica e superfície específica

Para análise da capacidade de retenção de contaminantes no solo, foram determinadas a capacidade de troca catiônica (CTC) e a superfície específica (SE) dos solos A e B, em dezembro de 2011 e do solo C em maio de 2012. Os ensaios foram realizados no Laboratório de Geotecnia Ambiental do Departamento de Geotecnia da EESC, pelo método de adsorção de azul de metileno, descrito por Pejon (1992).

Para isso, as amostras quarteadas foram peneiradas em peneira #100 (0,15 mm de abertura) e determinou-se seu teor de umidade no momento do início do ensaio. Nos béqueres previamente tarados em balança de precisão 0,0001 g (Sartorius BL 2105), adicionou-se aproximadamente 1 g do material peneirado (Figura 19). Em seguida, adicionou-se um pouco de água destilada apenas para suspender as partículas.



Figura 19 - CTC e SE – peneiramento da amostra em peneira #100 e determinação da massa de solo

Iniciou-se então a titulação da suspensão com solução de azul de metileno, de concentração de $1,5 \text{ g L}^{-1}$, com o auxílio de um agitador magnético (Alphalab AA 500). A cada volume (determinado) de azul de metileno titulado, retirou-se uma gota da suspensão, com auxílio de bastão de vidro, colocando-a em papel filtro Watman 42 (Figura 20). Esse procedimento foi repetido até se atingir o ponto da titulação onde, após 3 minutos da adição de um dado volume da solução de azul de metileno, a auréola com azul diferenciado em torno da gota colocada no papel filtro não desapareceu, finalizando-se a titulação e anotando-se o volume gasto de azul de metileno.



Figura 20 - CTC e SE - Titulação com azul de metileno e papel filtro contendo gotas da suspensão titulada

A superfície específica (SE) é dada pela Equação 7 e a CTC pela Equação 8, onde V_t é o volume de solução de azul de metileno consumida na titulação, M_s é a massa de sólidos titulada, considerando-se a umidade da amostra utilizada e C_{met} , é a concentração da solução de azul de metileno em mol L^{-1} .

$$SE = \frac{3,67 * V_t}{M_s} \quad \text{Equação 7}$$

$$CTC = \frac{V_t * C_{\text{met}} * 100}{M_s} \quad \text{Equação 8}$$

Caracterização química

Foram enviadas amostras quarteadas para análise no Laboratório de Solos da EMBRAPA Pecuária Sudeste. Seguindo os métodos apresentados pelo Manual de Métodos de Análise de Solo (DONAGEMA, 2011), foram analisados os seguintes parâmetros:

- pH em H₂O e CaCl₂;
- Concentração de matéria orgânica;
- Alumínio, cálcio e magnésio trocáveis;
- Potássio e sódio trocáveis;
- Fósforo assimilável;
- Boro, cobre, ferro, manganês e zinco.
- Sulfato solúvel;
- Acidez potencial;
- Capacidade de troca catiônica;
- Soma de bases trocáveis;
- Porcentagem de saturação por bases;
- Porcentagem de saturação por alumínio trocável.

Foram também enviadas amostras quarteadas para análise no Laboratório de Saneamento do SHS, USP São Carlos. Seguindo os métodos apresentados pelo *Standard methods for the examination of water and wastewater* (APHA, 2005), foram analisados os seguintes parâmetros:

- Sódio;
- Zinco, ferro, manganês e cobre;
- Potássio, alumínio, cálcio e magnésio;
- Chumbo, cádmio, níquel e cromo.

5.3. Colunas

5.3.1. Coleta e rasamento das colunas

As colunas foram coletadas em 3 de abril de 2012, no Sítio São João, apenas em área do solo tipo C, em talude sem cobertura vegetal, em local onde não havia plantações e também não havia sido aplicado nenhum tipo de adubo ou agrotóxico. Foram coletadas 5 colunas a uma profundidade de aproximadamente 40 cm, como mostra a Figura 21. Todas as colunas foram coletadas em cilindros de PVC de 15 cm de altura e 9 cm de diâmetro interno, aproximadamente. Após a coleta, as colunas foram mantidas envoltas em filme plástico para evitar perda de umidade.

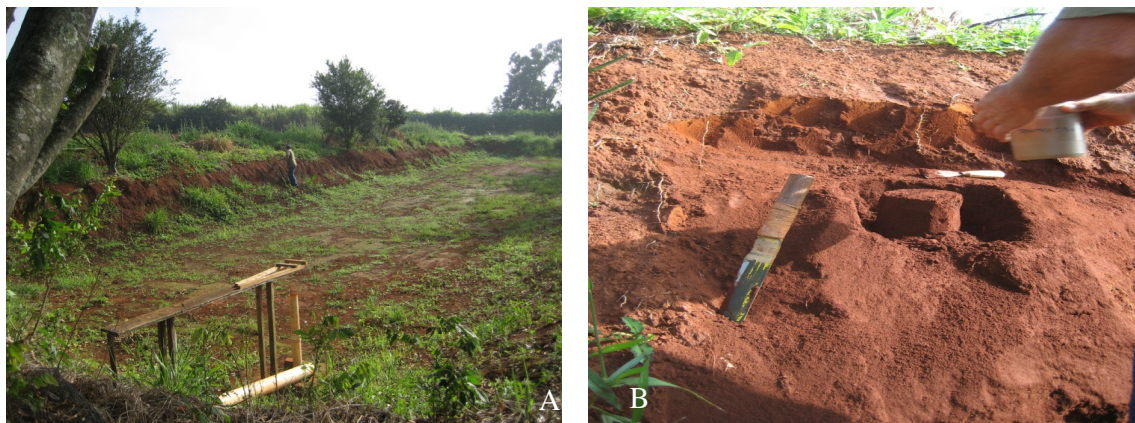


Figura 21 - A - Talude onde foram coletadas as amostras do solo C; B - Coleta de coluna de solo C

Entre os dias 10 e 12 de abril, realizou-se o rasamento das colunas coletadas, nivelando-se o solo contido nas colunas. Para isso, o excesso de solo das colunas foi umidificado com borrifador contendo água destilada e em seguida, retirado aos poucos com auxílio de lâmina cortante, cuidando-se para não retirar blocos de solo (Figura 22). Durante o rasamento, as raízes presentes foram cortadas com tesoura de forma a também ficarem niveladas e ao final as colunas foram limpas externamente com pano úmido, de forma a não ficar nenhum resíduo. Por fim, as colunas foram colocadas em permeâmetros com entrada e saída de fluxo fechados.



Figura 22 - Rasamento das colunas do solo tipo C

Ressalta-se que a Coluna 3 apresentou topo e base mais uniformes em comparação com as demais, as quais apresentaram alguns orifícios devido aos caminhos de insetos no solo e/ou presença de raízes.

5.3.2. Caracterização

Massa de solo

A fim de se conhecer a massa de solo presente nas colunas, pesou-se cada um dos cilindros de PVC, devidamente identificados, antes da coleta e após o rasamento. Não foi determinada a umidade do solo presente nas colunas devido à necessidade de umedecer as colunas durante o rasamento.

Volume de solo

Para a determinação do volume aproximado de solo presente em cada uma das colunas, com auxílio de uma régua comum, determinou-se altura e diâmetro internos dos cilindros de PVC que foram utilizados na coleta das colunas de solo.

Volume de vazios

A partir do valor de porosidade calculada para o solo C, determinou-se o volume de vazios (V_v) de cada uma das colunas, pela equação a seguir:

$$V_v = \eta * V_{coluna} \quad \text{Equação 9}$$

Permeabilidade

A determinação da permeabilidade das colunas foi realizada através de 2 métodos distintos. Os permeômetros utilizados em cada um desses métodos são classificados, segundo Daniel (1994), como permeômetro de parede rígida com amostrador de parede fina e permeômetro de parede rígida com selante entre o corpo de prova e a parede.

Para a montagem do permeômetro de parede fina, utilizou-se a Coluna 1, a qual foi colocada em um permeômetro na mesma posição de coleta, ou seja, com o topo voltado para cima. O permeômetro utilizado (Figura 23) é uma adaptação do modelo apresentado por Daniel (1994), já que contém pequenas câmaras na base e no topo, as quais permanecem preenchidas com o líquido durante a percolação. A câmara é separada do solo da coluna por uma tela seguida de um disco perfurado.

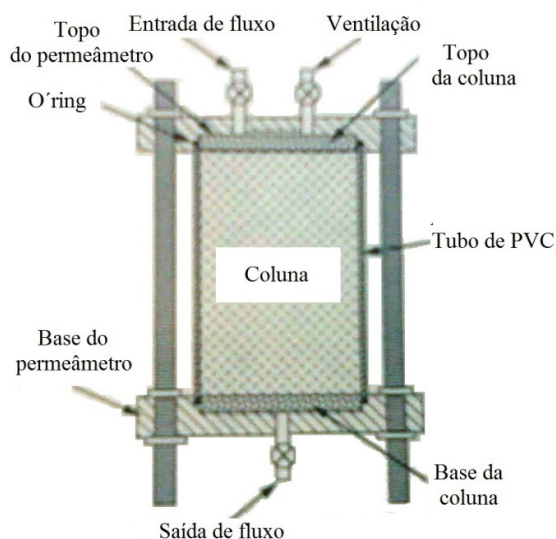


Figura 23 - Esquema de permeâmetro de parede fina, adaptado de Daniel (1994), e permeâmetro utilizado

O líquido utilizado na percolação foi água da rede e o nível do reservatório foi mantido constante com auxílio de boia, mantendo-se a carga hidráulica disponível (ΔH) constante e igual a 50,6 cm. A vazão de descarga (q), foi medida na saída da coluna com proveta graduada de 100 mL, entre 10 e 13 de abril, determinando-se o tempo necessário para se completar a proveta (Figura 24).

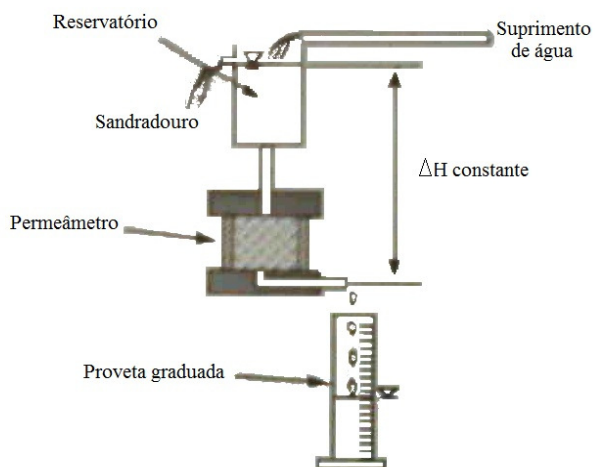


Figura 24 - Esquema de sistema hidráulico de carga constante com reservatório de volume constante, modificado de Daniel (1994) e sistema utilizado

Para o segundo método (Figura 25), utilizou-se a Coluna 2 para a obtenção do corpo de prova (CP). O solo indeformado dessa coluna foi retirado do cilindro de PVC e esculpido até a obtenção do CP, determinando-se sua altura (10,91 cm) e seu diâmetro (5,07 cm).

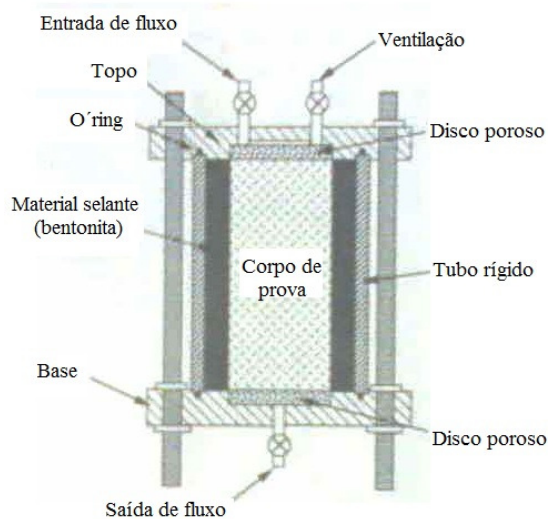


Figura 25 - Esquema de permeâmetro com corpo de prova e selante, modificado de Daniel (1994), e corpo de prova no interior do permeâmetro

O CP foi centralizado no interior do permeâmetro, com o topo voltado para cima, apoiado em camada de aproximadamente 3 cm de material granular, seguindo o apresentado na Norma NBR 13292 (ABNT, 1995). Em torno do corpo de prova e sobre a camada de material granular, foi colocada uma camada de cera quente de aproximadamente um terço do corpo de prova. Após o resfriamento da cera, colocou-se uma camada de bentonita, também de aproximadamente um terço da altura do corpo de prova. Por fim, colocou-se nova camada de cera quente e cobriu-se com material granular, fechando-se o permeâmetro.

Utilizou-se água da rede para percolação e o nível do reservatório foi mantido constante, com carga hidráulica disponível igual a 37,4 cm, medida em tubo manométrico (Figura 26). A vazão de descarga (q), foi determinada na saída do permeâmetro com proveta graduada de 50 mL, entre 20 e 23 de abril, anotando-se o volume percolado e tempo necessário para tal.

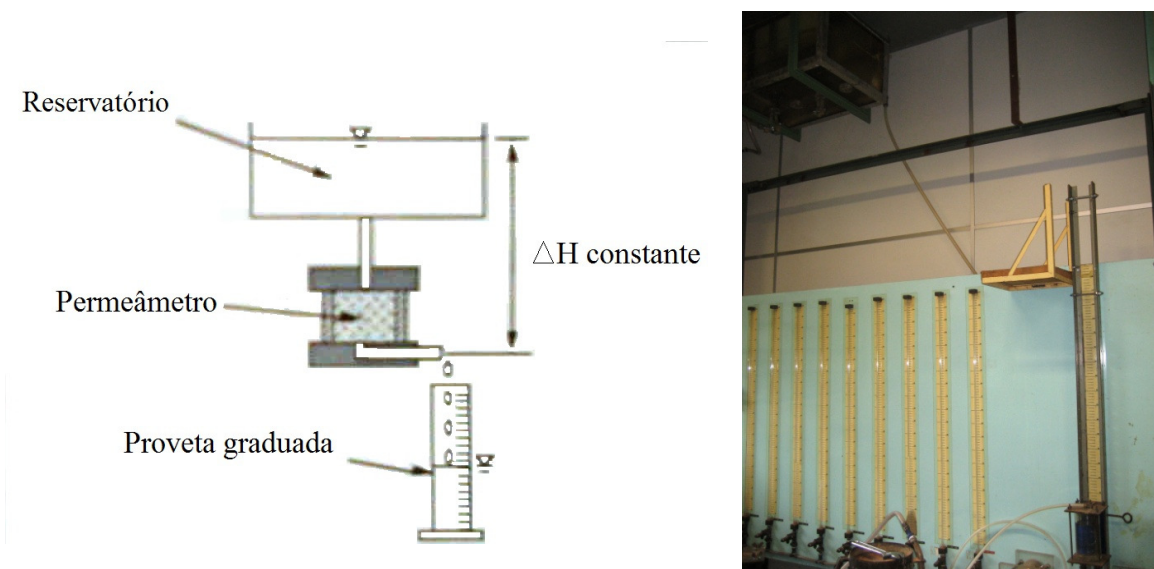


Figura 26 - Esquema de sistema hidráulico de carga constante com reservatório de variação de volume irrelevante, modificado de Daniel (1994) e sistema utilizado

Para ambos os métodos, o cálculo da condutividade hidráulica (k) para cada medição de vazão foi realizado pela Lei de Darcy, Equação 10. O valor de k médio foi determinado pela média dos valores referentes ao período em que a vazão percolada se manteve aproximadamente constante.

$$k = v \times i = \frac{q \times L}{\Delta H \times A} \quad \text{Equação 10}$$

Onde v é a velocidade de descarga, i o gradiente hidráulico, q a vazão de descarga, L a espessura de solo pela qual foi percolada a água da rede, ΔH a carga hidráulica disponível e A a área da seção transversal de aplicação.

5.3.3. Lavagem e saturação

Visando a saturação e lavagem das Colunas 3, 4 e 5, antes de se efetuar a percolação do efluente, os 3 permeâmetros contendo tais colunas foram ligados a um reservatório contendo água deionizada. Como apresentado na Figura 27, as Colunas foram colocadas com o topo voltado para baixo e o fluxo foi aplicado de forma ascendente (neste caso a coluna foi invertida).

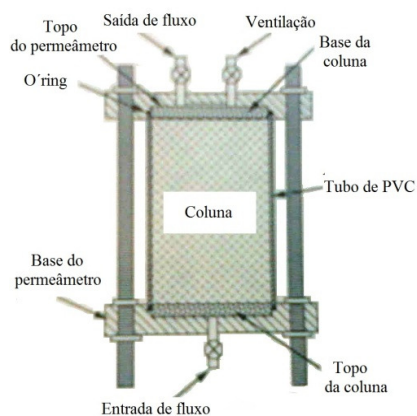


Figura 27 - Aplicação ascendente de água deionizada para saturação e lavagem das colunas

A lavagem foi realizada no período de 12 a 25 de abril, de forma intermitente, fechando-se as mangueiras de entrada e saída de água deionizada enquanto a lavagem não estava sendo realizada. Ao longo do período de lavagem, coletaram-se amostras de lixiviados das colunas em béqueres de 100 mL das quais se determinou a condutividade elétrica em condutivímetro Analyser 650.

A lavagem foi finalizada quando os valores de condutividade elétrica dos lixiviados de cada uma das colunas tornaram-se aproximadamente constantes. Ao final da lavagem fecharam-se entradas e saídas das 3 colunas, sem se retirar o excesso de água deionizada contidas nas câmaras dos permeâmetros.

5.4. Sistema de percolação de efluente tratado em colunas

O sistema de percolação de efluente constituiu-se de 3 permeâmetros contendo as Colunas 3, 4 e 5 ligados, de forma independente, a 3 reservatórios de poliacetato com os quais se pode monitorar e controlar o volume aplicado a cada uma das colunas.

5.4.1. Calibração do volume dos reservatórios

Para monitoramento do volume de efluente aplicado a cada uma das colunas, adicionou-se a cada um dos reservatórios de poliacetato um tubo transparente em sistema de vasos comunicantes. Preencheu-se cada um dos reservatórios com água da rede e marcou-se o nível inicial no tubo transparente e, com auxílio de uma proveta graduada de 500 mL, retirou-se tal volume de água e efetuou-se nova marcação. Esse procedimento de retirada de água e

marcação do novo nível foi repetido até que se atingisse o limite mínimo de visualização, através do tubo transparente, do nível d'água no reservatório (Figura 28).

