

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM PRODUÇÃO VEGETAL

ANA PAULA ALMEIDA BERTOSSI SOUZA

**TRATAMENTO DE EFLUENTE DE FOSSAS SÉPTICAS POR ESCOAMENTO
SUPERFICIAL EM RAMPAS CULTIVADAS COM FORRAGEIRAS**

ALEGRE/ES

2016

ANA PAULA ALMEIDA BERTOSSI SOUZA

**TRATAMENTO DE EFLUENTE DE FOSSAS SÉPTICAS POR ESCOAMENTO
SUPERFICIAL EM RAMPAS CULTIVADAS COM FORRAGEIRAS**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Produção Vegetal do Centro de Ciências Agrárias da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito para obtenção do título de Doutor em Produção Vegetal, na área de concentração de Recursos Hídricos e Geoprocessamento em Sistemas Agrícolas.

Orientador: Prof. Dr. Giovanni de Oliveira Garcia.

Coorientador: Prof. Dr. Edvaldo Fialho dos Reis

ALEGRE/ES

2016

Dados Internacionais de Catalogação-na-publicação (CIP)
(Biblioteca Setorial de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Espírito Santo, ES, Brasil)

S729t Souza, Ana Paula Almeida Bertossi, 1986-
Tratamento de efluente de fossas sépticas em rampas cultivadas
com forrageiras / Ana Paula Almeida Bertossi Souza. – 2016.
71 f. : il.

Orientador: Giovanni de Oliveira Garcia.
Coorientadores: Edvaldo Fialho dos Reis.
Tese (Doutorado em Produção Vegetal) – Universidade Federal do
Espírito Santo, Centro de Ciências Agrárias.

1. Esgotos. 2. Azevém. 3. Aveia preta. 4. Brachiaria brizantha.
5. Água – Reuso. 6. Fertirrigação. I. Garcia, Giovanni de Oliveira.
II. Reis, Edvaldo Fialho dos. III. Universidade Federal do Espírito
Santo. Centro de Ciências Agrárias. IV. Título.

CDU: 63

ANA PAULA ALMEIDA BERTOSSI SOUZA

**TRATAMENTO DE EFLUENTE DE FOSSAS SÉPTICAS POR ESCOAMENTO
SUPERFICIAL EM RAMPAS CULTIVADAS COM FORRAGEIRAS**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Produção Vegetal do Centro de Ciências Agrárias da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito para obtenção do título de Doutor em Produção Vegetal, na área de concentração de Recursos Hídricos e Geoprocessamento em Sistemas Agrícolas.

Aprovada em 16 de fevereiro de 2016.

Prof. Dr. Giovanni de Oliveira Garcia
Universidade Federal do Espírito Santo
Orientador

Prof. Dr. Edvaldo Fialho dos Reis
Universidade Federal do Espírito Santo
Coorientador

Prof. Dr. Alisson Carraro Borges
Universidade Federal de Viçosa

Prof. Dr. Gercílio Alves de Almeida Júnior
Universidade Federal do Espírito Santo

Prof.^a Dra. Camila Aparecida da Silva Martins
Universidade Federal do Espírito Santo

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por mais essa vitória, pois sem Ele não teria chegado até aqui. Aos meus pais pelo exemplo de vida, fé, coragem e por todo amor, carinho, apoio e dedicação.

Agradeço a toda minha família e amigos que sempre estiveram ao meu lado nas horas difíceis e me encorajaram a avançar cada passo nesta etapa da minha vida. Ao meu marido, Cristiano, pelo auxílio nos trabalhos de campo e acima de tudo pelo carinho, incentivo e compreensão.

Ao meu orientador, prof. Dr. Giovanni de Oliveira Garcia e coorientador, prof. Dr. Edvaldo Fialho dos Reis pela grande ajuda, abrindo os meus caminhos, proporcionando novos conhecimentos e pela atenção e incentivo no decorrer deste trabalho.

Ao programa de pós-graduação em Produção Vegetal pela oportunidade de estudo e aos professores pelo ensino. Agradeço também à CAPES pela concessão de bolsa durante o período de estudo e à FAPES e ao CNPq pelo apoio financeiro imprescindível para realização desse trabalho.

À Larissa pela amizade, apoio, disposição em me ajudar e pelas suas importantes contribuições. Também a todos os colegas do grupo de pesquisa, José Guilherme, Jorge e Wesley, pela ajuda na montagem e condução do experimento em campo.

A todos que de alguma forma possibilitaram a concretização desse sonho. O meu muito OBRIGADA!

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO GERAL	1
2 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	4
CAPÍTULO I - ÍNDICE DE QUALIDADE DE EFLUENTE DE FOSSAS SÉPTICAS TRATADO POR ESCOAMENTO SUPERFICIAL EM RAMPAS CULTIVADAS COM FORRAGEIRAS	6
1 INTRODUÇÃO	7
2 MATERIAL E MÉTODOS	8
2.1 Caracterização e delineamento experimental	8
2.2 Condução dos experimentos	9
2.3 Coleta e análise do efluente	12
3 RESULTADOS E DISCUSSÃO	18
3.1 Primeiro experimento	18
3.2 Segundo experimento	25
4 CONCLUSÕES	33
5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	34
CAPÍTULO II - ATRIBUTOS QUÍMICOS DO SOLO EM RAMPAS DE TRATAMENTO DE EFLUENTE DE FOSSAS SÉPTICAS POR ESCOAMENTO SUPERFICIAL	39
1 INTRODUÇÃO	40
2 MATERIAL E MÉTODOS	41
2.1 Caracterização e delineamento experimental	41
2.2 Condução dos experimentos	42
2.3 Coleta e análise do solo	42
3 RESULTADOS E DISCUSSÃO	42
3.1 Primeiro experimento	42
3.2 Segundo experimento	50
4 CONCLUSÕES	58
5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	59
CONSIDERAÇÕES FINAIS	62
ANEXOS	63

RESUMO

SOUZA, Ana Paula Almeida Bertossi. **Tratamento de efluente de fossas sépticas por escoamento superficial em rampas cultivadas com forrageiras.** 2016. Tese (Doutorado em Produção Vegetal) – Universidade Federal do Espírito Santo, Alegre-ES. Orientador: Prof. Dr. Giovanni de Oliveira Garcia. Coorientador: Prof. Dr. Edvaldo Fialho dos Reis.

Com o objetivo de avaliar a qualidade do efluente de fossas sépticas tratado utilizando a técnica do escoamento superficial e os atributos químicos do solo das rampas de tratamento cultivadas com diferentes forrageiras sob a aplicação de diferentes taxas de efluente foram realizados dois experimentos. No primeiro experimento foram utilizadas as espécies de forrageiras: azevém, aveia preta e centeio; e no segundo experimento foram utilizadas as forrageiras: azevém, capim marandu e um sistema misto composto pelas duas espécies. As unidades experimentais foram compostas por 15 rampas de tratamento dispostas a uma declividade de aproximadamente 5%, preenchidas com solo retirado do perfil natural de um Latossolo Vermelho-Amarelo. O plantio das forrageiras foi feito por sementes diretamente nas unidades experimentais, e após o seu completo estabelecimento foi iniciada a aplicação do efluente de fossas sépticas em diferentes taxas (vazão). Foram realizadas análises do efluente tratado e coletadas amostras de solo em três seções nas unidades experimentais para análise química. De acordo com os resultados obtidos nos dois experimentos pode-se concluir que a técnica do escoamento superficial apresenta potencial para ser utilizada no tratamento do efluente de fossas sépticas, atestando os benefícios dessa técnica tanto para a preservação ambiental quanto para a melhoria de vida da população. Já no solo, observou-se que o aumento das taxas de aplicação do efluente de fossas sépticas proporcionou maior aporte de nutrientes, principalmente na seção superior das rampas de tratamento.

Palavras-chave: Esgoto doméstico, forrageiras, reúso.

ABSTRACT

SOUZA, Ana Paula Almeida Bertossi. **Effluent treatment from septic tanks by overland flow in ramps cultivated with forages.** 2016. Thesis (Doctorate in Vegetable Production) - Federal University of Espírito Santo, Alegre-ES. Advisor: Prof. Dr. Giovanni de Oliveira Garcia. Co-advisor: Prof. Dr. Edvaldo Fialho dos Reis.

With the objective to evaluate the quality of effluent from septic tank treated using overland flow technique and soil chemical properties in treated ramps cultivated with different forages with applications in different effluent rates were held in two experiments. In the first experiment the following forage species were used: ryegrass, black oats and rye and in the second experiment, the following forages were used: ryegrass, Marandu grass and a mixed system composed by the two species. The experimental units were made of 15 treatment ramps arranged at a slope of approximately 5% filled with soil taken from natural Oxisol profile. Forage plantation was made by seeds directly in the experimental units and after being completely established, effluent application was started in septic tanks at different rates (flow). Analyzes of treated effluent and collected soil samples were done in three sections in the experimental units for chemical analysis. According to the results obtained in the two experiments it can be concluded that the overland flow technique presents potential to be used in effluent treatment from septic tanks certifying the benefits of this technique to preserve the environment and also to improve the life of population. In the soil it was observed that the increase in the rates of effluent application from septic tanks provided higher nutrients, especially in the upper section of the treatments ramps.

Keywords: Domestic sewage, forages, reuse.

1 INTRODUÇÃO GERAL

A escassez hídrica natural em certas regiões e aquela agravada pela poluição dos corpos hídricos reduzem a quantidade e qualidade deste recurso tão importante para a vida. Assim, considerando a destinação de fontes de água não poluída para o consumo humano, nos últimos anos, o avanço do conhecimento técnico-científico em relação ao potencial de reuso da água contribuiu para o aumento do interesse do uso de efluentes em cultivos agrícolas, como a utilização de esgoto doméstico (VILLELA JÚNIOR et al., 2003; FATTA-KASSINOS et al., 2011).

Estima-se que no Brasil apenas 52,2% dos municípios têm esgotamento sanitário; destes, 32% têm apenas serviço de coleta e 20,2% coletam e tratam o esgoto. Em volume, no país, diariamente, são coletados 14,5 milhões de m³ de esgoto, sendo que apenas 5,1 milhões de m³ são tratados. O restante que não recebe tratamento nenhum e aquele lançado diretamente nos cursos d'água podem causar sérios problemas ao meio ambiente e à saúde humana (IBGE, 2000).

Os esgotos domésticos adquirem características diversas resultantes do tipo de uso que sofreram, sendo constituídos por água, sólidos, matéria orgânica, nutrientes como fósforo, nitrogênio, potássio, cálcio e magnésio e organismos patogênicos, como vírus e bactéria. Esse efluente quando lançado no meio ambiente tende a alterar as propriedades do corpo hídrico receptor, resultando em consequências indesejáveis como redução do oxigênio dissolvido, contaminação por microrganismos patogênicos, eutrofização, entre outras, que podem comprometer os diversos usos aos quais este recurso se destina (VON SPERLING, 2005).

Considerando que um dos meios de preservação do meio ambiente é o tratamento desse efluente e que, para tal, são necessários recursos expressivos, têm-se buscado alternativas que sejam, ao mesmo tempo, de baixo custo de implantação e operação, desde que fique assegurada a salubridade da população vizinha à área de tratamento e a preservação do meio ambiente (ANDERSON et al., 2005; FONSECA, 2005). Portanto, o aproveitamento planejado de águas residuárias na agricultura é uma alternativa para o controle da poluição dos rios,

disponibilização de água e fertilizantes para as culturas, reciclagem de nutrientes e aumento da produção agrícola (TONETTI et al., 2009).

Nesse sentido, o tratamento do esgoto doméstico por disposição no solo tem-se mostrado economicamente viável e de simples implantação, podendo ser especialmente adequado ao denominado saneamento rural, embora possa ser estendido também a comunidades de maior porte.

Dentre os sistemas de tratamento de esgoto por disposição no solo e que poderiam ser conciliados com o uso de águas residuárias na agricultura, destaca-se a técnica do escoamento superficial, no qual a água residuária é aplicada, em altas taxas, na parte superior de uma rampa vegetada, com declividade de 5 a 8%, ficando sujeita ao escoamento superficial, condição que possibilitará sua depuração ao longo da rampa de tratamento (FONSECA, 2005). O efluente coletado na parte inferior da rampa dependendo de suas características poderá ser lançado em corpos receptores de água ou reutilizado para fertirrigação, como observado por Fonseca et al. (2001) ao avaliarem a qualidade do esgoto gerado após o tratamento por escoamento superficial.

De acordo com Matos et al. (2004) o principal objetivo da técnica é utilizar o “filtro vivo” formado pelo solo-planta-microrganismos a fim de reduzir a concentração de matéria orgânica, nutrientes e patógenos presentes nessas águas. Cada componente do sistema desempenhará um papel importante na depuração do efluente. O solo terá ação sobre a interceptação dos sólidos em suspensão, remoção de nutrientes por adsorção, além da oxidação do material orgânico, promovido principalmente por bactérias presentes. Já a vegetação será responsável pela remoção de nutrientes, principalmente nitrogênio, potássio, fósforo e cálcio, proteção do solo contra erosão, além de servir de meio para o desenvolvimento de microrganismos decompositores do material orgânico (FONSECA, 2005).

A esses benefícios, soma-se a produção de material vegetal com elevado valor proteico, boa digestibilidade, sem problemas de contaminação e que poderá ser utilizado para alimentação animal (FONSECA et al., 2001); além da possibilidade de geração de uma água de reuso, que poderá ser empregada no cultivo de diversos produtos e os baixos custos de implantação e operação,

tornando o método alternativo e altamente viável para tratamento de águas residuárias em comunidades rurais (TONETTI et al., 2009).

O grau de depuração do efluente dependerá da absorção de nutrientes pelas plantas e da decomposição da matéria orgânica pelos microrganismos, podendo atingir valores em torno de 70-85% para as demandas químicas e bioquímicas de oxigênio, 60-80% para o fósforo e 50-90% de nitrogênio total (MATOS, 2003).

Fonseca (2007) ao avaliar o desempenho do método do escoamento superficial em rampas cultivadas com Tifton 85 pode concluir que o método utilizado foi eficiente na remoção de material orgânico e nutrientes do efluente, atingindo remoções de DBO de 75,4%. Já as concentrações de N-total, P-disponível e K reduziram em média 39,2; 10,4; e 2,9%, respectivamente e a concentração de Na⁺ manteve-se constante. Já Twawale et al. (2006) obtiveram remoções de 60 a 76% para o nitrogênio, de 20 a 70% para o fósforo e de 80 a 94% para a DBO em estudo realizado na Índia.

No entanto, para que a disposição de efluentes líquidos no solo não traga riscos de salinização do solo, nem problemas de contaminação, torna-se necessário o conhecimento da capacidade de suporte de cada sistema solo-planta em diferentes condições climáticas para que se possa estabelecer a taxa de aplicação mais adequada, de forma a resguardar a integridade dos recursos naturais (LOURES et al., 2005; FAULWETTER et al., 2009).

Embora existam alguns trabalhos que avaliem a eficiência da técnica do escoamento superficial para tratar água residuária, são poucos os estudos que a utiliza para tratar efluente doméstico ou de fossas sépticas. Além disso, nem todos os trabalhos avaliam a taxa de aplicação mais adequada, utilizam cobertura vegetal apropriada para as diferentes épocas do ano, nem avaliam as alterações dos atributos químicos do solo e sua capacidade de depuração do resíduo aplicado.

Devido à falta de conhecimento específico sobre a técnica de tratamento de efluente por escoamento superficial no solo e a necessidade de se estabelecer características operacionais, este trabalho teve por objetivo geral avaliar a qualidade do efluente de fossas sépticas tratado utilizando a técnica do escoamento superficial e os atributos químicos do solo das rampas de tratamento

cultivadas com diferentes forrageiras sob a aplicação de diferentes taxas de efluente de fossas sépticas.

2 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANDERSSON, J. L.; BASTVIKEN, S. K.; TONDESKI, K. S. Free water surface wetlands for wastewater treatment in Sweden – nitrogen and phosphorus removal. **Water Science and Technology**, v.51, n.9, p.39-46, 2005.

FATTA-KASSINOS, D.; KALAVROUZOTIS, I. K.; KOUKOULAKIS, P. H.; VASQUEZ, M. I. The risks associated with wastewater reuse and xenobiotics in the agroecological environment. **Science of the Total Environment**, v.409, p.3555-3563, 2011.

FAULWETTER, J. L.; GAGNON, V.; SUNDBERG, C.; CHAZARENC, F.; BURR, M. D.; BRISSON, J.; CAMPER, A. K.; STEIN, O. R. Microbial processes influencing performance of treatment wetlands: A review. **Ecological Engineering**, v. 35, p. 987–1004, 2009.

FONSECA, S. P. P.; SOARES, A. A.; MATOS, A. T.; PEREIRA, O. G.; Avaliação do valor nutritivo e contaminação fecal do capim coastcross cultivado nas faixas de tratamento de esgoto doméstico pelo método do escoamento superficial. **Engenharia Agrícola**, v.21, n.3, p.293-301, 2001.

FONSECA, S. P. P. **Tratamento de esgoto por disposição no solo**. Belo Horizonte: FEAM, 2005.

FONSECA, S. P. P. **Avaliação de uma estação de tratamento de esgoto doméstico por escoamento superficial**. 2007. 144f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2007.

IBGE- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Pesquisa Nacional de Saneamento Básico**, 2000. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br/home/presidencia/noticias/27032002pnsb.shtm>>. Acesso em: 20 fev. 2015.

LOURES, A. P. S.; SOARES, A. A.; MATOS, A. T.; CECON, P. R. Concentrações de sódio e potássio em sistema de tratamento de esgoto doméstico, por escoamento superficial. **Engenharia na Agricultura**, Viçosa, v. 13, n. 4, p. 231-239, 2005.

MATOS, A. T. **Manejo e Tratamento de Resíduos Agroindustriais I**. Viçosa: 2003. 132 p.

MATOS, A. T.; LEMOS, A. F.; BARROS, F. M. Mobilidade de nitrato em solos de rampas de tratamento de águas residuárias por escoamento superficial. **Engenharia na Agricultura**, v.12, n.1, p.57-65, 2004.

THAWALE, P. R.; JUWARKAR, A. A.; SINGH, S. K. Resource conservation through land treatment of municipal wastewater. **Current Science**, v.90, n.5, p.704-711, 2006.

TONETTI, A. L.; CERQUEIRA, R. S.; COURACCI FILHO, B.; VON SPERLING, M.; FIGUEIREDO, R. F. Tratamento de esgotos de pequenas comunidades pelo método do escoamento superficial no solo. **Teoria e Prática na Engenharia Civil**, n.13, p.69-79, 2009.

