

MARCOS ALVES DE MAGALHÃES

**MODELAGEM DO PROCESSO DE FILTRAÇÃO DE ÁGUA
RESIDUÁRIA DE SUINOCULTURA EM MATERIAIS
ORGÂNICOS**

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

VIÇOSA
MINAS GERAIS – BRASIL

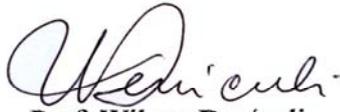
2005

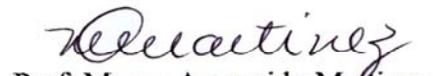
MARCOS ALVES DE MAGALHÃES

**MODELAGEM DO PROCESSO DE FILTRAÇÃO DE ÁGUA
RESIDUÁRIA DE SUINOCULTURA EM MATERIAIS ORGÂNICOS**

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

APROVADA: 23 de agosto de 2005


Prof. Wilson Deniculi
(Conselheiro)


Prof. Mauro Aparecido Martinez
(Conselheiro)


Prof. Max de Menezes


Prof. Roberto Francisco de Azevedo


Prof. Antonio Teikeira de Matos
(Orientador)

“A beleza de uma missão não está na chegada, mas na travessia”.

Graciliano Ramos

DEDICO

Dedico este trabalho a **Deus** que nos deu vida como dom, fez-nos livre e dotados de capacidade para entender, pensar, descobrir, criar e até mesmo, questionar tudo a nossa volta. Não há, pois, melhor definição para o seu ato de Amor, e melhor nome para chamá-lo que PAI CELESTIAL.

OFEREÇO

A minha esposa **Adriana** e minha querida filha **Mariana**, pelo carinho, compreensão, pelos incentivos e, principalmente, por compartilharem comigo todos os momentos bons e difíceis, fornecendo-me suporte emocional para alcançar este objetivo.

Aos meus **irmãos** e aos meus pais **Evandro e Teresinha** pelo incentivo dispensado durante os longos anos de estudos e por seu grande amor e apoio.

As minhas tias **Carminha e Tonha**, pessoas muito especiais em minha vida, que neste momento já não estão mais entre nós, brilham no céu como estrelas.

AGRADECIMENTOS

Ao professor Antonio Teixeira de Matos, pela orientação valiosa, pelo incentivo, pela amizade sincera e pela confiança e dedicação demonstrada ao longo da condução deste trabalho.

Aos Professores Wilson Deniculi e Mauro Aparecido Martinez pelas valiosas contribuições ao Projeto de Tese e pelo estímulo para sua condução.

À Universidade Federal de Viçosa (UFV), por intermédio do Departamento de Engenharia Agrícola e Ambiental, na pessoa de seus professores e funcionários, pela oportunidade concedida para participar do Programa de Pós-Graduação, pelas facilidades oferecidas e pelo incentivo para a execução do presente trabalho.

Ao Conselho Nacional de Pesquisa Científica (CNPq) pela concessão da bolsa de estudo.

As professoras Lucy Tiemi Takahashi e Valéria Matos de Rosa do Departamento de Matemática da UFV, pela valiosa colaboração na modelagem matemática da simulação do processo de filtração de água residuária de suinocultura.

Ao estudante de Doutorado da UFV, Alexandre Paiva da Silva pelo auxílio no uso dos programas estatísticos SAEG e Sigma Plot.

Ao técnico Roberto Cardoso Milagres e aos estudantes de graduação da UFV Márcio Shigueaki Inada, Fábio Yamada e Wilmar Pereira dos Santos, pela participação durante a condução do experimento.

Aos funcionários da Área Experimental de Hidráulica/Irrigação e Drenagem do Departamento de Engenharia Agrícola da UFV, Altair Anastácio, Francisco Lázaro Gomes e Carlos Henrique da Silva.

Às demais pessoas que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho, os meus sinceros agradecimentos.

BIOGRAFIA

MARCOS ALVES DE MAGALHÃES, filho de Evandro Pereira de Magalhães e Teresinha Alves de Magalhães, nasceu a 25 de agosto de 1957, em Uruçuca, Estado da Bahia.

Fez o curso Técnico em Agropecuária na Escola Média de Agropecuária da Região Cacaueira (EMARC – UR), em Uruçuca – BA, vindo em seguida para Viçosa onde iniciou o Curso de Engenharia Agrônômica na Universidade Federal de Viçosa, concluindo-o em dezembro de 1985.

Em março de 1993, iniciou o Curso de Pós-Graduação, em nível de Especialização na área de Desenvolvimento e Gestão Ambiental, na Universidade Estadual de Santa Cruz (UESC), Ilhéus – Bahia, concluindo-o em dezembro de 1994.

Em agosto de 2000, iniciou o Mestrado em Engenharia Agrícola, na área de concentração em Construções Rurais e Ambientais, na Universidade Federal de Viçosa, em Viçosa, MG, concluindo-o em agosto de 2002.

Em setembro de 2002, iniciou o Doutorado em Engenharia Agrícola, na área de concentração em Recursos Hídricos e Ambientais, na Universidade Federal de Viçosa, em Viçosa, MG.

CONTEÚDO

| | |
|---|------|
| LISTA DE SÍMBOLOS, ABREVIATURAS E NOMENCLATURAS..... | vii |
| LISTA DE FIGURAS | viii |
| LISTA DE QUADROS..... | xi |
| RESUMO | xiv |
| ABSTRACT | xvi |
| 1. INTRODUÇÃO | 1 |
| 2. REVISÃO DE LITERATURA..... | 4 |
| 2.1. A atividade suinícola..... | 4 |
| 2.2. Aspectos relativos à disposição final de água residuária de suinocultura | 7 |
| 2.3. Processo de filtração..... | 11 |
| 2.3.1 <i>Classificação dos sistemas de filtração</i> | 17 |
| 2.3.2 <i>Filtração de águas residuárias de suinocultura</i> | 18 |
| 2.4. Modelagem do Processo de filtração de águas residuárias..... | 20 |
| 3. MATERIAL E MÉTODOS | 29 |
| 3.1 Instalação, operação e monitoramento das colunas filtrantes segmentadas | 30 |
| 3.2 Instalação, operação e monitoramento das colunas filtrantes não segmentadas ... | 33 |
| 3.3 Avaliação da capacidade dos filtros segmentados na remoção de óleos e graxas. | 39 |
| 3.4 Simulação do processo de filtragem e validação do modelo | 39 |
| 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO | 40 |
| 4.1 Características do meio filtrante..... | 40 |
| 4.2 Remoção de sólidos da ARS nos filtros orgânicos..... | 41 |
| 4.3 Perda de carga de filtros orgânicos não segmentados | 58 |
| 4.4 Remoção de óleos e graxas da ARS nos filtros orgânicos..... | 65 |
| 4.5 Remoção de sólidos do afluente sob diferentes cargas de sólidos..... | 66 |

| | |
|---|----|
| 4.6 Validação do modelo semi-empírico de filtração da ARS baseado na Equação Geral da Filtração..... | 75 |
| 4.7 Simulação do processo de filtração utilizando-se a equação empírica ajustada aos dados obtidos nos filtros segmentados..... | 78 |
| 5. RESUMO E CONCLUSÕES | 80 |
| 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS..... | 83 |
| ANEXOS | 91 |
| ANEXO 1: Quadros | 92 |
| ANEXO 2: Dimensionamento de filtros orgânicos para tratamento de ARS..... | 99 |