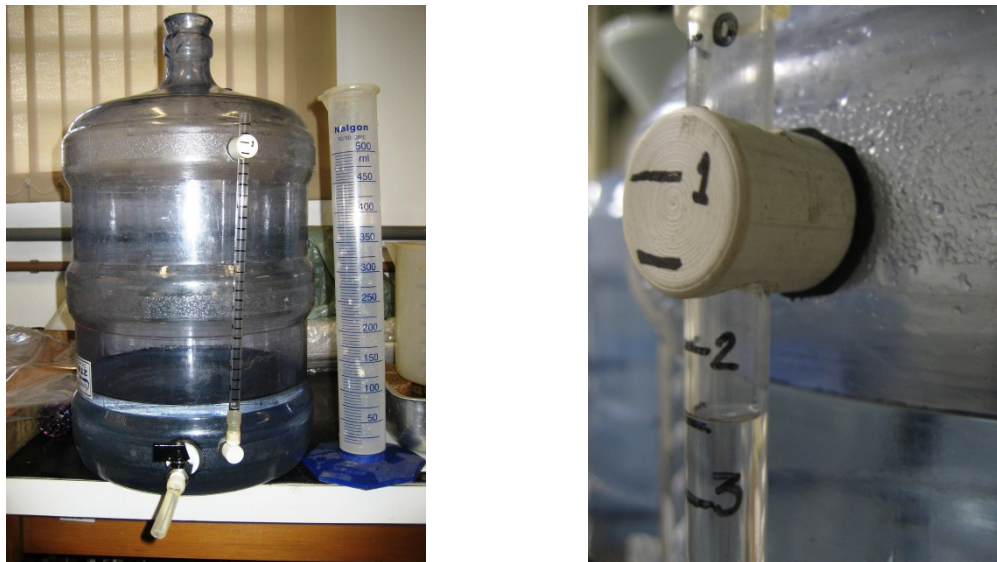


Figura 28 - Calibração do volume do reservatório de poliacetato e detalhe do tubo transparente contendo as marcações de nível

Foram ainda adicionados aos reservatórios registros para controle da vazão de efluente na saída desses. Preencheu-se cada um dos reservatórios com água da rede, até um nível máximo nos quais os níveis dos 3 reservatórios fossem aproximadamente iguais e fixou-se a mínima abertura dos 3 registros para a qual o gotejamento dos 3 reservatórios fosse visualmente igual.

Com auxílio de cronômetro e provetas graduadas de 50 mL, determinou-se, para o máximo nível d'água, a vazão de saída para cada um dos reservatórios, para verificar se as vazões tinham valores próximos uns dos outros. Em seguida, esvaziaram-se os reservatórios até o nível mínimo nos quais os níveis dos 3 reservatórios fossem aproximadamente iguais e, mantendo-se a abertura dos registros já fixada, verificou-se se as vazões se mantinham aproximadamente iguais (Figura 29).



Figura 29 - Determinação da vazão de saída dos reservatórios

Ao final da calibração os reservatórios foram esvaziados e lavados com água deionizada, mantendo-se os registros nas posições fixadas.

5.4.2. Montagem e percolação do efluente

A montagem dos sistemas de aplicação e o início do ensaio de percolação foram realizados em 25 e 26 de abril de 2012, respectivamente. Utilizou-se 3 sistemas de aplicação, constituídos por um reservatório e uma coluna cada um, sendo 2 para aplicação do EFSB 2-A e 1 para controle ou branco do ensaio.

Para o branco, escolheu-se a coluna com maior permeabilidade visível durante a lavagem das colunas (Coluna 4) e o reservatório que apresentou a maior vazão durante os ensaios de calibração. O reservatório desse sistema foi preenchido com água deionizada, até seu nível máximo visível no tubo graduado, sendo previamente lavado com água deionizada.

A coluna que apresentou a menor permeabilidade visível durante a lavagem das colunas (Coluna 3) e o reservatório que apresentou a menor vazão durante os ensaios de calibração foram utilizados para aplicação de EFSB por um período aproximado de 15 dias. E o conjunto formado pela Coluna 5, de permeabilidade e vazão de saída do galão intermediárias, foi utilizado para percolação de EFSB por um período de aproximadamente 27 dias. Os reservatórios desses sistemas foram previamente lavados com o EFSB 2-A e em seguida preenchidos até seu nível máximo visível no tubo graduado.

Na saída dos registros dos reservatórios foram colocadas mangueiras de silicone que, após o preenchimento e retirada de bolhas de ar, foram ligadas à base dos permeômetros. No topo de cada um dos permeômetros foram colocadas mangueiras de silicone para a coleta do lixiviado das colunas, as quais foram ligadas a frascos de vidro de 1 litro, trocando-os quando

cheios. Dessa forma, o fluxo foi aplicado no sentido ascendente, do topo das colunas para a base dessas, como apresentado na Figura 30.

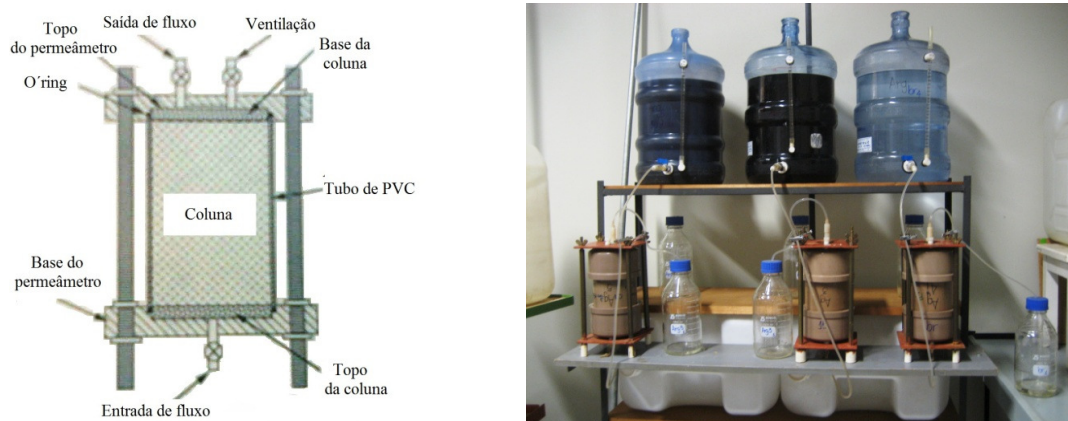


Figura 30 - Esquema e ensaio de percolação de efluente doméstico tratado

A percolação foi iniciada em 26 de abril de 2012 para os 3 sistemas e finalizada em 9 de maio de 2012 para os sistemas 3 e 4 e em 23 de maio para o sistema 5. Como os conjuntos 4 e 5 apresentaram vazão de lixiviado muito alta em comparação com o sistema 3, fez-se necessário o estrangulamento das mangueiras de entrada e saída, até ponto mínimo mais próximo possível da vazão de lixiviado do conjunto 3. Além disso, no dia 3 de maio foi necessário o preenchimento do galão do conjunto 5, sendo utilizado o EFSB 2-B.

Durante o ensaio de percolação, foram monitorados os níveis dos galões, através do tubo graduado, anotando-se hora, nível e temperatura, de forma a se determinar a taxa média de aplicação para cada sistema (Tabela 5) e a variação de temperatura ao longo do ensaio. Cabe ressaltar que a aplicação no sistema 5 não foi contínua, pois essa foi interrompida em alguns momentos devido ao entupimento do registro de saída do galão. Dessa forma, cada vez que foi necessário o esvaziamento e/ou preenchimento do galão, foi realizado o peneiramento do efluente em tecido sintético de forma a retirar o material grosseiro em suspensão.

Tabela 5 - Dados do ensaio de percolação de efluente tratado

Dados percolação	Colunas		
	3	4 - branco	5
Líquido percolante	EFSB 2-A ^a	Água deionizada	EFSB 2-A e 2-B ^b
Início da percolação	26/04/12	26/04/12	26/04/12
Término da percolação	09/05/12	09/05/12	23/05/12
Volume percolado (L)	5,4	29,0	38,3
Tempo de percolação (h)	320	318	647

a – efluente de fossa séptica biodigestora coletado em 03/04/12 e caracterizado em 23/04/12; b - efluente de fossa séptica biodigestora coletado em 03/04/12 e caracterizado em 07/05/12

Ao final do período de percolação, desconectaram-se os permeâmetros dos reservatórios e retirou-se, por gravidade, o excesso de líquido de seu interior, aqui denominado “Drenado”, em seguida, as mangueiras de entrada e saída foram fechadas para evitar a perda de umidade.

5.4.3. Desmontagem dos sistemas de percolação

No dia 14 de maio as Colunas 3 e 4 foram retiradas dos permeâmetros e abertas em sentido longitudinal, com auxílio de serra elétrica, como apresentado na Figura 31. A Coluna 5 foi aberta no dia 12 de junho de 2012.

**Figura 31** - Abertura de coluna após ensaio de percolação

Com as colunas abertas foram retiradas amostras de solo separando-as em topo e base, de forma a analisar se houve diferença entre a região próxima a entrada de líquido (topo) e a

aquela próxima à saída (base). As amostras devidamente identificadas foram colocadas para secar ao ar e, após secagem, destorroadas e colocadas em sacos plásticos (Figura 32).



Figura 32: Secagem e armazenamento das amostras de solo após ensaio de percolação

5.4.4. Caracterização do solo C após percolação de efluente

As amostras das Colunas 3 e 4 foram enviadas para análise no Laboratório de Solos da EMBRAPA Pecuária Sudeste. Seguindo os métodos apresentados pelo Manual de Métodos de Análise de Solo (DONAGEMA, 2011), foram analisados os seguintes parâmetros:

- pH em H₂O e CaCl₂;
- Concentração de matéria orgânica;
- Alumínio, cálcio e magnésio trocáveis;
- Potássio e sódio trocáveis;
- Fósforo assimilável;
- Acidez potencial;
- Sulfato solúvel;
- Capacidade de troca catiônica;
- Soma de bases trocáveis;
- Porcentagem de saturação por bases;
- Porcentagem de saturação por alumínio trocável.

Foram também enviadas amostras das Colunas 3 e 4 para análise no Laboratório de Saneamento do Departamento de Hidráulica e Saneamento. Seguindo os métodos

apresentados pelo *Standard methods for the examination of water and wastewater* (APHA, 2005), foram analisados os seguintes parâmetros:

- Sódio;
- Zinco, ferro, manganês e cobre;
- Potássio, alumínio, cálcio e magnésio;
- Chumbo, cádmio, níquel e cromo.

5.5. Lixiviado da percolação de efluente doméstico tratado

5.5.1. Coleta

Os Lixiviados 3, 4 e 5, das Colunas 3, 4 e 5, respectivamente, foram coletados em frascos de vidro de 1 litro e, visando o monitoramento de sua qualidade, coletaram-se amostras desses e também do excesso de EFSB, Drenado 3, retirado da Coluna 3 ao final do período de percolação. As amostras foram coletadas em frascos plásticos de 500 mL, previamente lavados com água deionizada seguida da própria amostra (Figura 33). A Tabela 6 apresenta as datas de coleta das amostras.

Tabela 6 - Datas de coleta de amostras de lixiviado e líquido drenado das colunas

Amostra	Coluna percolada	Data da coleta	Dias de percolação ^a
Lixiviado 3-A	3	27/04/2012	1
Lixiviado 3-B	3	02/05/2012	6
Lixiviado 3-C	3	09/05/2012	13
Drenado 3	3	09/05/2012	13
Lixiviado 4	4 - branco	09/05/2012	13
Lixiviado 5-A	5	27/04/2012	1
Lixiviado 5-B	5	02/05/2012	6
Lixiviado 5-C	5	09/05/2012	13

a – número de dias decorridos após início da percolação



Figura 33 - Frasco de coleta e amostras de lixiviado

Após a coleta, as amostras foram conservadas refrigeradas a uma temperatura média de 4 °C até a data de caracterização. Ressalta-se que não foi possível, antes da finalização do presente trabalho, analisar as amostras de lixiviado do último dia de percolação nem do drenado da Coluna 5.

5.5.2. Caracterização do lixiviado das colunas de percolação

As amostras coletadas foram enviadas para caracterização no Laboratório de Saneamento do Departamento de Hidráulica e Saneamento da EESC. Seguindo os métodos apresentados pelo *Standard methods for the examination of water and wastewater* (APHA, 2005), as amostras foram caracterizadas segundo os seguintes parâmetros:

- pH, turbidez e condutividade elétrica;
- Coliformes totais e *E. coli*;
- DBO e DQO;
- Fósforo total;
- Nitrogênio total, amoniacal, nitrato e nitrito;
- Sólidos sedimentáveis, totais, suspensos e dissolvidos;
- Sulfato e sulfeto;
- Potássio, ferro, manganês, magnésio, alumínio e sódio;
- Zinco, chumbo, cobre e cromo.

6. RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.1. Caracterização geológica-geotécnica dos solos A, B e C

Primeiramente, foram realizados os ensaios granulométricos, nos 3 tipos de solo. A partir da Tabela 7, nota-se que a fração predominante nos solos do tipo A e B é a areia média, já no solo do tipo C a fração predominante é a areia fina. As curvas granulométricas dos solos A, B e C são apresentadas no Apêndice A.

Tabela 7 - Granulometria das amostras de solo A, B e C

Parâmetro	Solo A	Solo B	Solo C
Argila (%)	21,3	6,6	21,8
Silte (%)	18,9	3,0	27,6
Areia fina (%)	21,8	21,4	31,6
Areia média (%)	35,0	59,0	17,0
Areia grossa (%)	3,0	10,0	2,0

O solo do tipo B é mais arenoso (90% na fração areia), granulometria mais grossa, que os solos do tipo A e C, sendo este menos adequado para ser empregado no ensaio em coluna, de acordo com este parâmetro. O solo do tipo C apresentou granulometria mais fina (49% nas frações argila e silte), sendo este composto por 21,8% de argila, 27,6% de silte e 31,6% de areia fina, quanto à granulometria, este solo é mais adequado para o ensaio em coluna.

De maneira geral, segundo o diagrama de classes de textura, apresentado por Embrapa² (1984 apud Oliveira, 2001, pg. 224), os solos A e C apresentam textura média e o solo B, arenosa.

Além dos ensaios granulométricos, foram realizadas determinações do índice de vazios, porosidade, massa específica seca e massa específica dos sólidos (Tabela 8).

²EMBRAPA. Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solo. Rio de Janeiro. Súmula da X Reunião Técnica de Levantamento de Solos. Rio de Janeiro, 1979. 83p.

Tabela 8 - Caracterização geotécnica das amostras de solo A, B e C

Parâmetro	Solo A	Solo B	Solo C
Massa específica seca (g cm^{-3})	1,53	1,65	1,18
Massa específica dos sólidos (g cm^{-3})	2,68	2,63	2,88
Índice de vazios	0,75	0,59	1,44
Porosidade (%)	43	37	59

A partir da Tabela 8, observa-se que os valores de massa específica dos sólidos (ρ_s) dos solos A e B são próximos entre si, sendo que o solo C apresentou o maior valor de ρ_s . Basso (2003) encontrou uma média de 2,73 e de 2,96 g cm^{-3} , para os solos da Formação Botucatu e Serra Geral, respectivamente. Em relação à massa específica seca, os solos A e B apresentaram resultados superiores àquele do solo C, porém, ressalta-se que os solos A e B continham muitas raízes, o que pode indicar que os resultados de ρ_d para os solos A e B não correspondem à realidade.

Em relação à porosidade, o solo C apresentou o maior valor e o solo B o menor. Dijkerman³ (1981, apud Oliveira, 2001, pg. 254), aponta que a porosidade do solo argiloso é cerca de 60%, o de textura média 49% e o de arenosa, 40%. Assim, a porosidade do solo B e C aproximam-se daquela dos solos arenosos e argilosos, respectivamente, e a do solo A está um pouco abaixo do valor estimado pelo autor.

Além da caracterização geotécnica dos solos, foram realizadas caracterizações geológicas e físico-químicas dos solos (Tabela 9).

³ DIJKERMAN, J. C. Agricultura evaluation of soils. MSc-Course in Soil Science and water management. Agricultural University Wageningen. 1981. 62 p.

Tabela 9 - Caracterização geológica e físico-química das amostras de solo A, B e C

Parâmetro	Solo A	Solo B	Solo C
pH	6,50	5,78	6,33
Eh (mV)	233	248	358
Condutividade elétrica ($\mu\text{S cm}^{-1}$)	38,7	28,6	65,5
CTC (mEq/100g)	5,1	3,2	2,5
SE ($\text{m}^2 \text{g}^{-1}$)	40,2	25,9	19,6

A partir da Tabela 9 observa-se que os 3 solos apresentaram pH levemente ácido, sendo o solo B o mais ácido dos 3. Em estudos anteriores realizados com amostras de solo coletadas nas proximidades da área de estudo, o pH obtido para o solo mais arenoso foi da ordem de 4,78 e o pH do solo mais argiloso foi de 6,08 (BASSO, 2003). Os resultados aqui obtidos estão um pouco mais elevados que os obtidos em Basso (2003), mas nos dois estudos, notou-se maior acidez nos solos mais arenosos.

Em relação ao potencial de oxido-redução e condutividade elétrica, o solo C foi o que apresentou os maiores valores dos 3 solos analisados. Porém, em relação à CTC e à superfície específica, foi o solo que apresentou os menores valores (Tabela 9). Em relação à CTC, os valores obtidos por Basso (2003) são também baixos e próximos dos obtidos para os solos A e B, sendo de 3,3 mEq/100g para o arenoso e de 4,4 mEq/100g para o argiloso. Comparando-se os valores de CTC e os valores apresentados na Tabela 10, os resultados obtidos correspondem à predominância da caulinita nos 3 solos. Porém os resultados de superfície específica correspondem aos valores para caulinita apenas no solo C.

Tabela 10 - Valores de CTC correspondentes aos principais argilominerais

Argilominerais	CTC (mEq/100g) ^a	SE (m ² g ⁻¹) ^b
Caulinita	3 a 15	10 – 20
Haloisita	5 a 10	-
Endelita ou haloisita	10 a 40	-
Montmorilonita	80 a 150	600 – 800
Ilita	10 a 40	-
Vermiculita	100 a 150	600 – 800
Clorita	10 a 40	-
Sepiolita-paligorsquita	20 30	-

a - adaptado de Santos (1989); b - adaptado de Bohn et al. ⁴ (1979 apud Oliveira, 2011, pg. 241)

Os resultados da Análise Térmica Diferencial (ATD) dos solos A, B e C são apresentados nos termogramas a seguir (Figura 34).

⁴ BOHN, H. L., McNEAL, B. L., O'CONNOR, G. A. Soil Chemistry. John Wiley, Sons. N. York. 1979. 329 p.