VILLELA JUNIOR, L. V. E.; ARAÚJO, J. A. C.; FACTOR, T. L. Efeito da utilização do efluente de biodigestor no cultivo hidropônico do meloeiro. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.7, p.72-79, 2003.

VON SPERLING, M. **Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos**. 3. ed. Belo Horizonte: UFMG, 2005. 452 p.

CAPÍTULO I - ÍNDICE DE QUALIDADE DE EFLUENTE DE FOSSAS SÉPTICAS TRATADO POR ESCOAMENTO SUPERFICIAL EM RAMPAS CULTIVADAS COM FORRAGEIRAS

RESUMO

Foram realizados dois experimentos com o objetivo de avaliar a qualidade do efluente de fossas sépticas tratado pela técnica do escoamento superficial em rampas cultivadas com forrageiras, por meio da proposta de um índice de qualidade adaptado para fertirrigação e agrupamento quanto à similaridade das características químicas utilizando estatística multivariada. O primeiro experimento foi montado no esquema de parcela subdividida 3x2, sendo nas parcelas forrageiras em três níveis (azevém, aveia preta e centeio) e nas subparcelas taxas de efluente em dois níveis (2,25 e 4,5 L h⁻¹), em um delineamento inteiramente casualizado com cinco repetições. O segundo foi montado no esquema de parcela subdividida 3x3, sendo nas parcelas forrageiras em três níveis (azevém, capim marandu e um sistema misto composto pelas duas espécies) e nas subparcelas taxas de efluente em 3 níveis (2,25, 4,5 e 6,75 L h⁻¹), em um delineamento inteiramente casualizado com cinco repetições. No primeiro experimento, o índice de qualidade para o efluente tratado apresentou alta e baixa restrição ao uso na fertirrigação nas taxas de 2,25 e 4,5 L h⁻¹, respectivamente e o efluente de fossas sépticas apresentou restrição severa, já a análise de agrupamento formou três grupos distintos de qualidade, que diferiram quanto à taxa de aplicação de efluente utilizada no sistema de tratamento. No segundo experimento, o índice de qualidade para o efluente tratado apresentou moderada restrição ao uso na fertirrigação e o efluente de fossas sépticas apresentou restrição severa, já a análise de agrupamento formou dois grupos distintos de qualidade, que diferiram em efluente de fossa séptica e efluente tratado.

Palavras-chave: Esgoto doméstico, estatística multivariada, tratamento.

1 INTRODUÇÃO

No Brasil, a partir da década de 80, as universidades em parceria com algumas empresas de saneamento básico iniciaram a implantação de Estações de Tratamento de Esgoto por meio do escoamento superficial no solo em diferentes regiões do país como alternativa de saneamento de baixo custo.

O escoamento superficial no solo proporciona a redução dos poluentes contidos no efluente por mecanismos físicos, químicos e biológicos. Nesse processo de tratamento o efluente é aplicado de forma controlada na cabeceira de uma superfície vegetada plana e uniforme, com declividade variando de 5% a 8%, ficando sujeito ao escoamento na superfície do solo, condição que possibilita sua depuração ao longo da rampa de tratamento (TONETTI et al., 2012).

A vegetação absorve parte dos nutrientes contidos no efluente, promove proteção do solo contra erosão e favorece o desenvolvimento do biofilme, camada na qual os microrganismos se estabelecerão. A matéria orgânica é oxidada por esses microrganismos e os sólidos suspensos são filtrados devido às propriedades de adsorção química e física do solo. Assim, parte do efluente aplicado percola pelo terreno ou evapora e o restante é coletado em canaletas ao final da rampa (TONETTI et al., 2012).

Visto que em certas regiões do país a baixa precipitação pluviométrica não é suficiente para suprir a necessidade hídrica de determinados cultivos, um destino para a água residuária resultante do escoamento superficial seria a fertirrigação (COSTA e BARROS, 2005). Porém, a utilização dessas águas na agricultura sem uma análise laboratorial de sua qualidade pode causar impactos negativos ao meio ambiente, à produtividade das culturas e à saúde de produtores e consumidores, devido à quantidade de sais, nutrientes e patógenos presentes (HURLEY et al., 2012).

Dessa forma, torna-se necessário o estabelecimento dos requisitos mínimos de qualidade dessas águas e para tal podem ser utilizados os índices de qualidade, que resumem várias informações em único valor numérico, facilitando a tomada de decisão quanto ao uso dessas águas e controle de possíveis problemas causados ao solo e às plantas irrigadas (WANDA et al., 2012; ARDILA e SALDARRIAGA, 2013).

Diversas técnicas para elaboração de um índice de qualidade de água (IQA) têm sido usadas, sendo várias delas baseados no IQA desenvolvido pela *National Sanitation Foundation* – (IQA_{NSF}) dos Estados Unidos e usado em outros países como o Brasil e a Inglaterra (FLORES, 2002).

Todavia, o IQA_{NSF} e sua adaptação feita pela CETESB - Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental de São Paulo (IQA_{CETESB}) apresentam fórmulas “engessadas” para seu cálculo, aplicando pesos específicos para cada variável. Além disso, esses índices avaliam a qualidade da água para consumo humano, o que impede sua aplicação na avaliação da qualidade da água para fertirrigação, pois outras variáveis físico-químicas da água, que não aquelas utilizadas no cálculo do IQA_{NSF} e IQA_{CETESB}, podem ser importantes para a caracterização da qualidade da água para este fim.

Nesse sentido, objetivou-se com este trabalho avaliar a qualidade do efluente tratado pela técnica do escoamento superficial em rampas cultivadas com forrageiras, por meio da proposta de um índice de qualidade adaptado para fertirrigação e agrupamento quanto à similaridade das características químicas utilizando Estatística Multivariada.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Caracterização e delineamento experimental

Os experimentos foram conduzidos na área experimental do Centro de Ciências Agrárias da Universidade Federal do Espírito Santo em Alegre/ES. O local possui coordenadas geográficas 20°45'2,3" de latitude Sul e 41°29'17,7" de longitude Oeste, e altitude de 119 m. O clima típico da região é úmido no verão e seco no inverno.

O primeiro experimento foi conduzido no período de agosto a dezembro de 2013, com temperatura média e precipitação de 23,5°C e 788,2 mm, respectivamente (Figura 1A). Já o segundo experimento foi conduzido no período de março a agosto de 2014, com temperatura média e precipitação de 22,3°C e 435,6 mm, respectivamente (Figura 1B).

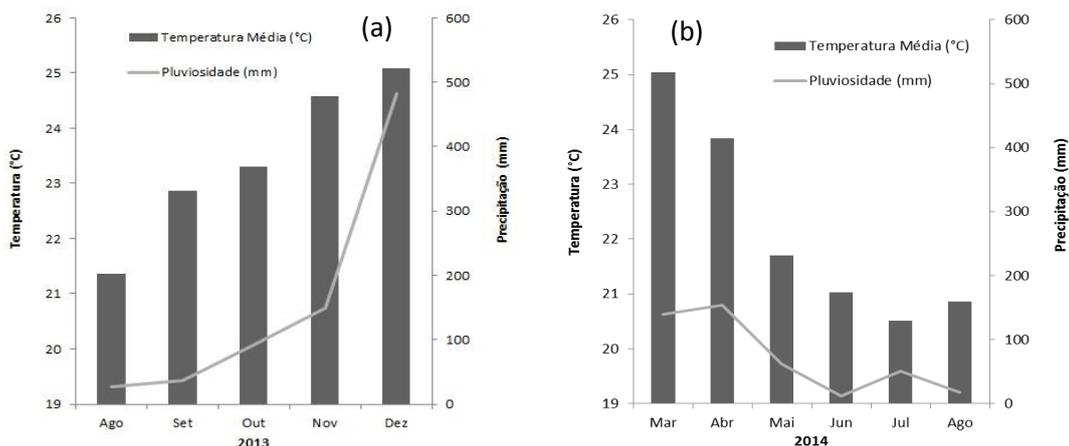


Figura 1 - Valores de temperatura média e precipitação durante o período experimental: (a) primeiro experimento e (b) segundo experimento.

O primeiro experimento foi montado no esquema de parcela subdividida 3x2, sendo nas parcelas forrageiras em três níveis: Azevém (*Lolium multiflorum*), Aveia preta (*Avena strigosa*) e Centeio (*Secale cereale*); e nas subparcelas taxas de aplicação em dois níveis: 2,25 e 4,5 L h⁻¹ de efluente por rampa de tratamento, em um delineamento inteiramente casualizado com cinco repetições.

O segundo experimento foi montado no esquema de parcela subdividida 3x3, sendo nas parcelas forrageiras em três níveis: Azevém (*Lolium multiflorum*), Capim Marandu (*Brachiaria brizantha* cv. Marandu) e um sistema misto composto pelas duas espécies; e nas subparcelas taxas de aplicação em três níveis: 2,25; 4,5 e 6,75 L h⁻¹ de efluente por rampa de tratamento, em um delineamento inteiramente casualizado com cinco repetições.

Nos dois experimentos, cada taxa de efluente corresponde a uma diferente vazão; as taxas foram aplicadas no tempo, em ordem crescente durante um período de 28 dias cada, ou seja, ao término da aplicação de uma taxa, iniciou-se a aplicação da taxa subsequente nas mesmas rampas de tratamento.

2.2 Condução dos experimentos

Os experimentos foram montados em campo, a céu aberto, ou seja, sem cobertura. Para a construção das rampas de tratamento foram utilizadas 15 calhas de fibrocimento com dimensões de 3,00 x 0,90 x 0,25 metros (comprimento, largura e profundidade), dispostas em uma declividade de 5%. Essas foram preenchidas com uma camada de aproximadamente 5,0 cm de brita

no fundo e solo de textura média coletado no perfil natural de um Latossolo Vermelho-Amarelo. Após coletado, o solo foi seco ao ar, peneirado em malha de 4 mm e depositado em igual massa em cada unidade experimental. Uma amostra do solo foi coletada e encaminhada ao laboratório para determinação dos atributos físicos e químicos (Tabela 1) conforme metodologia proposta pela Embrapa (2009).

O plantio das forrageiras foi feito diretamente nas unidades experimentais que receberam adubação mineral conforme exigência nutricional e disponibilidade de nutrientes no solo segundo a metodologia da SBCS (2004). As sementes foram semeadas de modo a cobrir toda a superfície das rampas.

A taxa de semeadura utilizada no primeiro experimento foi de 37 kg ha⁻¹ para o azevém, 74 kg ha⁻¹ para a aveia preta e 55 Kg ha⁻¹ para o centeio. No segundo experimento foi utilizada a taxa de semeadura de 37 Kg ha⁻¹ para o azevém, 55 Kg ha⁻¹ para o marandu e 18,5 Kg ha⁻¹ de azevém + 27,5 Kg ha⁻¹ de marandu no cultivo misto. Essas plantas foram irrigadas até o seu completo estabelecimento, que ocorreu 40 dias após a semeadura para todas as espécies de forrageiras.

Após esse período foi efetuado um corte de uniformização das plantas a cinco centímetros de altura do solo e iniciada a aplicação do efluente de fossas sépticas de forma a satisfazer as quantidades determinadas para cada taxa de aplicação.

O efluente utilizado no experimento foi proveniente de fossas sépticas de comunidades rurais dos municípios de Jerônimo Monteiro e Cachoeiro de Itapemirim, Espírito Santo. O efluente foi captado nas fossas e transportado em veículos com reservatórios adaptados até o local do experimento, onde foi armazenado em reservatórios com capacidade de 5.000 litros, e diariamente conduzido até um sistema de tratamento preliminar composto de filtros de tela com malha de dois milímetros e armazenado em um tanque de 500 litros para decantação, para posterior aplicação nas unidades experimentais. Semanalmente, foram coletadas amostras desse efluente para caracterização química conforme metodologia preconizada por Silva e Oliveira (2001). Os resultados médios para cada taxa encontram-se na Tabela 2.

Tabela 1 - Atributos físicos e químicos do solo utilizado no preenchimento das rampas de tratamento

Atributo	Valores
pH	5,4
¹ Cálcio (cmol _c dm ⁻³)	1,3
¹ Magnésio (cmol _c dm ⁻³)	0,5
² Fósforo (mg dm ⁻³)	3,3
³ Potássio (mg dm ⁻³)	101
⁴ H + Al (cmol _c dm ⁻³)	2,15
⁵ Alumínio (cmol _c dm ⁻³)	0,0
Matéria Orgânica (dag kg ⁻¹)	1,86
³ Sódio (mg dm ⁻³)	0,0
Índice de saturação por sódio (%)	0,0
Soma de bases (cmol _c dm ⁻³)	2,06
Capacidade de Troca de Cátions Efetiva (cmol _c dm ⁻³)	2,06
Capacidade de Troca de Cátions Total (cmol _c dm ⁻³)	4,21
Saturação por Bases (%)	38,25
Saturação por Alumínio (%)	0,0
⁶ Ferro (mg dm ⁻³)	127,4
⁶ Cobre (mg dm ⁻³)	2,0
⁶ Zinco (mg dm ⁻³)	5,5
⁶ Manganês (mg dm ⁻³)	77,2
⁷ Boro (mg dm ⁻³)	0,3
Areia (%)	59,19
Silte (%)	5,59
Argila (%)	35,22

1. Extraído com cloreto de potássio 1 mol L⁻¹ e determinado por titulometria; 2. Extraído por Mehlich-1 e determinado por colorimetria; 3. Extraído por Mehlich-1 e determinado por fotometria de chama; 4. Extraído com acetato de cálcio 0,5 mol L⁻¹, pH 7,0 e determinado por titulação; 5. Extraído com cloreto de potássio 1 mol L⁻¹ e determinado por espectrofotômetro de absorção atômica; 6. Determinado por espectrofotômetro de absorção atômica; 7. Determinado por via seca e leitura em colorimetria (EMBRAPA, 2009).

Tabela 2 - Atributos químicos do efluente de fossas sépticas utilizado no experimento

Atributos químicos	Taxas (L h ⁻¹)				
	Primeiro experimento		Segundo experimento		
	2,25	4,5	2,25	4,5	6,75
pH	7,5	8,0	7,5	7,9	8,0
Condutividade elétrica (dS m ⁻¹)	1,30	0,70	1,43	0,89	0,67
Potássio (mg L ⁻¹)	52,00	29,00	46,00	30,00	10,00
Sódio (meq L ⁻¹)	4,56	2,08	3,56	1,96	1,00
Ferro (mg L ⁻¹)	3,08	0,04	3,84	0,04	0,29
Fosfato (mg L ⁻¹)	2,03	0,15	1,87	1,73	0,85
Nitrato (mg L ⁻¹)	18,40	20,30	15,40	10,30	5,20
Sulfato (meq L ⁻¹)	0,56	1,13	0,49	0,44	0,67
Boro (mg L ⁻¹)	0,16	0,04	0,16	0,03	0,06
Cálcio (meq L ⁻¹)	1,62	2,75	4,39	2,85	2,61
Magnésio (meq L ⁻¹)	0,61	0,34	1,46	0,61	0,96
Manganês (mg L ⁻¹)	0,01	0,01	0,04	0,03	0,02
Zinco (mg L ⁻¹)	0,01	0,01	0,04	0,01	0,01
Cobre (mg L ⁻¹)	0,01	0,01	0,02	0,01	0,01
Razão de absorção de sódio (cmol _c L ⁻¹)	4,32	1,67	2,08	1,49	0,75

O efluente de fossas sépticas foi aplicado por gravidade na parte superior das parcelas experimentais através de tubulações perfuradas de 20 milímetros de diâmetro, que continham cada uma um registro para regulação da vazão a ser aplicada de acordo com cada taxa avaliada. A aplicação do esgoto se deu cinco dias por semana (de segunda a sexta-feira) por seis horas/dia.

2.3 Coleta e análise do efluente

Diariamente foram coletadas amostras do efluente tratado após o escoamento nas rampas e do efluente de fossas sépticas aplicado no sistema. Nessas amostras foram determinados os valores de pH, condutividade elétrica (CE), turbidez (Tu) e oxigênio dissolvido (OD), sendo o restante da amostra acondicionado em geladeira.

Ao final da aplicação de cada taxa essas amostras foram misturadas formando uma amostra composta e representativa de cada taxa para determinação da Razão de Adsorção de Sódio (RAS), Ferro reduzido (Fe^{2+}), Ferro oxidado (Fe^{3+}), Ferro total, Na, Cl, Carbonato (CO_3^{2-}), Dureza (CaCO_3), Bicarbonato (HCO_3^{2-}), Sulfato (SO_4^{2-}), Fosfato (PO_4^{3-}), K, Ca, Mg, B, Mn, Zn, Cu, Al, Nitrato (NO_3^-) e Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO) conforme metodologia preconizada por Silva e Oliveira (2001).

Devido ao tempo de armazenamento foram adotadas técnicas de preservação visando à manutenção das características originais dos efluentes até o momento de seu exame em laboratório (ABNT, 1987).

Devido ao grande número de variáveis de qualidade medidas nos efluentes, foi aplicada a análise de componentes principais (ACP) para avaliar a importância de cada variável e promover a eliminação daquelas que contribuíram pouco em termos de variação da qualidade dos efluentes tratados. Para eliminar o efeito de escala e unidades foi feita a padronização dos dados, na qual os valores das variáveis são subtraídos de sua média e divididos pelo seu desvio padrão.

A seleção do número de componentes extraídas neste trabalho seguiu os preceitos apresentados por Hair et al. (2005), em que se consideram somente componentes com autovalor superior a um. Após terem sido selecionadas as componentes principais, dentro destas foram escolhidas as variáveis que apresentaram coeficiente de correlação maior ou igual a 0,7 com as componentes selecionadas para comporem o índice de qualidade (IQ) conforme realizado por Bertossi et al. (2013a).

O IQ foi calculado por um valor numérico associado à qualidade individual de cada variável (q_i) elevada aos respectivos pesos dessas variáveis na avaliação da variabilidade total da qualidade do efluente (w_i), como apresentado na equação 1.

$$IQ = \prod_{i=1}^n q_i^{w_i} \quad (1)$$

sendo, IQ = Índice de Qualidade do efluente (número entre 0 e 100); q_i = valor numérico associado à qualidade da i -ésima variável (número entre 0 e 100);

w_i = peso correspondente à i -ésima variável (número entre 0 e 1); n = número de variáveis.

Os valores de q_i foram obtidos em função da concentração das variáveis medidas nos efluentes, as quais foram transformadas em valores numéricos que representassem sua qualidade, conforme realizado por Andrade et al. (2005).