LISTA DE SÍMBOLOS, ABREVIATURAS E NOMENCLATURAS

| Símbolo | Definição | Unidade |
|---------------------------------------|---|-----------------------------------|
| ARS | água residuária de suinocultura | - |
| ST | sólidos totais | mg L^{-1} |
| SS | sólidos em suspensão | mg L^{-1} |
| Q | vazão de filtração | $\text{L}^3 \text{T}^{-1}$ |
| V | fluxo ou taxa de filtração | cm min^{-1} |
| H_t | perda de carga total no tempo t | cm. c. a |
| H_o | perda de carga inicial total com água “limpa” | cm. c. a |
| $(h_i)_t$ | perda de carga adicional na i-ésima camada, no tempo t | cm. c. a |
| C_o | concentração de sólidos do afluente | M L^{-3} |
| C | concentração de sólidos suspensos | M L^{-1} |
| x | coordenada espacial na direção do escoamento | L |
| r_o | taxa de remoção inicial | cm^{-1} |
| $(q_i)_t^b$ | quantidade de material depositado na i-ésima camada no tempo t | $\text{mg cm}^{-1} \text{L}^{-3}$ |
| q | massa de sólidos suspensos depositados na camada filtrante | M L^{-3} |
| q_u | máxima massa de sólidos a ser retida na camada filtrante | M L^{-3} |
| $\frac{\partial q}{\partial t}$ | variação na quantidade de sólidos depositados no filtro com o tempo | $\text{M L}^{-3} \text{T}^{-1}$ |
| α | porosidade média do meio filtrante | - |
| $\frac{\partial \bar{C}}{\partial t}$ | variação na concentração média de sólidos contidos no espaço porosos do filtro, em relação ao tempo | $\text{M L}^{-3} \text{T}^{-1}$ |
| dV | diferencial do volume | L^3 |
| $\frac{\partial C}{\partial x}$ | <i>variação na concentração de sólidos suspensos no fluido do efluente com distância</i> | $\text{M L}^{-3} \text{L}^{-1}$ |

LISTA DE FIGURAS

| | Página |
|---|---------------|
| Figura 1: Aspecto relacionado à aplicação inadequada da ARS no solo causando à rápida colmatção superficial | 18 |
| Figura 2: Fotos da serragem de madeira (a), do bagaço de cana-de-açúcar (b) e de pergaminho de café, utilizados como materiais filtrantes..... | 30 |
| Figura 3: Sistema de filtração em coluna segmentada, construída para avaliação da capacidade filtrante de cada camada de material orgânico..... | 31 |
| Figura 4: Vista parcial dos filtros individualizados..... | 31 |
| Figura 5: Detalhe da entrada ARS no filtro..... | 31 |
| Figura 6: Esquema de montagem do filtro orgânico não segmentado..... | 34 |
| Figura 7: Colunas de filtração, não segmentadas, com detalhamento dos piezômetros..... | 35 |
| Figura 8: Tela utilizada para filtração da ARS..... | 36 |
| Figura 9: Massa de sólidos retidos nos filtros, segmentados, após filtração, por 120 minutos, da ARS bruta peneirada..... | 42 |
| Figura 10: Concentração relativa de ST nos efluentes dos filtros, não segmentados, de serragem de madeira, bagaço de cana-de-açúcar e pergaminho dos grãos de café..... | 48 |
| Figura 11: Concentrações relativas de SS em filtros, não segmentado, de serragem de madeira, bagaço de cana-de-açúcar e pergaminho dos grãos de café..... | 48 |
| Figura 12: Aspecto visual de uma amostra da ARS antes da filtração (a) e após filtração (b)..... | 49 |
| Figura 13. Superfície de resposta e equação ajustada da estimativa de SS em função do tempo de operação e da altura do filtro de serragem de madeira, sendo “ <i>p</i> ” a profundidade do filtro e “ <i>t</i> ” o tempo de operação..... | 50 |
| Figura 14. Superfície de resposta e equação ajustada da estimativa de SS em função do tempo de operação e da altura do filtro de bagaço de cana-de-açúcar, sendo “ <i>p</i> ” a profundidade do filtro e “ <i>t</i> ” o tempo de operação..... | 51 |
| Figura 15. Superfície de resposta e equação ajustada da estimativa de SS em função do tempo de operação e da altura do filtro de pergaminho de grãos de café, sendo “ <i>p</i> ” a profundidade do filtro e “ <i>t</i> ” o tempo de operação..... | 51 |
| Figura 16: Variação da concentração de ST e profundidade em função do tempo de operação dos filtros de serragem de madeira (a), bagaço de cana-de-açúcar (b) e de pergaminho de grãos de café (c)..... | 54 |

| | |
|---|----|
| Figura 17: Variação da concentração de SS e profundidade em função do tempo de operação dos filtros de serragem de madeira, bagaço de cana-de-açúcar e de pergaminho de grãos de café..... | 55 |
| Figura 18: Perda de carga com o tempo de operação nos filtros não segmentados, operando com ARS..... | 59 |
| Figura 19: Visualização da perda de carga no filtro de bagaço de cana-de-açúcar após diferentes tempos de operação..... | 60 |
| Figura 20. Superfície de resposta da perda de carga em função do tempo de operação e da profundidade do filtro de serragem de madeira..... | 64 |
| Figura 21. Superfície de resposta da perda de carga em função do tempo de operação e da profundidade do filtro de bagaço de cana-de-açúcar triturado..... | 64 |
| Figura 22. Superfície de resposta da perda de carga em função do tempo de operação e da profundidade do filtro de pergaminho de grãos de café..... | 65 |
| Figura 23: Concentração relativa de ST do filtro, não segmentado, de serragem de madeira, como função do tempo de operação dos filtros..... | 67 |
| Figura 24: Concentração relativa de ST do filtro, não segmentado, de bagaço de cana-de-açúcar, como função do tempo de operação dos filtros... | 68 |
| Figura 25: Concentração relativa de ST do filtro, não segmentado, de pergaminho dos grãos de café, como função do tempo de operação dos filtros..... | 69 |
| Figura 26: Concentração relativa de SS do filtro, não segmentado, de serragem de madeira, como função do tempo de operação dos filtros..... | 71 |
| Figura 27: Concentração relativa de SS do filtro, não segmentado, de bagaço de cana-de-açúcar, como função do tempo de operação dos filtros..... | 72 |
| Figura 28: Concentração relativa de SS do filtro, não segmentado, de pergaminho dos grãos de café, como função do tempo de operação dos filtros..... | 73 |
| Figura 29: Concentração de ST experimental e estimado, utilizando-se a equação semi-empírica, em função do tempo de operação dos filtros de serragem de madeira (a), bagaço de cana-de-açúcar (b) e de pergaminho de grãos de café (c) com ARS de diferentes diluições..... | 75 |
| Figura 30: Concentração de SS experimental e estimado no efluente, utilizando-se a equação semi-empírica, em função do tempo de operação dos filtros de serragem de madeira (a), bagaço de cana-de-açúcar (b) e de pergaminho de grãos de café (c) com ARS de diferentes diluições..... | 76 |
| Figura 31: Concentração de ST experimental e estimado no efluente, utilizando-se a equação semi-empírica, em função do tempo de operação dos filtros de serragem de madeira (a), bagaço de cana-de-açúcar (b) e de pergaminho de grãos de café (c) com ARS de diferentes diluições..... | 77 |

| | |
|---|----|
| Figura 32: Concentração de SS experimental e estimado no efluente, utilizando-se a equação semi-empírica, em função do tempo de operação dos filtros de serragem de madeira (a), bagaço de cana-de-açúcar (b) e de pergaminho de grãos de café (c) com ARS de diferentes diluições..... | 77 |
| Figura 33: Concentração de SS experimental e estimada do efluente, utilizando-se a equação empírica, em função do tempo de operação dos filtros de serragem de madeira (a), bagaço de cana-de-açúcar (b) e de pergaminho de grãos de café (c) com ARS de diferentes diluições..... | 78 |