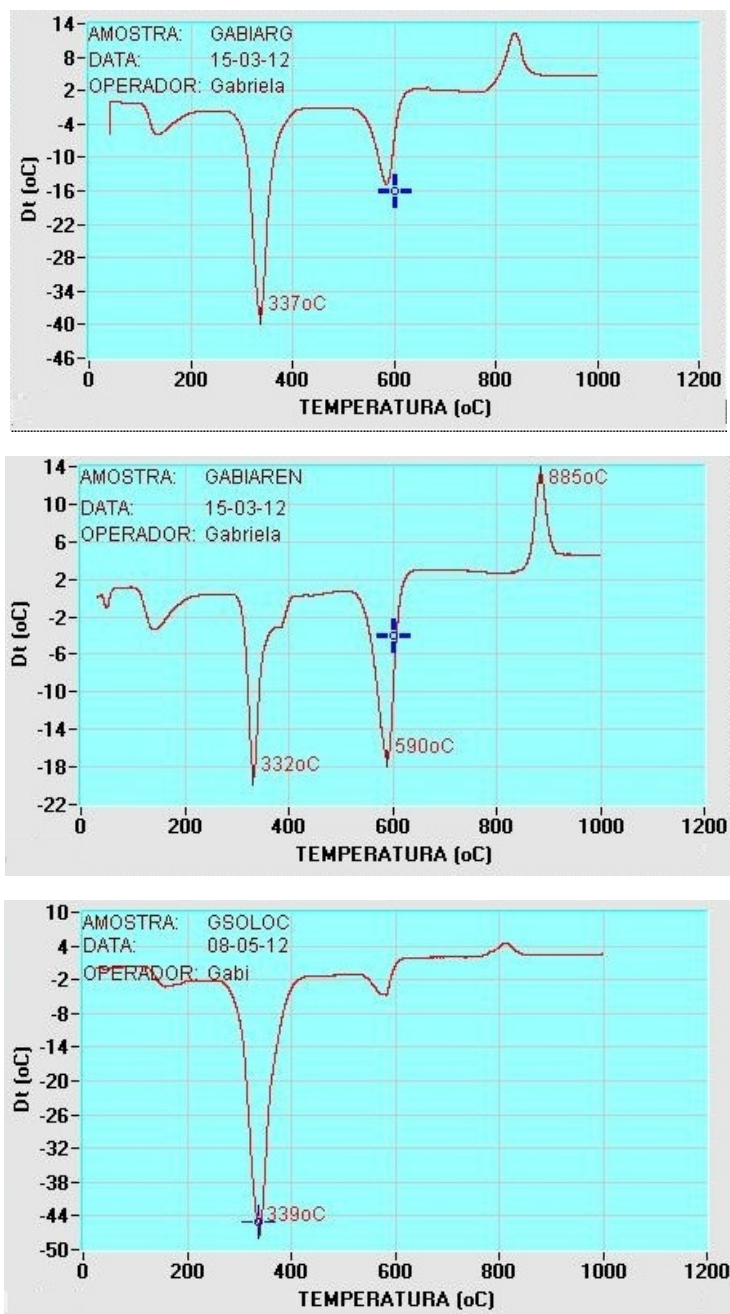


Figura 34 - Termogramas do solo A, B e C gerados pelo equipamento da BP Engenharia

Os picos entre 330 e 337 $^{\circ}\text{C}$ correspondem à presença de gibsita e óxidos de ferro e alumínio e aqueles por volta de 600 e 850 $^{\circ}\text{C}$ correspondem à presença de caulinita. De maneira geral, nota-se que estes solos são compostos por caulinita, gibsita e óxidos de ferro e alumínio. Este mesmo resultado foi obtido por Basso (2003), nos solos coletados na mesma região de estudo.

Os resultados obtidos na Difractometria de raio X (DRX) foram semelhantes para os 3 tipos de solos analisados, sendo que a Figura 35 exibe o difratograma correspondente ao solo C. A partir da DRX, nota-se que estes solos são compostos por quartzo, gibbsite e goetita.

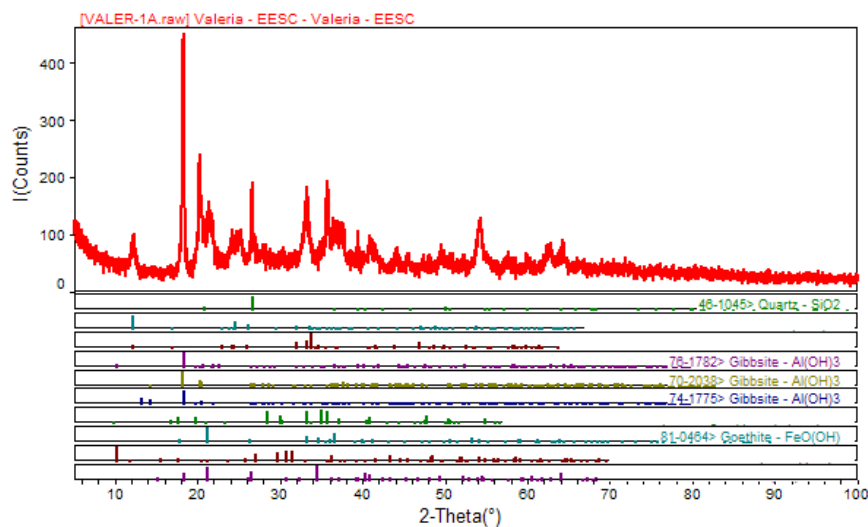


Figura 35 - Difratograma do solo C

As Tabelas de 11 a 14 apresentam os resultados obtidos pela caracterização realizada no Laboratório de Solos da EMBRAPA, unidade Pecuária Sudeste.

Tabela 11 - Resultados de caracterização físico-química e geológica realizada no Laboratório de Solos da EMBRAPA

Parâmetros	Solo A	Solo B	Solo C
pH em H ₂ O	6,0	5,5	5,8
pH em CaCl ₂	5,1	4,5	5,0
Acidez potencial – H ⁺ +Al ⁺³ (mmolc dm ⁻³)	24	28	34
CTC (mmolc dm ⁻³)	55	42	54

A partir da Tabela 11, observa-se que os resultados de pH da caracterização realizada na EMBRAPA apontam valores menores do que aqueles determinados no Laboratório de Geoquímica (anteriormente apresentados), tal fato está relacionado com o método de análise empregado. Nas duas análises, o solo B apresentou o pH mais ácido entre os 3 solos.

Em relação ao CTC, o método utilizado pela EMBRAPA é diferente daquele realizado no Laboratório de Geoquímica, e como apresentado anteriormente, o solo A apresentou maior CTC que o solo B, porém, diferente do obtido no Laboratório de Geoquímica, no método utilizado pela EMBRAPA a CTC do solo C é próxima a do solo A.

Freixo et al. (2002), ao analisar um latossolo vermelho-amarelo com cobertura de cerrado, encontrou valores de pH em água igual a 4,8, acidez potencial de 85 mmolc dm^{-3} e CTC de 91 mmolc dm^{-3} . Já Carneiro et al. (2009), analisando um neossolo quartzarênico também com cobertura de cerrado encontrou os valores de pH de 4,9 e de 38 mmolc dm^{-3} de acidez potencial. Assim, os valores de pH encontrados pelos autores são bem mais baixos do que os determinados no presente estudo (solos A, B e C). Os valores de acidez potencial e CTC encontrados por Freixo et al. (2002) são maiores que os dos solos analisados (solos A, B e C), enquanto a acidez potencial apresentada por Carneiro et al. (2009) é mais baixa e próxima dos resultados obtidos no presente estudo (solos A, B e C).

Na Tabela 12 são apresentados os resultados de quantificação de macronutrientes, fosfato e sódio.

Tabela 12 - Resultados de quantificação de macronutrientes, fosfato e sódio realizada no Laboratório de Solos da EMBRAPA

Parâmetros	Solo A	Solo B	Solo C
Matéria Orgânica (g dm^{-3})	29	19	21
Alumínio trocável - Al^{+3} (mmol dm^{-3})	0	2	1
Cálcio trocável - Ca^{+2} (mmol dm^{-3})	20	10	12
Magnésio trocável - Mg^{+2} (mmol dm^{-3})	11	4	6
Potássio trocável - K^{+} (mmol dm^{-3})	0,4	0,5	2,4
Sódio trocável - Na^{+} (mmol dm^{-3})	ND	ND	0,3
Fósforo assimilável (mg dm^{-3})	7	6	9
Sulfato solúvel - S-SO_4^{-2} (mg dm^{-3})	5	6	107
Proporção $(\text{Ca}^{+2} + \text{Mg}^{+2})/\text{K}^{+}$	80	30	8

*ND = não determinado

As concentrações de matéria orgânica, cálcio e magnésio trocáveis do solo A são maiores que as dos solos B e C, porém as concentrações dos outros elementos são maiores no solo C (Tabela 12). As concentrações de potássio trocável e sulfato solúvel são maiores no

solo C. Já as concentrações de alumínio e fósforo são bem próximas para os 3 solos analisados. A proporção de $(Ca^{+2} + Mg^{+2})/K^{+}$ é maior para o solo A e menor para o solo C.

A partir da Tabela 13 observa-se que as diferenças mais acentuadas entre os 3 solos, quanto aos micronutrientes, correspondem às concentrações de manganês, ferro e cobre.

Tabela 13 - Resultados de quantificação de micronutrientes realizada no Laboratório de Solos da EMBRAPA

Parâmetros	Solo A	Solo B	Solo C
Boro ($mg\ dm^{-3}$)	0,22	0,24	0,37
Cobre ($mg\ dm^{-3}$)	3,3	1,2	5,4
Ferro ($mg\ dm^{-3}$)	32	84	16
Manganês ($mg\ dm^{-3}$)	7,2	1,0	10,2
Zinco ($mg\ dm^{-3}$)	4,2	1,5	3,0

Ainda conforme a Tabela 13, o solo C apresentou as maiores concentrações para boro, cobre e manganês e o solo B apresentou as menores concentrações para cobre, manganês e zinco, podendo ser considerado o solo mais pobre dentre os 3 solos analisados, considerando-se a presença de micronutrientes. O solo B, mesmo sendo considerado o mais pobre em micronutrientes, foi o que apresentou maior concentração de Ferro.

Na Tabela 14 observa-se os resultados dos valores de bases trocáveis, porcentagem de saturação de bases e porcentagem de saturação por Al^{+3} .

Tabela 14 - Resultados dos valores de soma de bases trocáveis (S), porcentagem de saturação por bases (V) e porcentagem de saturação por Al^{+3} (m) realizada no Laboratório de Solos da EMBRAPA

Parâmetros	Solo A	Solo B	Solo C
Soma de bases trocáveis – S ($mmolc\ dm^{-3}$)	31	14	20
Porcentagem de saturação de bases – V (%)	57	34	38
Porcentagem de saturação por Al^{+3} - m (%)	0	12	5

De acordo com a Tabela 14, o solo A apresentou valores mais elevados de bases trocáveis e porcentagem de saturação de bases, por outro lado o solo B exibiu os menores valores, para estes dois parâmetros. Com relação à porcentagem de saturação por Al^{3+} , o solo B apresentou maior valor. Ribeiro et al. (1999) classificam valores de soma de bases trocáveis

de 6 a 18 e de 18 a 36 mmolc dm⁻³, como baixos e médios, respectivamente, e valores de 20 a 40 e 40 a 60% de saturação por bases também como baixos e médios, sendo que para esses 2 parâmetros, quanto maiores os valores apresentados, mais fértil será o solo. Já para a saturação por alumínio, quanto menor o valor, melhor, e valores até 15% são considerados muito baixos. Considerando-se a classificação apresentada por Ribeiro et al. (1999), pode-se dizer que o solo B é o menos fértil e o solo A o mais fértil dos 3 solos analisados.

Por fim, a Tabela 15 apresenta a concentração de metais presente em cada um dos solos. Pelos resultados apresentados, observa-se que os metais com maior concentração natural nos 3 solos são o ferro e alumínio, característica de solos da região. Além disso, o solo C apresenta as maiores concentrações de metais, exceto para cálcio, magnésio e sódio. Já o solo B, é o que apresenta as menores concentrações, exceto para o ferro.

Tabela 15 - Concentração de metais dos solos A, B e C.

Parâmetros	Solo A	Solo B	Solo C
Zinco (mg kg ⁻¹)	43,6	8,37	85,4
Chumbo (mg kg ⁻¹)	13,0	<0,1	15,0
Cádmio (mg kg ⁻¹)	<0,06	<0,06	5,6
Níquel (mg kg ⁻¹)	9,5	<0,8	29,8
Ferro (mg kg ⁻¹)	45000	11940	127700
Manganês (mg kg ⁻¹)	207,0	31,8	497,0
Cobre (mg kg ⁻¹)	16,9	1,5	47,9
Cromo total (mg kg ⁻¹)	<0,5	<0,5	0,8
Alumínio (mg kg ⁻¹)	3391,0	7415	73760
Cálcio (mg kg ⁻¹)	840,0	334,0	665,0
Magnésio (mg kg ⁻¹)	204,2	49,5	171,3
Sódio (mg kg ⁻¹)	60,0	30,0	10,0
Potássio (mg kg ⁻¹)	80,0	40,0	110,0

Com relação aos metais potencialmente tóxicos (zinco, chumbo, níquel, cobre e cromo), os valores encontrados nos 3 tipos de solo, são valores naturais, já relatados em

outros trabalhos. Dos 3 tipos de solo, o solo C apresentou concentrações mais elevadas de Zinco, Chumbo, Níquel, Cobre e Cromo, reflexo do material parental que originou tal solo.

Todas as análises anteriormente apresentadas foram realizadas visando caracterizar os solos antes da aplicação do efluente, tanto para verificar o melhor solo a ser empregado no ensaio em coluna como para verificar as alterações que a aplicação do efluente causaria no solo.

Por fim, considerando-se todos os resultados apresentados e, apesar das características físico-químicas do solo A serem as mais adequadas para os testes de percolação com efluente de fossa biodigestora, principalmente em relação aos parâmetros geotécnicos, à CTC e à superfície específica, o solo utilizado nos ensaios foi o solo C. Isso porque a área de coleta do solo A continha muitas raízes (em profundidade), dificultando a coleta dos solos indeformados (colunas), pois a grande presença de raízes gera caminhos preferenciais, o que não é adequado para ensaios em coluna.

As caracterizações granulométricas, de macronutrientes e micronutrientes do solo C foram consideradas apropriadas para o mesmo ser empregado no ensaio em coluna.

6.2. Caracterização do efluente de fossa séptica biodigestora

A Tabela 16 apresenta os resultados da caracterização físico-química das amostras dos efluentes coletados. Ressalta-se que o EFSB 1 foi coletado em um período no qual o Sítio estava recebendo visitas frequentes e, assim, a fossa estava em intenso uso. Já o EFSB 2, coletado em 3 de abril de 2012, último dia do período em que o Sítio não estava recebendo a visita das crianças, devido às férias de fim de ano.

Tabela 16 - Resultados da caracterização físico-química dos efluentes

Parâmetros	EFSB 1 ^a	EFSB 2-A ^b	EFSB 2-B ^c
pH	7,99	7,22	6,87
Turbidez (NTU)	69,6	18,3	38,4
Condutividade Elétrica ($\mu\text{S cm}^{-1}$)	3740	2230	2190
DBO ($\text{mg O}_2 \text{ L}^{-1}$)	155	142	251
DQO ($\text{mg O}_2 \text{ L}^{-1}$)	404	269	297
Total (mg L^{-1})	NR	160	126
Série Nitrogênio	Amoniacal (mg L^{-1})	329	142
	Nitrito (mg L^{-1})	0,005	16,75
	Nitrato (mg L^{-1})	4,37	16,02
Fosfato Total (mg L^{-1})	65,50	54	75,75
Fósforo total (mg L^{-1})	NR	18	25,25
Potássio (mg L^{-1})	173,5	69,0	66,0
Coliformes Totais (UFC 100 mL^{-1})	$8,0 \times 10^5$	$3,1 \times 10^3$	NR
<i>E. Coli</i> (UFC 100 mL^{-1})	$1,0 \times 10^4$	$2,0 \times 10^3$	NR

a – efluente de fossa séptica biodigestora coletado em 01/08/12; b – efluente de fossa séptica biodigestora coletado em 03/04/12 e analisado em 23/04/12; c - efluente de fossa séptica biodigestora coletado em 03/04/12 e analisado em 07/05/12

NR: não realizado

Mancuso e Santos (2003) apontam 5 classes de salinidade para águas de irrigação segundo sua condutividade elétrica (Tabela 17). Comparando-se os intervalos apresentados com os resultados obtidos para os efluentes analisados, é possível classificar o EFSB 1 como de salinidade muito alta e o EFSB 2 como de salinidade alta. Os autores ainda apontam que tanto para as classes alta e muito alta, a área de disposição deve ser permeável e ter boa drenagem e a vegetação a ser irrigada deve ser tolerante aos sais.

Tabela 17 - Classificação de salinidade para águas de irrigação

Classe de salinidade	Condutividade elétrica ($\mu\text{S cm}^{-1}$)
Baixa	0 – 270
Média	270 – 780
Alta	780 – 2340
Muito alta	2340 – 5470
Extremamente alta	>5470

Adaptado de Mancuso e Santos (2003)

Observando-se a Tabela 16, a qualidade do EFSB 1 é pior, já que, com exceção das concentrações de nitrito, nitrato, fosfato total e DBO, os resultados dos outros parâmetros são maiores que para o EFSB 2. E comparando-se os EFSB 2-A e o 2-B, o segundo apresenta pior qualidade que o primeiro, o que pode indicar que, quando foi realizada a coleta do EFSB 2-A, o efluente contido na bombona não foi totalmente homogeneizado, já que, apresenta maior DBO e concentração de sólidos totais e suspensos, como se pode observar na Tabela 18.

Tabela 18 - Resultados da caracterização quanto à presença de sólidos dos efluentes analisados

Parâmetros	EFSB 1 ^a	EFSB 2-A ^b	EFSB 2-B ^c
Sólidos sedimentáveis (mg L^{-1})	0,0	0,1	ND
	Totais	1133	856
Sólidos (mg L^{-1})	Totais Fixos	765	436
	Totais Voláteis	368	420
Sólidos Suspensos (mg L^{-1})	Totais	66	40
	Fixos	7	18
	Voláteis	59	22
Sólidos Dissolvidos (mg L^{-1})	Totais	1067	816
	Fixos	758	418
	Voláteis	309	398

a – efluente de fossa séptica biodigestora coletado em 01/08/12; b – efluente de fossa séptica biodigestora coletado em 03/04/12 e analisado em 23/04/12; c - efluente de fossa séptica biodigestora coletado em 03/04/12 e analisado em 07/05/12

Silva et. al. (2007) apresentam valores para alguns parâmetros dos efluentes de 3 fossas sépticas biodigestoras, duas inoculadas com esterco ovino e uma com esterco bovino. Assim, pela Tabela 19, com exceção das concentrações de nitrato, fosfato e sólidos suspensos fixos, as concentrações apresentadas nos EFSB 1 e 2-A são menores que as apresentadas por Silvia et al. (2007). Além disso, o EFSB 2-A apresentou maiores valores, em relação aos da Tabela 19, para sólidos suspensos totais e fixos, além de apresentar maior valor de DBO que aquele da inoculação com esterco bovino.