Os limites para o enquadramento dos valores de cada variável no seu referido q_i foram definidos considerando o risco de salinidade, redução da infiltração de água no solo e problemas de toxicidade às plantas, seguindo os padrões de qualidade de água para irrigação proposto por Ayers e Westcot (1994) e Bernardo et al. (2006) . Na Tabela 3 estão apresentados os limites propostos das variáveis que foram selecionadas na análise de componentes principais para comporem o IQ.

Tabela 3- Limites das variáveis utilizados no IQ para cálculo do q_i

Variáveis	q_i				
	80-100	60-80	40-60	20-40	0-20
CE (dS m ⁻¹)	0-0,7	0,7-1,5	1,5-3	3-5	>5
Tu (UNT)	0-30	30-50	50-70	70-100	>100
pH	7-7,5	6,7-7 ou 7,5-8	6,5-6,7 ou 8-8,5	6-6,5 ou 8,5-9	<6 ou >9
RAS	0-3	3-5	5-7	7-10	>10
Fe total (mg L ⁻¹)	0-0,2	0,2-0,5	0,5-1	1-1,5	>1,5
Na (meq L ⁻¹)	0-0,7	0,7-1,5	1,5-3	3-5	>5
Cl (meq L ⁻¹)	0-3	3-5	5-7	7-10	>10
CaCO ₃ (mg L ⁻¹)	0-50	50-150	150-200	200-300	>300
HCO ₃ ²⁻ (mg L ⁻¹)	0-3	3-5	5-7	7-10	>10
SO ₄ ²⁻ (meq L ⁻¹)	0-6	6-10	10-14	14-20	>20
PO ₄ ³⁻ (mg L ⁻¹)	0-1	1-1,5	1,5-2	2-3	>3
K (mg L ⁻¹)	0-10	10-15	15-20	20-25	>25
Ca (meq L ⁻¹)	0-5	5-10	10-15	15-20	>20
Mg (meq L ⁻¹)	0-2	2-3	3-5	5-7	>7
B (mg L ⁻¹)	0-0,7	0,7-1,5	1,5-3	3-5	>5
Mn (mg L ⁻¹)	0-0,2	0,2-0,5	0,5-0,8	0,8-1	>1

Para a obtenção do q_i correspondente às concentrações das variáveis de qualidade medidos nos efluentes, utilizou-se a equação 2, na qual considera-se o valor medido e os limites de q_i das variáveis expressos na Tabela 3 (ANDRADE et al., 2005).

$$q_i = q_{i \max} - \frac{(X_{ij} - X_{\inf}) * q_{iamp}}{X_{amp}} \quad (2)$$

sendo, $q_{i \max}$ = valor máximo de q_i para a classe; X_{ij} = valor observado para a célula ij ; X_{\inf} = limite inferior da classe a que pertence X_{ij} ; q_{iamp} = amplitude de classe; X_{amp} = amplitude da classe a que pertence X_{ij} .

Para o cálculo de X_{amp} da última classe para cada variável, foi considerado como limite superior o maior valor encontrado nas análises físico-químicas das amostras de efluente para cada variável conforme realizado por Andrade et al. (2005).

Para atribuir os pesos (w_i) a cada variável de qualidade de efluente utilizado no IQ, foram tomados como base os resultados obtidos na análise das componentes principais. Nesse procedimento, foram utilizados os autovalores das componentes e a contribuição de cada variável pelas respectivas componentes, extraídas da ACP, como realizado por Andrade et al. (2005).

Inicialmente, calculou-se o somatório dos autovalores de todas as componentes multiplicados pela contribuição de cada variável. Em seguida foram ponderados os valores de w_i para cada variável em função de sua contribuição por cada componente, de forma que a soma de todos os w_i fosse igual a um, conforme demonstrado na equação 3.

$$w_i = \frac{F_1 P_{1i} + F_2 P_{2i}}{(\sum_{j=1}^n F_1 P_{1j}) + (\sum_{j=1}^n F_2 P_{2j})} \quad (3)$$

sendo, F_1 e F_2 = autovalores das componentes principais; P = contribuição das variáveis pela componente principal; i e j = índices para as variáveis; n = número de variáveis envolvidas na ACP.

De posse dos valores de q_i e w_i , determinou-se a qualidade do efluente de fossas sépticas e tratado, segundo as variáveis avaliadas, para fertirrigação que, indicada pelo IQ em uma escala de 0 a 100, foi classificado segundo a Tabela 4.

Tabela 4- Classificação do índice de qualidade de água para irrigação segundo Meireles et al. (2010)

IQ	Restrições ao uso	Recomendações	
		Solo	Planta
85 ≤ 100	Nenhuma restrição	Pode ser usado para a maioria dos solos com baixa probabilidade de causar problemas de salinidade e sodicidade, sendo recomendada lixiviação em conjunto com práticas de irrigação, exceto em solos com baixa permeabilidade.	Não há risco de toxicidade para a maioria das plantas.
70 ≤ 85	Baixa restrição	Recomendado o uso em solos com textura leve ou moderada permeabilidade, sendo recomendada a lixiviação de sal. Em solos muito argilosos, podem ocorrer problemas de sodicidade; deve ser evitado o uso em solos com altos níveis de argila 2:1.	Evite plantas sensíveis ao sal.
55 ≤ 70	Moderada restrição	Pode ser usada em solos com moderada a alta permeabilidade, sendo sugerida lixiviação moderada de sais.	Plantas com tolerância moderada a sais podem ser cultivadas.

40 ≤ 55	Alta restrição	<p>Pode ser usado em solos com alta permeabilidade, sem camadas compactas.</p> <p>Cronograma de irrigação de alta frequência deve ser adotado para água com CE acima 2 dS m⁻¹ e RAS acima de 7.</p>	<p>Deve ser usada para a irrigação de plantas com moderada a alta tolerância aos sais com práticas de controle de salinidade especiais, exceto água com baixos valores de Na, Cl e HCO₃.</p>
0 ≤ 40	Severa restrição	<p>Deve ser evitada a sua utilização para a irrigação, em condições normais. Em casos especiais, pode ser utilizada de vez em quando. Água com baixos níveis de sal e RAS alta exigem aplicação de gesso.</p>	<p>Apenas as plantas com tolerância elevada de sal, com exceção de águas com baixíssimos valores de Na, Cl e HCO₃.</p>

As características mais importantes para variação da qualidade dos efluentes selecionadas na ACP foram utilizadas para o estudo da semelhança entre o efluente de fossas sépticas aplicado no sistema e o efluente tratado, que foi realizado através da análise de agrupamento hierárquico de Cluster (AAHC).

As amostras de efluente foram agrupadas com base na similaridade das características analisadas, definida pela variação entre os coeficientes de agrupamento de dois grupos consecutivos, conforme descrito por Hair et al. (2005). Como as variáveis utilizadas nesse estudo são reais, adotou-se a combinação da distância euclidiana ao quadrado para a formação da matriz de similaridade e o algoritmo do método de ligação Ward, conforme realizado por vários autores, como Fernandes et al. (2010), Palácio et al. (2011) e Bertossi et al. (2013b).

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Primeiro experimento

Pelo teste da análise da componente principal (ACP), um modelo com duas componentes foi adequado para representar as variáveis químicas analisadas no efluente e explicar 90,54% da variância total (Tabela 5).

Tabela 5- Variância das componentes principais para as amostras de efluente estudadas

Componentes	Autovalor (variância)	Variância (%)	Variância acumulada (%)
1	9,45	72,77	72,77
2	2,29	17,77	90,54

Pela análise da Tabela 5, verifica-se que a primeira e a segunda componente principal explicaram, respectivamente, 72,77% e 17,77% da variância total dos dados, concentrando em duas dimensões, 90,54% das informações antes diluídas em 25 dimensões (número de variáveis analisadas). Resultados semelhantes foram encontrados por Andrade et al. (2007b) ao avaliarem a qualidade das águas superficiais da bacia hidrográfica do Alto Acaraú no Ceará, e por Bertossi et al (2013a) ao avaliarem a qualidade da água em microbacias com diferentes coberturas do solo, no Sul do Espírito Santo.

Já Meireles et al. (2010) ao utilizarem a Análise de Componente Principal para avaliação da qualidade da água para irrigação do rio Acaraú no Ceará, Brasil, selecionaram três componentes indicadoras da qualidade das águas superficiais estudadas, que juntas explicaram 78,3% da variância total. No presente trabalho foram encontrados valores superiores, ou seja, com apenas duas componentes foi possível explicar 90,54% da variância total dos dados.

Na primeira componente foram selecionadas as variáveis condutividade elétrica, turbidez, RAS, sódio, cloro, bicarbonato, sulfato, fosfato, potássio, boro e nitrato; e na segunda componente, as variáveis dureza e magnésio. Meireles et al. (2010) ao utilizarem a técnica das componentes principais para selecionarem as características mais importantes das águas superficiais do rio Acaraú no Ceará, Brasil, para uso na irrigação, obtiveram resultados semelhantes com o obtido

neste trabalho. Os autores supracitados selecionaram as variáveis: CE, Mg, Na, K, Cl, HCO₃, RAS, PO₄, NH₄, NO₃ e SO₄.

Portanto a qualidade para irrigação/fertirrigação está relacionada aos sais solúveis presentes, demonstrando serem essas as características mais importantes para avaliação da qualidade de água/efluente para tal uso. Segundo Silva et al. (2011) altos níveis de sais nas águas de irrigação, tanto são prejudiciais ao desenvolvimento das culturas como causam problemas no solo e obstrução das tubulações e emissores dos sistemas de irrigação.

A análise de componentes principais promoveu uma boa redução no número de variáveis, na qual foram selecionadas 13 das 25 variáveis analisadas no efluente, ou seja, foram selecionadas 52% das variáveis analisadas para comporem o IQ. Da mesma forma, Bertossi et al. (2013a) obtiveram resultados satisfatórios ao aplicarem a técnica das componentes principais para selecionarem as variáveis mais representativas da qualidade da água de microbacias com diferentes usos do solo no sul do Espírito Santo, na qual foram selecionadas 7 das 13 variáveis analisadas, ou seja, foram selecionadas 53,85% das variáveis para comporem o IQA, valor próximo ao encontrado no presente estudo.

Já Andrade et al. (2007a) com o objetivo de identificarem a origem dos fatores que determinavam a qualidade das águas na parte baixa da Bacia do Acaraú (Ceará, Brasil) não obtiveram resultados satisfatórios ao aplicar a análise de componentes principais para reduzir o número de variáveis, uma vez que o melhor ajuste do modelo ocorreu com a inclusão de 18 das 25 variáveis analisadas, ou seja 72% das variáveis.

A concentração das variáveis selecionadas na ACP para comporem o IQ foi transformada em valores numéricos que representassem sua qualidade (qi). Os valores de qi para cada variável química, variando de zero a 100, estão apresentados na Tabela 6.

Tabela 6- Valores de q_i para o efluente tratado nas rampas utilizando diferentes forrageiras e taxas de aplicação e para o efluente de fossas sépticas (EFS)

Forrageiras Taxa ($L h^{-1}$)	Azevém		Aveia preta		Centeio		EFS
	2,25	4,5	2,25	4,5	2,25	4,5	
Condutividade elétrica	72,73	81,57	73,98	84,97	71,13	82,77	60,00
Turbidez	86,94	96,02	89,21	96,91	92,61	96,18	37,50
RAS	73,88	91,50	78,64	93,32	75,26	90,85	62,00
Na	32,64	57,33	38,16	67,90	38,00	58,13	24,40
Cl	97,06	98,55	97,31	98,76	96,75	98,79	96,13
Dureza	67,59	48,07	68,50	60,37	65,58	61,03	64,43
Bicarbonato	99,15	94,20	99,17	95,91	99,21	95,94	95,60
Sulfato	96,11	96,38	95,85	96,77	95,94	96,95	98,13
Fosfato	95,74	96,72	94,18	96,30	93,86	96,22	39,40
K	8,23	49,20	4,84	64,20	6,80	38,80	0,71
Mg	96,16	95,62	95,70	95,67	95,58	96,78	93,90
B	96,43	98,89	95,40	98,33	96,14	98,91	95,43
Nitrato	5,27	83,67	8,07	75,00	2,86	61,00	3,20

Para a maioria do efluente tratado, os valores de q_i foram menores para o sódio, dureza, potássio e nitrato, o que sugere que essas foram as variáveis que mais diferenciaram uma amostra da outra, afetando de forma significativa sua qualidade, de forma a reduzi-la.

Altas concentrações de sódio na água de irrigação podem interferir nos atributos físicos do solo, causando dispersão da argila, entupimento dos poros e redução da permeabilidade (MUYEN et al. 2011). Águas com alta dureza podem formar incrustações nas paredes das tubulações e emissores restringindo a passagem da água (BERNARDO et al. 2006). A utilização de águas para irrigação com concentrações de nitrato e potássio acima dos limites aceitáveis durante um longo período pode ocasionar distúrbios nutricionais na cultura irrigada (HANJRA et al., 2012). Além disso, o nitrato, por ser íon móvel no solo, pode vir a

contaminar os aquíferos subterrâneos utilizados para abastecimento de água (PINTO et al., 2013).

Já o EFS, além dessas características, apresentou baixo q_i para a turbidez, demonstrando ser essa a principal característica que diferenciou os efluentes tratados do efluente de fossas sépticas. Taebi e Droste (2008) ao utilizarem a técnica do escoamento superficial para tratamento de efluentes observaram ótima remoção de turbidez, podendo atingir valores em torno de 70%.

A depuração do efluente no sistema de tratamento por escoamento superficial dá-se à medida que o efluente escoar na área recoberta pela vegetação, onde os sólidos em suspensão são filtrados (TONETTI et al., 2012). Segundo Surampalli et al. (2007) essa técnica também apresenta ótima remoção de sólidos em suspensão, podendo variar de 51 a 92%, sendo essa a principal característica responsável pela alta turbidez do efluente, que, se utilizado para irrigação, pode causar entupimento das tubulações, reduzindo a área de condução de água e queda na eficiência do sistema (AYERS e WESTCOT, 1994).

Os valores do peso w_i não variaram muito entre as variáveis, sendo maior para o Cl, CE, RAS, K, Na, dureza, bicarbonato, sulfato, Mg e B, apresentando o índice alta sensibilidade à variabilidade dessas características. Já as variáveis turbidez e fosfato obtiveram pesos inferiores aos demais (Tabela 7).

Tabela 7- Pesos (w_i) para as variáveis selecionadas para comporem o Índice de qualidade

Variáveis	CE	Tu	RAS	Na	Cl	Dureza	Bicarbonato
w_i	0,082	0,066	0,082	0,081	0,083	0,081	0,078
Variáveis	Sulfato	Fosfato	K	Mg	B	Nitrato	
w_i	0,078	0,062	0,082	0,076	0,076	0,073	

Procedimento semelhante foi adotado por Meireles et al. (2010) ao utilizarem a técnica da análise de componentes principais a fim de desenvolver um índice de qualidade de água para irrigação. Os sobreditos autores encontraram maiores valores do peso w_i para as variáveis CE, Na, bicarbonato, cloro e RAS, o que corrobora com os resultados encontrados neste trabalho, atestando a importância do monitoramento de sais na água de irrigação.

De posse dos valores de q_i e w_i foi possível calcular o IQ para o efluente e classificá-lo de acordo com os limites para uso na irrigação apresentados na Tabela 4. De acordo com a Tabela 8, pode-se constatar que os valores de IQ para as amostras do efluente tratado variaram de 51,45 a 84,85, classe de alta a baixa restrição, nas taxas de 2,25 e 4,5 L h⁻¹, respectivamente. Já o efluente de fossas sépticas apresentou valor de IQ de 35,85 (classe de restrição severa).

Tabela 8- Índice de Qualidade do efluente tratado nas rampas utilizando diferentes forrageiras e taxas de aplicação e do efluente de fossas sépticas (EFS)

Plantas	Taxa (L h ⁻¹)	IQ	Classificação
Azevém	2,25	54,02	Alta restrição
	4,5	80,4	Baixa restrição
Aveia preta	2,25	54,4	Alta restrição
	4,5	84,85	Baixa restrição
Centeio	2,25	51,45	Alta restrição
	4,5	79,1	Baixa restrição
EFS		35,85	Severa restrição

Os efluentes com alta restrição devem ser utilizados para a irrigação de plantas com moderada a alta tolerância aos sais e em solos com alta permeabilidade. Os efluentes com baixa restrição devem ser utilizados em solos com textura leve ou moderada permeabilidade. Já o efluente de fossas sépticas, que apresentou restrição severa, deve ser evitado para uso na irrigação em condições normais, sem adoção de práticas de controle dos problemas relacionados à salinidade e sodicidade.

Pela análise da Tabela 8, observa-se que o efluente tratado na taxa de 4,5 L h⁻¹ para todas as espécies de forrageiras testadas apresentou melhor qualidade que o tratado na taxa de 2,25 L h⁻¹. Tal fato pode ser explicado pela composição química do efluente aplicado no sistema, na qual se percebe uma qualidade inferior no efluente utilizado na primeira taxa (2,25 L h⁻¹), principalmente para as variáveis condutividade elétrica, potássio, sódio e RAS, que apresentaram altos valores (Tabela 2).

Outra possibilidade seria a interferência da chuva no sistema de tratamento, já que este não era coberto e, portanto, estava sujeito às condições climáticas locais. De acordo com a Figura 1 o período final do experimento apresentou um alto valor de precipitação, que pode ter diluído o efluente, fazendo que este apresentasse qualidade melhor, período que coincide com a aplicação da taxa de $4,5 \text{ L h}^{-1}$.

Apesar de nesse estudo de qualidade ter sido utilizado efluente de fossas sépticas, resultados semelhantes foram obtidos por Meireles et al. (2010) ao avaliarem a qualidade das águas do rio Acaraú no Ceará para irrigação. Esses autores também observaram que a qualidade das águas estudadas variou de baixa a severa restrição, o que sugere que tanto água quanto efluente, se utilizados de forma inadequada, podem causar problemas ao solo e a cultura irrigada devido às suas características químicas e principalmente se possuírem altos teores de sais.

Na Figura 2 apresenta-se o dendograma referente à AAHC, no qual as amostras de efluente de fossas sépticas e tratado foram agrupadas quanto à similaridade das características de qualidade selecionadas como mais importantes na ACP. Observa-se que o ponto ótimo de corte para formação dos grupos de similaridade se encontra em 20%, pois, a partir deste, ocorre o distanciamento maior na medida de similaridade para a formação dos grupos. Desta forma, definem-se três agrupamentos distintos.

Percebe-se que dois dos grupos formados foram compostos cada um por efluentes tratados nas diferentes plantas utilizadas (AZ, AV e C) no sistema de tratamento por escoamento superficial; o que diferiu esses grupos foi a taxa de aplicação ($2,25$ e $4,5 \text{ L h}^{-1}$). Já o efluente de fossas sépticas ficou em um grupo sozinho, o que significa que este apresentou características diferentes dos efluentes tratados.