LISTA DE QUADROS

| | Página |
|--|---------------|
| Quadro 1: Distribuição percentual dos sistemas de produção de suínos no Brasil..... | 4 |
| Quadro 2: Características dos materiais orgânicos na granulometria de 2,5-3mm utilizados como meio filtrante..... | 40 |
| Quadro 3: Massa de sólidos em suspensão retidos na serragem de madeira, contidos nos filtros segmentados, após 120 min de operação com ARS bruta peneirada..... | 41 |
| Quadro 4: Massa de sólidos em suspensão retidos no bagaço de cana-de-açúcar, contidos nos filtros segmentados, após 120 min de operação com ARS bruta peneirada..... | 41 |
| Quadro 5: Massa de sólidos em suspensão retidos no pergaminho dos grãos de café, contido nos filtros segmentados, após 120 min de operação com ARS bruta peneirada..... | 42 |
| Quadro 6: Concentração de ST (mg L^{-1}) no efluente ARS em função do tempo de filtração, em filtros segmentados de serragem de madeira, operados em seqüência..... | 43 |
| Quadro 7: Concentração de ST (mg L^{-1}) no efluente ARS em função do tempo de filtração, em filtros segmentados de bagaço de cana-de-açúcar, operados em seqüência..... | 44 |
| Quadro 8: Concentração de ST (mg L^{-1}) no efluente ARS em função do tempo de filtração, em filtros segmentados de pergaminho dos grãos de café, operados em seqüência..... | 44 |
| Quadro 9: Concentração de SS (mg L^{-1}) no efluente ARS em função do tempo de filtração, em filtros segmentados de serragem de madeira, operados em seqüência..... | 45 |
| Quadro 10: Concentração de SS (mg L^{-1}) no efluente ARS em função do tempo de filtração, em filtros segmentados de bagaço de cana-de-açúcar, operados em seqüência..... | 45 |
| Quadro 11: Concentração de SS (mg L^{-1}) no efluente ARS em função do tempo de filtração, em filtros segmentados de pergaminho dos grãos de café, operados em seqüência..... | 46 |
| Quadro 12: Análise de variância para os valores de SS do efluente da ARS obtidos por meio de filtros orgânicos..... | 49 |
| Quadro 13: Valores dos parâmetros ajustados à equação geral da filtração semi-empírica..... | 52 |
| Quadro 14: Perdas de carga obtida em diferentes camadas e vazões nos filtros não segmentados de serragem de madeira, em função do tempo de operação, durante a filtração da ARS bruta peneirada..... | 61 |

| | |
|--|----|
| Quadro 15: Perdas de carga obtida em diferentes profundidades nos filtros não segmentados de bagaço de cana-de-açúcar, em função do tempo de operação, durante a filtração da ARS bruta peneirada..... | 61 |
| Quadro 16: Perdas de carga obtida em diferentes profundidades nos filtros não segmentados de pergaminho dos grãos de café, em função do tempo de operação, durante a filtração da ARS bruta peneirada..... | 62 |
| Quadro 17: Análise de variância para os valores de perda de carga dos filtros orgânicos..... | 62 |
| Quadro 18: Equações de regressão ajustadas para a variável perda de carga em função da profundidade e do tempo, para os diferentes materiais orgânicos estudados..... | 63 |
| Quadro 19: Eficiência na remoção de óleos e graxas presentes na ARS por diferentes materiais orgânicos utilizados em colunas filtrantes não segmentados..... | 65 |
| Quadro 20: Teste de identidade entre as curvas de concentração relativa de ST em função do tempo de operação do filtro, não segmentado, de serragem de madeira..... | 67 |
| Quadro 21: Teste de identidade entre as curvas de concentração relativa de ST em função do tempo de operação do filtro, não segmentado, de bagaço de cana-de-açúcar..... | 69 |
| Quadro 22: Teste de identidade entre as curvas de concentração relativa de ST em função do tempo de operação do filtro, não segmentado, de pergaminho dos grãos de café..... | 70 |
| Quadro 23: Teste de identidade entre as curvas de concentração relativa de SS em função do tempo de operação do filtro, não segmentado, de serragem de madeira..... | 71 |
| Quadro 24: Teste de identidade entre as curvas de concentração relativa de SS em função do tempo de operação do filtro, não segmentado, de bagaço de cana-de-açúcar..... | 73 |
| Quadro 25: Teste de identidade entre as curvas de concentração relativa de SS em função do tempo de operação do filtro, não segmentado, de pergaminho dos grãos de café..... | 74 |
| Quadro 26: Parâmetros ajustados para a equação semi-empírica..... | 78 |

LISTA DE QUADROS DO ANEXO

| | Página |
|--|---------------|
| Quadro 1A: Eficiência dos filtros de serragem de madeira, não segmentados, quanto à capacidade de reter ST da ARS bruta peneirada..... | 93 |
| Quadro 2A: Eficiência dos filtros de bagaço de cana-de-açúcar triturado, não segmentados, quanto à capacidade de reter ST da ARS bruta peneirada..... | 93 |
| Quadro 3A: Eficiência dos filtros de pergaminho dos grãos de café, não segmentados, quanto à capacidade de reter ST da ARS bruta peneirada..... | 94 |
| Quadro 4A: Eficiência dos filtros de serragem de madeira, não segmentados, quanto à capacidade de reter SS da ARS bruta peneirada..... | 94 |
| Quadro 5A: Eficiência dos filtros de bagaço de cana-de-açúcar, não segmentados, quanto à capacidade de reter SS da ARS bruta peneirada..... | 95 |
| Quadro 6A: Eficiência dos filtros de pergaminho dos grãos de café, não segmentados, quanto à capacidade de reter SS da ARS bruta peneirada..... | 95 |
| Quadro 7A: Concentração relativa de ST da ARS bruta peneirada, submetida a diferentes níveis diluições com água limpa e aplicada nos filtros, não segmentados, de serragem de madeira..... | 96 |
| Quadro 8A: Concentração relativa de ST da ARS bruta peneirada, submetida a diferentes níveis diluições com água limpa e aplicada nos filtros, não segmentados, de bagaço de cana-de-açúcar..... | 96 |
| Quadro 9A: Concentração relativa de ST da ARS bruta peneirada, submetida a diferentes níveis diluições com água limpa e aplicada nos filtros, não segmentados, de pergaminho dos grãos de café..... | 97 |
| Quadro 10A: Concentração relativa de SS da ARS bruta peneirada, submetida a diferentes níveis diluições com água limpa e aplicada nos filtros, não segmentados, de serragem de madeira..... | 97 |
| Quadro 11A: Concentração relativa de SS da ARS bruta peneirada, submetida a diferentes níveis diluições com água limpa e aplicada nos filtros, não segmentados, de bagaço de cana-de-açúcar..... | 98 |
| Quadro 12A: Concentração relativa de SS da ARS bruta peneirada, submetida a diferentes níveis diluições com água limpa e aplicada nos filtros, não segmentados, de pergaminho dos grãos de café..... | 98 |

RESUMO

MAGALHÃES, Marcos Alves de, D.S., Universidade Federal de Viçosa, agosto de 2005. **Modelagem do processo de filtração de água residuária de suinocultura em materiais orgânicos.** Orientador: Antonio Teixeira de Matos. Conselheiros: Wilson Deniculi e Mauro Aparecido Martinez.