Tabela 19 - Caracterização de efluentes de biodigestores inoculados com esterco ovino e bovino

Parâmetros		Tipo de Inoculação		
		Ovino 1	Ovino 2	Bovino
	pH	8,05	8,14	8,33
	Turbidez (NTU)	638	576	461
Nitrogênio	Amoniacal (mg L ⁻¹)	562	517	404
	Nitrato (mg L ⁻¹)	0,86	2,02	2,41
	Fosfato Total (mg L ⁻¹)	32	12	33
Sólidos Suspensos	Totais (mg L ⁻¹)	96	117	110
	Fixos (mg L ⁻¹)	8	28	8
	Voláteis (mg L ⁻¹)	88	89	102
	DBO (mg L ⁻¹)	411	344	220

.Adaptado de Silva et al. (2007)

A Tabela 20 exhibe os resultados da caracterização química dos efluentes.

Tabela 20 - Resultados da caracterização química dos efluentes analisados

Parâmetros	EFSB 1^a	EFSB 2-A^b	EFSB 2-B^c
Sulfato (mg L ⁻¹)	ND	100	65
Sulfeto (mg L ⁻¹)	NR	<0,001	<0,001
Ferro (mg L ⁻¹)	NR	0,623	0,658
Manganês (mg L ⁻¹)	NR	0,097	0,114
Magnésio (mg L ⁻¹)	NR	2,596	10,430
Alumínio (mg L ⁻¹)	NR	0,38	0,58
Sódio (mg L ⁻¹)	NR	131,0	130,0
Zinco (mg L ⁻¹)	0,075	0,038	0,034
Chumbo (mg L ⁻¹)	<0,01	< 0,01	< 0,01
Cobre (mg L ⁻¹)	0,021	<0,003	0,008
Cromo (mg L ⁻¹)	0,033	<0,005	<0,005

a – efluente de fossa séptica biodigestora coletado em 01/08/12; b – efluente de fossa séptica biodigestora coletado em 03/04/12 e analisado em 23/04/12; c - efluente de fossa séptica biodigestora coletado em 03/04/12 e analisado em 07/05/12

NR: Não realizado

A partir da Tabela 20, observa-se que de todos os parâmetros analisados, destaca-se a concentração de sódio e magnésio, sendo que para o segundo a concentração encontrada no EFSB 2-B é maior.

Por fim, considerando-se os padrões de qualidade das classes apresentadas pela Resolução CONAMA 357 (CONAMA, 2005), os 3 efluentes analisados atendem ao padrão de pH para a classe 1, o EFSB 1 atende aos padrões de nitrato e nitrito para a classe 1 e ao padrão de turbidez para a classe 2 e o EFSB 2 atende ao padrão de turbidez para classe 1. Todos os outros padrões apresentados pela Resolução não são atendidos por nenhuma das amostras.

6.3. Sistema de percolação e solo de efluente doméstico tratado

6.3.1. Caracterização das Colunas do solo C

A Tabela 21 apresenta as massas, volumes de solo e de vazios e a massa específica do solo das colunas coletadas, bem como os resultados dos ensaios de permeabilidade e as taxas aplicadas nos ensaios de percolação.

Tabela 21 - Resultados dos parâmetros geotécnicos (colunas de solo do tipo C)

Parâmetros	Coluna 1	Coluna 2 – CP ^a	Coluna 3	Coluna 4	Coluna 5
Massa de solo (g)	1492,19	333,71	1651,70	1508,43	1510,25
Área transversal (cm ²)	66,5	20,2	72,4	67,9	66,5
Volume de solo (cm ³)	950,6	220,3	1071,3	1005,4	983,8
Massa específica do solo (g cm ⁻³)	1,57	1,52	1,54	1,50	1,54
Volume de Vazios (cm ³)	560,9	130,0	632,0	593,2	580,5
Permeabilidade (cm h ⁻¹)	4,09	2,02	NR	NR	NR
Taxa de aplicação média (cm dia ⁻¹)	-	-	5,6	32,2	21,4

a - dados referentes ao corpo de prova moldado à partir da Coluna 2

NR: Não realizado

Segundo as classes de permeabilidade estabelecidas pelo Serviço de Conservação de solos dos Estados Unidos (ESTADOS UNIDOS, 1983⁵ apud OLIVEIRA, 2001, p. 253), a permeabilidade do solo C é classificada como moderada, que inclui valores de permeabilidades de 1,5 a 5,0 cm h⁻¹. A qual corresponde, segundo a mesma classificação, a solos argilosos, porosos e de CTC baixa, correspondendo a latossolos, nitossolos e argissolos.

Melo et al. (2005), ao analisarem em colunas de solo o deslocamento de cátions básicos provenientes de água residuária da mandioca, utilizaram uma coluna contendo neossolo quartzarênico, com predominância de areia grossa, de permeabilidade igual a 68,1 cm h⁻¹ e uma coluna contendo latossolo vermelho-amarelo, com predominância de argila, de permeabilidade igual a 37,8 cm h⁻¹. Cabe ressaltar que as colunas empregadas no trabalho apresentado por Melo et al. (2005) foram formadas por amostras deformadas de solo, posteriormente acondicionadas nas colunas. Assim, considerando-se o latossolo vermelho-

⁵ ESTADOS UNIDOS. United States Department of Agriculture. Soil Conservation Service. In: National Soils Handbook. Part 603: Application of soil information (p. 603-1/603-222), 1983.

amarelo, com permeabilidade tão superior aos valores encontrados para as colunas de solo C (objeto de estudo), nota-se que os ensaios com amostras deformadas, em relação à permeabilidade, podem não corresponder à realidade. O ideal para este tipo de ensaio é o emprego de amostras indeformadas, que representa o que realmente ocorre no solo.

Considerando-se a taxa de aplicação média de líquido percolante (efluente tratado para as Colunas 3 e 5 e água deionizada para a Coluna 4), observa-se que a maior taxa foi aquela aplicada à Coluna 4, seguida da Coluna 5, sendo que a aplicação de efluente tratado na Coluna 5 foi cerca de 3,8 vezes àquela aplicada à Coluna 3. Indicando que, apesar dos esforços para se aplicar uma mesma vazão às 3 colunas, as diferentes características entre os registros de saída dos reservatórios e entre os solos presentes nas 3 colunas (caminhos preferenciais), determinaram as diferentes taxas de aplicação. Isso já era esperado, já que durante o rasamento e a saturação das colunas observou-se que o solo presente na Coluna 3 apresentava menos caminhos preferenciais.

6.3.2. Caracterização de lixiviado e drenado das colunas

As Tabelas 22 a 29 exibem os resultados da caracterização dos lixiviados das Colunas 3, 4 e 5, bem como do excesso de efluente presente na Coluna 3, drenado ao término do período de percolação.

A Tabela 22 exhibe os resultados da caracterização físico-química das amostras de lixiviado das Colunas 3 e 5, coletadas no dia 27/04/12.

Tabela 22 - Caracterização físico-química das amostras de lixiviado das Colunas 3 e 5 - 27/04/12

Parâmetros	Lixiviado 3-A		Lixiviado 5-A	
	Valor	Lix./2-A ^a (%)	Valor	Lix./2-A ^b (%)
pH	7,14	99	7,82	108
Turbidez (NTU)	3,24	18	5,78	32
Condutividade Elétrica ($\mu\text{S cm}^{-1}$)	1387	62	1984	89
DBO (mg L^{-1})	100	70	131	92
DQO (mg L^{-1})	113	42	175	65
Nitrogênio	Total (mg L^{-1})	83	130	81
	Amoniacal (mg L^{-1})	NR	NR	-
	Nitrato (mg L^{-1})	15,82	19,93	124
	Nitrito (mg L^{-1})	28,80	34,00	203
Fosfato Total (mg L^{-1})	3,8	7	16,8	31
Potássio (mg L^{-1})	28,0	41	52,0	75

a - relação do lixiviado da Coluna 3 com EFSB 2-A; b - relação do lixiviado da Coluna 5 com EFSB 2-A
NR: Não realizado

A partir da Tabela 22 observa-se que, para todos os parâmetros analisados, o lixiviado da Coluna 5 apresentou maiores valores que aqueles do lixiviado da Coluna 3. Em relação ao EFSB 2-A, com exceção do nitrito de ambas as colunas, e de pH e nitrato para a Coluna 5, todos os valores foram menores àqueles de entrada, ou seja, àqueles relativos ao EFSB 2-A. Em relação ao nitrito e nitrato e, considerando-se a redução de nitrogênio total, pode-se observar que ocorreu a nitrificação.

A Tabela 23 exibe os resultados da caracterização físico-química das amostras de lixiviado das Colunas 3 e 5, coletadas no dia 02/05/12.

Na Tabela 23, como observado para a coleta do dia 27 de abril, observa-se que, com exceção do pH, os valores do lixiviado da Coluna 5 são maiores que aqueles da Coluna 3. Além disso, como na primeira coleta, os valores de pH, nitrato e nitrito aumentaram na saída, em relação àqueles de entrada.

Tabela 23 - Caracterização físico-química das amostras de lixiviado das Colunas 3 e 5 - 2/05/12

Parâmetros	Lixiviado 3-B		Lixiviado 5-B		
	Valor	Lix./2-A ^c (%)	Valor	Lix./2-A ^d (%)	
pH	7,98	111	7,33	102	
Turbidez (NTU)	3,30	18	4,66	25	
Condutividade Elétrica ($\mu\text{S cm}^{-1}$)	1824	82	2050	92	
DBO (mg L^{-1})	100	70	134	94	
DQO (mg L^{-1})	142	53	186	69	
Nitrogênio	Total (mg L^{-1})	133	83	139	87
	Amoniacal (mg L^{-1})	NR	-	NR	-
	Nitrato (mg L^{-1})	NR	-	19,25	120
	Nitrito (mg L^{-1})	NR	-	40,50	242
Fosfato Total (mg L^{-1})	2,8	5	6,0	11	
Fósforo total (mg L^{-1})	NR	-	NR	-	

c - relação do lixiviado da Coluna 3 com EFSB 2-A; d - relação do lixiviado da Coluna 5 com EFSB 2-A

A Tabela 24 exibe os resultados da caracterização química das amostras de lixiviado das Colunas 3, 4 e 5 e do líquido drenado da Coluna 3, coletadas no dia 09/05/12.

Na Tabela 24, pode-se observar que, como esperado, os resultados referentes ao lixiviado da Coluna 4, pela qual foi percolada água deionizada, com exceção do pH, são todos menores que os lixiviados da Colunas 3 e 5 e do líquido drenado da Coluna 3. Observa-se também que os resultados dos lixiviados das Colunas 3 e 5 apresentam redução das concentrações em relação àquelas de entrada, exceto para pH, nitrato e nitrito, tendência já observada anteriormente.

Tabela 24 - Caracterização química das amostras de lixiviado das Colunas 3, 4 e 5 e do líquido drenado da Coluna 3 - 9/05/12

Parâmetros	Lixiviado 3-C		Lixiviado 5-C		Lixiviado 4 Branco	Drenado 3		
	Valor	Lix./2-A ^e (%)	Valor	Lix./2-B ^f (%)	Valor	Valor	Lix./2-A ^g (%)	
pH	8,33	115	7,21	105	7,25	6,01	83	
Turbidez (NTU)	2,97	16	4,29	11	0,45	10,20	56	
Condutividade Elétrica ($\mu\text{S cm}^{-1}$)	1806	81	1915	87	4,02	1712	77	
DBO (mg L^{-1})	131	92	121	48	<1	142	100	
DQO (mg L^{-1})	152	57	184	62	1	171	64	
Total (mg L^{-1})	120	75	108	86	3	71	44	
Nitrogênio	Amoniacal (mg L^{-1})	NR	-	NR	-	NR	NR	-
	Nitrato (mg L^{-1})	19,98	125	43,62	146	0,11	107,10	669
	Nítrito (mg L^{-1})	71,50	427	103,00	189	<0,001	0,006	0
Fosfato Total (mg L^{-1})	2,7	5	9,3	12	0,06	48,0	89	
Fósforo total (mg L^{-1})	0,9	5	3,1	12	0,02	16,0	89	
Potássio (mg L^{-1})	44,7	65	56,0	85	0,3	51,0	74	

e – relação do lixiviado da Coluna 3 com EFSB 2-A; f – relação do lixiviado da Coluna 5 com EFSB 2-B; g - relação do líquido drenado da Coluna 3 com EFSB 2-A
NR: Não realizado

Ainda segundo a Tabela 24, é possível verificar que o líquido drenado da coluna 3, que pode ser considerado como sendo o efluente EFSB 2-A, antes da percolação pelo solo, retido na câmara de entrada do permeâmetro, com exceção da DBO e do nitrato, apresentou redução em relação aos resultados referentes ao EFSB 2-A, analisado em 23 de abril. Isso confirma a variação de qualidade do efluente antes da percolação, indicando a necessidade de um melhor monitoramento de sua qualidade ao longo do período de percolação. Por fim, comparando-se os resultados do lixiviado e do líquido drenado, ambos da Coluna 3, observa-se que o Drenado 3 apresentou menores valores de pH, condutividade, nitrogênio total e nitrito.

Observando-se a Tabela 25, é possível verificar que os lixiviados da primeira coleta apresentam características significativamente diferentes entre si, o que era esperado pela aparência menos clarificada do lixiviado da Coluna 5.

Tabela 25 - Quantificação de sólidos das amostras de lixiviado das Colunas 3 e 5 - 27/04/12

Parâmetros		Lixiviado 3-A		Lixiviado 5-A	
		Valor	Lix./2-A ^a (%)	Valor	Lix./2-A ^b (%)
Sólidos (mg L ⁻¹)	Totais	502	59	902	105
	Totais Fixos	324	74	454	104
	Totais Voláteis	178	42	448	107
Sólidos Suspensos (mg L ⁻¹)	Totais	50	125	102	255
	Fixos	24	133	68	378
	Voláteis	26	118	34	155
Sólidos Dissolvidos (mg L ⁻¹)	Totais	452	55	800	98
	Fixos	300	72	386	92
	Voláteis	152	38	414	104

a - relação do lixiviado da Coluna 3 com EFSB 2-A; b - relação do lixiviado da Coluna 5 com EFSB 2-A

Pelos resultados da Tabela 25, o Lixiviado da Coluna 3 apresentou redução dos sólidos totais e dissolvidos e aumento dos sólidos suspensos. Já o Lixiviado da Coluna 5 apresentou pouca variação, em relação ao EFSB 2-A, nas concentrações de sólidos totais e dissolvidos,

porém houve aumento nas concentrações de sólidos suspensos, muito maior que aquele observado para a Coluna 3.

A Tabela 26 exhibe os resultados da quantificação de sólidos das amostras de lixiviado das Colunas 3 e 5 (coleta dia 02/05/12).

Tabela 26 - Quantificação de sólidos das amostras de lixiviado das Colunas 3 e 5 - 2/05/12

Parâmetros	Lixiviado 3-B		Lixiviado 5-B		
	Valor	Lix./2-A ^c (%)	Valor	Lix./2-A ^d (%)	
Sólidos (mg L ⁻¹)	Totais	688	80	852	100
	Totais Fixos	470	108	566	130
	Totais Voláteis	218	52	286	68
Sólidos Suspensos (mg L ⁻¹)	Totais	106	265	106	265
	Fixos	60	333	16	89
	Voláteis	46	209	90	409
Sólidos Dissolvidos (mg L ⁻¹)	Totais	582	71	746	91
	Fixos	410	98	550	132
	Voláteis	172	43	196	49

c - relação do lixiviado da Coluna 3 com EFSB 2-A; d - relação do lixiviado da Coluna 5 com EFSB 2-A

Na Tabela 26, observa-se que, em relação ao EFSB 2-A, houve significativo aumento de sólidos suspensos voláteis e redução de sólidos dissolvidos voláteis, nos lixiviados de ambas as colunas.

Por fim, não foi possível realizar a caracterização de sólidos das amostras coletadas em 9 de maio.

A Tabela 27 exhibe a caracterização química das amostras de lixiviado das Colunas 3 e 5 (27/04/12).

Tabela 27 - Caracterização química das amostras de lixiviado das Colunas 3 e 5 - 27/04/12

Parâmetros	Lixiviado 3-A		Lixiviado 5-A	
	Valor	Lix./2-A ^a (%)	Valor	Lix./2-A ^b (%)
Sulfato (mg L ⁻¹)	45	45	80	80
Sulfeto (mg L ⁻¹)	<0,001	-	<0,001	-
Ferro (mg L ⁻¹)	0,024	4	0,086	14
Manganês (mg L ⁻¹)	0,251	259	0,192	198
Magnésio (mg L ⁻¹)	4,66	180	4,46	172
Alumínio (mg L ⁻¹)	0,06	16	0,04	11
Sódio (mg L ⁻¹)	90,0	69	104,0	79
Zinco (mg L ⁻¹)	0,110	289	0,010	26
Chumbo (mg L ⁻¹)	0,04	-	<0,01	-
Cobre (mg L ⁻¹)	0,066	-	0,040	-
Cromo (mg L ⁻¹)	<0,005	-	<0,005	-

a - relação do lixiviado da Coluna 3 com EFSB 2-A; b - relação do lixiviado da Coluna 5 com EFSB 2-A

A partir da Tabela 27, observa-se que ocorreu lixiviação de manganês, magnésio e zinco para a Coluna 3 e manganês e magnésio para a Coluna 5. Todos os outros resultados apresentados indicam diminuição no lixiviado das colunas.

A Tabela 28 exibe a caracterização química das amostras de lixiviado das Colunas 3 e 5 (02/05/12).

Tabela 28 - Caracterização química das amostras de lixiviado das Colunas 3 e 5 - 2/05/12

Parâmetros	Lixiviado 3-B		Lixiviado 5-B	
	Valor	Lix./2-A ^c (%)	Valor	Lix./2-A ^d (%)
Sulfato (mg L ⁻¹)	80	80	70	70
Sulfeto (mg L ⁻¹)	<0,001	-	<0,001	-
Ferro (mg L ⁻¹)	0,218	35	0,044	7
Manganês (mg L ⁻¹)	0,125	129	0,081	84
Magnésio (mg L ⁻¹)	1,74	67	4,79	185
Alumínio (mg L ⁻¹)	0,78	205	0,04	11
Sódio (mg L ⁻¹)	106,0	81	109,0	83
Zinco (mg L ⁻¹)	0,002 ^h	5	0,006	16
Chumbo (mg L ⁻¹)	0,09	-	0,05	-
Cobre (mg L ⁻¹)	0,058	-	0,044	-
Cromo (mg L ⁻¹)	<0,005	-	<0,005	-

c - relação do lixiviado da Coluna 3 com EFSB 2-A; d - relação do lixiviado da Coluna 5 com EFSB 2-A; h - valor menor que o limite de detecção considerado igual a 0,002 apenas para cálculo da percentagem em relação à concentração no EFSB 2-A

Na Tabela 28, observa-se que houve lixiviação de manganês e alumínio para a Coluna 3 e magnésio para a Coluna 5. Para todos os outros elementos analisados ocorreu a diminuição da concentração em relação à concentração do EFSB 2-A. Além disso, a concentração de zinco no lixiviado da Coluna 3 foi menor que o limite de detecção (0,002 mg L⁻¹), porém para determinação aproximada de sua relação com a concentração de zinco no EFSB 2-A, essa foi considerada igual a 0,002 mg L⁻¹.