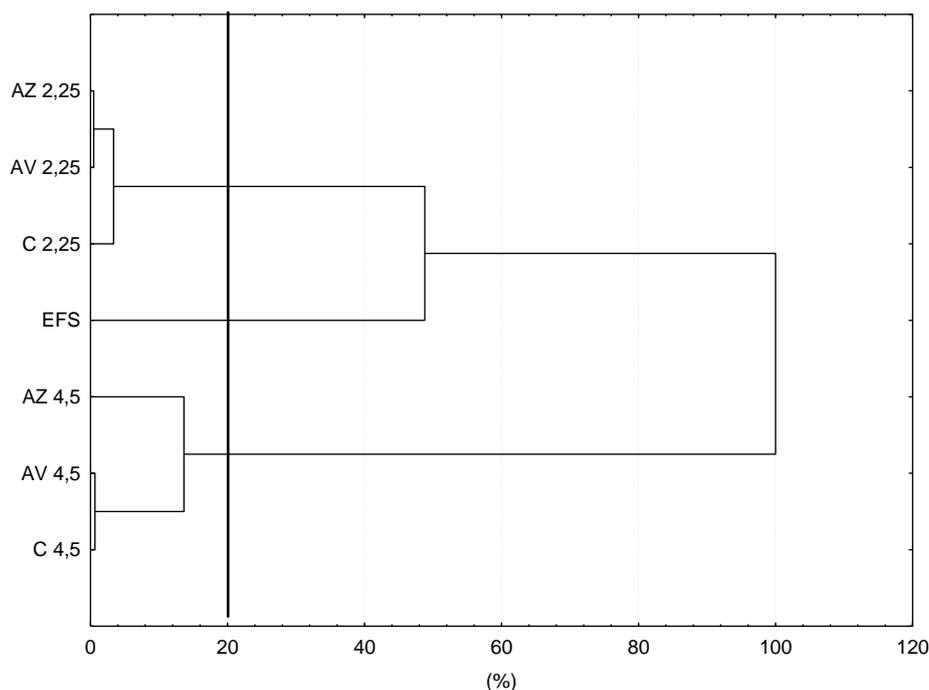


Figura 2- Dendrograma dos efluentes agrupados quanto às características de qualidade selecionadas na análise de componentes principais para comporem o Índice de Qualidade, em que: AZ = azevém, AV = aveia preta, C = centeio, 2,25 e 4,5 = taxas de aplicação de efluente em $L h^{-1}$ e EFS = efluente de fossas sépticas.

Os resultados obtidos no agrupamento são condizentes com o índice de qualidade, no qual todas as amostras de efluente tratado utilizando as diferentes espécies de forrageiras e uma taxa de aplicação de $2,25 L h^{-1}$ apresentaram valores do índice de qualidade próximos e com a mesma classificação (Alta restrição) e na análise de agrupamento ficaram no mesmo grupo. As amostras de efluente tratado utilizando um taxa de aplicação de $4,5 L h^{-1}$ também apresentaram valores bem próximos do índice de qualidade, com a mesma classificação (Baixa restrição) e formaram um grupo distinto. Já o EFS apresentou um valor de IQ bem abaixo das amostras de efluente tratado, apresentando uma severa restrição ao uso na irrigação e por isso na análise de agrupamento formou um grupo sozinho.

Assim, os resultados obtidos com o IQ e com a análise de agrupamento demonstram que a técnica do escoamento superficial apresenta potencial para ser utilizada no tratamento do EFS, o qual passou de uma severa (EFS) para alta e baixa restrição ao uso na fertirrigação (efluente tratado). Além disso, pode-se

observar que as plantas utilizadas no experimento não influenciaram na qualificação nem no agrupamento dos efluentes tratados, que diferenciaram apenas quanto às taxas de aplicação utilizadas.

Segundo Wen et al. (2007) a espécie de planta utilizada nas rampas de tratamento por escoamento superficial pode influenciar na eficiência do sistema. Esses autores, ao avaliarem a remoção de poluentes por quatro espécies de gramíneas diferentes utilizadas nesse tipo de tratamento: Para grass (*Brachiaria mutica*), Nile grass (*Acroceras macrum*), Cattail (*Typha orientalis*) e Vetiver (*Vetiveria zizanioides*), observaram diferentes remoções para as diferentes espécies de plantas utilizadas. Porém, cabe salientar que no presente estudo foram utilizadas outras espécies de plantas e em condições climáticas diferentes e que estas influenciaram de forma semelhante no tratamento do efluente de fossas sépticas.

Apenas a taxa de aplicação influenciou na eficiência do sistema de tratamento, sendo observada melhor qualidade nos efluentes tratados na taxa de $4,5 \text{ L h}^{-1}$. Assim como no presente estudo, diversos autores, ao utilizarem a técnica do escoamento superficial para tratamento de efluentes, observaram que diferentes taxas de aplicação proporcionaram diferenças na eficiência do tratamento (LOURES et al., 2006; TAEBI e DROSTE, 2008; TONETTI et al., 2012). Porém, cabe salientar que no presente trabalho foram observadas diferenças nas condições climáticas durante o experimento, principalmente quanto à chuva e variação química do efluente utilizado no sistema de tratamento, o que pode ter influenciado nos resultados obtidos.

3.2 Segundo experimento

Pelo teste da análise da componente principal (ACP), um modelo com três componentes foi adequado para representar as variáveis químicas analisadas nos efluentes tratado e de fossas sépticas e explicar aproximadamente 94,95% da variância total (Tabela 9).

Tabela 9- Variância das componentes principais para as amostras de efluente estudadas

Componentes	Autovalor (variância)	Variância (%)	Variância acumulada (%)
1	9,687	60,55	60,55
2	4,356	27,23	87,78
3	1,146	7,17	94,95

Pela análise da Tabela 9, verifica-se que a primeira, a segunda e a terceira componente principal explicaram, respectivamente, 60,55, 27,23 e 7,17% da variância total dos dados, concentrando em três dimensões 94,95% das informações antes diluídas em 25 dimensões (número de variáveis analisadas). Resultados semelhantes foram encontrados por Andrade et al. (2007b) ao avaliarem a qualidade das águas superficiais da bacia hidrográfica do Alto Acaraú, no Ceará.

Já Moura et al. (2010), ao aplicarem a mesma técnica a fim de avaliarem a qualidade das águas da bacia do Gama no Distrito Federal, selecionaram oito componentes principais que juntas explicaram 70,88% dos dados, resultado inferior ao obtido no presente estudo, no qual com apenas três componentes pode-se explicar uma maior variação dos dados. Porém Zamberlam et al. (2013), com o objetivo de calcular índices de qualidade da água para irrigação na região central do Rio Grande do Sul, conseguiram resultados ainda melhores, pois concentraram em apenas duas dimensões 92,14% da variância total dos dados.

Na primeira componente foram selecionadas as variáveis condutividade elétrica, turbidez, ferro total, bicarbonato, fosfato, potássio, boro e manganês, na segunda componente as variáveis foram pH, RAS, sódio, dureza, cálcio e magnésio, já na terceira componente apenas o cloro foi selecionado. Meireles et al. (2010), ao utilizarem a técnica das componentes principais para selecionarem as características mais importantes das águas superficiais do rio Acaraú no Ceará, Brasil, para uso na irrigação, obtiveram resultados semelhantes com o obtido neste trabalho. Os autores supracitados selecionaram as variáveis: CE, Mg, Na, K, Cl, HCO₃, RAS, PO₄, NH₄, NO₃ e SO₄.

Portanto a qualidade da água/efluente para irrigação/fertirrigação está relacionada aos sais solúveis presentes, demonstrando serem essas as

características mais importantes para avaliação da qualidade da água/efluente para tal uso. Tais águas estão propensas a causar problemas de sodicidade e toxicidade se a relação solo-planta-água não for bem manejada (MEIRELES et al., 2010).

Segundo Ardila e Saldarriaga (2013) as principais características que devem ser avaliadas nos efluentes utilizados para fertirrigação são: Al, Cd, Cr, DBO, Fe, pH, Ca, Na, Cl, Mg, RAS, bicarbonato, carbonato, sulfato e condutividade elétrica. O que corrobora os resultados encontrados no presente estudo, pois muitas das características selecionadas para comporem o índice de qualidade foram citadas por esses autores.

A análise de componentes principais promoveu boa redução no número de variáveis, na qual foram selecionadas 15 das 25 variáveis analisadas nos efluentes para comporem o índice de qualidade (60%). Da mesma forma, Bertossi et al. (2013a) obtiveram resultados satisfatórios ao aplicarem a técnica das componentes principais para selecionarem as variáveis mais representativas da qualidade da água de microbacias com diferentes usos do solo no sul do Espírito Santo, na qual foram selecionadas 7 das 13 variáveis analisadas, ou seja, foram selecionadas 53,85% das variáveis para comporem o IQA, valor semelhante ao encontrado no presente estudo.

Já Andrade et al. (2007a), com o objetivo de identificarem a origem dos fatores que determinavam a qualidade das águas na parte baixa da Bacia do Acaraú (Ceará, Brasil), não obtiveram resultados satisfatórios ao aplicar a análise de componentes principais para reduzir o número de variáveis, uma vez que o melhor ajuste do modelo ocorreu com a inclusão de 18 das 25 variáveis analisadas, ou seja 72% das variáveis.

A concentração das variáveis selecionadas na ACP para comporem o IQ foi transformada em valores numéricos que representassem sua qualidade (q_i). Os valores de q_i para cada variável química, variando de zero a 100, estão apresentados na Tabela 10.

Tabela 10- Valores de q_i para o efluente tratado nas rampas utilizando diferentes forrageiras e taxas de aplicação e para o efluente de fossas sépticas (EFS)

Forrageiras	Azevém			Misto			Capim Marandu			EFS
	Taxa (L h ⁻¹)	2,25	4,5	6,75	2,25	4,5	6,75	2,25	4,5	
Condutividade elétrica	77,85	82,91	78,50	77,25	83,89	80,46	79,40	84,06	78,70	61,75
Turbidez	72,05	81,92	89,06	76,25	81,24	93,19	77,48	84,35	91,78	1,43
pH	97,60	97,60	68,00	96,80	72,00	54,00	97,60	99,20	60,00	66,67
RAS	91,41	94,25	96,05	91,52	94,29	96,63	91,47	94,72	96,56	93,40
Fe total	77,87	89,20	94,00	86,80	91,20	95,20	76,67	93,60	94,20	1,28
Na	53,87	67,90	71,90	55,15	66,90	75,50	55,36	68,65	74,50	53,87
Cl	97,72	98,39	97,45	97,87	98,47	97,48	98,09	98,56	97,40	96,47
Dureza	56,00	45,15	20,13	59,74	38,76	20,06	53,27	37,26	15,02	1,57
Bicarbonato	94,23	96,05	96,71	94,92	97,01	97,61	94,73	97,04	97,32	85,53
Sulfato	93,28	94,96	95,12	93,32	94,80	95,68	93,64	95,76	95,16	45,20
Fosfato	32,00	82,80	86,40	36,00	77,60	86,40	52,00	86,80	87,20	3,33
K	84,26	87,04	80,20	85,53	85,73	79,50	85,63	85,02	77,70	74,44
Ca	93,26	94,94	89,58	93,14	94,40	91,26	93,94	94,66	90,72	85,40
Mg	97,03	98,57	99,14	96,97	98,97	99,03	97,49	99,20	98,74	95,43
B	96,80	99,00	98,00	97,80	97,80	97,00	97,20	97,80	97,60	63,33
Mn	77,85	82,91	78,50	77,25	83,89	80,46	79,40	84,06	78,70	61,75

Para a maioria do efluente tratado, os valores de q_i foram menores para o sódio e dureza, o que sugere que essas foram as variáveis que mais diferenciaram uma amostra da outra, afetando de forma significativa sua qualidade, de forma a reduzi-la.

O sódio, quando presente em altas concentrações na água de irrigação, pode afetar os atributos físicos do solo, causando dispersão da argila, entupimento dos poros e redução da permeabilidade (MUYEN et al. 2011). Águas com alta dureza podem favorecer a formação de incrustações nas paredes das tubulações e emissores restringindo a passagem da água (BERNARDO et al. 2006).

Já o EFS, além dessas características, apresentou baixo q_i para a turbidez, fosfato e ferro total, demonstrando serem essas as principais características que diferenciaram os efluentes tratados do efluente de fossas sépticas. Taebi e Droste (2008), ao utilizarem a técnica do escoamento superficial para tratamento de efluentes, observaram ótima remoção de turbidez, podendo atingir valores em torno de 70%.

A depuração do efluente no sistema de tratamento por escoamento superficial dá-se à medida que este escoar na área recoberta pela vegetação e baseia-se na capacidade depuradora do sistema solo-planta, que utiliza os mecanismos físicos, químicos e biológicos de remoção dos poluentes contidos nas águas residuárias (TONETTI et al., 2012).

De acordo com Surampalli et al. (2007) essa técnica também apresenta alta eficiência na remoção de sólidos em suspensão, podendo variar de 51 a 92%, sendo essa a principal característica responsável pela alta turbidez do efluente, que se utilizado para irrigação pode causar entupimento das tubulações, reduzir a área de condução de água e queda na eficiência do sistema (AYERS e WESTCOT, 1994).

Quanto ao fósforo, sistemas de tratamento por escoamento superficial podem atingir cerca de 80% de remoção deste nutriente (SURAMPALLI et al., 2007). Segundo Tonetti et al. (2012), o principal mecanismo de remoção de fósforo envolve a adsorção, precipitação química, imobilização na forma de compostos orgânicos e absorção pela vegetação.

Um dos compostos com o qual o fósforo pode formar complexos insolúveis é o ferro, que também apresentou valores bem inferiores nos efluentes tratados, o que permite inferir que um dos processos de remoção do fósforo foi a precipitação química para formação de complexo insolúvel com o ferro (TURNER et al., 1994).

A utilização de águas para irrigação com concentrações de fósforo e ferro acima dos limites aceitáveis durante um longo período podem ocasionar distúrbios nutricionais na cultura irrigada (HANJRA et al., 2012). Além disso, altas concentrações de ferro favorecem o desenvolvimento de ferrobactérias, que podem causar maus odores e coloração à água e obstrução das canalizações, reduzindo a uniformidade de aplicação de água pelo sistema de irrigação (SILVA et al., 2011).

Os valores do peso w_i não apresentaram grande variação entre as variáveis, apenas o pH apresentou valor abaixo das demais, demonstrando ser essa a característica que menos influenciou na qualidade dos efluentes estudados. Já as outras características, por apresentarem os maiores valores de w_i , pode-se inferir que o índice apresentou alta sensibilidade à variabilidade dessas características (Tabela 11).

Andrade et al. (2005), com o objetivo de elaborar um índice de qualidade para as águas do vale Trussu, no Ceará, observaram maiores pesos (w_i) para as variáveis relacionadas à concentração salina da água e menor peso para o pH, apresentando o índice menor sensibilidade a variação dessa característica, assim como observado no presente estudo.

Tabela 11- Pesos (w_i) para as variáveis selecionadas para comporem o Índice de qualidade

Variáveis	CE	Tu	pH	RAS	Fe total	Na	Cl	Dureza
w_i	0,069	0,068	0,056	0,067	0,068	0,066	0,066	0,067
Variáveis	Bicarbonato	Fosfato	K	Ca	Mg	B	Mn	
w_i	0,070	0,069	0,065	0,068	0,066	0,066	0,069	

De posse dos valores de q_i e w_i foi possível calcular o IQ para o efluente tratado e classificá-lo de acordo com os limites para uso na irrigação apresentados na Tabela 4. De acordo com a Tabela 12, pode-se constatar que os valores de IQ para as amostras do efluente tratado variaram de 61,96 a 67,95 (classe de restrição moderada). Já o efluente de fossas sépticas apresentou valor de IQ de 21,05 (classe de restrição severa).

Os efluentes com moderada restrição devem ser utilizados para a irrigação de plantas com moderada tolerância aos sais e em solos com moderada a alta permeabilidade, sendo sugerida lixiviação moderada de sais. Já o efluente de fossas sépticas que apresentou restrição severa deve ser evitado para uso na irrigação em condições normais, sem adoção de práticas de controle dos problemas relacionados à salinidade e sodicidade.

Tabela 12- Índice de Qualidade para o efluente tratado nas rampas utilizando diferentes forrageiras e taxas de aplicação e para o efluente de fossas sépticas (EFS)

Forrageiras	Taxa (L h ⁻¹)	IQA	Classificação
Azevém	2,25	67,95	Moderada
	4,5	66,42	Moderada
	6,75	63,13	Moderada
Misto	2,25	62,7	Moderada
	4,5	66,2	Moderada
	6,75	62,16	Moderada
Capim Marandu	2,25	61,96	Moderada
	4,5	65,43	Moderada
	6,75	63,76	Moderada
EFS		21,05	Severa

Pela análise da Tabela 12, observa-se que todos os tratamentos apresentaram valores próximos de IQ sendo classificados com restrição moderada. Tal fato pode ser explicado pela composição química do efluente aplicado no sistema de tratamento e pela distribuição da chuva durante o período experimental.

De acordo com a Tabela 2, o efluente aplicado nas primeiras taxas apresentou uma qualidade inferior, principalmente para as variáveis condutividade elétrica, potássio, sódio, ferro e RAS, que apresentaram altos valores.

Portanto, era de se esperar que as amostras de efluente tratado nessas condições apresentassem qualidade inferior que as demais. Porém, de acordo com Figura 1 observa-se que as maiores precipitações ocorreram no início do experimento, período que coincide com a aplicação das primeiras taxas, e como este não era coberto, a chuva pode ter diluído o efluente, influenciando nos resultados obtidos.

Apesar de nesse estudo de qualidade ter sido utilizado efluente de fossas sépticas, resultados semelhantes foram obtidos por Meireles et al. (2010) ao avaliarem a qualidade das águas para irrigação do rio Acaraú no Ceará. Esses autores observaram que a qualidade das águas estudadas variou de baixa a

severa restrição, o que sugere que tanto água quanto efluente, se utilizados de forma inadequada, podem causar problemas ao solo e à cultura irrigada devido às suas características químicas e principalmente se conterem altos teores de sais.

Na Figura 3 apresenta-se o dendrograma referente à AAHC, no qual as amostras de efluente de fossas sépticas e tratado foram agrupadas quanto à similaridade das características de qualidade selecionadas como mais importantes na ACP. Observa-se que o ponto ótimo de corte para formação dos grupos de similaridade se encontra em 20%, pois, a partir deste, ocorre o distanciamento maior na medida de similaridade para formação dos grupos. Desta forma, definem-se dois agrupamentos distintos.