A atividade suinícola tem sido considerada pelos órgãos de controle ambiental como "atividade potencialmente causadora de degradação ambiental", representando importante fonte de degradação do ar, dos recursos hídricos e do solo. Neste contexto, a atividade suinícola carece de soluções capazes de introduzir procedimentos operacionais para tratar a água residuária gerada, que sejam tecnicamente exeqüíveis e ecologicamente sustentáveis. O presente trabalho foi conduzido na Área Experimental de Hidráulica/Irrigação e Drenagem do Departamento de Engenharia Agrícola da UFV, sendo instaladas, operadas e monitoradas colunas filtrantes segmentadas e não segmentadas, para filtração da ARS. O sistema de filtração segmentado foi constituído por 10 filtros, com 13 cm de altura cada, utilizando tubo de PVC de 200 mm. O sistema de filtração não segmentado foi montado em tonéis com 0,58 m de diâmetro e 1,30 m altura. Bagaço de cana-de-açúcar triturado, serragem de madeira e pergaminho de grãos de café, subprodutos de atividades agropecuárias e agroindustriais, foram utilizados no preenchimento das colunas filtrantes. Foram coletados dados de retenção e de concentração sólidos em suspensão e totais nos filtros segmentados e de perda de carga com o tempo de operação dos filtros não segmentados para ajuste, respectivamente, da equação geral de filtração e equação de evolução da perda de carga. De acordo com os resultados obtidos, concluiu-se que serragem de madeira foi, dentre os materiais orgânicos avaliados, o mais eficiente quanto à capacidade de reter sólidos da ARS, alcançando o máximo de 0,19g de sólidos para cada cm^{-3} de camada filtrante, seguido do bagaço de cana-de-açúcar com 0,16g e o pergaminho dos grãos de café com de 0,11g. Os filtros orgânicos proporcionaram razoavelmente alta remoção de óleos e

graxas da ARS, tendo sido obtidos valores de 96%, 89% e 75%, respectivamente para serragem de madeira, bagaço de cana-de-açúcar triturado e pergaminho de grãos de café. O modelo matemático semi-empírico utilizado para a simulação do processo de filtração da ARS em filtros segmentados apresentou resultados satisfatórios, podendo ser usada na estimativa da concentração de sólidos totais (ST) e sólidos em suspensão (SS) na água residuária em percolação e efluente de filtros orgânicos. Para cada filtro orgânico não segmentado avaliado, foi ajustada uma equação de regressão relacionando os valores de ST e SS com o tempo de operação do filtro e a profundidade de camada dos filtros, escolhida com base nos critérios de significância dos estimadores dos coeficientes de regressão até o nível de 1% e nos valores de R^2 . Porém, quando as equações obtidas para descrever a filtração em filtros segmentados foram validadas para as condições de operação de filtros não segmentados, os ajustes não foram bons, notadamente para a concentração efluente de SS. Dessa forma, ajustes de outros parâmetros tiveram que ser implementados de forma a se tentar adequar as equações semi-empíricas de forma que pudessem ser utilizadas na predição da remoção de ST e SS de águas residuárias da suinocultura com diferentes concentrações de sólidos. Equações de perda de carga como função da profundidade e do tempo de operação dos filtros explicaram, com adequada eficiência, o comportamento dos filtros constituídos por serragem de madeira, bagaço de cana-de-açúcar e pergaminho de grãos de café. Concentração efluente de SS, obtidos experimentalmente nos filtros não segmentados e os estimados utilizando a equação empírica ajustada para dados obtidos em filtros segmentados subestimou remoção de SS. Filtros não segmentados possibilitaram maior retenção de SS no material poroso do que foi obtida em filtros segmentados, em função da menor velocidade de escoamento da ARS.

ABSTRACT

MAGALHÃES, Marcos Alves de, D.S., Universidade Federal de Viçosa, august 2005.

Modelling of the filtration process of swine waste water through organic materials. Adviser: Antonio Teixeira de Matos. Committee Members: Wilson Denículi and Mauro Aparecido Martinez.

The swine industry has been considered by the agencies of environmental control as a “potential cause of environmental degradation”, representing important source of air, water and soil degradation. In this context, the swine industry lacks solutions capable of establishing technically feasible and ecologically sustainable operational procedures for treating the waste water produced. The present work was conducted at the Experimental Area of Hydraulics/Irrigation and Drainage, DEA/UFV. Segmented and non-segmented filter columns were installed, operated and monitored for SWW filtration. The segmented filtration system consisted of ten 13-cm-height filters, using 200 mm PVC pipes. The non-segmented filtration system was set up in 0.58 m diameter x 1.30 m height barrels. Sugarcane bagasse, sawdust and coffee husk, by-products of agricultural and agro-industrial activities, were used to fill the filter columns. Data on retention, suspended solids concentration, total suspended solids in the segmented filters, and head loss with time of operation of the non-segmented filters were collected for adjustment of the general filtration equation and head loss evolution equation. According to the results, the sawdust was the most efficient organic material to retain SWW solids, reaching the maximum of 0.19g of solids per cm^{-3} of filter layer, followed by sugarcane bagasse with 0.16g and coffee husk with 0.11g. The organic filters provided quite high efficiency of SWW oil and grease removal, obtaining values of 96%, 89% and 75%, for sawdust, sugarcane bagasse and coffee husk, respectively. The semi-empiric mathematical model used for simulating the process of SWW filtration through segmented filters gave satisfactory results, and could be used to estimate the total suspended solids (TS) and suspended solids (SS) of percolating waste

water and effluents of organic filters. For each non-segmented organic filter tested, a regression equation was adjusted to relate the TS and SS values with the time of operation and the layer depth of the filters, based on the criteria for significance of regression coefficient estimators at 1% probability level and on R^2 values. However, when the equations obtained to describe the filtration through segmented filters were validated for the operational conditions of the non-segmented filters, the adjustments were not good, especially for the SS concentration of effluent. Therefore, the adjustments of the other parameters had to be applied to try fitting the semi-empiric equations so they could be used for the prediction of TS and SS removal from swine waste waters with different solid concentrations. Head loss equations as function of depth and time of filter operation adequately explained the behavior of the filters consisted of sawdust, sugarcane bagasse and coffee husk. Effluent concentration of SS, experimentally obtained from the non-segmented filters and the estimates of the adjusted empiric equation for the data obtained with the segmented filters underestimated SS removal. SS retention by the porous material was greater in non-segmented filters than in segmented filters, as a function of the lower SWW drainage velocity.

1. INTRODUÇÃO

Toda e qualquer atividade humana, seja ela de mineração, industrial, agropecuária, agroindustrial ou urbana, gera resíduos. Por essa razão, uns dos grandes problemas atuais da humanidade são os impactos causados ao meio ambiente, principalmente pela crescente produção de resíduos sólidos e líquidos, gerados em diversas atividades antrópicas, os quais, quando inadequadamente dispostos, podem trazer grandes prejuízos para o ambiente. Assim, a geração de diferentes resíduos e rejeitos provenientes dessas atividades corresponde a um dos “custos” a ser contabilizado no processo produtivo (MAGALHÃES, 2002).

A suinocultura moderna é uma atividade pecuária conhecida como concentradora de dejetos em pequenas áreas, considerada pelos órgãos de controle ambiental, como uma "atividade potencialmente causadora de degradação ambiental", face ao elevado número de contaminantes gerados pelos seus efluentes. Esta atividade pode representar importante fonte de degradação do ar, dos recursos hídricos e do solo, sendo por tudo isto, enquadrada como de grande potencial poluidor.

De acordo com OLIVEIRA (1993), apenas para comparar quantitativamente o potencial poluidor, a DBO₅ (Demanda Bioquímica de Oxigênio) em esgotos domésticos situa-se em torno de 200 mg L⁻¹, enquanto o mesmo atributo em dejetos de suínos oscila entre 30.000 a 52.000 mg L⁻¹, correspondendo a uma concentração média 200 vezes maior.

A atividade suinícola carece de soluções capazes de introduzir procedimentos operacionais para tratar a água residuária gerada neste tipo de empreendimento, que sejam tecnicamente exequíveis e ecologicamente sustentáveis.

O conceito de desenvolvimento sustentável preconiza que o crescimento econômico deve acontecer com equidade social e proteção ambiental e que os padrões de

produção e consumo devem atingir patamares de sustentabilidade máximos e padrões de impactos mínimos, observando a manutenção de qualidade dos recursos ambientais, aliados a programas de investimentos de desenvolvimento sustentável.

O maior problema para os suinocultores se adequarem às exigências da legislação pertinente é que as ações para a redução do poder poluente dos dejetos suínos, em níveis aceitáveis, requerem recursos financeiros significativos, normalmente acima da capacidade de investimento do produtor e, muitas vezes, sem garantias de atendimento às exigências da legislação ambiental.

A poluição por dejetos suínos vem se agravando nos principais centros produtores, sendo que a disposição, de forma adequada, desses resíduos no meio vai depender da instalação de sistemas de tratamento eficientes ou, no caso da disposição no solo, da disponibilidade de área compatível com a quantidade de resíduos produzidos.