Por fim, na Tabela 29, observa-se lixiviação de ferro, manganês e magnésio para a Coluna 3 e cobre para a Coluna 5. Ocorrendo diminuição da concentração de todos os outros elementos em relação ao EFSB 2-A. Para a Coluna 5, observa-se lixiviação apenas do cobre, com redução da concentração dos demais elementos, em comparação com o EFSB 2-B.

Tabela 29 - Caracterização físico-química das amostras de lixiviado das Colunas 3, 4 e 5 e do líquido drenado da Coluna 3 - 9/05/12

Parâmetros	Lixiviado 3-C		Lixiviado 5-C		Lixiviado 4	Drenado 3	
	Valor	Lix./2-A ^e (%)	Valor	Lix./2-B ^f (%)	Branco	Valor	Lix./2-A ^g (%)
Sulfato (mg L ⁻¹)	95	95	65	100	<1	65	65
Sulfeto (mg L ⁻¹)	<0,001	-	<0,001	-	<0,001	<0,001	-
Ferro (mg L ⁻¹)	0,787	126	0,083	13	0,025	0,451	72
Manganês (mg L ⁻¹)	0,119	123	0,094	82	<0,003	0,105	108
Magnésio (mg L ⁻¹)	2,83	109	5,51	53	0,15	11,98	461
Alumínio (mg L ⁻¹)	0,12	32	0,17	29	0,01	0,16	42
Sódio (mg L ⁻¹)	87,0	66	103,0	79	0,3	95,0	73
Zinco (mg L ⁻¹)	0,002 ^h	5	0,002 ^h	6	<0,002	0,050	132
Chumbo (mg L ⁻¹)	0,12	-	<0,01	-	<0,01	0,06	-
Cobre (mg L ⁻¹)	0,050	-	0,026	325	<0,003	0,054	-
Cromo (mg L ⁻¹)	<0,005	-	<0,005	-	<0,005	0,018	-

e – relação do lixiviado da Coluna 3 com EFSB 2-A; f – relação do lixiviado da Coluna 5 com EFSB 2-B; g - relação do líquido drenado da Coluna 3 com EFSB 2-A; h - valor menor que o limite de detecção considerado igual a 0,002 apenas para cálculo da porcentagem em relação à concentração no EFSB 2-A

Ainda segundo a Tabela 29, o líquido drenado da Coluna 3 apresentou maiores concentrações de manganês, magnésio e zinco e menores concentrações dos demais elementos, quando comparado com o EFSB 2-A, o que pode ser um indício de que o líquido drenado não se refere apenas àquele presente na câmara de entrada do permeâmetro, mas também a um excesso de efluente presente no solo da Coluna 3, podendo também indicar contaminação do material empregado no ensaio em coluna, que foi empregado em outros ensaios (ensaios com percolação de Zinco) e não foi devidamente descontaminado.

Os gráficos representados nas Figuras 36 a 45 foram gerados com o objetivo de facilitar a análise e comparação da variação da qualidade das amostras dos lixiviados das Colunas 3 e 5 entre as 3 coletas realizadas. Assim, a Figura 36 apresenta os valores de pH das amostras a partir dos quais é possível observar que, enquanto o pH do lixiviado da Coluna 3 sofreu aumento ao longo do tempo, o pH do lixiviado da Coluna 5 sofreu decréscimo, porém todos os valores foram maiores que 7,00 e menores que 8,50.

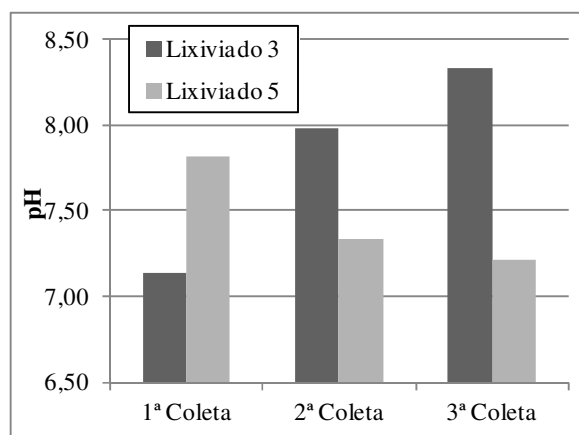


Figura 36 - pH das amostras de lixiviado das Colunas 3 e 5

A Figura 37 apresenta os valores de turbidez e condutividade elétrica das amostras, sendo possível observar que todos os resultados de turbidez foram menores que 6,00 NTU e o lixiviado da Coluna 5 apresentou tendência à redução ao longo do tempo e o da Coluna 3 apresentou pouca variação, com valores em torno de 3,00 NTU. Em relação à condutividade elétrica, apesar da redução em relação ao efluente, antes da percolação pelo solo, todos os valores se enquadram na classe de salinidade alta, segundo valores apresentados na Tabela 17. Além disso, o lixiviado da Coluna 5 apresentou pouca variação ao longo do tempo, enquanto as amostras de lixiviado da Coluna 3 apresentaram aumento da 1ª para a 2ª coleta.

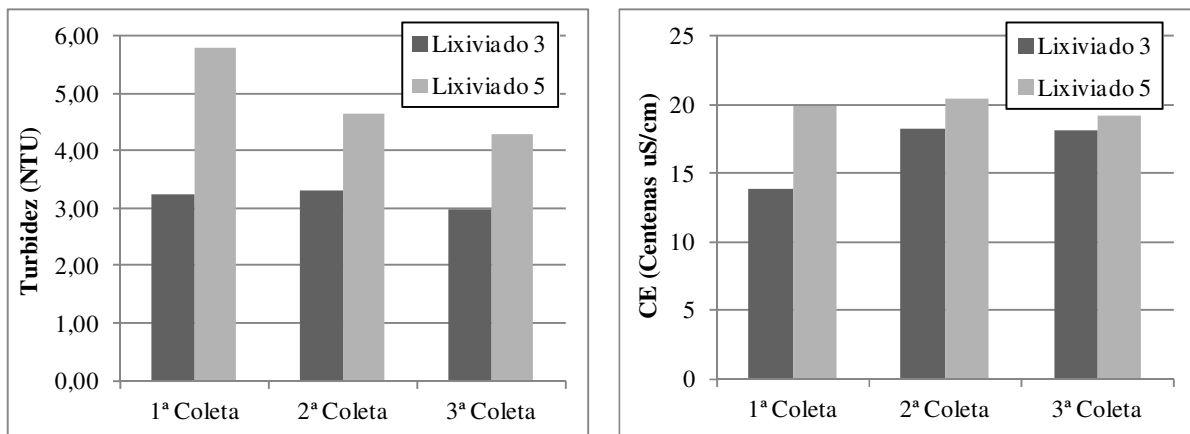


Figura 37 - Turbidez e condutividade elétrica das amostras de lixiviado das Colunas 3 e 5

Na Figura 38, observa-se que tanto a DBO, quanto a DQO das amostras de lixiviado da Coluna 3 aumentaram ao longo do tempo, quanto a DBO e a DQO do lixiviado da Coluna 5, essas apresentaram pouca variação. Apesar disso, exceto para a DBO da 3ª coleta, todos os valores para o lixiviado da Coluna 3 foram menores que os da Coluna 5.

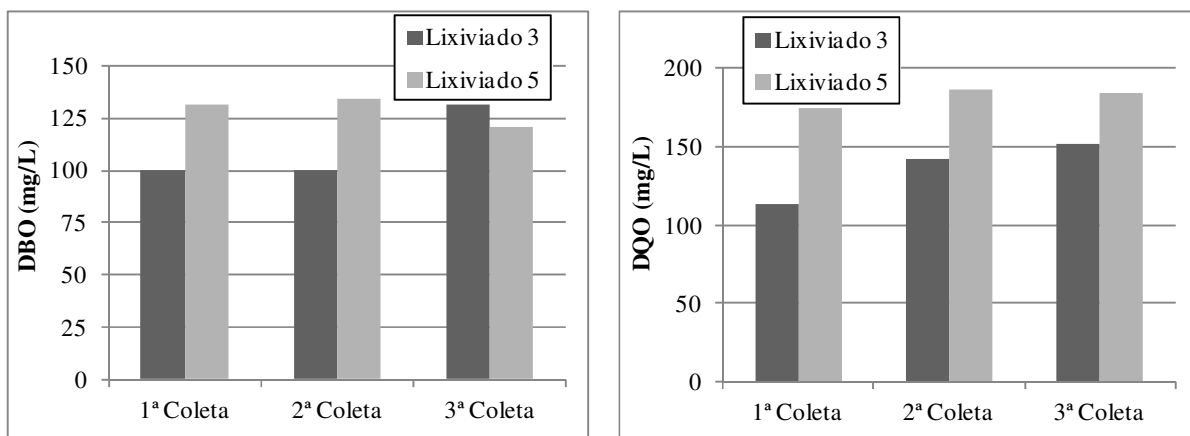


Figura 38 - DBO e DQO das amostras de lixiviado das Colunas 3 e 5

Na Figura 39, observa-se que ambos os lixiviados apresentaram as maiores concentrações de nitrogênio total na 2ª coleta, e apenas para a 3ª coleta a concentração de nitrogênio total presente no lixiviado da Coluna 3 foi maior que aquela da Coluna 5.

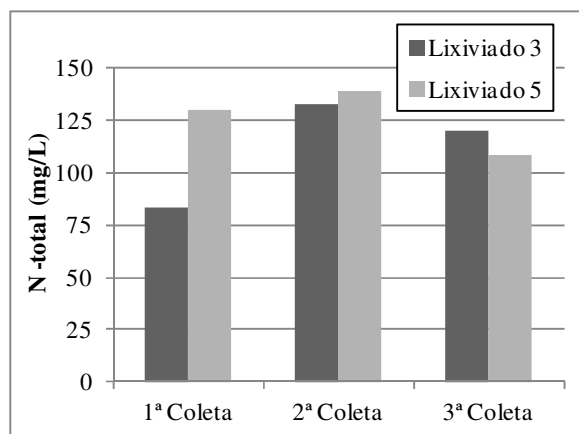


Figura 39 - Nitrogênio total das amostras de lixiviado das Colunas 3 e 5

Já a Figura 40 mostra que houve aumento da concentração de nitrito nos lixiviados das 2 colunas e significativo aumento nas concentrações de nitrato do lixiviado da Coluna 5, sendo que o lixiviado da Coluna 3 apresentou pouca variação na concentração de nitrato.

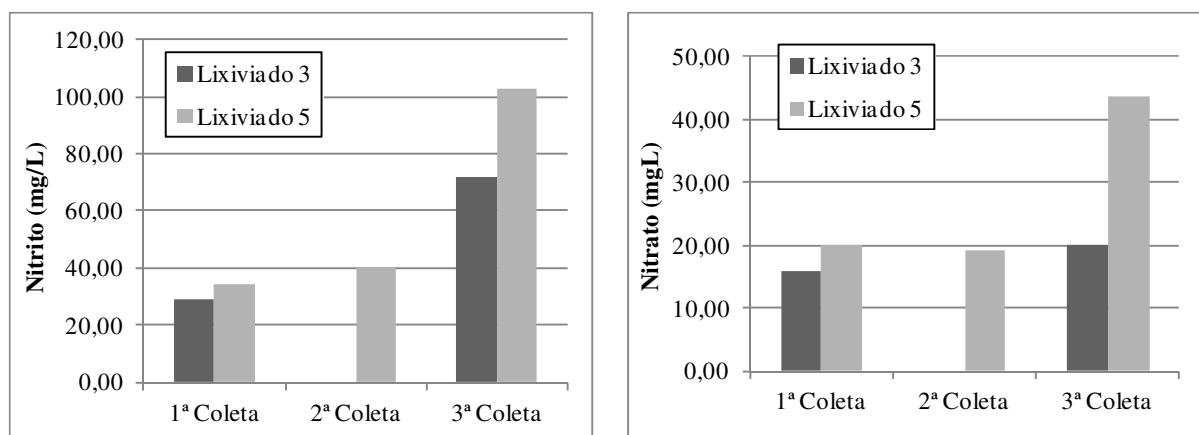


Figura 40 - Nitrito e nitrato das amostras de lixiviado das Colunas 3 e 5

Na Figura 41, observa-se que a concentração de fosfato no lixiviado da Coluna 3 sofreu pouca variação ao longo das 3 coletas e no lixiviado da Coluna 5, sofreu redução da primeira coleta para as 2ª e 3ª coletas. Além disso, todos os resultados de fosfato no lixiviado da Coluna 3 foram abaixo daqueles para a Coluna 5 e sempre menores que 4 mg L^{-1} .

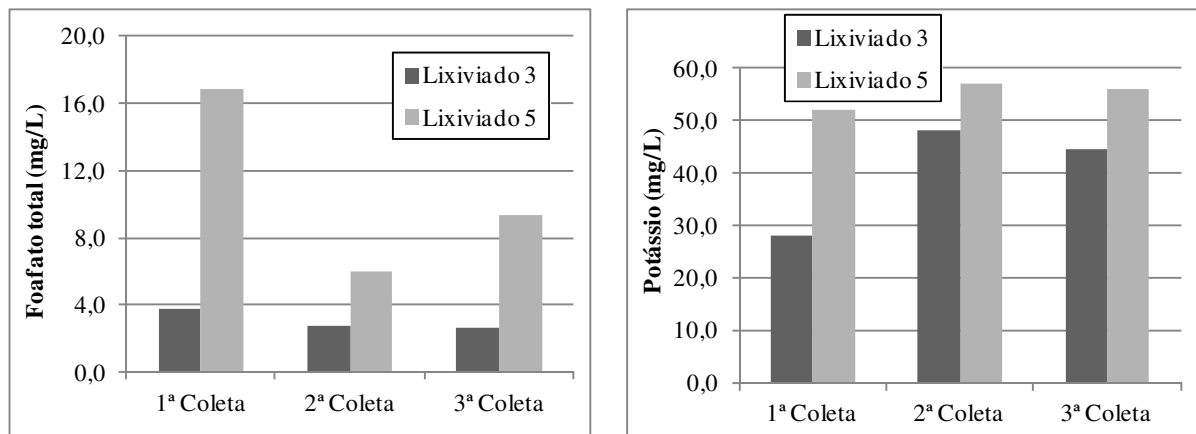


Figura 41 - Fosfato e potássio das amostras de lixiviado das Colunas 3 e 5

Ainda segundo a Figura 41, observa-se que a concentração de potássio no lixiviado da Coluna 3 aumentou da 1ª para as 2ª e 3ª coletas, porém manteve-se sempre abaixo das concentrações no lixiviado da Coluna 5, as quais sofreram pouca variação.

A Figura 42 exibe os gráficos referentes aos sólidos suspensos (totais, fixos e voláteis) e sólidos dissolvidos (totais, fixos e voláteis) das amostras de lixiviado das Colunas 3 e 5.

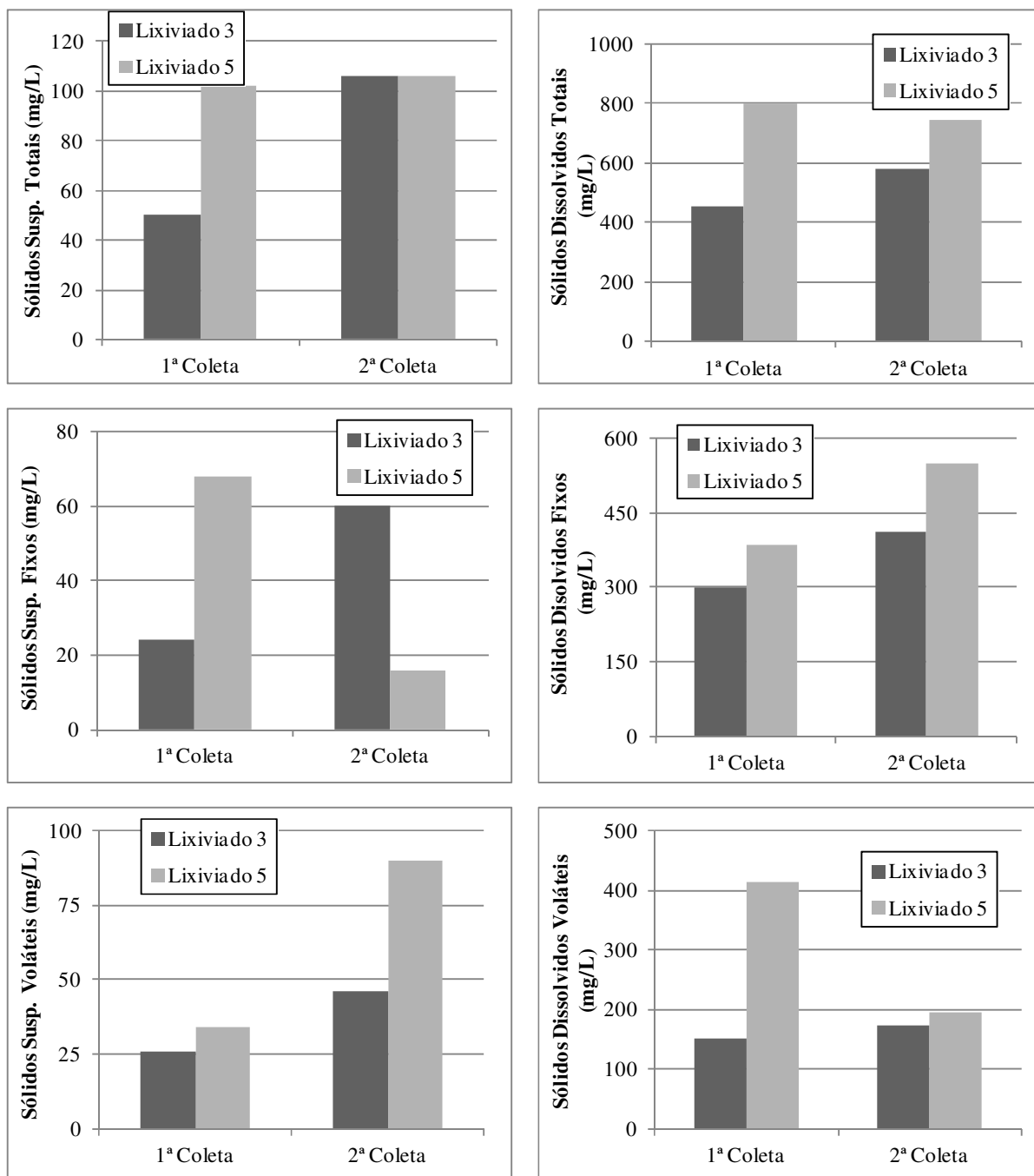


Figura 42 - Sólidos suspensos e dissolvidos das amostras de lixiviado das Colunas 3 e 5

Na Figura 42, observa-se que os sólidos suspensos e dissolvidos do lixiviado da Coluna 3 aumentaram da 1ª coleta para a 2ª coleta. Porém, no lixiviado da Coluna 5 houve diminuição dos suspensos fixos e dos dissolvidos voláteis e aumento dos suspensos voláteis e dissolvidos fixos e, com exceção da concentração de sólidos suspensos fixos, todos os resultados se mantiveram acima dos resultados do lixiviado da Coluna 3.