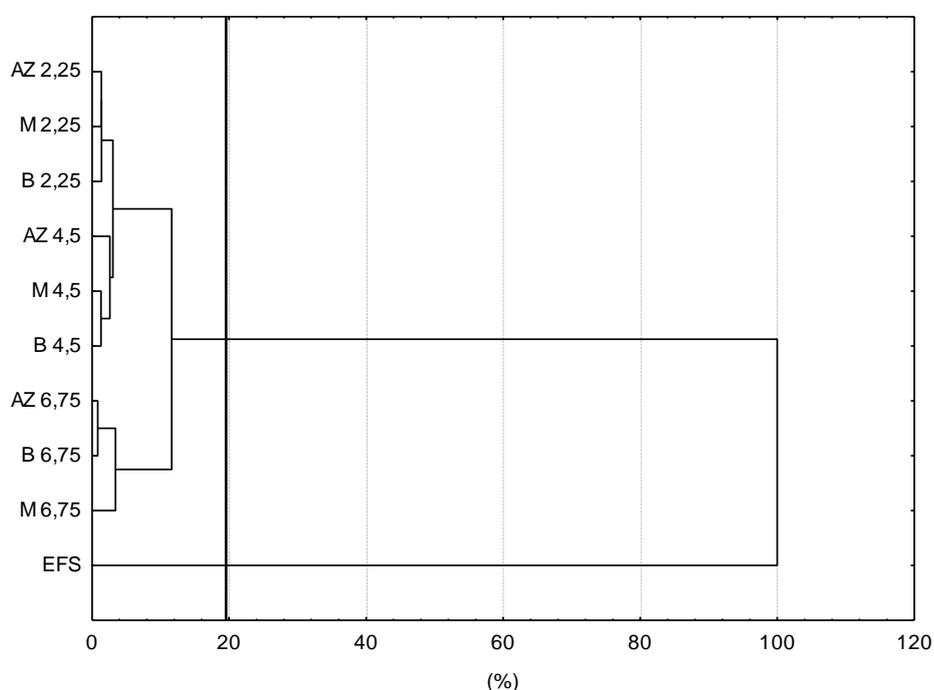


Figura 3- Dendrograma dos efluentes agrupados quanto às características de qualidade selecionadas na análise de componentes principais para comporem o Índice de Qualidade, em que: AZ = azevém, M = misto, B = *Brachiaria brizantha* cv. Marandu, 2,25; 4,5 e 6,75 = taxas de aplicação de efluente em $L h^{-1}$ e EFS = efluente de fossas sépticas.

Percebe-se que um dos grupos formados foi composto pelos efluentes tratados, nas diferentes espécies de forrageiras utilizadas (AZ, M e B) no sistema de tratamento por escoamento superficial, nas diferentes taxas de aplicação

(2,25; 4,5 e 6,75 L h⁻¹). Já o efluente de fossas sépticas ficou em um grupo sozinho, o que significa que este apresentou características distintas dos efluentes tratados.

Os resultados obtidos na análise agrupamento confirmam os resultados obtidos no índice de qualidade, que permitiu classificar os efluentes tratados de forma semelhante, em moderada restrição. Já o EFS apresentou um valor de IQ bem abaixo das amostras de efluente tratado, apresentando uma severa restrição ao uso na irrigação e por isso na análise de agrupamento formou um grupo sozinho, se ligando ao grupo dos efluentes tratados em 100%, o que demonstra a grande diferença entre o efluente de fossas sépticas e tratado.

Assim, os resultados obtidos com o IQ e com a análise de agrupamento demonstram que a técnica do escoamento superficial apresenta potencial para ser utilizada no tratamento do EFS, o qual passou de uma severa (EFS) para moderada restrição ao uso na fertirrigação (efluente tratado).

Diversos autores também constataram a eficiência da técnica do escoamento superficial para tratamento de efluentes (THAWALE et al., 2006; WEN et al., 2007; TONETTI et al., 2009; LI et al., 2014). Segundo Taebi e Droste (2008), essa eficiência pode variar com as características operacionais do sistema, tipo de efluente utilizado e condições climáticas; porém no geral, observa-se mais de 50% de remoção de poluentes, gerando ao final do tratamento um efluente menos poluente e com características melhores que aquele aplicado no início da rampa de tratamento.

4 CONCLUSÕES

Os resultados apresentados neste trabalho conduziram às seguintes conclusões:

Para o primeiro experimento:

1. As variáveis representativas da variabilidade da qualidade do efluente analisado foram: condutividade elétrica, turbidez, RAS, sódio, cloro, bicarbonato, sulfato, fosfato, potássio, boro, nitrato, dureza e magnésio;
2. O índice de qualidade para o efluente tratado apresentou alta a baixa restrição ao uso na fertirrigação nas taxas de aplicação de 2,25 e 4,5 L h⁻¹, respectivamente, e o efluente de fossas sépticas apresentou restrição severa;

3. A técnica do escoamento superficial demonstrou potencial para ser utilizada no tratamento do efluente de fossas sépticas;
4. A análise de agrupamento hierárquico de Cluster formou três grupos distintos de qualidade, que diferiram quanto à taxa de aplicação de efluente utilizada no sistema de tratamento;

Para o segundo experimento:

1. As variáveis representativas da variabilidade da qualidade do efluente analisado foram: condutividade elétrica, turbidez, ferro total, bicarbonato, fosfato, potássio, boro, manganês, pH, RAS, sódio, dureza, cálcio, magnésio e cloro;
2. O índice de qualidade para o efluente tratado apresentou moderada restrição ao uso na fertirrigação e o efluente de fossas sépticas apresentou restrição severa;
3. A técnica do escoamento superficial demonstrou potencial para ser utilizada no tratamento do efluente de fossas sépticas;
4. A análise de agrupamento hierárquico de Cluster formou dois grupos distintos de qualidade, que diferiram em efluente de fossa séptica e efluente tratado.

5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **Preservação e técnicas de amostragem de efluentes líquidos e corpos receptores**: 9898. Rio de Janeiro, 1987. 22p

ANDRADE, E. M. PALÁCIO, H. A. Q.; CRISÓSTOMO, L. A.; SOUZA, I. H.; TEIXEIRA, A. S. Índice de qualidade de água, uma proposta para o vale do rio Trussu, Ceará. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, v. 36, n. 2, p. 135-142, 2005.

ANDRADE, E. M.; ARAÚJO, L. F. P.; ROSA, M. F.; DISNEY, W.; ALVES, A. B. Seleção dos indicadores da qualidade das águas superficiais pelo emprego da análise multivariada. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 27, n.3, 2007a.

ANDRADE, E. M.; ARAÚJO, L. F. P.; ROSA, M. F.; GOMES, R. B.; LOBATO, F. A. O. Fatores determinantes da qualidade das águas superficiais na bacia do Alto

Acaraú, Ceará, Brasil. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.37, n.6, p. 1791-1797, 2007b.

ARDILA, A. N.; SALDARRIAGA, J. C. Formulación de un Índice Global de Calidad de Aguas Residuales para Riego. **Avances en Ciencias e Ingeniería**, v.4, n.3, p.11-26, 2013.

AYERS, R. S.; WESTCOT, D. W. **Water Quality for Agriculture**. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), 1994. (Serie: FAO Irrigation and Drainage Papers - 29) Disponível em <<http://www.fao.org/DOCREP/003/T0234E/T0234E00.htm#TOC>>. Acesso em: 01 mar. 2015.

BERNARDO, S.; SOARES, A. A.; MANTOVANI, E. C. **Manual de Irrigação**. Editora UFV, Viçosa, 625 p. 2006.

BERTOSSI, A. P.A.; CECÍLIO, R. A.; NEVES, M. A.; GARCIA, G. O. Qualidade da água em microbacias hidrográficas com diferentes coberturas do solo no sul do Espírito Santo. **Revista Árvore**, v.37, n.1, p.107-117, 2013a.

BERTOSSI, A. P.A.; MENEZES, J. P. C.; CECÍLIO, R. A.; GARCIA, G. O.; NEVES, M. A. Seleção e agrupamento de indicadores da qualidade de águas utilizando Estatística Multivariada. **Semina: Ciências Agrárias**, Londrina, v. 34, n. 5, p. 2025-2036, 2013b.

COSTA, D. M. A.; BARROS JÚNIOR, A. C. Avaliação da Necessidade do Reúso de Águas Residuais. **Holos**, Ano 21, p. 82, 2005.

EMBRAPA- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes**. Brasília: Embrapa Comunicação para Transferência de Tecnologia. 627p. 2009.

FERNANDES, F.B.P.; ANDRADE, E.M.; FONTENELE, S.B.; MEIRELES, A.C.M.; RIBEIRO, J.A. Análise de agrupamento como suporte à gestão qualitativa da água subterrânea no semiárido cearense. **Revista Agro@ambiente On-line**, Boa Vista, v. 4, n. 2, p. 86-95, 2010.

FLORES, J. C. Comments on the use of water quality indices to verify the impact of Cordoba City (Argentina) on Suquia River. **Water Research**, v.36, n.18, p.4664–4666, 2002.

HAIR, J.J.F.; ANDERSON, R.E.; TATHAM, R.L.; BLACK, W.C. **Análise multivariada de dados**. 5.ed. Porto Alegre: Bookman, 2005. 593 p.

HANJRA, M. A.; BLACKWELL, J.; CARR, G.; ZHANG, F.; JACKSON, T. M. Wastewater irrigation and environmental health: Implications for water governance and public policy. **International Journal of Hygiene and Environmental Health**, v. 215, p. 255-269, 2012.

HURLEY, T.; SADIQ, R.; MAZUMDER, A. Adaptation and evaluation of the Canadian Council of Ministers of the Environment Water Quality Index (CCME WQI) for use as an effective tool to characterize drinking source water quality. **Water Research**, v. 46, p. 3544-3552, 2012.

LI, H.; LI, Y.; XU, X.; WANG, P.; ZHOU, Y. Effects of intermitente operation mode on nitrogen removal by na Overland flow system: A pilot study. **Ecological Engineering**, v. 69, p. 192-195, 2014.

LOURES, A. P. S.; SOARES, A. A.; MATOS, A. T.; CECON, P. R. PEREIRA, O. G. Remoção de fósforo em sistema de tratamento de esgoto doméstico, por escoamento superficial. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.10, n.3, p.706–714, 2006.

MEIRELES, A. C. M.; ANDRADE, E. M.; CHAVES, L. C. G.; FRISCHKORN, H.; CRISOSTOMO, L. A. A new proposal of the classification of irrigation water. **Revista Ciência Agronômica**, v.41, n.3, p.349-357, 2010.

MOURA, L. H. A.; BOAVENTURA, G. R.; PINELLI, M. P. A qualidade de água como indicador de uso e ocupação do solo: Bacia do Gama – Distrito Federal. **Química Nova**, v.33, n. 1, p. 97-103, 2010.

MUYEN, Z.; MOORE, G. A.; WRIGLEY, R. J. Soil salinity and sodicity effects of wastewater irrigation in South East Australia. **Agricultural Water Management**, v. 99, p. 33-41, 2011.

PALÁCIO, H. A. Q.; ARAÚJO NETO, J. R.; MEIRELES, A. C. M.; ANDRADE, E. M.; SANTOS, J. C. N.; CHAVES, L. C. G. Similaridade e fatores determinantes na salinidade das águas superficiais do Ceará, por técnicas multivariadas. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 15, n. 4, p. 395-402, 2011.

PINTO, M. C. K.; CRUZ, R. L.; FRIGO, E. P.; FRIGO, M. S.; HERMES, E. Contaminação das águas subterrâneas por nitrogênio devido à irrigação com efluente do tratamento de esgoto. **Irriga**, Botucatu, v. 18, n. 2, p. 270-281, 2013.

SILVA, I. N.; FONTES, L. O.; TAVELLA, L. B.; OLIVEIRA, J. B.; OLIVEIRA, A. C. Qualidade de água na irrigação. **Agropecuária Científica no Semi-Árido**, v. 7, n. 3, P. 1-15, 2011.

SILVA, S.A.; OLIVEIRA, R. **Manual de análises físico-química de águas de abastecimento e residuárias**. Marcone: Capina Grande, 2001, 266p.

SBCS - SOCIEDADE BRASILEIRA DE CIÊNCIAS DO SOLO - RS/SC. **Manual de adubação e de calagem para os Estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina**. Porto Alegre, 2004. 394p.

SURAMPALLI, R. Y.; BANEJI, S. K.; TYAGI, R. D.; YANG, P. Y. Integrated advanced natural wastewater treatment system for small communities. **Water Science & Technology**, v. 55, n. 11, p. 239-243, 2007.

TAEBI, A.; DROSTE, R. L. Performance of an overland flow system for advanced treatment of wastewater plant effluent. **Journal of Environmental Management**, v. 88, p.688–696, 2008.

THAWALE, P. R.; JUWARKAR, A. A.; SINGH, S. K. Resource conservation through land treatment of municipal wastewater. **Current Science**, v.90, n.5, p.704-711, 2006.

TONETTI, A. L.; CERQUEIRA, R. S.; COURACCI FILHO, B.; VON SPERLING, M.; FIGUEIREDO, R. F. Tratamento de esgotos de pequenas comunidades pelo método do escoamento superficial no solo. **Teoria e Prática na Engenharia Civil**, n.13, p.69-79, 2009.

TONETTI, A. L.; COURACCI FILHO, B.; STEFANUTTI, R. Pós-tratamento de efluente de filtros anaeróbios operados com baixo tempo de detenção hidráulica por escoamento superficial no solo. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v.17, n.1, p. 7-12, 2012.

TURNER, G.; CRAWFORD, D.; WATTS, R. J. ZIRSCHKY, Z. H. Phosphorus removal from secondary-treated wastewater using overland flow. **Water, Air, and Soil Pollution**, v.73, p.157-167, 1994.

WANDA, E. M. M., GULULA, L. C., PHIRI, G. Determination of characteristics and drinking water quality index in Mzuzu City, Norther Malawi. **Physics and Cheemistry Earth**. v.50, n.52, p.92-97, 2012.

WEN, C. G.; CHEN, T. H.; HSU, F. H.; LU, C. H.; LIN, J. B.; CHANG, C. H. CHANG, S. P.; LEE, C. S. A high loading overland flow system: Impacts on soil characteristics, grass constituents, yields and nutrient removal. **Chemosphere**, v. 67, p. 1588–1600, 2007.

ZAMBERLAM, J. F.; ROBAINA, A. D.; PEITER, M. X.; FERRAZ, F. C.; PINTO, L. M. Índices sazonais de qualidade da água de irrigação via análise multivariada na região central do Rio Grande do Sul. **Irriga**, v. 18, n. 3, p. 376-386, 2013.

CAPÍTULO II - ATRIBUTOS QUÍMICOS DO SOLO EM RAMPAS DE TRATAMENTO DE EFLUENTE DE FOSSAS SÉPTICAS POR ESCOAMENTO SUPERFICIAL

RESUMO

Com o objetivo de avaliar os atributos químicos do solo em rampas de tratamento de efluente de fossas sépticas aplicando a técnica do escoamento superficial foram realizados dois experimentos. O primeiro experimento foi montado no esquema de parcela sub-subdividida 3x3x2, sendo nas parcelas forrageiras em três níveis (azevém, aveia preta e centeio), nas subparcelas seções da rampa de tratamento em três níveis (seção superior, seção intermediária e seção inferior) e nas sub-subparcelas taxas de aplicação em dois níveis (2,25 e 4,5 L h⁻¹), em um delineamento inteiramente casualizado com cinco repetições. O segundo experimento foi montado no esquema de parcela sub-subdividida 3x3x3, sendo nas parcelas forrageiras em três níveis (azevém, capim Marandu e um sistema misto composto pelas duas espécies), nas subparcelas seções da rampa de tratamento em três níveis (seção superior, seção intermediária e seção inferior) e nas sub-subparcelas taxas de aplicação em três níveis (2,25, 4,5 e 6,75 L h⁻¹), em um delineamento inteiramente casualizado com cinco repetições. Transcorridos 28 dias de aplicação do efluente de fossas sépticas para cada taxa, foram coletadas amostras de solo a 0,10 m de profundidade em cada seção das rampas de tratamento para análise química. No primeiro experimento, o solo apresentou maior teor de fósforo, sódio, cálcio, magnésio e pH na maior taxa de aplicação e na seção superior das rampas de tratamento e maior teor de potássio na menor taxa. Já no segundo experimento, o solo das rampas de tratamento apresentou maior teor de fósforo, cálcio, magnésio e pH nas maiores taxas de aplicação e maior teor de potássio e sódio na menor taxa de aplicação. A aplicação de efluente de fossas sépticas proporcionou maior teor de fósforo, sódio e cálcio na seção superior das rampas de tratamento e maior teor de potássio na seção inferior das rampas de tratamento.

Palavras-chave: Esgoto doméstico, forrageiras, reuso.

1 INTRODUÇÃO

A água é um bem indispensável à vida, entretanto os dejetos gerados após o seu uso podem causar sérios prejuízos ao meio ambiente e à saúde humana quando não tratados ou dispostos em locais inadequados. Diante disso, o tratamento adequado e o reuso desse efluente na agricultura surgem como uma alternativa viável de reaproveitamento de água, nutrientes e matéria orgânica.

O tratamento de esgoto doméstico por disposição no solo tem se apresentado como importante alternativa de tratamento e aproveitamento de nutrientes desses efluentes (CANDELA et al., 2007). Dentre os métodos utilizados, destaca-se o escoamento superficial, no qual o efluente é aplicado na parte superior de uma rampa vegetada, ficando sujeito ao escoamento superficial, condição que possibilita sua depuração ao longo da rampa de tratamento.

A disposição de águas residuárias no solo se baseia na capacidade depuradora do sistema solo-planta, que utiliza mecanismos físicos, químicos e biológicos de remoção dos poluentes contidos nessas águas (ERTHAL et al., 2010).

O solo, considerado um sistema disperso, polifásico e heterogêneo, possui propriedades que possibilitam sua utilização como meio de tratamento de águas residuárias. Esse filtro natural constituído pela matriz solo com suas propriedades de adsorção química e física, aliado a atividade de plantas e microrganismos, atua como depurador de águas residuárias por meio da interceptação dos sólidos em suspensão, remoção de nutrientes, além da oxidação do material orgânico promovido por bactérias, que se estabelecem no colo das plantas e no próprio solo (QUEIROZ et al., 2004).