Caso o suinocultor venha adotar a filtração como uma das etapas do tratamento da água residuária de suinocultura (ARS), essa decisão terá significativa implicação na redução da carga orgânica, facilitando as etapas de tratamento subseqüentes, possibilitando o lançamento do efluente em corpos hídricos, de acordo com a legislação específica, em Minas Gerais, a Deliberação Normativa do COPAM nº 010/86 (von SPERLING e NASCIMENTO, 1999). A DN 010/86 estabelece que efluentes, de qualquer fonte poluidora, para serem lançados, direta ou indiretamente, nos corpos d'água, deverá conter até 1 mL L^{-1} de materiais sedimentáveis, 100 mg L^{-1} de sólidos em suspensão e a DBO_5 a 20°C deve ser de, no máximo, 60 mg L^{-1} , desde que esse efluente lançado não altere os padrões de qualidade ou classificação em que o curso d'água esteja enquadrado

O uso de filtros orgânicos para o tratamento de águas residuárias tem sido pesquisado por diversos autores (BRANDÃO *et al*, 2000; MAGALHÃES, 2002; Lo MÔNACO *et al*, 2004), sendo considerada importante etapa no tratamento de águas residuárias com altas concentrações de sólidos em suspensão.

A redução da carga orgânica propiciada pela filtração implicará em significativa redução de sistemas de tratamento biológicos subseqüentes ou proporcionará ao efluente dos filtros condições que possibilitem sua disposição no solo utilizando-se sistemas de aplicação localizada. Este aspecto é extremamente relevante, principalmente em regiões produtoras que apresentem topografias acidentadas e que, portanto, apresentem limitações de áreas para implantação de sistemas não compactos de tratamento biológico,

como é o caso das granjas localizadas na Zona da Mata Mineira. Além disso, com o uso de filtro orgânico torna-se mais fácil o aproveitamento agrícola da ARS, por fertirrigação.

Neste contexto o presente trabalho tem como objetivo geral ajustar equações já existentes e propor novas, visando à constituição de um modelo matemático capaz de descrever o processo de remoção de sólidos em filtros de diferentes materiais orgânicos (bagaço de cana-de-açúcar triturado, “pergaminho” dos grãos do café e serragem de madeira), utilizados no tratamento de águas residuárias de suinocultura. Os objetivos específicos são:

1. Avaliar a equação geral da filtração para a descrição do processo de tratamento da água residuária da suinocultura em diferentes filtros orgânicos.

2. Parametrizar a equação de evolução da perda de carga para descrição do processo de perda de carga com a profundidade e o tempo de operação do filtro orgânico utilizado para o tratamento de água residuária da suinocultura.

3. Parametrizar modelos de ajuste e propor equações matemáticas para estimativa da concentração de sólidos em suspensão no líquido em escoamento em filtros constituídos por diferentes materiais orgânicos, como função de profundidade do filtro e do tempo de operação.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. A atividade suinícola

Na atividade suinícola os sistemas de produção de animais são: criados ao ar livre ou extensivo, semi-extensivo e intensivo (confinado ou semi-confinado).

A distribuição dos sistemas de produção de suínos no Brasil está apresentada no Quadro 1, qual pode-se verificar a crescente dominância da forma de produção confinada em relação aos outros sistemas de produção.

Quadro 1: Distribuição percentual dos sistemas de produção de suínos no Brasil

| Sistema | ano | | | |
|--------------------------|----------------|------|------|------|
| | 1990 | 1995 | 2000 | |
| Intensivo | Confinado | 40,0 | 48,0 | 61,0 |
| | Semi-Confinado | 27,0 | 26,0 | 21,0 |
| Semi - Extensivo | | 32,8 | 25,5 | 17,0 |
| Extensivo ou ao Ar Livre | | 0,2 | 0,5 | 1,0 |

Fonte: GOMES *et al.* (1992).

O sistema de produção de animais criados extensivo ou ao livre pode ser uma opção para os criadores que queiram ingressar na atividade da suinocultura ou para os que desejam integrar e diversificar sua propriedade. Esse sistema pode oferecer facilidades aos criadores, em função do baixo custo de implantação e manutenção, número reduzido de edificações, facilidade de implantação do sistema, mobilidade das instalações, contudo, nesse sistema, o animal fica submetido às variações de clima, quantidade e qualidade de alimentos.

No sistema de criação semi-extensivo, os animais permanecem soltos apenas parte do dia, recebendo suplementação alimentar em cochos.

O sistema de criação intensivo é um sistema característico de pequenas e médias propriedades e requer maior investimento e mão-de-obra especializada. Nesse sistema, que é mais característico das regiões Sul e Sudeste do Brasil, o animal recebe alimentação balanceada em cochos. Esse sistema de criação exige mão-de-obra especializada e todas as fases de produção de animais ocorrem no interior das instalações.

No sistema intensivo semi-confinado algumas fases ocorrem em piquetes (gestação, pré-gestação, machos reprodutores, aleitamento) e em outras fases os animais são confinados em baias (recria, acabamento).

De acordo com GOMES *et al.* (1992), os sistemas confinados de suínos constituem a base da expansão suinícola no Brasil.

Todos os sistemas de produção de suínos são potencialmente poluidores, mas com níveis de impactos ambientais diferenciados. Entretanto, de acordo com PERDOMO *et al.* (2001), o sistema confinado, de uma forma geral, coleta e armazena os dejetos de suínos para posterior tratamento e utilização, enquanto nos outros sistemas a geração e distribuição dos dejetos ocorre no próprio local de criação.

O Brasil possui cerca de 36,5 milhões de cabeças de suínos, plantel correspondente ao quarto maior rebanho do mundo (ANUALPEC, 2004). Se for considerado que esta atividade gera no Brasil, em média, 10 litros de água residuária suíno⁻¹ d⁻¹, estima-se que esteja sendo gerado no país o equivalente a 365 milhões de litros d⁻¹ de ARS.

A escassez de recursos hídricos no mundo, às vezes por falta absoluta d'água e outras vezes pela contaminação das fontes naturais, é motivo de preocupação da comunidade científica e tem fomentado discussões e pesquisas no campo do aproveitamento das águas residuárias.

O reuso da água, planejado e controlado, é definido como o uso das águas residuárias renovadas para fins benéficos como a fertirrigação e a recarga de aquíferos subterrâneos (METCALF e EDDY, 1995).

Apesar da atividade suinícola se constituir num fator importante tanto social como econômico, gerando emprego e renda em vários setores da economia, o agravamento dos problemas ambientais causados pelos resíduos gerados por essa atividade, tem sido verificado não apenas no Brasil (BAVARESCO *et al.*, 1999), mas, também em várias

partes do mundo, a ponto de limitar o avanço da sua expansão ou exigindo a implantação de processos de manejo, tratamento e utilização bastante rigorosos e onerosos.

De acordo com PERDOMO *et al.* (2001), em grandes centros produtores de suínos, a exemplo da Europa, estão sendo encontradas dificuldades para manter os atuais rebanhos, em virtude do excesso de dejetos, da saturação das áreas pela produção de contaminação de recursos naturais e dos altos investimentos para o tratamento de efluentes, é o caso da Holanda que tem um rebanho estimado em 16 milhões de cabeças, concentrado numa pequena área. Problemas semelhantes têm a Inglaterra, Dinamarca, Alemanha, Bélgica e França, tradicionais produtores de suínos da União Européia.

Segundo PERDOMO (1995), a contaminação das águas superficiais com coliformes fecais (principais indicadores de riscos sanitários) em algumas regiões do Sul do Brasil chega a 85% das fontes naturais de abastecimento. Nos últimos anos, muita atenção passou a ser dada à necessidade de desenvolvimento tecnológico com vistas à disposição dos resíduos gerados por animais, de forma a causar o mínimo impacto sobre o ambiente.