A Figura 43 exibe o gráfico das concentrações de sulfato nas amostras de lixiviado das Colunas 3 e 5.

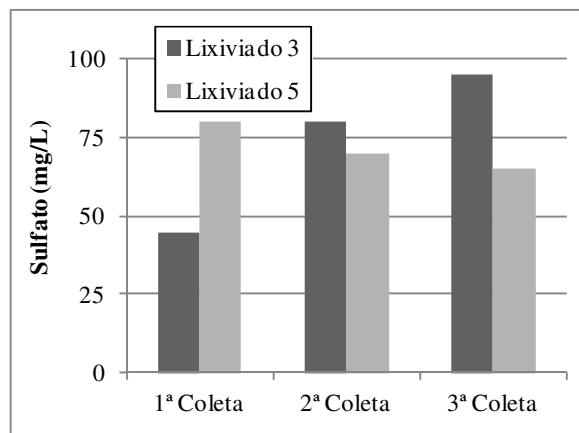


Figura 43 - Sulfato das amostras de lixiviado das Colunas 3 e 5

Em relação à concentração de sulfato, Figura 43, observa-se que a concentração de sulfato no lixiviado da Coluna 3 aumentou ao longo do tempo, chegando próximo a 100 mg L⁻¹, concentração de sulfato do EFSB 2-A. Já a concentração de sulfato no lixiviado da Coluna 5 diminuiu, porém o valor da 3ª coleta se igualou à concentração de do EFSB 2-B.

A Figura 44 exibe os gráficos das concentrações de Ferro e Alumínio nas amostras de lixiviado das Colunas 3 e 5.

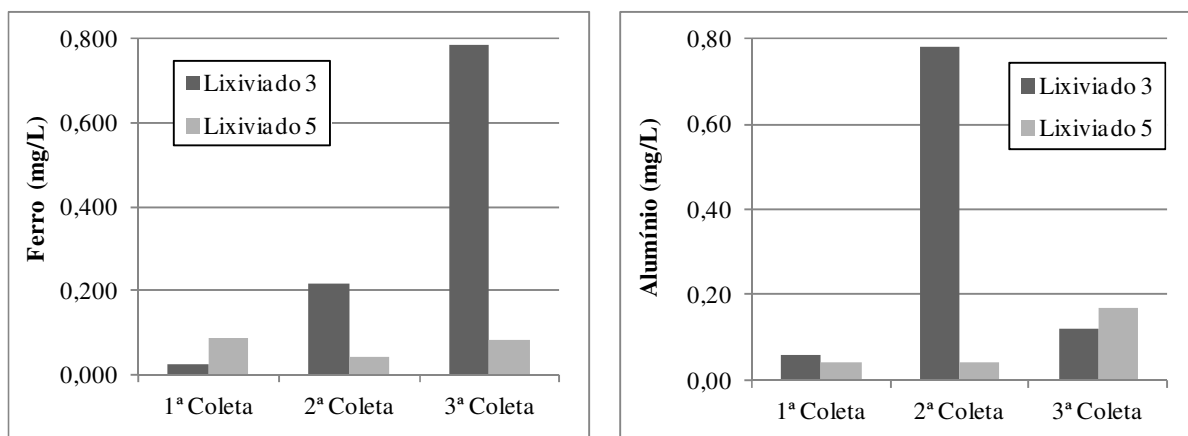


Figura 44 - Ferro e alumínio das amostras de lixiviado das Colunas 3 e 5

A partir da Figura 44, nota-se que a concentração de ferro e alumínio no lixiviado da Coluna 5 variou pouco e foi menor que 0,2 mg L⁻¹ em todas as coletas. Em relação ao

lixiviado da Coluna 3, tanto as concentrações de ferro e alumínio atingiram valores próximos a $0,8 \text{ mg L}^{-1}$.

A Figura 45 exibe os gráficos das concentrações de manganês, magnésio, sódio, zinco, chumbo e cobre presentes nas amostras de lixiviado das Colunas 3 e 5.

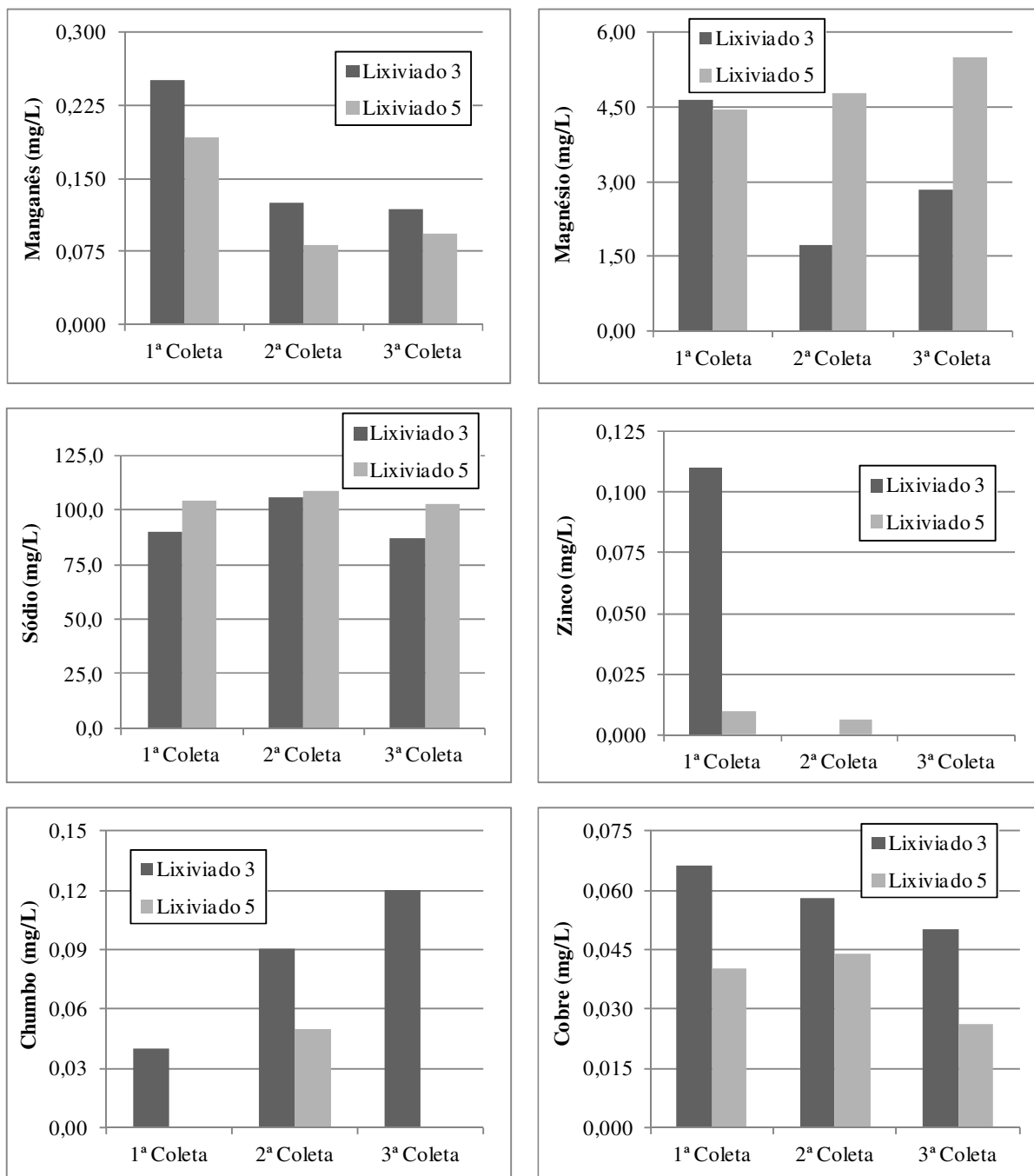


Figura 45 - Manganês, magnésio, sódio, zinco, chumbo e cobre presentes nas amostras de lixiviado das Colunas 3 e 5

Na Figura 45, observa-se que as concentrações de manganês e cobre reduziram da 1ª para a 3ª coleta nos lixiviados das 2 colunas e todos os resultados do lixiviado da Coluna 3 foram maiores que aqueles da Coluna 5. Em relação à concentração de sódio nos lixiviados, para as 2 colunas as concentrações da 2ª coleta foram maiores e todos os resultados foram maiores para a Coluna 5. Em relação ao manganês, houve redução da concentração no lixiviado da Coluna 3 e aumento no da Coluna 5.

Por fim, as concentrações de zinco sofreram pouca variação no lixiviado da Coluna 5 e redução para a Coluna 3. Já a concentração de chumbo aumento da 1ª para a 3ª coleta no lixiviado da Coluna 3.

Pelos resultados apresentados, de maneira geral, as amostras de lixiviado da Coluna 3 apresentaram melhor qualidade que as amostras da Coluna 5, a qual apresentou resultados mais próximos aos resultados do efluente percolado, isso ocorre devido à própria característica da coluna, como já comentado, o solo presente na Coluna 3 apresentou menor quantidade de caminhos preferenciais, ocorrendo mais interação dos elementos presentes no líquido percolado com o solo, quando comparado com a Coluna 5.

6.3.3. *Caracterização do solo após percolação*

As Figuras 46 a 55 apresentam os resultados da caracterização dos solos presentes nas Colunas 3 (após aplicação do efluente) e 4 (amostra controle – branco). As amostras foram divididas em “topo” e “base”, sendo que o fluxo pelo permeâmetro foi ascendente, do topo para a base das colunas. A tabela com todos os resultados dessa caracterização é apresentada no Apêndice B.

A Figura 46 exhibe os gráficos com o pH em H₂O e com CaCl₂ das Colunas 3 e 4.

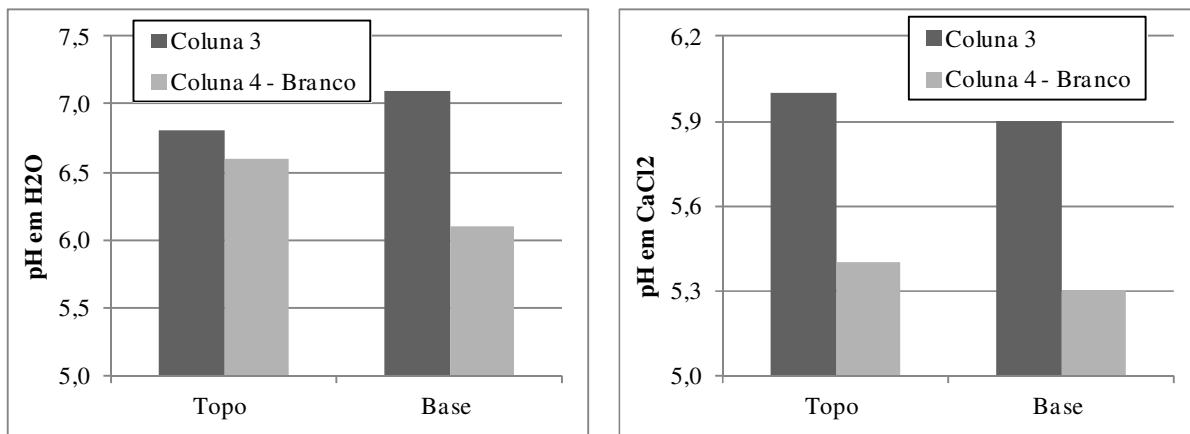


Figura 46 - pH em H₂O e em CaCl₂ das Colunas 3 (após percolação do efluente) e 4 (amostra controle, após percolação de água deionizada)

O valor de pH após a aplicação do efluente foi maior que o obtido antes da aplicação (Coluna 4 - branco), nos dois métodos (com H₂O e com CaCl₂). Na Figura 46, observa-se que o pH em H₂O no ensaio com a Coluna 3 foi mais elevado na base que no topo. Na amostra controle (Coluna 4) o pH em H₂O e em CaCl₂ foi mais elevado no topo.

A Figura 47 exibe os gráficos de CTC e acidez potencial das Colunas 3 (após aplicação do efluente) e 4 (amostra branca – sem aplicação).

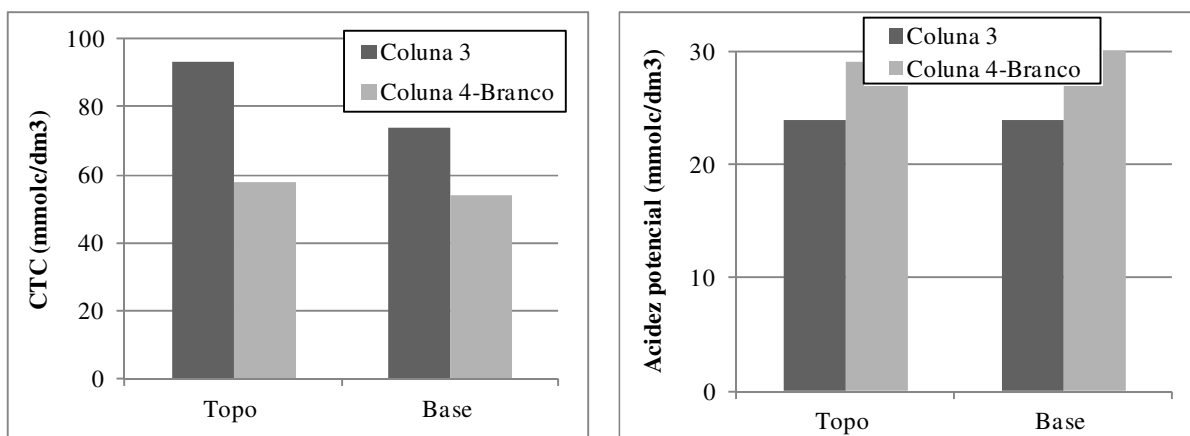


Figura 47 - CTC e acidez potencial das Colunas 3 (após percolação do efluente) e 4 (amostra controle, após percolação de água deionizada)

Da mesma maneira que o pH, a Coluna 3 exibiu maior CTC que a Coluna 4 (amostra controle – branco). Desta forma, o CTC após aplicação do efluente, na Coluna 3, foi maior que o determinado antes da aplicação (Figura 47). Tanto na Coluna 3 como na 4, os maiores valores de CTC foram observados no topo da coluna, sendo que na amostra controle (Coluna 4) não há variação significativa do CTC no topo e base da coluna (Figura 47).

Em relação à acidez potencial, observa-se diminuição dessa após aplicação do efluente (Coluna 3), não ocorrendo variação do topo para a base (Figura 47).

A Figura 48 exibe os gráficos de cálcio trocável, magnésio trocável, potássio trocável e da proporção $(Ca^{2+} + Mg^{2+})/K^{+}$ obtidas nos solos das Colunas 3 (após aplicação do efluente) e 4 (amostra branca – sem aplicação).

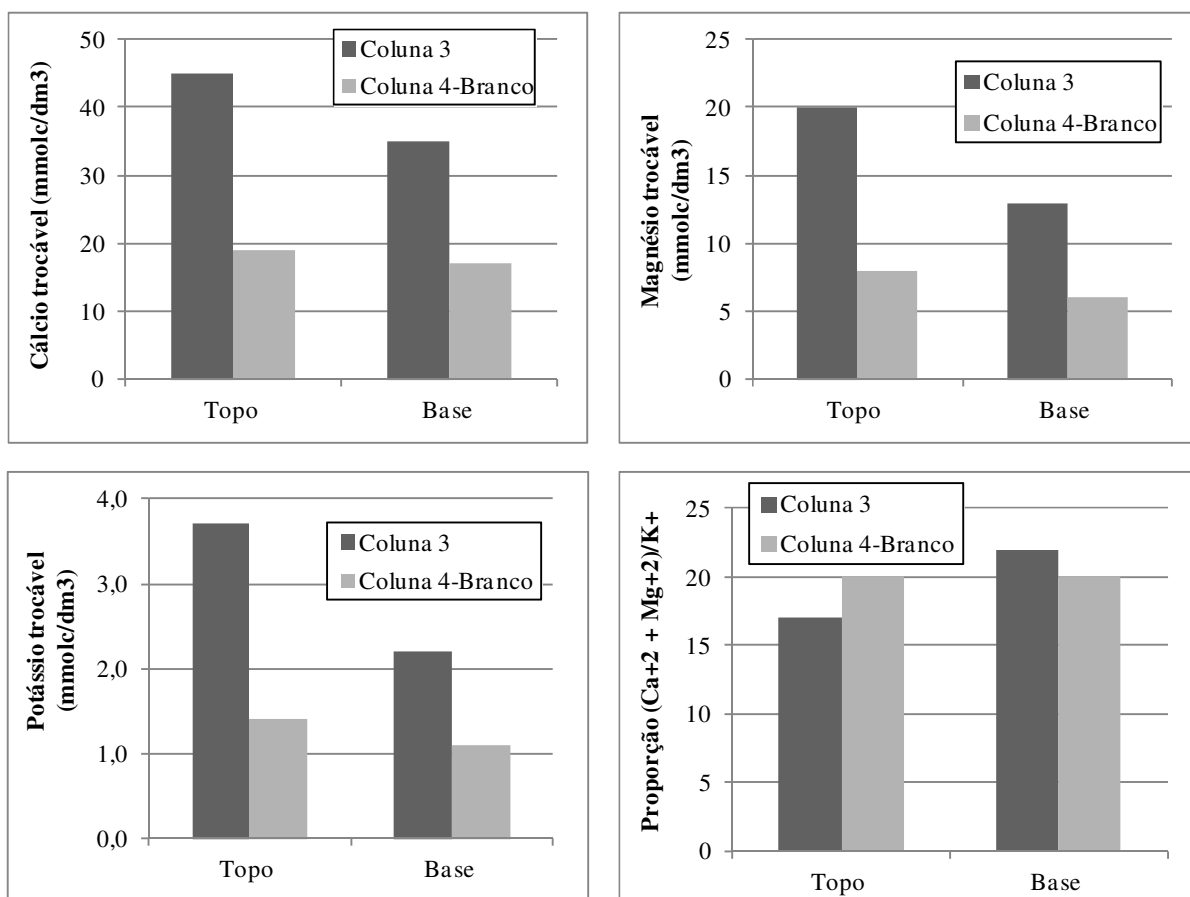


Figura 48 - Cálcio, magnésio e potássio trocáveis nas Colunas 3 (após percolação do efluente) e 4(amostra controle, após percolação de água deionizada)

Na Figura 48, observa-se que a aplicação do efluente também proporcionou aumento das concentrações de cálcio, magnésio e potássio trocáveis, sendo que esse aporte de nutrientes foi maior no topo da Coluna 3.