Duarte et al. (2008), ao avaliarem os efeitos da disposição do efluente doméstico tratado sobre algumas características do solo, concluíram que a água residuária utilizada favoreceu a mineralização da matéria orgânica e não provocou alterações significativas no pH, nem nos teores de fósforo e potássio do solo. Assim como observado por Matos et al. (2005a) ao avaliarem a alteração dos atributos químicos no solo de rampas utilizadas no tratamento de águas residuárias.

No entanto, segundo Silva et al. (2011) é recomendável um monitoramento periódico das características químicas e físicas do solo para que se avaliem os riscos de contaminação ambiental em aplicações de longo prazo.

Dessa forma, objetivou-se com esse trabalho avaliar os atributos químicos do solo em rampas de tratamento de efluente de fossas sépticas utilizando a técnica do escoamento superficial.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Caracterização e delineamento experimental

Os experimentos foram conduzidos na área experimental do Centro de Ciências Agrárias da Universidade Federal do Espírito Santo em Alegre/ES, com características conforme descritas no capítulo I.

Foram realizados dois experimentos. O primeiro experimento foi montado no esquema de parcela sub-subdividida 3x3x2. Sendo nas parcelas forrageiras em três níveis: azevém (*Lolium multiflorum*), aveia preta (*Avena strigosa*) e centeio (*Secale cereale*); nas subparcelas seções da rampa de tratamento em três níveis: seção superior, seção intermediária e seção inferior; e nas sub-subparcelas taxas de aplicação em dois níveis: 2,25 e 4,5 L h⁻¹ de efluente por rampa de tratamento, em um delineamento inteiramente casualizado com cinco repetições.

O segundo experimento foi montado no esquema de parcela sub-subdividida 3x3x3. Sendo nas parcelas forrageiras em três níveis: azevém (*Lolium multiflorum*), capim Marandu (*Brachiaria brizantha* cv. Marandu) e um sistema misto composto pelas duas espécies; nas subparcelas seções da rampa de tratamento em três níveis: seção superior, seção intermediária e seção inferior; e nas sub-subparcelas taxas de aplicação em três níveis: 2,25, 4,5 e 6,75 L h⁻¹ de efluente por rampa de tratamento, em um delineamento inteiramente casualizado com cinco repetições.

Nos dois experimentos, cada taxa de efluente corresponde a uma diferente vazão; as taxas foram aplicadas no tempo, em ordem crescente, por um período de 28 dias cada, ou seja, ao término da aplicação de uma taxa, iniciou-se a aplicação da taxa subsequente nas mesmas unidades experimentais.

2.2 Condução dos experimentos

Os experimentos foram conduzidos conforme apresentado no capítulo I.

2.3 Coleta e análise do solo

Transcorridos os 28 dias de aplicação do efluente de fossas sépticas, para cada taxa foi feito o corte do material vegetal a 5,0 cm da superfície e coletadas amostras de solo a 0,10 m de profundidade. A área útil de coleta de solo de cada rampa de tratamento foi dividida em três seções de 0,25 m² cada (seção superior, intermediária e inferior), que foram demarcadas com o auxílio de um quadro de madeira de 0,5 x 0,5 m, sendo coletadas quatro amostras aleatórias em cada uma das seções para formação de uma amostra composta e representativa da área amostrada.

O solo coletado foi encaminhado ao laboratório para determinação do pH, teores de fósforo, potássio, sódio, cálcio e magnésio conforme metodologia proposta pela EMBRAPA (2009).

Os resultados obtidos foram submetidos à análise de variância ($\alpha \leq 0,05$) e quando significativo foi aplicado o teste Tukey para $\alpha \leq 0,05$, seguindo o procedimento descrito por Banzato e Kronka (2008).

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Primeiro experimento

De acordo com os resultados da análise de variância (Anexos A e B), as variáveis fósforo e potássio apresentaram interação significativa entre os fatores forrageira x seção x taxa ($\alpha \leq 0,05$). Houve interação significativa ($\alpha \leq 0,05$) entre forrageira x taxa de aplicação para as variáveis: pH, sódio, cálcio e magnésio. Para a variável sódio houve interação significativa entre taxa x seção ($\alpha \leq 0,05$) e houve efeito significativo para a interação forrageira x seção ($\alpha \leq 0,05$) para a variável pH. Para as variáveis cálcio e magnésio houve efeito significativo para o fator seção ($\alpha \leq 0,05$).

No desdobramento da interação tripla (forrageira x seção x taxa), estudando o teor de fósforo no solo em função das seções e das taxas para cada forrageira apresentado na Tabela 1, verifica-se que o teor de fósforo no solo das rampas de tratamento cultivado com azevém em todas as seções avaliadas não

apresentou diferença significativa entre as taxas de efluente de fossas sépticas aplicadas. Para a aveia preta houve diferença significativa entre as taxas na seção superior, em que a taxa de 4,5 L h⁻¹ diferiu significativamente da taxa 2,25 L h⁻¹, apresentando maior teor de fósforo. Já para o centeio houve diferença significativa entre as taxas nas seções superior e intermediária, que também apresentou maior teor de fósforo na taxa de 4,5 L h⁻¹.

Tabela 1- Teor de fósforo no solo (mg dm⁻³) em função das seções e das taxas avaliadas em cada forrageira, em que: sup= seção superior, int= seção intermediária e inf= seção inferior

Forrageiras	Azevém			Aveia preta			Centeio			
	Seção	Sup.	Int.	Inf.	Sup.	Int.	Inf.	Sup.	Int.	Inf.
Taxa	2,25	5,32 Aa	4,7 Aa	2,96 Aa	5,14 Ba	7,06 Aa	5,66 Aa	5,3 Ba	5,4 Ba	5,8 Aa
(L h ⁻¹)	4,5	3,7 Aa	2,8 Aa	3,2 Aa	9,6 Aa	8,2Aa	5,6 Ab	9,78 Aa	10,3 Aa	4,24 Ab

Médias seguidas pela mesma letra maiúscula na coluna e minúscula em linha não diferem entre si, ao nível de 5% de probabilidade pelo teste Tukey.

Segundo Taebi e Droste (2008) taxas de aplicação maiores proporcionam menor remoção dos nutrientes e conseqüente acúmulo no solo. Com o aumento da taxa, o tempo de detenção do esgoto no solo e no filme biológico diminui, gerando menos tempo para os processos de sedimentação dos sólidos e oxidação da matéria orgânica. Outro fator é que essas taxas implicam níveis de saturação do solo mais elevados e a umidade excessiva nas camadas mais superficiais limita e desequilibra a atividade biológica, por dificultar a aeração do solo.

Ao avaliar o teor de fósforo entre as seções, nota-se que o solo sob azevém nas duas taxas avaliadas não apresentou diferença significativa entre as seções das rampas de tratamento, assim como o solo sob aveia preta e centeio na taxa de 2,25 L h⁻¹, porém, na taxa de 4,5 L h⁻¹, o teor de fósforo do solo sob essas duas forrageiras diferiram significativamente, sendo observado menor teor na seção inferior das rampas de tratamento (Tabela 1).

O fósforo é um elemento pouco móvel no solo, portanto é esperado obter menor teor desse nutriente na seção inferior das rampas de tratamento como observado na Tabela 1. Fonseca et al. (2007) afirmam que o aporte de fósforo para o solo, em razão da aplicação via águas residuárias, normalmente é baixo,

sendo observados maiores valores desse nutriente nas camadas superficiais do solo, o que condiz com os resultados obtidos nessa pesquisa (QUEIROZ et al., 2004; MEDEIROS et al., 2005).

Além disso, Loures et al. (2006), ao avaliarem a remoção de fósforo em sistemas de tratamento de esgoto doméstico por escoamento superficial cultivado com capim coastcross (*Cynodon dactylon*), observaram uma tendência da eficiência de remoção de fósforo pelas plantas em aumentar com o comprimento da rampa de escoamento; dessa forma, uma maior absorção desse nutriente pelas plantas nas seções inferiores da rampa acarretaria em uma menor concentração no solo.

Na Tabela 2, estudando o teor de fósforo no solo em função das forrageiras e das taxas para cada seção, observa-se que nas seções superior e intermediária das rampas de tratamento, na taxa de 2,25 L h⁻¹, não houve diferença significativa entre as forrageiras; porém na taxa de 4,5 L h⁻¹, nessas mesmas seções, o solo cultivado com centeio e aveia preta diferiram significativamente do azevém, não diferindo entre si. Já na seção inferior não houve diferença significativa entre as forrageiras nas duas taxas de aplicação de efluente de fossas sépticas avaliadas.

Tabela 2- Teor de fósforo no solo (mg dm⁻³) em função das forrageiras e das taxas avaliadas em cada seção das rampas de tratamento

Seção	Superior		Intermediária		Inferior	
	Taxa (L h ⁻¹)		Taxa (L h ⁻¹)		Taxa (L h ⁻¹)	
	2,25	4,5	2,25	4,5	2,25	4,5
Azevém	5,32 A	3,7 B	4,7 A	2,8 B	2,96 A	3,2 A
FORAGEIRAS						
Aveia preta	5,14 A	9,6 A	7,06 A	8,2 A	5,66 A	5,6 A
Centeio	5,3 A	9,78 A	5,4 A	10,3 A	5,8 A	4,24 A

Médias seguidas pela mesma letra maiúscula em coluna não diferem entre si, ao nível de 5% de probabilidade pelo teste Tukey.

O principal mecanismo de remoção de fósforo no sistema de escoamento superficial ocorre devido aos mecanismos de adsorção, precipitação química, imobilização na forma de compostos orgânicos e principalmente remoção pela vegetação (TONETTI et al., 2012; TURNER et al., 1994). De acordo com Wen et al. (2007) espécies de plantas diferentes apresentam remoção de nutrientes variados, o que pode ter influenciado nos resultados obtidos na Tabela 2 .

No desdobramento da interação tripla, estudando o teor de potássio no solo em função das seções e das taxas para cada forrageira apresentado na Tabela 3, verifica-se que o solo cultivado com azevém, aveia preta e centeio apresentou diferença significativa entre as taxas nas seções intermediária e inferior, sendo observado maior teor de potássio na taxa de 2,25 L h⁻¹. Já na seção superior as taxas de aplicação não apresentaram diferença significativa entre si.

Tabela 3- Teor de potássio no solo (mg dm⁻³) em função das seções e das taxas avaliadas em cada forrageira em que: sup= seção superior, int= seção intermediária e inf= seção inferior

Forrageiras	Azevém			Aveia preta			Centeio			
	Seção	Sup.	Int.	Inf.	Sup.	Int.	Inf.	Sup.	Int.	Inf.
Taxa	2,25	56,6 Ac	68,4 Ab	90,4 Aa	52,8 Ac	70,4 Ab	85,2 Aa	63,2 Ac	75,6 Ab	90,2 Aa
(L h ⁻¹)	4,5	58,0 Aa	58,4 Ba	54,0 Ba	56,2 Aa	57,6 Ba	57,0 Ba	59,8 Aa	62,2 Ba	60,5 Ba

Médias seguidas pela mesma letra maiúscula na coluna e minúscula em linha não diferem entre si, ao nível de 5% de probabilidade pelo teste Tukey.

O teor de potássio no efluente de fossas sépticas utilizado neste estudo pode ser considerado alto, pois segundo a Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura (FAO, 1992) a concentração desse elemento nesse tipo de efluente pode variar de 1 a 25 mg L⁻¹, dependendo das condições locais. Na Tabela 2 do capítulo I pode-se observar maior valor de potássio (52 mg L⁻¹) no efluente aplicado na primeira taxa (2,25 L h⁻¹), por isso maior valor desse elemento no solo analisado após a aplicação dessa taxa.

No entanto, era de se esperar que houvesse o acúmulo desse nutriente no solo com as sucessivas aplicações de efluente, mesmo que contendo teores menores de potássio, porém este é um íon móvel no solo e com o tempo pode ter sido lixiviado junto com o efluente que escoava sobre a rampa. Além disso, observou-se maior precipitação no período que coincide com aplicação da taxa de 4,5 L h⁻¹, o que também pode ter favorecido a lixiviação desse nutriente no solo (Figura 1 do capítulo I)

Dessa forma, é esperado obter maior teor desse elemento nas seções inferiores das rampas de tratamento, como observado no solo das rampas de tratamento cultivado com azevém, aveia preta e centeio, na taxa de 2,25 L h⁻¹, que apresentaram maior teor de potássio nessa seção. Já na taxa de 4,5 L h⁻¹

não foi observada diferença significativa entre as seções das rampas de tratamento para as três forrageiras avaliadas (Tabela 3).

Na Tabela 4, observa-se que não houve diferença significativa entre as forrageiras nas três seções das rampas de tratamento para as duas taxas de aplicação de efluente de fossas sépticas avaliadas.

Tabela 4- Teor de potássio no solo (mg dm^{-3}) em função das forrageiras e das taxas avaliadas em cada seção das rampas de tratamento

Seção	Superior		Intermediária		Inferior	
Taxa (L h^{-1})	2,25	4,5	2,25	4,5	2,25	4,5
Azevém	56,6 A	58,0 A	68,4 A	58,4 A	90,4 A	54,0 A
Forageiras Aveia preta	52,8 A	56,2 A	70,4 A	57,6 A	85,2 A	57,0 A
Centeio	63,2 A	59,8 A	75,6 A	62,2 A	90,2 A	60,5 A

Médias seguidas pela mesma letra maiúscula em coluna não diferem entre si, ao nível de 5% de probabilidade pelo teste Tukey.

No desdobramento da interação forrageira x taxa apresentado na Tabela 5, observa-se que o solo das rampas cultivadas com azevém e aveia preta apresentaram maior valor de pH na taxa de $4,5 \text{ L h}^{-1}$, já o solo sob centeio não apresentou diferença significativa entre as duas taxas avaliadas.

Tabela 5- Valor de pH do solo em função das forrageiras e das taxas de efluente de fossas sépticas aplicadas

Taxa (L h^{-1})	Forrageiras		
	Azevém	Aveia preta	Centeio
2,25	5,0 Ba	4,9 Ba	5,3 Aa
4,5	5,7 Aa	5,5 Aa	5,6 Aa

Médias seguidas pela mesma letra maiúscula na coluna e minúscula em linha não diferem entre si, ao nível de 5% de probabilidade pelo teste Tukey.

O aumento de pH observado com a aplicação da taxa de $4,5 \text{ L h}^{-1}$ pode ser atribuído ao alto valor de pH do efluente, que de acordo com a Tabela 2 do capítulo I variou de 7,5 a 8. Além disso, pode estar relacionado com maior aporte de cátions trocáveis e ânions nessa taxa, já que foi aplicado um maior volume de efluente (ERTHAL et al., 2010)

Segundo Cassol et al. (2011) a magnitude do efeito de resíduos orgânicos em componentes da acidez do solo, além dos fatores citados anteriormente,

depende do poder tampão do solo tratado e da dose aplicada, sendo, geralmente, necessárias doses maiores e repetidas para serem observadas mudanças significativas, o que também justifica o aumento do pH na taxa de 4,5 L h⁻¹, já que esta foi aplicada subsequente à primeira taxa.

Além disso, na menor taxa aplicada (2,25 L h⁻¹) tem-se um menor umedecimento do solo, o que possibilita uma maior mineralização dos compostos orgânicos pelos microrganismos aeróbios presentes, fazendo com que haja liberação de H⁺ e consequente redução do pH do solo (WEN et al., 2007).

Ao avaliar as forrageiras em cada taxa, observa-se que não houve diferença significativa entre o valor do pH medido no solo cultivado com as três forrageiras nas duas taxas de aplicação (Tabela 5), como observado por Duarte et al. (2008) ao estudarem o efeito da aplicação de efluente tratado no solo. Segundo Rodrigues et al. (2009) o pH das águas residuárias normalmente não afeta significativamente o pH do solo, devido ao seu poder tampão, alguma diferença pode ser observada ao longo do tempo.

No desdobramento da interação forrageira x seção apresentado na Tabela 6, observa-se maior valor de pH no solo das seções superiores das rampas de tratamento para todas as forrageiras avaliadas, que não diferiram entre si. Esse aumento também pode estar relacionado com o aumento dos cátions trocáveis, como cálcio, magnésio e sódio na seção superior das rampas de tratamento, conforme descrito nas Tabelas 7 e 8. De acordo com Erthal et al. (2010) essa é umas das principais causas de aumento do pH do solo ao se utilizar resíduos orgânicos, como o efluente doméstico e de fossas sépticas.

Tabela 6- Valor de pH do solo em função das forrageiras e das seções das rampas de tratamento

Seção	Forrageiras		
	Azevém	Aveia preta	Centeio
Superior	5,59 Aa	5,46 Aa	6,25 Aa
Intermediária	5,07 Ba	4,84 Ba	4,95 Ba
Inferior	5,03 Ba	5,04 Ba	5,20 Ba

Médias seguidas pela mesma letra maiúscula na coluna e minúscula em linha não diferem entre si, ao nível de 5% de probabilidade pelo teste Tukey.

No desdobramento da interação forrageira x taxa apresentado na Tabela 7 e seção x taxa apresentado na Tabela 8, observa-se diferença significativa entre as taxas de aplicação para todas as forrageiras avaliadas nas três seções das rampas de tratamento, sendo encontrados valores de sódio no solo apenas na taxa de 4,5 L h⁻¹. Para essa mesma taxa, observou-se que a seção superior das rampas de tratamento apresentou diferença significativa entre as demais seções, que não diferiram entre si, assim como todas as seções na taxa de 2,25 L h⁻¹ (Tabela 8).

Tabela 7- Teor de sódio (mg dm⁻³) no solo em função das forrageiras e das taxas de efluente de fossas sépticas aplicadas

Taxa (L h ⁻¹)	Forrageiras		
	Azevém	Aveia preta	Centeio
2,25	0,0 Ba	0,0 Ba	0,0 Ba
4,5	28,6 Aa	27,4 Aa	30,53 Aa

Médias seguidas pela mesma letra maiúscula na coluna e minúscula em linha não diferem entre si, ao nível de 5% de probabilidade pelo teste Tukey.

Tabela 8- Teor de sódio no solo (mg dm⁻³) em função das taxas de efluente de fossas sépticas aplicadas e das seções das rampas de tratamento

Taxa (L h ⁻¹)	Seção		
	Superior	Intermediária	Inferior
2,25	0,0 Ba	0,0 Ba	0,0 Ba
4,5	35,66 Aa	22,4 Ab	21,73 Ab

Médias seguidas pela mesma letra maiúscula na coluna e minúscula em linha não diferem entre si, ao nível de 5% de probabilidade pelo teste Tukey.