Impacto ambiental segundo a Resolução nº 001/86 do CONAMA, de 23.01.86, é conceituado como: alteração das propriedades físicas, químicas e biológicas do meio ambiente, causado por qualquer forma de matéria ou energia resultante de atividades humanas que direta ou indiretamente afetem: (i) a saúde; a segurança e o bem estar da população; (ii) as atividades sociais e econômicas; (iii) a biota; (iv) as condições estéticas e sanitárias do meio ambiente; (v) a qualidade dos recursos ambientais.

O conhecimento do volume e da composição química da ARS é fundamental para o estabelecimento de um programa de manejo, armazenagem e tratamento, visando o controle da poluição.

As ARS contêm altas concentrações de material orgânico prontamente biodegradável e, quando lançadas diretamente em um corpo d'água, trazem diversas implicações do ponto de vista ambiental, constituindo um dos principais problemas de poluição das águas. Particularmente, o potencial poluidor das ARS está relacionado com a presença de sólidos em suspensão e dissolvidos, matéria orgânica, nutrientes, patógenos, metais pesados e sais diversos (BRANDÃO *et al.*, 2000).

A ARS é constituída por fezes, urina, resíduo de ração, excesso de água dos bebedouros e de água de higienização (KONZEN, 1997). As águas utilizadas na higienização somadas às desperdiçadas pelos animais e por deficiências nas instalações,

além da urina e fezes dos animais, produzem um material com cerca de 96% de água e 4% de sólidos em suspensão (BLEY JÚNIOR, 1997).

Diante dos problemas ambientais causados pela atividade suinícola, o poder público passou a agir, utilizando-se dos órgãos ambientais responsáveis pela fiscalização e controle da poluição ambiental, para minimizar os problemas decorrentes dessa atividade. Foram estabelecidas normas e legislação específica (em Minas Gerais, a Resolução COPAM 010/86) para lançamento de águas residuárias em corpos hídricos (von SPERLING e NASCIMENTO, 1999).

A partir da implantação da Política Nacional de Meio Ambiente, do sistema de licenciamento ambiental, e após a aprovação da lei de crimes ambientais, como o suinocultor pode ser responsabilizado criminalmente por eventuais danos causados ao ambiente, o mesmo deve adotar critérios para manejo dos dejetos gerados, levando em conta as características específicas do empreendimento, inclusive quanto ao porte, para planejar as etapas de coleta, de armazenagem, de tratamento, de distribuição e de utilização dos dejetos. O conhecimento de cada uma dessas etapas é de fundamental importância para o sucesso e a sustentabilidade do sistema.

2.2. Aspectos relativos à disposição final de água residuária de suinocultura

Para que se possa estabelecer medidas adequadas de proteção ambiental e a escolha de tecnologias apropriadas para a disposição de ARS no ambiente, deve-se atentar para os aspectos relacionados à maior eficiência no tratamento ou no adequado aproveitamento do resíduo, proporcionando a minimização dos impactos negativos sobre o ambiente.

De acordo com BARKER (1996), o tratamento de dejetos de suínos se faz em duas etapas distintas. A primeira, denominada pré-tratamento, consiste da remoção física dos sólidos na retenção do material utilizando tanque de sedimentação, peneiras planas vibratórias ou peneiras circulares rotativas. Já na segunda etapa, o efluente líquido recebe tratamento biológico, o qual pode acontecer em lagoas de estabilização, filtros biológicos, em reatores anaeróbicos com manta de lodo UASB (OLIVEIRA e FORESTI, 1998), tanques de aeração etc (BARKER, 1996).

SUTTON (1994) afirmou que os dejetos animais, independentemente de suas qualidades e dos benefícios que podem trazer, estão sendo considerados substâncias

indesejáveis e de difícil manejo e que o modo mais seguro de se utilizar dejetos, em termos ambientais, consiste numa disposição adequada desses resíduos no solo aliada a uma intensa utilização dos nutrientes pelas plantas.

No aproveitamento agrícola, a aplicação das ARS não deve ser feita sem planejamento, sob pena de causar sérios danos ambientais. Alguns autores mencionam que a aplicação de altas concentrações da ARS no solo pode levar à sua salinização ou trazer problemas potenciais à sua estrutura, já que altas concentrações de sódio ou até mesmo de potássio, podem causar dispersão da argila do solo, influenciando na sua permeabilidade (LOEHR, 1977; OLIVEIRA, 1993).

SCALOPPI e BAPTISTELLA (1986) salientam que se a aplicação da ARS for realizada de maneira adequada, evita-se a poluição de mananciais de água e, ao mesmo tempo, melhora-se a fertilidade do solo. No entanto, CLANTON e SLACK (2003) afirmam que aplicações excessivas podem causar selamento superficial e dispersão de partículas do solo.

Outros problemas resultantes da aplicação no solo são o risco de poluição do lençol freático, comprometendo o uso da água para o consumo, e a contaminação do solo e das culturas por microrganismos patogênicos presentes nas águas residuárias.

O nitrogênio, presente em elevadas concentrações nas ARS, quando aplicado no solo, pode vir a ser importante fonte de poluição ambiental. Quando presente no solo na forma de nitrato, torna-se disponível para lixiviação e, como consequência, contaminação do lençol freático.

A presença de metais pesados também deve se constituir em motivo de preocupação, pois, embora presentes em baixas concentrações nas ARS, apresentam elevados níveis de toxicidade para biota. De acordo com SCHERER e BALDISSERA (1994), o cobre e o zinco têm sido motivo de maior preocupação, uma vez que fazem parte do suplemento dietético de rações e de formulações de antibióticos, aumentando os riscos de contaminação ambiental.

A maior parte da matéria sólida presente nos efluentes da ARS é de natureza orgânica e apresentam o inconveniente de serem ricos em óleos e graxas, também denominadas sólidos flutuantes ou espuma (PESSOA, 1982), material que podem diminuir a eficiência do tratamento biológico.

O termo “graxa” inclui as gorduras, os óleos, as ceras e outros constituintes de baixa massa específica, encontrados nas águas residuárias (METCALFY e EDDY, 1991).

As formas orgânicas das gorduras presentes na ARS são originadas da própria gordura animal e dos óleos vegetais presentes nas rações.

Quimicamente, óleos e gorduras são bastante similares, sendo compostos por carbono, hidrogênio e oxigênio, em proporções variadas (METCALFY e EDDY, 1991). A gordura, além de possuir moléculas de grande tamanho, é insolúvel em água, o que torna difícil sua hidrólise, formando nos corpos receptores um filme sobre a superfície aquática que dificulta a troca de gases e a passagem de luz. As gorduras estão entre os compostos orgânicos mais estáveis e não são facilmente decompostos por bactérias (STOLL e GUPTA, 1997).

Vários são os inconvenientes decorrentes da presença de óleos e graxas em ARS e, dentre os principais, pode-se citar:

- Aderência às paredes de tubulações, bombas, válvulas e demais equipamentos acessórios;
- Aderência às paredes de tanques e unidades de tratamento;
- Obstruções nas canalizações, peças e equipamentos;
- Risco de geração de maus odores, em decorrência da decomposição anaeróbica.

Quando utilizados sistemas de disposição no solo (tratamento por escoamento superficial ou fertirrigação), sem a remoção prévia de gorduras, pode ocorrer colmatagem dos poros do solo, geração de vetores e maus odores.

De acordo com MATOS e SEDIYAMA (1995), aplicações contínuas de altas cargas da ARS podem igualmente resultar em entupimento de macroporos dos solos, dificultando a infiltração de água e a troca de gases entre a atmosfera e o solo, além de acarretar aumento na concentração de sais no solo, principalmente de sódio, potássio e bicarbonatos.

A quantificação da concentração de óleos e graxas em águas residuárias torna-se importante, uma vez que sua presença nas águas residuárias torna necessária a introdução de unidades para separação dessas substâncias por flutuação ou flotação, a fim de minimizar problemas nos sistemas de tratamento.