A Figura 49 exibe os gráficos de fósforo assimilável e matéria orgânica obtidas nos solos das Colunas 3 (após aplicação do efluente) e 4 (amostra branca – sem aplicação).

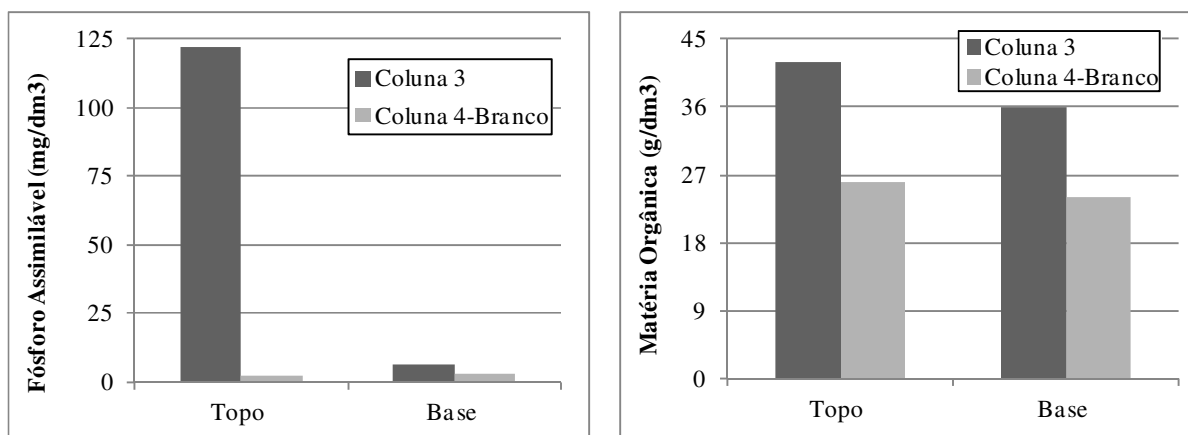


Figura 49 - Fósforo assimilável e matéria orgânica nas Colunas 3 (após percolação do efluente) e 4(amostra controle, após percolação de água deionizada)

Ocorreu também aumento da concentração de fósforo assimilável e de matéria orgânica, sendo que o fósforo manteve-se majoritariamente no topo da Coluna 3. A concentração de matéria orgânica também foi maior no topo da Coluna 3.

A Figura 50 exibe os gráficos de soma de bases trocáveis e porcentagem de saturação por bases nas Colunas 3 (após aplicação do efluente) e 4 (amostra branca – sem aplicação).

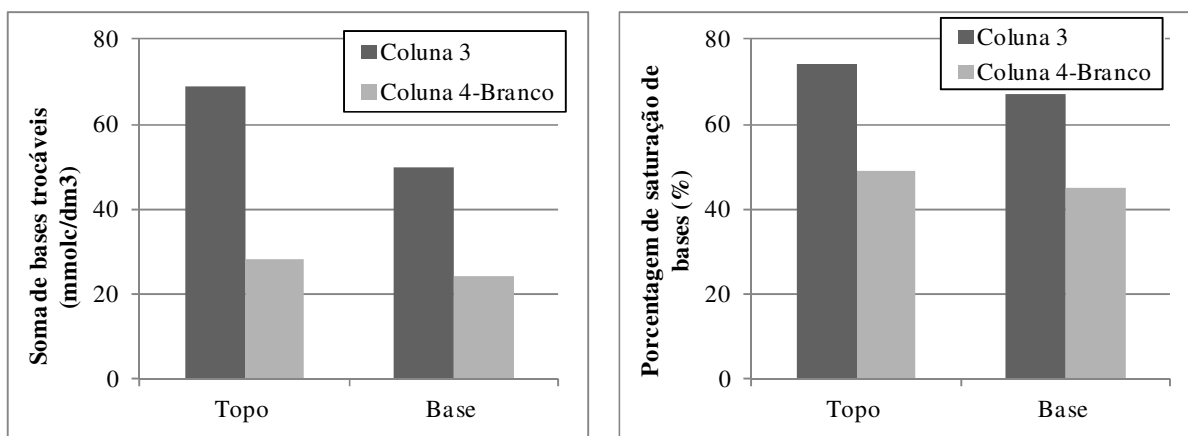


Figura 50 - Soma de bases trocáveis e porcentagem de saturação por bases das Colunas 3 (após percolação do efluente) e 4(amostra controle, após percolação de água deionizada)

Confirmando a melhora de fertilidade do solo, observa-se pela Figura 50 o aumento da soma de bases trocáveis e da porcentagem de saturação de bases do solo com a aplicação de efluente.

Faustino (2007), analisando um Latossolo Vermelho-Amarelo de fase arenosa, no qual foi aplicado efluente de fossa séptica biodigestora por 3 anos, também observou aumento do

pH e dos macronutrientes fósforo, cálcio e magnésio, porém o aumento da concentração de potássio foi pouco significativa.

A Figura 51 exibe o gráfico de sulfato solúvel nas Colunas 3 (após aplicação do efluente) e 4 (amostra branca – sem aplicação).

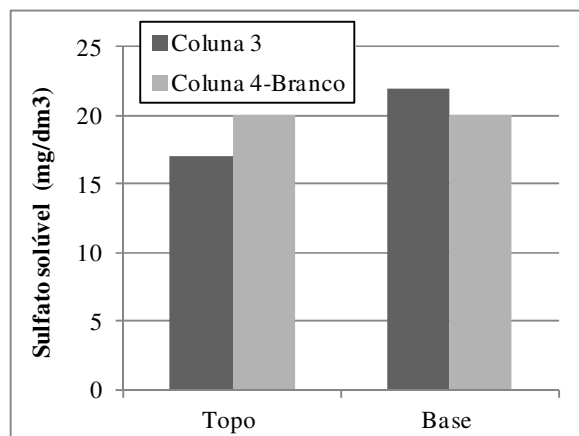


Figura 51 - Sulfato solúvel nas Colunas 3 (após percolação do efluente) e 4(amostra controle, após percolação de água deionizada)

A Figura 51 mostra que houve pouca variação da concentração de sulfato nas Colunas 3 e 4, porém, quando comparados à concentração de 107 mg dm^{-3} da amostra indeformada de solo C, observa-se que houve significativa redução com a percolação de efluente e de água deionizada, nas Colunas 3 e 4, respectivamente.

A Figura 52 exibe os gráficos de potássio, cálcio e magnésio nas Colunas 3 (após aplicação do efluente) e 4 (amostra branca – sem aplicação).

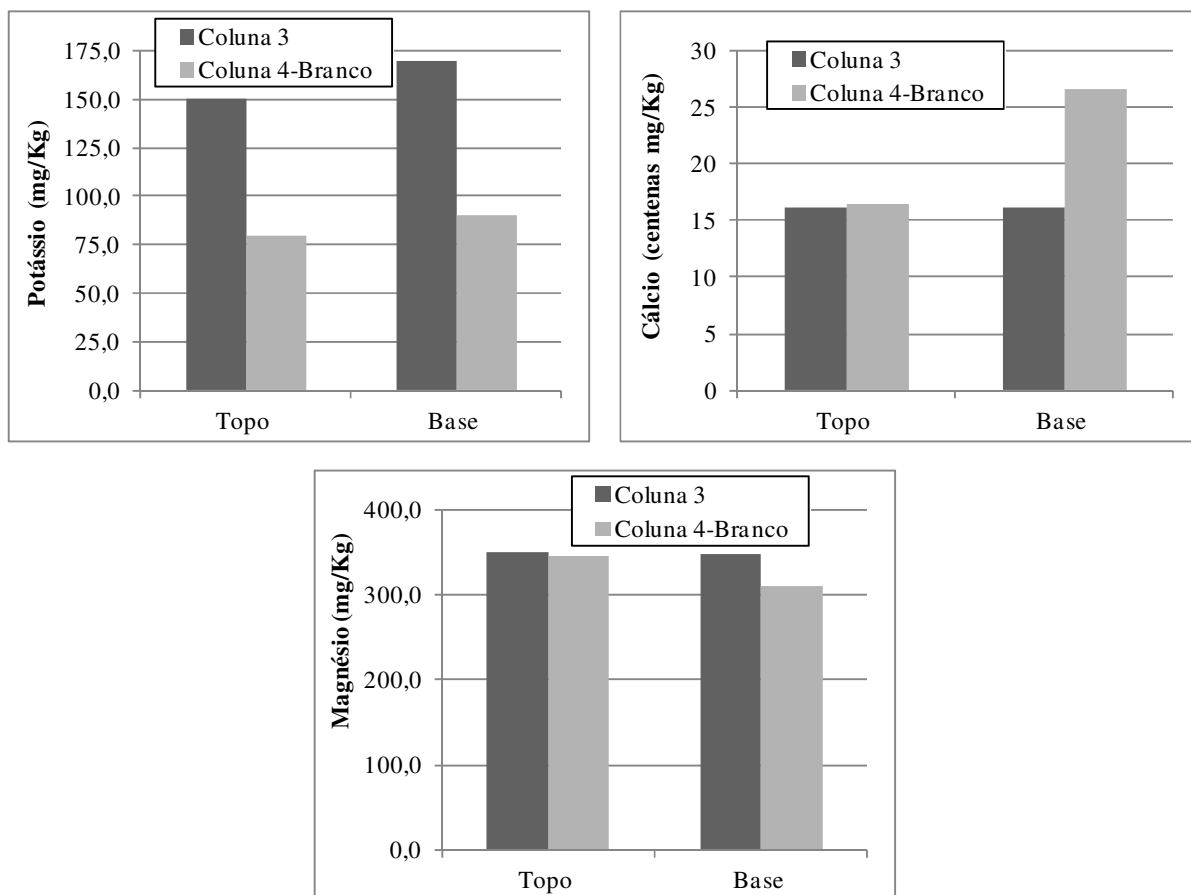


Figura 52 - Potássio, cálcio e magnésio nas Colunas 3 (após percolação do efluente) e 4(amostra controle, após percolação de água deionizada)

Considerando-se as concentrações totais dos macronutrientes potássio, cálcio e magnésio, não apenas as formas trocáveis, observa-se pela Figura 52 que, com a aplicação de efluente, houve aumento significativo apenas para o potássio, já que, com exceção da concentração de cálcio na base das colunas, as outras concentrações sofreram pouca variação entre as Colunas 3 e 4 (branco).

A Figura 53 exibe os gráficos de concentrações de ferro, manganês, zinco e cobre das Colunas 3 (após aplicação do efluente) e 4 (amostra branca – sem aplicação).

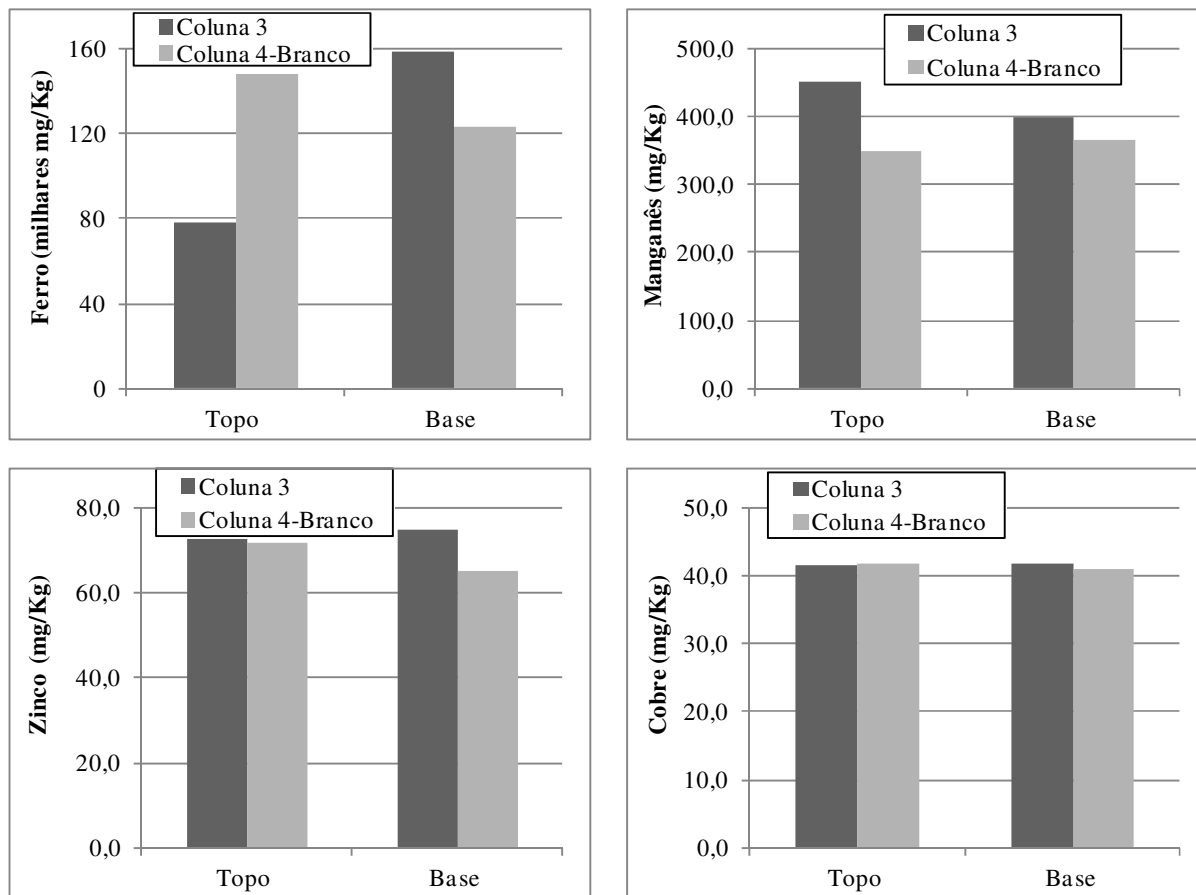


Figura 53 - Ferro, manganês, zinco e cobre nas Colunas 3 (após percolação do efluente) e 4 (amostra controle, após percolação de água deionizada)

Considerando-se as concentrações totais dos micronutrientes ferro, manganês, zinco e cobre, observa-se aumento, após aplicação de efluente, apenas na concentração de manganês e de zinco na base da Coluna 3. As concentrações de ferro diminuíram no topo da Coluna 3 e aumentaram em sua base, quando comparadas com a Coluna 4, e as concentrações de cobre pouco variaram (Figura 53).

Comparando-se as concentrações de zinco e cobre das Colunas 3 e 4 com os valores orientadores apresentados pela Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental (CETESB, 2005), as duas colunas apresentam valores acima dos valores de referência de qualidade (de 60 mg kg^{-1} para o zinco e de 35 mg kg^{-1}), porém não ultrapassaram o valor de concentração dito de prevenção (de 300 mg kg^{-1} para o zinco e de 60 mg kg^{-1}).

A Figura 54 exibe os gráficos de concentração de alumínio, chumbo, cádmio, níquel e cromo das Colunas 3 (após aplicação do efluente) e 4 (amostra branca – sem aplicação).

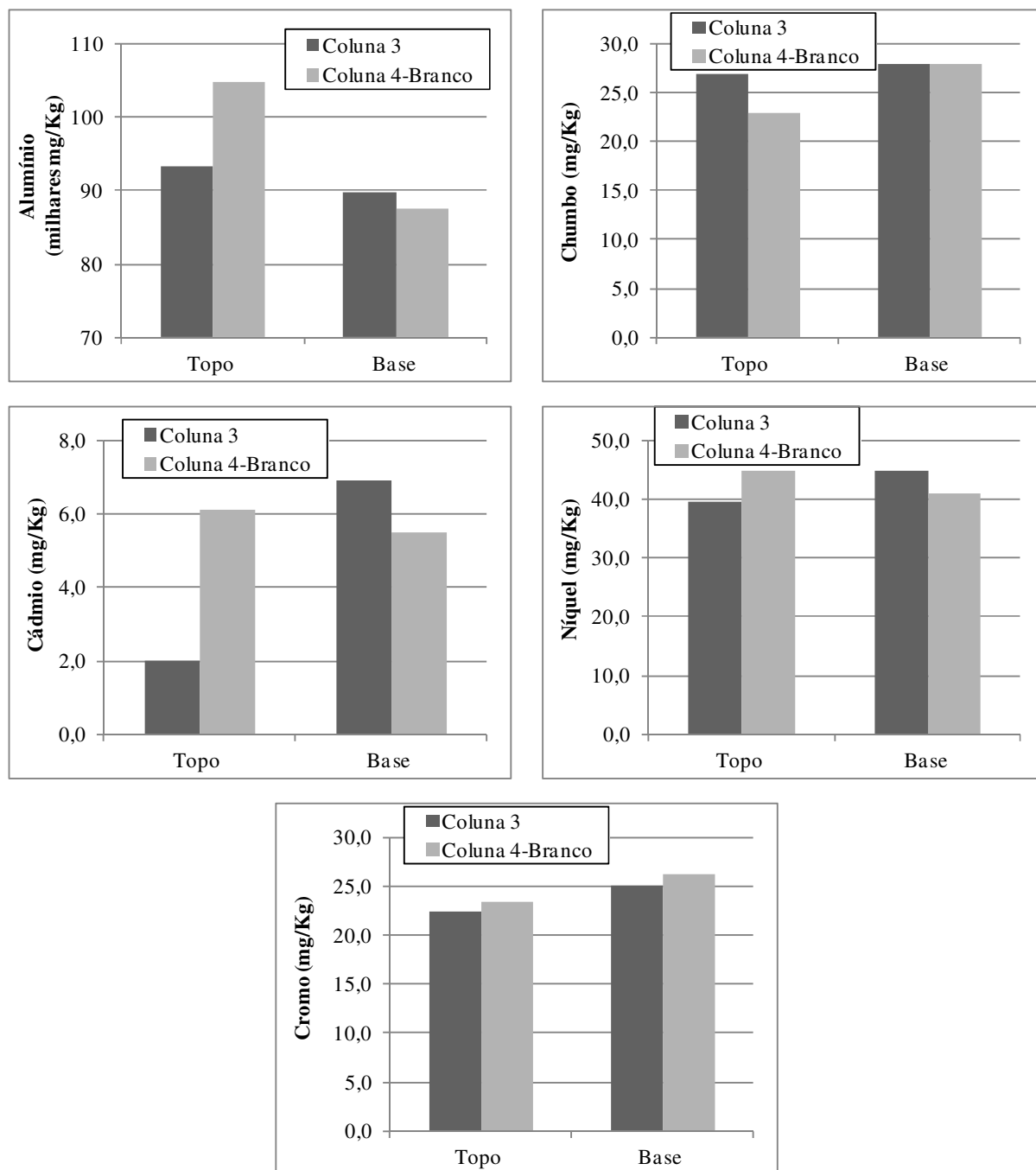


Figura 54: Alumínio, chumbo, cádmio, níquel e cromo nas Colunas 3 (após percolação do efluente) e 4 (amostra controle, após percolação de água deionizada)

Pelos gráficos da Figura 53, é possível verificar que a aplicação de efluente não alterou as concentrações de chumbo, níquel e cromo (Tabela 15), porém reduziu as concentrações de cádmio e alumínio no topo da Coluna 3.