De acordo com Erthal et al. (2010) as concentrações de sódio no solo normalmente são elevadas após a aplicação de águas residuárias, principalmente nas camadas superficiais, como observado no presente estudo. Além disso, a utilização de uma taxa maior (4,5 L h⁻¹) pode ter proporcionado um maior aporte desse nutriente, levando a um acúmulo no solo, que muitas vezes pode ser prejudicial.

Segundo Ayers e Westcot (1999) valores de sódio na água de irrigação/efluente acima de 3 meq L⁻¹ podem causar sérios danos ao solo, devido ao efeito dispersante desse íon, que afeta a estrutura do solo causando obstrução do espaço poroso e redução da infiltração de água no solo.

No desdobramento da interação forrageira x taxa apresentado na Tabela 9, observa-se diferença significativa entre as taxas apenas no solo cultivado com azevém e diferença significativa entre as forrageiras apenas na taxa de 4,5 L h⁻¹, em que o azevém diferiu significativamente das demais forrageiras, que não diferiram entre si.

Segundo Erthal et al. (2010) o acúmulo verificado pode ser explicado pelo maior aporte desse nutriente propiciado pelo aumento da taxa de aplicação da água residuária, já que foi aplicada uma maior quantidade de efluente na taxa de 4,5 L h⁻¹ e também pela análise química do efluente, o qual apresentou maior teor de cálcio na amostra referente a taxa de 4,5 L h⁻¹ (Tabela 2 do capítulo I).

Tabela 9- Teor de cálcio no solo (cmol_c dm⁻³) em função das forrageiras e das taxas de efluente de fossas sépticas aplicadas

Taxa (L h ⁻¹)	Forrageiras		
	Azevém	Aveia preta	Centeio
2,25	1,36 Ba	1,33 Aa	1,26 Aa
4,5	1,75 Aa	1,23 Ab	1,16 Ab

Médias seguidas pela mesma letra maiúscula na coluna e minúscula em linha não diferem entre si, ao nível de 5% de probabilidade pelo teste Tukey.

Diferentemente do cálcio, os teores de magnésio medidos no solo das rampas de tratamento não apresentaram diferença significativa entre si no desdobramento da interação forrageira x taxa apresentado na Tabela 10. Porém, ao avaliar os teores de cálcio e magnésio entre as seções apresentados na Tabela 11, observa-se diferença significativa entre as seções das rampas de tratamento, em que a seção superior diferiu das demais seções, que não diferiram entre si, o que também foi observado por Erthal et al. (2010) ao avaliarem as alterações físicas e químicas de um Argissolo após a aplicação de água residuária de bovinocultura.

Tabela 10- Teor de magnésio no solo ($\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$) em função das forrageiras e das taxas de efluente de fossas sépticas aplicadas

Taxa (L h^{-1})	Forrageiras		
	Azevém	Aveia preta	Centeio
2,25	0,46 Aa	0,39 Aa	0,42 Aa
4,5	0,39 Aa	0,45 Aa	0,51 Aa

Médias seguidas pela mesma letra maiúscula na coluna e minúscula em linha não diferem entre si, ao nível de 5% de probabilidade pelo teste Tukey.

Tabela 11- Atributos químicos do solo em função das seções das rampas de tratamento

Seção	Atributos Químicos	
	Ca	Mg
	($\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$)	($\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$)
Superior	1,45 A	0,51 A
Intermediária	1,22 B	0,36 B
Inferior	1,22 B	0,34 B

Médias seguidas pela mesma letra maiúscula em coluna não diferem entre si, ao nível de 5% de probabilidade pelo teste Tukey.

3.2 Segundo experimento

De acordo com os resultados da análise de variância (Anexos C e D), as variáveis pH, P, K e Na apresentaram interação significativa entre os fatores forrageira x seção x taxa ($\alpha \leq 0,05$). Houve interação significativa ($\alpha \leq 0,05$) entre forrageira x taxa de aplicação para as variáveis Ca e Mg e houve interação significativa ($\alpha \leq 0,05$) entre taxa de aplicação x seção para o Ca.

No desdobramento da interação tripla apresentado na Tabela 11 verifica-se que o valor de pH no solo das rampas de tratamento apresentou diferença significativa entre a taxa de $6,75 \text{ L h}^{-1}$ e as demais taxas de aplicação que não diferiram entre si nas três seções avaliadas para o azevém e na seção intermediária para o cultivo misto. Já o valor de pH no solo das rampas cultivadas com capim marandu nas três seções avaliadas e com o cultivo misto nas seções superior e inferior apresentou diferença significativa entre a taxa de $2,25 \text{ L h}^{-1}$ e as demais, que não diferiram estatisticamente entre si.

Ao avaliar o valor de pH entre as seções das rampas de tratamento, nota-se que não houve diferença significativa em nenhuma das taxas aplicadas, assim como entre as forrageiras (Tabela 12).

Tabela 11- Valor de pH no solo em função das seções e das taxas avaliadas em cada forrageira, em que: sup= seção superior, int= seção intermediária e inf= seção inferior

Forrageiras	Azevém			Misto			Marandu			
	Seção	Sup.	Int.	Inf.	Sup.	Int.	Inf.	Sup.	Int.	Inf.
Taxa	2,25	5,18 Ba	5,10 Ba	5,16 Ba	5,22 Ba	5,1 Ba	5,18 Ba	5,26 Ba	5,12 Ba	5,24 Ba
(L h ⁻¹)	4,5	5,36 Ba	5,2 Ba	5,26 Ba	5,9 Aa	5,38 Ba	6,02 Aa	5,74 Aa	5,96 Aa	5,68 Aa
	6,75	5,94 Aa	5,76 Aa	6,16 Aa	5,8 Aa	6,02 Aa	5,8 Aa	5,6 Aa	5,62 Aa	5,48 Aa

Médias seguidas pela mesma letra maiúscula na coluna e minúscula em linha não diferem entre si, ao nível de 5% de probabilidade pelo teste Tukey.

Tabela 12- Valor de pH em função das forrageiras e das taxas avaliadas em cada seção das rampas de tratamento

Seção	Superior			Intermediária			Inferior			
	Taxa (L h ⁻¹)	2,25	4,5	6,75	2,25	4,5	6,75	2,25	4,5	6,75
Forrageiras	Azevém	5,18 A	5,36 A	5,94 A	5,1 A	5,2 A	5,76 A	5,16 A	5,26 A	6,16 A
	Misto	5,22 A	5,9 A	5,82 A	5,1 A	5,38 A	6,02 A	5,18 A	6,02 A	5,8 A
	Marandu	5,26 A	5,74 A	5,6 A	5,12 A	5,96 A	5,62 A	5,24 A	5,68 A	5,48 A

Médias seguidas pela mesma letra maiúscula em coluna não diferem entre si, ao nível de 5% de probabilidade pelo teste Tukey.

O aumento de pH observado com a aplicação das maiores taxas pode ser atribuído ao alto valor de pH do efluente, que de acordo com a Tabela 2 do capítulo I variou de 7,5 a 8. Além disso, pode estar relacionado com maior aporte de cátions trocáveis e ânions nessas taxas, já que foi aplicado um maior volume de efluente (ERTHAL et al., 2010)

De acordo com Cassol et al. (2011) a influência dos resíduos orgânicos na acidez do solo, além dos fatores citados anteriormente, depende do poder tampão do solo tratado e da dose aplicada, sendo, geralmente, necessárias altas doses aplicadas de forma repetidas para serem observadas algumas mudanças, o que também justifica o aumento do pH nas maiores taxas, já que estas foram aplicadas de forma subsequente.

Além disso, na menor taxa (2,25 L h⁻¹), por ter sido aplicada uma vazão menor de efluente, obteve-se um menor umedecimento do solo, o que pode ter possibilitado uma maior mineralização dos compostos orgânicos pelos microrganismos aeróbios presentes, fazendo com que houvesse liberação de H⁺ e consequente redução do pH do solo (WEN et al., 2007).

No desdobramento da interação tripla apresentado na Tabela 13 verifica-se que o teor de fósforo no solo das rampas de tratamento cultivado com azevém, em todas as seções avaliadas e o solo sob o cultivo misto e o capim marandu, nas seções intermediária e inferior, não apresentaram diferença significativa entre as taxas de efluente de fossas sépticas aplicadas. Na seção superior das rampas de tratamento para o cultivo misto e para o capim marandu observou-se diferença significativa entre a taxa de 6,75 L h⁻¹ e as demais, que não diferiram entre si.

Tabela 13- Teor de fósforo no solo (mg dm⁻³) em função das seções e das taxas avaliadas em cada forrageira, em que: sup= seção superior, int= seção intermediária e inf= seção inferior

Forrageiras	Azevém			Misto			Marandu			
	Seção	Sup.	Int.	Inf.	Sup.	Int.	Inf.	Sup.	Int.	Inf.
Taxa	2,25	5,72 Aa	3,68 Aa	5,34 Aa	5,96 Ba	3,88 Ab	3,34 Ab	6,18 Ba	3,82 Ab	3,84 Ab
(L h ⁻¹)	4,5	6,08 Aa	3,42 Ab	3,02 Ab	7,1 Ba	3,24 Ab	3,08 Ab	6,3 Ba	4,16 Ab	4,1 Ab
	6,75	7,46 Aa	4,08 Ab	4,42 Ab	10,24 Aa	4,84 Ab	4,46 Ab	9,36 Aa	4,62 Ab	4,86 Ab

Médias seguidas pela mesma letra maiúscula na coluna e minúscula em linha não diferem entre si, ao nível de 5% de probabilidade pelo teste Tukey.

Segundo Taebi e Droste (2008) taxas de aplicação maiores proporcionam menor remoção dos nutrientes e consequente acúmulo no solo. Com o aumento da taxa de aplicação, o tempo de detenção do esgoto no solo e no filme biológico diminui, gerando menos tempo para os processos de sedimentação dos sólidos e oxidação da matéria orgânica. Outro fator é que essas taxas implicam níveis de saturação do solo mais elevados e a umidade excessiva limita e desequilibra a atividade biológica, por dificultar a aeração do solo.

Com o aumento das taxas de aplicação uma maior quantidade de fósforo foi adicionada ao solo, além disso, a forma de aplicação dessas taxas também pode ter favorecido o acúmulo desse nutriente no solo, já que estas foram aplicadas de forma subsequente.

Ao avaliar o teor de fósforo entre as seções, nota-se que o solo sob as três forrageiras avaliadas apresentou diferença significativa entre a seção superior e as demais seções das rampas de tratamento, que não diferiram entre si nas três taxas avaliadas, exceto o azevém na taxa de 2,25 L h⁻¹ que não apresentou diferença significativa entre as seções da rampa de tratamento (Tabela 13).

O fósforo é um elemento pouco móvel no solo, portanto é esperado obter maior teor desse nutriente na seção superior das rampas de tratamento, como observado na Tabela 13. Fonseca et al. (2007) afirmam que o aporte de fósforo para o solo, em razão da aplicação via águas residuárias, normalmente é baixo, sendo observados maiores valores desse nutriente nas camadas superficiais do solo, o que condiz com os resultados obtidos nessa pesquisa (QUEIROZ et al., 2004; MEDEIROS et al., 2005).

Além disso, Loures et al. (2006), ao avaliarem a remoção de fósforo em sistemas de tratamento de esgoto doméstico por escoamento superficial cultivado com capim coastcross (*Cynodon dactylon*), observaram uma tendência da eficiência de remoção de fósforo pelas plantas em aumentar com o comprimento da rampa de escoamento; dessa forma, uma maior absorção desse nutriente pelas plantas nas seções inferiores da rampa, acarretaria em uma menor concentração no solo.

Na Tabela 14, observa-se que não houve diferença significativa entre as forrageiras nas três taxas de aplicação de efluente de fossas sépticas para as três seções das rampas de tratamento avaliadas.

Tabela 14- Teor de fósforo no solo (mg dm⁻³) em função das forrageiras e das taxas avaliadas em cada seção das rampas de tratamento

Seção	Superior			Intermediária			Inferior			
	Taxa (L h ⁻¹)	2,25	4,5	6,75	2,25	4,5	6,75	2,25	4,5	6,75
Azevém		5,72 A	6,08 A	7,46 A	3,68 A	3,42 A	4,08 A	5,34 A	3,02 A	4,42 A
Forrageiras	Misto	5,96 A	7,1 A	10,24 A	3,88 A	3,24 A	4,84 A	3,34 A	3,08 A	4,46 A
	Marandu	6,18 A	6,3 A	9,36 A	3,82 A	4,16 A	4,62 A	3,84 A	4,1 A	4,86 A

Médias seguidas pela mesma letra maiúscula em coluna não diferem entre si, ao nível de 5% de probabilidade pelo teste Tukey.

No desdobramento da interação tripla apresentado na Tabela 15 verifica-se que o solo cultivado com as diferentes forrageiras, na seção superior, apresentou

diferença significativa entre a taxa de 2,25 L h⁻¹ e as demais taxas, que não diferiram entre si. Nas seções intermediária e inferior para todas as espécies de forrageiras não foram observadas diferenças significativas entre as taxas de aplicação.

Tabela 15- Teor de potássio no solo (mg dm⁻³) em função das seções e das taxas avaliadas em cada forrageira, em que: sup= seção superior, int= seção intermediária e inf= seção inferior

Forrageiras	Azevém			Misto			Marandu			
	Seção	Sup.	Int.	Inf.	Sup.	Int.	Inf.	Sup.	Int.	Inf.
Taxa (L h ⁻¹)	2,25	72,4 Aa	66,6 Aa	71,4 Aa	51,8 Aa	47,2 Aa	58,0 Aa	63,2 Aa	53,0 Aa	73,8 Aa
	4,5	52,0 Bb	70,4 Aa	72,8 Aa	43,2 Bb	51,2 Ab	65,2 Aa	50,6 Bb	58,6 Ab	79,0 Aa
	6,75	42,0 Bb	64,8 Aa	71,6 Aa	36,2 Bc	51,8 Ab	67,8 Aa	40,4 Bb	50,4 Ab	75,4 Aa

Médias seguidas pela mesma letra maiúscula na coluna e minúscula em linha não diferem entre si, ao nível de 5% de probabilidade pelo teste Tukey.

O teor de potássio no efluente de fossas sépticas utilizado neste estudo pode ser considerado alto, pois segundo a Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura (FAO, 1992) a concentração desse elemento nesse tipo de efluente pode variar de 1 a 25 mg L⁻¹, dependendo das condições locais. Na Tabela 2 do capítulo I observa-se maior valor de potássio (46 mg L⁻¹) no efluente aplicado na primeira taxa (2,25 L h⁻¹), por isso maior valor desse elemento no solo analisado após a aplicação dessa taxa.

No entanto, era de se esperar que houvesse o acúmulo desse nutriente no solo com as sucessivas aplicações de efluente, mesmo que contendo teores menores de potássio, porém este é um íon móvel no solo e com o tempo pode ter sido lixiviado junto com o efluente que escoava sobre a rampa.

Dessa forma, é esperado obter maior teor desse elemento nas seções inferiores das rampas de tratamento, como observado no solo das rampas de tratamento para todas as forrageiras avaliadas, nas taxas de 4,5 e 6,75 L h⁻¹, que apresentaram maior teor de potássio nessa seção (Tabela 15).

Na Tabela 16, observa-se que nas seções superior e inferior das rampas de tratamento, nas taxas de 2,25 e 4,5 L h⁻¹, o teor de potássio do solo sob o cultivo misto diferiu estatisticamente das demais forrageiras, que não diferiram entre si, assim como todas as espécies de forrageiras avaliadas nessas mesmas

seções na taxa de 6,75 L h⁻¹. Já na seção intermediária, em todas as taxas de aplicação avaliadas observou-se diferença significativa entre o azevém e as demais forrageiras, que não diferiram entre si.

Tabela 16- Teor de potássio no solo (mg dm⁻³) em função das forrageiras e das taxas avaliadas em cada seção das rampas de tratamento

Seção	Superior			Intermediária			Inferior			
	Taxa (L h ⁻¹)	2,25	4,5	6,75	2,25	4,5	6,75	2,25	4,5	6,75
Azevém		72,4 A	52,0 A	42,0 A	66,6 A	70,4 A	64,8 A	71,4 A	72,8 A	71,6 A
Forrageiras	Misto	51,8 B	43,2 B	36,2 A	47,2 B	51,2 B	51,8 B	58,0 B	65,2 B	67,8 A
	Marandu	63,2 A	50,6 A	40,4 A	53,0 B	58,6 B	50,4 B	73,8 A	79,0 A	75,4 A

Médias seguidas pela mesma letra maiúscula em coluna não diferem entre si, ao nível de 5% de probabilidade pelo teste Tukey.

De acordo com Wen et al. (2007) espécies de plantas diferentes apresentam remoção de nutrientes variados, o que pode ter influenciado nos resultados obtidos na Tabela 16.

O cultivo misto foi realizado através da mistura em partes iguais das sementes das outras duas espécies de forrageiras avaliadas (azevém e capim marandu). De acordo com o resultado obtido por outros autores (QUEIROZ et al., 2004; MATOS et al., 2005b; COSTA et al., 2009), essas duas espécies podem ser consideradas boas extratoras de potássio, e quando cultivadas juntas obtiveram melhor resultado na absorção de potássio do que cultivadas separadamente.

No desdobramento da interação tripla apresentado na Tabela 17 observa-se que o teor de sódio no solo para as três forrageiras, na seção superior, apresentou diferença significativa entre a taxa de 2,25 L h⁻¹ e as demais taxas de aplicação, que não diferiram estatisticamente entre si. Nas seções intermediária e inferior as taxas de aplicação não apresentaram diferença significativa, assim como as forrageiras avaliadas (Tabela 18).

Tabela 17- Teor de sódio no solo (mg dm^{-3}) em função das seções e das taxas avaliadas em cada forrageira, em que: sup= seção superior, int= seção intermediária e inf= seção inferior

Forrageiras	Azevém			Misto			Marandu			
	Sup.	Int.	Inf.	Sup.	Int.	Inf.	Sup.	Int.	Inf.	
Taxa	2,25	5,8 Aa	2,8 Ab	2,4 Ab	6,0 Aa	2,6 Ab	2,5 Ab	5,6 Aa	2,8 Ab	2,6 Ab
(L h^{-1})	4,5	4,0 Ba	3,6 Aa	2,6 Aa	2,9 Ba	3,0 Aa	3,6 Aa	3,4 Ba	3,0 Aa	3,4 Aa
	6,75	3,8 Ba	3,2 Aa	3,0 Aa	3,6 Ba	3,4 Aa	3,0 Aa	3,8 Ba	3,2 Aa	3,2 Aa

Médias seguidas pela mesma letra maiúscula na coluna e minúscula em linha não diferem entre si, ao nível de 5% de probabilidade pelo teste Tukey.