Como a ARS apresenta grande variação na sua composição, em decorrência da diluição dos dejetos promovidos pelas diferentes formas de lavagem das instalações, o conteúdo de matéria seca pode variar de 40 a 80 g L⁻¹ e, com ele, variar também seu valor fertilizante. O estabelecimento da taxa de aplicação no solo vai depender da concentração

de matéria seca na água residuária, da fertilidade do solo, da cultura a ser cultivada e dos riscos de contaminação ambiental.

Existem poucos trabalhos que abordam detalhadamente as características hidráulicas do escoamento de águas residuárias, provavelmente devido ao grau de complexidade envolvido, por se tratar de um fluido com comportamento diferente ao da água (TAGLIAFERRE, 2003).

Foi Isaac Newton o primeiro cientista a pesquisar a tendência de um fluido escoar, revelando que o fluxo é diretamente proporcional à força aplicada, definindo, assim, uma classe de líquidos como “fluidos newtonianos”. A água é um exemplo típico dessa classe. Mais tarde, outros pesquisadores estudaram fluidos mais complexos como Schluber, em 1828, que incluiu nova constante física denominada “taxa de fluidez”.

De acordo com BOURNE (1982), Poiseuille pode ser considerado um dos precursores dos viscosímetros, pois estudou o escoamento de fluido em tubos capilares, sendo este trabalho consolidado por George Gabriel Stokes com o experimento sobre o escoamento de fluidos através de orifícios.

Herchel e Bulkley propuseram com base nesses estudos a equação geral de viscosidade (equação 1), que descreve o comportamento reológico da grande maioria dos fluidos (HERUM *et al.*, 1966; HUGHES e BRIGHTON, 1974; BOURNE, 1982; STEFFE e MORGAN, 1986):

$$\tau = K \left(\dot{\gamma} \right)^n + \tau_o \quad (1)$$

em que

τ = tensão de cisalhamento, $ML^{-1} T^{-2}$;

K = índice de consistência (constante reológica), $ML^{-1} T^{n-1}$

$\dot{\gamma}$ = taxa de deformação angular, T^{-1}

n = índice de comportamento (constante reológica), adimensional;

τ_o = tensão mínima que promove o escoamento (constante reológica), $ML^{-1} T^{-2}$

Os líquidos podem ser classificados, quanto à sua resistência ao escoamento (viscosidade), em duas grandes classes: os fluidos newtonianos e os não newtonianos.

A ARS é um fluidos não-newtonianos, em que a relação da tensão de cisalhamento não é linear. Segundo FOX e McDONALD (1998), a maioria dos fluidos

não-newtonianos enquadra-se na categoria de pseudoplásticos, cuja curva do fluido é côncava para o eixo da taxa de deformação angular; para isso, $\tau_0 = 0$ e $n < 1$, isto é, os fluidos escoam logo que a força é aplicada, não aumentam de volume quando ocorre o escoamento e apresentam as partículas sólidas em suspensão no meio, característica que se observa com as águas residuárias da bovinocultura, suinocultura e da avicultura (CHEN e HASHIMOTO, 1976)

2.3. Processo de filtração

Segundo von SPERLING (1996), os diversos componentes presentes na água e que alteram o seu grau de pureza podem ser retratados de uma maneira mais ampla, em termos das suas características físicas, químicas e biológicas, traduzidas na forma de atributos de qualidade da água, às quais constituem-se fator de extrema importância no movimento da água em um filtro.

As impurezas presentes são constituídas, em sua maior parte, por sólidos suspensos, coloidais e dissolvidos. A turbidez nas águas é proporcionada pela presença de partículas em suspensão e em estado coloidal, as quais podem apresentar ampla faixa de tamanhos (von SPERLING, 1996).

As características químicas são proporcionadas pela presença de matéria orgânica ou inorgânica na água residuária. As características biológicas estão relacionadas à presença de seres vivos e, ou, mortos na água, seja do reino animal, vegetal e/ou, protistas.

A filtração é um processo físico de retenção de partículas, cuja eficiência dos filtros está diretamente relacionada ao diâmetro efetivo e à uniformidade do material filtrante utilizado (METCALF e EDDY, 1991).

A filtração é realizada quando a água residuária passa por uma camada de filtro composta de material granular, com ou sem a adição de substâncias químicas coagulantes. Na camada filtrante, a remoção dos sólidos suspensos contidos na água residuária é realizada por um processo complexo, envolvendo um ou mais mecanismos de remoção, como tensão superficial, interceptação, impactação, sedimentação e adsorção (METCALF e EDDY, 1991).

De acordo com POVINELLI e MARTINS (1973), a ação mecânica de eliminação dos sólidos em suspensão por filtração está baseada no princípio de que um meio poroso

pode reter impurezas de dimensões menores do que as dos poros da camada filtrante. No entanto, esses mecanismos de remoção são temporários ou finitos, tendo em vista a obstrução gradativa dos poros do leito filtrante, com o conseqüente aumento da perda de carga no filtro. O fim da operação do filtro é alcançado quando os sólidos suspensos provocam interrupção completa do fluxo do líquido em tratamento.

A base do conhecimento que se dispõe atualmente sobre os princípios da filtração foi desenvolvida a partir do uso da areia como material filtrante. Em 1791, James Peacock demonstrou que a água podia ser filtrada deixando-a infiltrar-se num leito de areia (EMARP, 2004).

Em 1829 o método de tratamento da água pelo processo de filtração foi apresentado pela primeira vez em Londres, quando o inglês James Simpson apresentou um filtro de areia para ser usado para reduzir a turbidez da água, alcançando tal sucesso que se tornou de uso generalizado e até mesmo obrigatório naquela cidade em 1855. O processo consistia em fazer a água atravessar lentamente numa camada de areia, disposta sobre uma camada de cascalho.

O filtro de areia passou, então, a ser constituído de várias camadas de partículas de tamanhos diferentes. Basicamente, esse filtro consiste em uma camada de material filtrante de textura mais fina disposta sobre outra camada de material de textura mais grossa. Essas camadas, por sua vez, ficam sobre uma camada de cascalho mantida numa tela de arame, que serve de suporte para a coluna filtrante. Após aplicar sobre o filtro água impura ou barrenta, as impurezas ficam retidas nos poros dos materiais componentes do filtro. O processo descrito passou a ser denominado de filtração.

Desde então, o uso da areia como material filtrante passou a ser difundido no mundo inteiro como um processo de tratamento no qual se faz passar água por um meio poroso capaz de reter alguns tipos de impurezas. De acordo com SANTOS *et al.* (2004), a filtração consiste na passagem de um afluente líquido através de um meio filtrante granular, onde, por intermédio de mecanismos de transporte e adesão, as partículas presentes podem ficar retidas. Contudo, é controvertido o uso desse dispositivo como a última barreira sanitária capaz de reter eventuais partículas, até mesmo microrganismos presentes na água. Há argumentos contrários a sua utilização como tratamento único, em virtude da baixa eficiência e irregularidade na remoção da turbidez e de patogênicos, da formação de uma película biológica em torno do elemento filtrante, na qual pode ocorrer o desenvolvimento de patogênicos oportunistas e da não filtração domiciliar da água em países desenvolvidos.

A filtração é geralmente, considerada como última etapa do processo de tratamento da água antes da sua desinfecção, podendo também ser aplicada no pós-tratamento de esgoto sanitário. Segundo KAMINSKI *et al.* (1997), partículas menores que 1 mm são transportadas por difusão até a superfície dos grãos do meio filtrante, enquanto as demais são transportadas pela ação da gravidade. Não obstante, a real compreensão do comportamento das partículas dentro dos filtros continua ainda incompleta, dada à complexidade do processo (LAWLER, 1997).

SANTOS *et al.* (2004) afirmaram que, em estações de tratamento de água e de esgoto, os atributos comumente usados no monitoramento de sistemas de filtração são: a perda de carga nos filtros, o tempo de duração da filtração, a concentração de sólidos suspensos totais (SST) e a turbidez do efluente. Contudo, de acordo com KOBLER e BOLLER (1997), tanto a concentração de SST quanto a turbidez são medidas que contemplam, principalmente, partículas maiores que 10 µm, sendo essas as que mais contribuem para a massa e o volume total de sólidos presentes em efluentes.