Comparando-se as concentrações desses metais com os valores orientadores apresentados pela CETESB (2005), as duas colunas apresentaram concentrações de chumbo

acima do valor de referência de qualidade, de 17 mg Kg^{-1} , porém as concentrações foram abaixo do valor de prevenção (de 72 mg Kg^{-1}). Em relação ao cádmio, com exceção do topo da Coluna 3, que apresentou concentração acima do valor de prevenção (de $1,3 \text{ mg Kg}^{-1}$), todas as concentrações foram acima do valor de intervenção para áreas agrícolas, de 3 mg Kg^{-1} . Já em relação ao níquel, todas as concentrações estão acima do valor de prevenção, de 30 mg Kg^{-1} .

A Figura 55 exibe o gráfico de sódio trocável nas Colunas 3 (após aplicação do efluente) e 4 (amostra branca – sem aplicação).

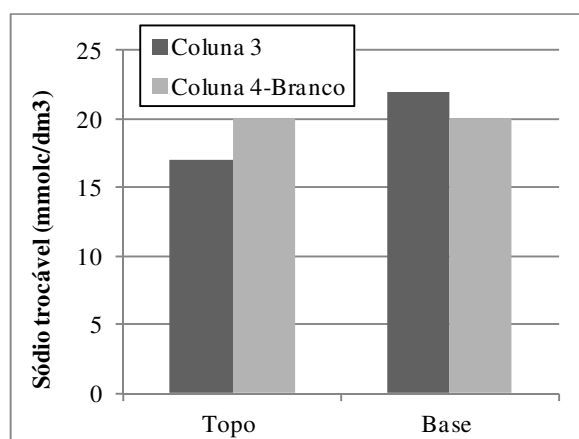


Figura 55 - Sódio trocável nas Colunas 3 (após percolação do efluente) e 4(amostra controle, após percolação de água deionizada)

Em relação ao sódio, apesar da alta concentração no efluente, a percolação desse pela Coluna 3 não provocou aumento significativo em comparação com a Coluna 4, pela qual foi percolada água deionizada.

Por fim, considerando-se os resultados apresentados, a aplicação do efluente de fossa séptica biodigestora a uma taxa média de $5,6 \text{ cm dia}^{-1}$ possibilitou melhora das condições de fertilidade do solo C e não ocasionou aporte de metais tóxicos ao solo.

7. CONCLUSÕES

A partir dos resultados apresentados, nota-se a importância da caracterização do solo e do efluente antes da aplicação nos ensaios em coluna. As caracterizações geológicas, geotécnica e físico-químicas realizadas nos solos foram importantes para determinar o solo mais apropriado para o ensaio em coluna. Dos solos analisados o mais apropriado foi o do tipo A, mas devido ao mesmo apresentar quantidades elevadas de raízes, não foi possível o emprego do mesmo no ensaio em coluna. O solo C, como apresentou parâmetros geológicos e químicos adequados, e devido ao mesmo não apresentar quantidade elevada de raízes, este foi empregado no ensaio em coluna.

A época de coleta do efluente também interfere no ensaio, pois nos períodos com maior movimento (maior uso do sistema), a qualidade do efluente é pior, assim sendo, deve-se atentar ao período de coleta do efluente antes de sua aplicação no solo, e deve-se realizar monitoramento da qualidade do mesmo durante o período de aplicação.

Nos ensaios em coluna, conclui-se que a presença de caminhos preferências interfere nas taxas de aplicação e na interação do efluente com o solo. A Coluna 3 foi a que apresentou melhores resultados, por não ter caminhos preferenciais. Os resultados obtidos no lixiviado da Coluna 3 apresentaram melhor qualidade que as amostras da Coluna 5, a qual apresentou resultados mais próximos aos resultados do efluente percolado, devido a menor interação do efluente com o solo.

Conclui-se ainda, que é fundamental o emprego de uma coluna controle (branco), pois esta determina as alterações geradas no solo após a aplicação do efluente.

O pH, CTC, macronutrientes, matéria orgânica, bases trocáveis e porcentagem de saturação foram mais elevadas no solo após aplicação do efluente. Desta forma, nota-se que ocorrem alterações, no geral, positivas, nas propriedades do solo tratado com efluente de fossa séptica biodigestora.

Assim sendo, conclui-se que a aplicação do efluente a uma taxa média de $5,6 \text{ cm dia}^{-1}$ para o solo utilizado na pesquisa e para o esgoto de origem doméstica, possibilita melhora das condições de fertilidade do solo e não ocasiona aporte de metais tóxicos ao solo, no caso de solos com as características geológicas, geotécnicas e físico-químicas do solo do tipo C.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 7181**: Análise granulométrica. Rio de Janeiro: ABNT, 1984.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 13292**: Solo – determinação do coeficiente de permeabilidade de solos granulares à carga constante. Rio de Janeiro: ABNT, 1995.

ANAMI, M. H. et al. **Deslocamento miscível de nitrato e fosfato proveniente de água residuária da suinocultura em colunas de solo**. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v.12, n.1, p.75–80. Campina Grande: UAEAg/UFCG, 2008.

ANDRADE, I. P. et al. **Impacto do reuso de efluentes de esgoto no lixiviado de solos cultivados com milho**. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v.9, suplemento, p.212-216. Campina Grande: DEAg/UFCG, 2005.

APHA. **Standard methods for the examination of water and wastewater**. Washington. América Public. Walt Association, 2005.

BASSO, J. B. **Transporte e retenção de K^+ , Cu^{+2} e Cl^- em uma mistura compactada de solos lateríticos para uso em barreiras selantes**: procedimentos de homogeneização da mistura e adaptações em equipamentos de percolação em colunas. Dissertação – departamento de Geotecnia, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos, 2003.

BATALHA, B. H. L. **Fossa séptica**. 2ª Ed. São Paulo: CETESB. 1989.

CARNEIRO, M. A. C., SOUZA, E. D., REIS, E. F., PEREIRA, H. S., AZEVEDO, W. R. **Atributos Físicos químicos e biológicos de solo de cerrado sob diferentes sistemas de uso e manejo**. Revista Brasileira de Ciência do Solo, Viçosa, v. 33, p. 147 - 157, 2009.

COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL (CETESB). **Decisão de Diretoria nº 195-2005-E, de 23 de Novembro de 2005**. Dispõe sobre a aprovação dos Valores Orientadores para Solos e Águas Subterrâneas no Estado de São Paulo – 2005, em substituição aos Valores Orientadores de 2001, e dá outras providências. São Paulo/SP. 2005.

CONSELHO NACIONAL DE MEIO AMBIENTE (CONAMA). **Resolução nº 357 de 17 de março de 2005**. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para

o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências. Brasília/DF. 2005.

CORREA R. S., FILHO, B. M., BERNARDES, R. S. **Deposição de esgoto doméstico para controle de poluição e revegetação induzida em área degradada.** Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v.4, n.2, p.252-256. Campina Grande: DEAg/UFPB, 2000.

DANIEL, D. E. **State-of-the-art: laboratory hydraulic conductivity tests for saturated soils.** In Hydraulic Conductivity and waste contaminant transport in soil. Philadelphia: ASTM, 1994.

DONAGEMA, G. K et al. (Org.). Manual de métodos de análise de solos. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2011. 230 p.

DUARTE, A. S. et al. **Efeitos da aplicação de efluente tratado no solo: pH, matéria orgânica, fósforo e potássio.** Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v.12, n.3, p.302–310. Campina Grande: UAEAg/UFCG, 2008.

FAUSTINO, A. S. **Estudos físico-químicos do efluente produzido por fossa séptica biodigestora e o impacto do seu uso no solo.** Dissertação – Departamento de Química, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 105p. 2007.

FREIXO, A. A., MACHADO, P. L. O. A., GUIMARÃES, C. M., SILVA, C. C., FADIGAS, F. S. **Estoques de carbono e nitrogênio e distribuição de frações orgânicas de latossolo do cerrado sob diferentes sistemas de cultivo.** Revista Brasileira de Ciência do Solo, Viçosa, v. 26, n. 2, p. 425 – 434, 2002.

GLOAGUEN, R. A. B. G. **Efeito da irrigação com efluente de esgoto tratado nas propriedades físico-hídricas de um latossolo.** Tese (Doutorado em Agronomia) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2005. 119p.

GONÇALVES, R. F. (coord.). **Conservação de água e energia em sistemas prediais e públicos de abastecimento de água.** Rio de Janeiro/RJ. ABES, 2009.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Pesquisa Nacional de Saneamento Básico - 2008.** Rio de Janeiro: IBGE. 2010a.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Indicadores de Desenvolvimento Sustentável - Brasil 2010.** Rio de Janeiro: IBGE. 2010b.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO – IPT. **Relatório nº 40.674** - Diagnóstico da situação atual dos recursos hídricos e estabelecimento de diretrizes técnicas para a elaboração do Plano da Bacia Hidrográfica do Tietê/Jacaré. 1998.

JORDÃO, E. P. **Tratamento de esgotos domésticos**. 4ª edição. Rio de Janeiro/RJ. 2005.

LEITE, A. L. **Migração de íons inorgânicos em alguns solos tropicais, com ênfase nos processos de sorção e difusão molecular**. Tese de Doutorado. Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo. São Carlos. 2001. p. 120.

MANCUSO, P. C. S.; SANTOS, H. F. **Reuso de água**. Barueri/SP: Manole, 2003.

MELO, R. F. **Deslocamento miscível de cátions básicos provenientes da água residuária de mandioca em colunas de solo**. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v.10, n.2, p.456–465. Campina Grande: PB, DEAg/UFCG, 2006.

NOGUEIRA, J. B. **Mecânica dos solos – Ensaio de Laboratório**. São Carlos/SP. 1995.

NOVAES, A. P. et al. **Utilização de uma Fossa Séptica Biodigestora para melhoria do saneamento rural e desenvolvimento da agricultura orgânica**. São Carlos: EMBRAPA, 2002. 5 p. Comunicado técnico, 46.

OLIVEIRA, J. B. **Pedologia aplicada**. Jaboticabal/SP. Funep, 2001. 398 p.

OHNUMA Jr., A. A. Medidas não convencionais de reservação d'água e controle da poluição hídrica em lotes domiciliares. Tese (Doutorado em Ciências da Engenharia Ambiental) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos, 2008.

PEJON, O. J. **Mapeamento geotécnico da Folha Piracicaba-SP (escala 1:100.000)**: Estudo de aspectos metodológicos, de caracterização e de apresentação dos atributos. Tese de Doutorado. Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo. São Carlos. 1992. 2v.

REBOUÇAS, A. C. **Água no Brasil: abundância, desperdício e escassez**. Análise & Dados. Bahia. 2003.

RIBEIRO, A. C.; GUIMARÃES, P. T. G.; ALVAREZ V., V. H. (Ed.). **Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais**. 5ª. aproximação. Viçosa, MG: Comissão de Fertilidade do Solo do Estado de Minas Gerais, 1999. 359 p.

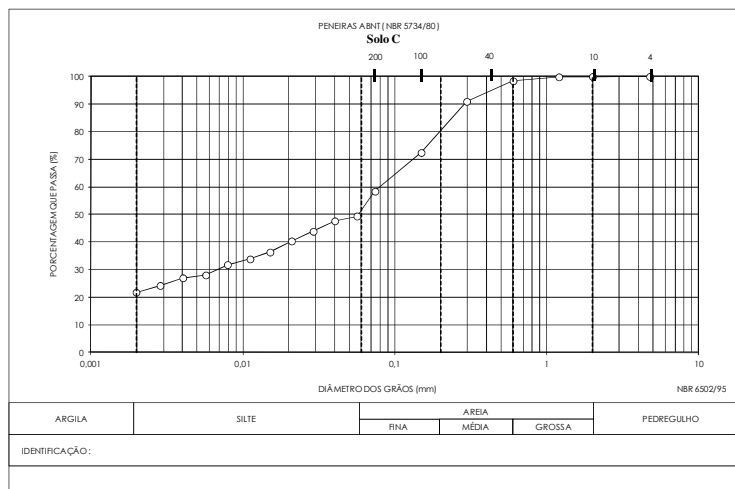
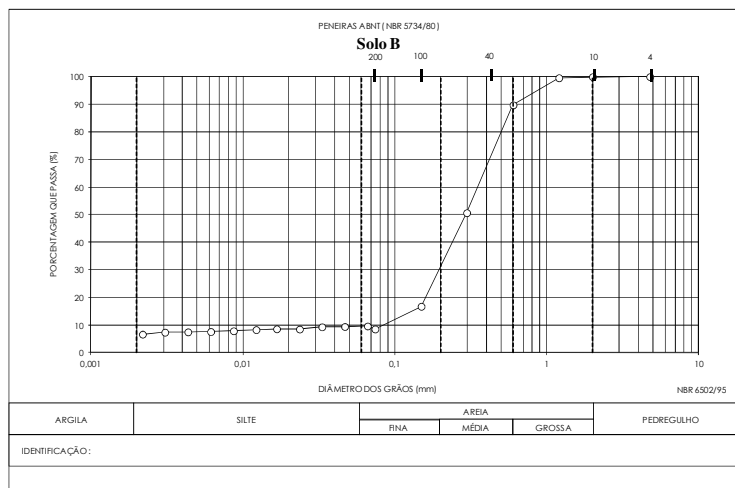
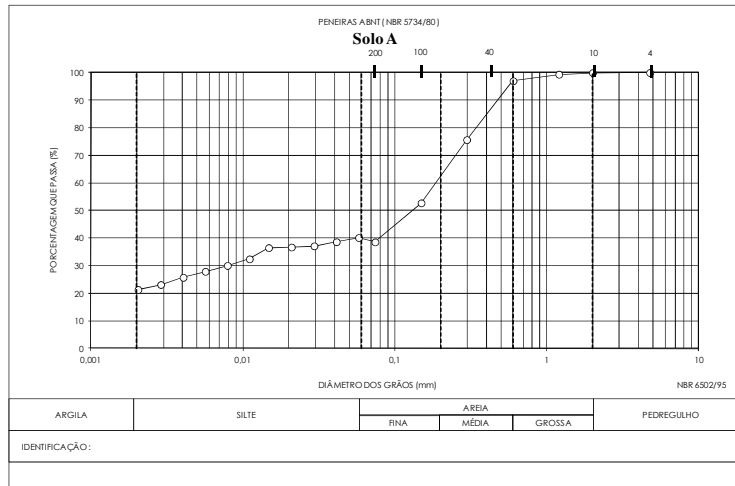
SILVA, W. T. L.; FAUSTINO, A. S.; NOVAES, A. P. **Eficiência do Processo de Biodigestão em Fossa Séptica Biodigestora Inoculada com Esterco de Ovino**. Embrapa Instrumentação Agropecuária. São Carlos/SP. 2007.

VELOZO, R. **Caracterização geológico-geotécnica do lixão desativado de São Carlos-SP, com auxílio da geofísica**. Dissertação de Mestrado – Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos, 177p. 2006.

VON SPERLING, M. **Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos**. Belo Horizonte/MG. Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Minas Gerais, 2005.

APÊNDICES

APÊNDICE A – Curvas granulométricas dos solos A, B e C



APÊNDICE B – Caracterização das amostras de solo tipo C presente na Coluna 3 (aplicação de EFSB 2-A) e na Coluna 4 (aplicação de água deionizada) após ensaio de percolação

Parâmetros	Topo	Base	Topo	Base
	Coluna 3	Coluna 3	Coluna 4	Coluna 4
pH em H ₂ O	6,8	7,1	6,6	6,1
pH em CaCl ₂	6,0	5,9	5,4	5,3
Matéria Orgânica (g dm ⁻³)	42	36	26	24
Alumínio trocável (mmolc dm ⁻³)	0	0	0	0
Cálcio trocável (mmolc dm ⁻³)	45	35	19	17
Magnésio trocável (mmolc dm ⁻³)	20	13	8	6
Potássio trocável (mmolc dm ⁻³)	3,7	2,2	1,4	1,1
Sódio trocável (mmolc dm ⁻³)	9,8	7,9	0,2	0,2
Fósforo assimilável (mg dm ⁻³)	122	6	2	3
Sulfato solúvel (mg dm ⁻³)	24	70	19	23
Proporção (Ca ⁺² +Mg ⁺²)/K ⁺	17	22	20	20
Acidez potencial – H ⁺ +Al ⁺³ (mmolc dm ⁻³)	24	24	29	30
CTC (mmolc dm ⁻³)	93	74	58	54
Soma de bases trocáveis – S (mmolc dm ⁻³)	69	50	28	24
Porcentagem de saturação de bases – V (%)	74	67	49	45
Porcentagem de saturação por Al ⁺³ - m (%)	0	0	0	0
Zinco (mg Kg ⁻¹)	72,5	75,0	72,0	65,1
Chumbo (mg Kg ⁻¹)	27,0	28,0	23,0	28,0
Cádmio (mg Kg ⁻¹)	2,0	6,9	6,1	5,5
Níquel (mg Kg ⁻¹)	39,6	44,9	44,8	40,9
Ferro (mg Kg ⁻¹)	77900	159000	148400	123500
Manganês (mg Kg ⁻¹)	451,0	400,0	349,0	367,0
Cobre (mg Kg ⁻¹)	41,5	41,9	41,9	41,1
Cromo total (mg Kg ⁻¹)	22,5	25,1	23,4	26,2
Alumínio (mg Kg ⁻¹)	93200	89700	104800	87600
Cálcio (mg Kg ⁻¹)	1617	1610	1654	2653
Magnésio (mg Kg ⁻¹)	351,0	347,0	345,0	311,0
Sódio (mg Kg ⁻¹)	180,0	180,0	90,0	110,0
Potássio (mg Kg ⁻¹)	150,0	170,0	80,0	90,0