Tabela 18- Teor de sódio no solo (mg dm^{-3}) em função das forrageiras e das taxas avaliadas em cada seção das rampas de tratamento

Seção	Superior			Intermediária			Inferior		
Taxa (L h^{-1})	2,25	4,5	6,75	2,25	4,5	6,75	2,25	4,5	6,75
Azevém	5,8 A	4,0 A	3,8 A	2,8 A	3,6 A	3,2 A	2,4 A	2,6 A	3,0 A
Misto	6,0 A	2,9 A	3,6 A	2,6 A	3,0 A	3,4 A	2,5 A	3,6 A	3,0 A
Marandu	5,6 A	3,4 A	3,8 A	2,8 A	3,0 A	3,2 A	2,6 A	3,4 A	3,2 A

Médias seguidas pela mesma letra maiúscula em coluna não diferem entre si, ao nível de 5% de probabilidade pelo teste Tukey.

De acordo com Ayers e Westcot (1999) valores de sódio na água de irrigação/efluente acima de 3 meq L^{-1} podem causar sérios danos ao solo devido ao efeito dispersante desse íon, que afeta a estrutura do solo causando obstrução do espaço poroso e redução da infiltração de água no solo.

Na Tabela 2 do capítulo I pode-se observar maior valor de sódio ($3,56 \text{ meq L}^{-1}$) no efluente aplicado na primeira taxa ($2,25 \text{ L h}^{-1}$), por isso maior valor desse elemento no solo analisado após a aplicação dessa taxa.

No entanto, era de se esperar que houvesse o acúmulo desse nutriente no solo com as sucessivas aplicações de efluente, mesmo que contendo teores menores de sódio, porém este é um íon móvel no solo e com o tempo pode ter sido lixiviado junto com o efluente que escoava sobre a rampa, já que não foi observada diferença significativa entre as seções das rampas de tratamento nas taxas subsequentes (Tabela 17).

Apenas na taxa de $2,25 \text{ L h}^{-1}$ para as três forrageiras avaliadas foi observado diferença significativa no teor de sódio do solo entre as seções das

rampas de tratamento, em que a superior apresentou maior valor desse nutriente (Tabela 17).

De acordo com Erthal et al. (2010) as concentrações de sódio no solo normalmente são elevadas após a aplicação de águas residuárias, principalmente nas camadas superficiais, como observado no presente estudo.

No desdobramento da interação forrageira x taxa apresentado na Tabela 19 para o cálcio, observa-se, para todas as espécies de forrageiras, diferença significativa entre a taxa de 2,25 L h⁻¹ e as demais, que não diferiram entre si. Já para o magnésio observa-se diferença significativa entre a taxa de 2,25 L h⁻¹ e as demais taxas apenas no solo sob azevém. Não sendo observada diferença significativa entre as forrageiras para esses dois nutrientes (cálcio e magnésio).

Tabela 19- Atributos químicos do solo em função das forrageiras e das taxas de efluente de fossas sépticas aplicadas

Taxa (L h ⁻¹)	Forrageiras					
	Azevém			Misto		
	Ca (cmol _c dm ⁻³)			Mg (cmol _c dm ⁻³)		
2,25	2,3 Ba	2,19 Ba	2,35 Ba	0,62 Ba	0,66 Aa	0,66 Aa
4,5	3,1 Aa	3,32 Aa	3,34 Aa	0,86 Aa	0,94 Aa	0,96 Aa
6,75	3,4 Aa	3,43 Aa	2,9 Aa	0,98 Aa	0,96 Aa	0,75 Aa

Médias seguidas pela mesma letra maiúscula na coluna e minúscula em linha não diferem entre si, ao nível de 5% de probabilidade pelo teste Tukey.

De acordo com Medeiros et al. (2005) o aumento do teor de cálcio e magnésio no solo após a aplicação de água residuária está relacionado com a concentração da mesma, a absorção pelas plantas e lixiviação no perfil do solo.

O acúmulo de cálcio e magnésio no solo verificado com o aumento das taxas de aplicação pode ser explicado pelo maior aporte desses nutrientes propiciado pela maior quantidade de água residuária aplicada (CONDÉ et al., 2013).

No desdobramento da interação seção x taxa apresentado na Tabela 20 para o cálcio, observa-se, para todas as seções das rampas de tratamento, diferença significativa entre a taxa de 2,25 L h⁻¹ e as demais, que não diferiram entre si. Entre as seções, observa-se diferença significativa entre a seção superior e as demais apenas na taxa de 2,25 L h⁻¹.

De acordo com a Tabela 20 percebe-se que o solo da seção superior das rampas de tratamento apresentou maior teor de cálcio, o que também foi verificado por Erthal et al. (2010) ao avaliarem as alterações físicas e químicas de um Argissolo após a aplicação de água residuária de bovinocultura.

Matos et al. (2005b), ao avaliarem as alterações em alguns atributos químicos no solo de rampas vegetadas utilizadas no tratamento por escoamento superficial de águas residuárias do beneficiamento dos frutos do cafeeiro, também observaram maior concentração de cálcio na camada superficial do solo (0 a 0,10 m), que segundo os autores pode ser explicado pela baixa mobilidade desse cátion no solo.

Tabela 20- Teor de cálcio ($\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$) no solo em função das taxas de efluente de fossas sépticas aplicadas e das seções das rampas de tratamento

Taxa (L h^{-1})	Seção		
	Superior	Intermediária	Inferior
2,25	2,56 Ba	1,98 Bb	2,09 Bb
4,5	3,2 Aa	2,92 Aa	3,04 Aa
6,75	3,22 Aa	3,28 Aa	3,02 Aa

Médias seguidas pela mesma letra maiúscula na coluna e minúscula em linha não diferem entre si, ao nível de 5% de probabilidade pelo teste Tukey.

4 CONCLUSÕES

Os resultados obtidos neste trabalho conduziram às seguintes conclusões:

Para o primeiro experimento:

1. O solo das rampas de tratamento apresentou maior teor de fósforo, sódio, cálcio, magnésio e pH na taxa de aplicação de $4,5 \text{ L h}^{-1}$ e maior teor de potássio na taxa de $2,25 \text{ L h}^{-1}$;
2. A aplicação de efluente de fossas sépticas proporcionou maior teor de fósforo, sódio, cálcio, magnésio e pH na seção superior das rampas de tratamento;
3. Observou-se diferença significativa entre as forrageiras utilizadas no sistema de tratamento apenas para os teores de fósforo e cálcio do solo.

Para o segundo experimento:

1. O solo das rampas de tratamento apresentou maior teor de fósforo, cálcio, magnésio e pH nas maiores taxas de aplicação (4,5 e/ou 6,75 L h⁻¹) e maior teor de potássio e sódio na menor taxa de aplicação (2,25 L h⁻¹).
2. A aplicação de efluente de fossas sépticas proporcionou maior teor de fósforo, sódio e cálcio na seção superior das rampas de tratamento e maior teor de potássio na seção inferior das rampas de tratamento.
3. Observou-se diferença significativa entre as forrageiras utilizadas no sistema de tratamento apenas para o teor de potássio do solo.

5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AYERS, R. S.; WESTCOT, D. W. **Water Quality for Agriculture**. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), 1999.

BANZATO, D. A.; KRONKA, S. do N. **Experimentação agrícola**. 3.ed. Jaboticabal: FUNEP, 2008.

CANDELA, L.; FABREGAT, S.; JOSA, A.; SURIOL, J.; VIGUÉS, N.; MAS, J. Assessment of soil a groundwater impacts by treated urban wastewater reuse. A case study: application in a golf course (Girona, Spain). **Science of the Total Environment**, v.374, p.26–35, 2007.

CASSOL, P.C.; SILVA, D.C.P.; ERNANI, P.R.; KLAUBERG FILHO, O.; LUCRÉCIO, W. Atributos químicos em Latossolo Vermelho fertilizado com dejetos suíno e adubo solúvel. **Revista de Ciências Agroveterinárias**, Lages, v.10, n.2, p.103-112, 2011.

CONDÉ, M. S.; ALMEIDA NETO, O. B.; HOMEM, B. G. C.; FERREIRA, I. M.; SILVA, M. D. Impacto da fertirrigação com água residuária da suinocultura em um Latossolo vermelho-amarelo. **Vértices**, v.15, n. 2, p. 161-178, 2013.

COSTA, K. A. P.; FAQUIN, V.; OLIVEIRA, I. P. de; SEVERIANO, E. C.; SIMON, G. A.; CARRIJO, M. S. Extração de nutrientes do capim-marandu sob doses e fontes de nitrogênio. **Revista brasileira de saúde e produção animal**, v.10, n.4, p.801-812, 2009.

DUARTE, A. S.; AIROLDI, R. P. S.; FOLEGATTI, M. V.; BOTREL, T. A.; SOARES, T. M. Efeitos da aplicação de efluente tratado no solo: pH, matéria orgânica, fósforo e potássio. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.12, n.3, p.302–310, 2008.

ERTHAL, V. T. J.; FERREIRA, P. A.; PEREIRA, O. G.; MATOS, A. T. Características fisiológicas, nutricionais e rendimento de forrageiras fertigadas com água residuária de bovinocultura. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.14, n.5, p.458–466, 2010

EMBRAPA- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes**. Brasília: Embrapa Comunicação para Transferência de Tecnologia. 627p. 2009.

FAO. Food and Agriculture Organization of the United Nations. **Wastewater treatment and use in agriculture**. Rome, 169 p. 1992.

FONSECA, A. F.; HERPIN, U; PAULA, A. M.; VICTORIA, R. L.; MELFI, A. J. Agricultural use of treated sewage effluents: Agronomic and environmental implications and perspectives for Brazil. **Scientia Agricola**, v. 64, n.2, p.194-209, 2007.

LOURES, A. P. S.; SOARES, A. A.; MATOS, A. T.; CECON, P. R.; PEREIRA, O. G. Remoção de fósforo em sistema de tratamento de esgoto doméstico, por escoamento superficial. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.10, n.3, p.706-714, 2006.

MATOS, A. T.; PINTO, A. B.; PEREIRA, O. G.; BARROS, F. M. Alteração de químicos no solo de rampas utilizadas no tratamento de águas residuárias. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.9, n.3, p.406-412, 2005a.

MATOS, A. T.; PINTO, A. B.; PEREIRA, O. G.; BARROS, F. M. Extração de nutrientes por forrageiras cultivadas com água residuária do beneficiamento de frutos do cafeeiro. **Ceres**, v.52, n.303, p.675-688, 2005b.

MEDEIROS, S. S.; SOARES, A. A.; FERREIRA, P. A.; MATOS, A. T.; SOUZA, J. A. A. Utilização de água residuária de origem doméstica na agricultura: Estudo das alterações químicas do solo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.9, n.4, p.603-612, 2005.

QUEIROZ, F. M.; MATOS, A. T.; PEREIRA, O. G.; OLIVEIRA, R. A. Características químicas de solo submetido ao tratamento com esterco líquido de suínos e cultivado com gramíneas forrageiras. **Ciência Rural**, v.34, n.05, p.1487-1492, 2004.

RODRIGUES, L. N.; NERY, A. R.; FERNANDES, P. D.; BELTRÃO, N. E. M. Aplicação de água residuária de esgoto doméstico e seus impactos sobre a fertilidade do solo. **Revista de Biologia e Ciências da Terra**, v. 9, n. 2, p. 55-67, 2009.

SILVA, I. N.; FONTES, L. O.; TAVELLA, L. B.; OLIVEIRA, J. B.; OLIVEIRA, A. C. Qualidade de água na irrigação. **Agropecuária Científica no Semi-Árido**, v. 7, n. 3, P. 1-15, 2011.

TAEBI, A.; DROSTE, R. L. Performance of an overland flow system for advanced treatment of wastewater plant effluent. **Journal of Environmental Management**, v. 88, p.688–696, 2008

TONETTI, A. L.; COURACCI FILHO, B.; STEFANUTTI, R. Pós-tratamento de efluente de filtros anaeróbios operados com baixo tempo de detenção hidráulica por escoamento superficial no solo. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v.17, n.1, p. 7-12, 2012.

TURNER, G.; CRAWFORD, D.; WATTS, R. J. ZIRSCHKY, Z. H. Phosphorus removal from secondary-treated wastewater using overland flow. **Water, Air, and Soil Pollution**, v.73, p.157-167, 1994.

WEN, C. G.; CHEN, T. H.; HSU, F. H.; LU, C. H.; LIN, J. B.; CHANG, C. H. CHANG, S. P.; LEE, C. S. A high loading overland flow system: Impacts on soil characteristics, grass constituents, yields and nutrient removal. **Chemosphere**, v. 67, p. 1588–1600, 2007.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

De acordo com os resultados obtidos nos experimentos realizados pode-se observar que a técnica do escoamento superficial apresenta potencial para ser utilizada no tratamento de efluente de fossas sépticas, o que atesta os benefícios dessa técnica tanto para a preservação ambiental quanto para a melhoria de vida da população.

O efluente de fossa séptica utilizado no sistema de tratamento por escoamento superficial passou de uma severa restrição a alta/baixa restrição ao uso na fertirrigação no primeiro experimento e para uma restrição moderada no segundo experimento.

O índice de qualidade proposto apresentou-se eficiente para avaliar a qualidade dos efluentes tratado e de fossas sépticas, ao invés de se estudar isoladamente cada variável.

A qualidade dos efluentes foi mais influenciada pelas taxas de aplicação do que pelas forrageiras testadas.

O aumento da taxa de aplicação de efluente de fossas sépticas nas rampas de tratamento proporcionou maior aporte de nutrientes no solo, principalmente na seção superior das rampas de tratamento.

ANEXOS

ANEXO A – Resumo da análise de variância do pH, fósforo e potássio do solo no primeiro experimento

Fonte de variação	GL	Quadrado médio		
		pH	Fósforo	Potássio
Forrageira	2	0,5318302*	294,2541*	4093,211*
Res(a)	12	0,2859444	11,34011	70,75556
Seção	2	5,977000*	222,1068*	1132,744*
Forrageira×Seção	4	0,400000*	124,3483*	1966,744*
Res(b)	24	0,1476111	4,939028	82,64722
Taxa	1	4,489000*	154,1871*	4840,000*
Forrageira×Taxa	2	0,361000*	22,25744*	184,3000 ^{ns}
Seção×Taxa	2	0,49000E-01 ^{ns}	177,7201*	401,6333*
Forrageira×Seção×Taxa	4	0,77000E-01 ^{ns}	129,9149*	277,1333*
Resíduo	36	0,6605556E-01	6,587722	92,68333
Média geral		5,35	6,9311	69,489
Coef. de variação (%)		4,804	37,031	13,854

*Significativo a 5% de probabilidade pelo Teste F; ns – não significativo.

ANEXO B – Resumo da análise de variância do sódio, cálcio e magnésio do solo no primeiro experimento

Fonte de variação	GL	Quadrado médio		
		Sódio	Cálcio	Magnésio
Forrageira	2	144,4333*	1,45778*	0,203333E-01 ^{ns}
Res(a)	12	21,82222	0,8127778E-01	0,304444E-01
Seção	2	463,2333*	0,537778*	0,1773333*
Forrageira×Seção	4	15,51667 ^{ns}	0,1096111 ^{ns}	0,9166667E-02 ^{ns}
Res(b)	24	14,79722	0,639444E-01	0,2202778E-01
Taxa	1	15920,10*	0,84444E-01 ^{ns}	0,160000E-01 ^{ns}
Forrageira×Taxa	2	144,4333*	1,053444*	0,503333E-01*
Seção×Taxa	2	463,2333*	0,401111E-01 ^{ns}	0,53333E-02 ^{ns}
Forrageira×Seção×Taxa	4	15,51667 ^{ns}	0,566111E-01 ^{ns}	0,4166667E-02 ^{ns}
Resíduo	36	17,13889	0,3938889E-01	0,5166667E-02
Média geral		13,300	1,3022	0,4400
Coef. de variação (%)		31,127	15,241	16,336

*Significativo a 5% de probabilidade pelo Teste F; ns – não significativo.

ANEXO C – Resumo da análise de variância do pH, fósforo e potássio do solo no segundo experimento

Fonte de variação	GL	Quadrado médio		
		pH	Fósforo	Potássio
FORAGEIRA	2	0,2431852 [*]	24,24800 [*]	1618,289 [*]
Res(a)	12	0,6814815E-01	1,655185	55,72593
Seção	2	0,1049630 ^{ns}	309,1849 [*]	2718,822 [*]
FORAGEIRAxSEÇÃO	4	0,8418519E-01 ^{ns}	22,35689 [*]	70,0444 ^{ns}
Res(b)	24	0,9092593E-01	1,609741	48,7593
Taxa	2	4,416963 [*]	38,22822 [*]	410,2889 [*]
FORAGEIRAxTAXA	4	1,206519 [*]	18,97322 [*]	214,5778 [*]
SeçãoxTaxa	4	0,9096296E-01 ^{ns}	22,10711 [*]	1530,511 [*]
FORAGEIRAxSEÇÃOxTAXA	8	0,1810185 [*]	6,008278 [*]	136,4333 [*]
Resíduo	72	0,7094444E-01	2,674667	49,86481
Média geral		5,52	5,46	58,4
Coef. de variação (%)		4,8181	29,904	12,092

*Significativo a 5% de probabilidade pelo Teste F; ns – não significativo.

ANEXO D – Resumo da análise de variância do sódio, cálcio e magnésio do solo no segundo experimento

Fonte de variação	GL	Quadrado médio		
		Sódio	Cálcio	Magnésio
FORAGEIRA	2	1,651852 ^{ns}	0,746930 [*]	0,106889 [*]
Res(a)	12	2,03333	0,7214815E-01	0,777778E-02
Seção	2	50,89630 [*]	0,8907407 [*]	0,1622222E-01 ^{ns}
FORAGEIRAxSEÇÃO	4	1,985185 ^{ns}	0,1290741 ^{ns}	0,1244444E-01 ^{ns}
Res(b)	24	1,177778	0,056481	0,1333333E-01
Taxa	2	1,696296 ^{ns}	10,61252 [*]	0,8125556 [*]
FORAGEIRAxTAXA	4	1,718519 ^{ns}	2,699852 [*]	0,277444 [*]
SeçãoxTaxa	4	20,06296 [*]	0,4782963 [*]	0,211111E-01 ^{ns}
FORAGEIRAxSEÇÃOxTAXA	8	3,668519 [*]	0,1717963 ^{ns}	0,130000E-01 ^{ns}
Resíduo	72	1,085185	0,1888148	0,1464815E-01
Média geral		13,5185	2,8385	0,8022
Coef. de variação (%)		29,607	15,308	15,087

*Significativo a 5% de probabilidade pelo Teste F; ns – não significativo.