Segundo KAMINSKI *et al.* (1997), KOBLER e BOLLER (1997) e HALL e CROLL (1997), a maioria dos sistemas de filtração não apresenta remoções satisfatórias de partículas menores que 10 µm, de modo que seus efluentes podem conter grande quantidade de bactérias e protozoários, mesmo apresentando baixas turbidez e concentração de SST. Sendo assim, a utilização da distribuição de tamanho de partículas na avaliação do desempenho de filtros, poderia servir como parâmetro indicador de risco sanitário.

HALL e CROLL (1997) avaliaram o desempenho de alguns filtros rápidos na Inglaterra usando a turbidez e a contagem de partículas como atributos de controle sanitário e oocisto de *Cryptosporidium* como microrganismo indicador, utilizado por apresentar tamanho entre 4 e 6 µm e serem resistentes à desinfecção. Os autores não observaram qualquer correlação entre turbidez e contagem de partículas, porquanto efluentes com pequena variação de turbidez (0,1 a 0,2 uT) apresentaram grande variabilidade no número de partículas entre 2 µm a 5 µm (20 a 6000 partículas por mL).

O filtro de areia tem um funcionamento semelhante ao dos filtros lentos das estações de tratamento de água. De forma similar, a limpeza deste tipo de filtro deve ser realizada por meio de raspagem da camada superficial da areia, quando o filtro começar a perder sua capacidade de filtração, ou seja, quando começar a "entupir". Após limpeza, o leito filtrante deve ter sua espessura original reconstituída, ou seja, a camada de areia deve ser completada novamente.

Com base no conhecimento já acumulado sobre os princípios de filtração, já se utiliza hoje além da areia, vários tipos de materiais filtrantes, a exemplo de membranas filtrantes, carvão ativado, cartuchos em celulose aglomerada por resina melamínica, sendo este último utilizado como filtro polidor que tem o objetivo de separar da água as partículas que não puderam ser retidas nos filtros de areia e carvão.

Nas tecnologias de filtração em membranas, a vazão afluente é separada em dois fluxos distintos, denominado permeado e concentrado. Permeado é a parcela que passa através da membrana, enquanto o concentrado é a parcela que fica enriquecida com solutos ou sólidos suspensos retidos pela membrana. Segundo SCHNEIDER e TSUTIYA (2001), nestes processos a água é forçada a atravessar uma membrana semipermeável pela aplicação de uma força motriz que pode ser, por exemplo, decorrente de uma diferença de pressão.

As tecnologias de membranas filtrantes são aplicadas tanto no pós-tratamento de esgoto sanitário como no tratamento de água para abastecimento.

Filtros de areia, de modo geral, têm sido utilizados em sistemas de tratamento de água com finalidade básica de remover qualquer arraste de matérias em suspensão ou ainda flocos, provenientes do reator. O filtro de areia, de um modo geral, consta de um leito filtrante de granulometria crescente no sentido descendente, e de um distribuidor superior e outro inferior, que objetivam um fluxo uniforme de água em toda a área de filtração. O leito filtrante é geralmente areia ou antracito e o sub-leito, de granulometria maior, é constituído por cascalho.

De acordo com TCHOBANOGLIOUS (1995), uma das maiores limitações ao aprimoramento de projetos de estações de água e esgoto é o pouco conhecimento dos fenômenos como transferência de massa, adsorção, difusão e reações bioquímicas, todos influenciados pela distribuição de tamanho de partículas e a utilização de atributos não-específicos (DBO, DQO, sólidos suspensos, turbidez etc.), no monitoramento e controle de processos e operações, nos quais a natureza e o tamanho dos constituintes são desconhecidos. LEVINE *et al.* (1985), argumentam que os processos de transferência de massa, adsorção e difusão e as reações bioquímicas são todos influenciados pela distribuição de tamanho das partículas, de modo que, seja em operações ou processos de separação sólido-líquido, seja na degradação biológica da matéria orgânica, o conhecimento da distribuição de tamanho de partículas pode contribuir para a escolha e o aperfeiçoamento das tecnologias de tratamento e para a adoção de procedimentos operacionais apropriados.

CRUZ VELEZ (1993), ao pesquisar filtração direta ascendente, visando superar as limitações iniciais e adoção de novos critérios de projeto e operação, estudou os efeitos do emprego de altas taxas e a possibilidade de carreamento de partículas do filtro. Di BERNARDO *et al.* (1999) colocaram o material filtrante totalmente misturado e expandido, posteriormente, em até 20%. Como os resultados obtidos na qualidade do efluente foram insatisfatórios, promoveu-se a expansão da areia em 50%, visando-se obter maior estratificação do meio granular. Concluíram que o estado de estratificação ou de mistura exerceu influência significativa no desempenho da filtração direta ascendente. Até o trabalho anteriormente relatado, o meio filtrante tinha sido colocado por subcamadas de maior granulometria na parte inferior e de menor na parte superior do filtro (estratificado).

De acordo com Di BERNARDO *et al.* (1999), um aspecto importante a ser considerado na filtração direta ascendente é a perda de carga máxima permitida, proporcionada pelo meio granular (areia + camada de pedregulho) no final da coluna de filtração. No entanto, como comprovado por PATTERNIANI (1986), FERNANDES (1987), TEIXEIRA (1987), CRUZ VELEZ (1993) e LARA PINTO (1994), de 30 a 50 % da perda de carga, obtida no final da coluna de filtração é devida à retenção de impurezas que ocorrem na camada de pedregulho, de sorte que pode-se assumir valor de perda de carga final no meio granular (areia+pedregulho) entre 2,0 e 2,4 m para areia com camada de espessura igual a 1,8 m.

A força motriz deve superar a resistência oferecida pela camada filtrante, pois com a operação do filtro inicia-se o processo de acúmulo dos sólidos até ocorrer o seu completo entupimento. Quando a perda de carga máxima admissível é alcançada, se o material filtrante (areia+pedregulho) deve ser retrolavado. No caso de filtros orgânicos o material filtrante deve ser trocado.

Di BERNARDO *et al.* (1999) concluiu que: i) a velocidade mínima de carreamento de areia parcial ou totalmente misturada é maior que aquela dos menores grãos da areia estratificada, possibilitando o uso de maiores taxas de filtração; ii) há influência do tipo da areia na duração da filtração; iii) o período inicial de funcionamento do filtro com produção de água de qualidade insatisfatória é mais longo nos filtros com maior grau de mistura da areia; iv) após esse período inicial, a qualidade da água filtrada não é mais influenciada pelo grau de mistura da areia.

Um meio filtrante ideal deve ser constituído de partículas de diâmetro e tipo de material que venham proporcionar um efluente em condição satisfatória, reter um máximo de quantidade de sólidos.

Materiais filtrantes mais finos deverão proporcionar a produção de um efluente mais depurado, entretanto produzirão, também, maior perda de carga nas camadas superiores da coluna filtrante, proporcionando, assim, pequeno período de operação do filtro. Materiais filtrantes mais grosseiros vão permitir mais profunda penetração de sedimentos, maior volume poroso para remoção e armazenamento de partículas suspensas, maiores períodos de operação do filtro e mais fácil limpeza por reversão do fluxo.

Depois de suplantada a capacidade do material filtrante reter sólidos, a eficiência de tratamento deverá diminuir, o que tornará necessária à substituição do filtro em intervalos definidos de tempo. Os materiais filtrantes utilizados, ou seja, saturados de material absorvido, adsorvido ou simplesmente retido em seus poros, constituem lotes de material a ser compostado, podendo produzir, ao final do período de maturação, adubo orgânico de considerável valor fertilizante.

De acordo com Bispo e Behrman, citados por METCALF e EDDY (1991), a filtração deve ser baseada na compreensão das variáveis que controlam o processo e no conhecimento pertinente do mecanismo ou mecanismos responsáveis pela remoção de particulado de águas residuárias.

Pela teoria da filtração, a área exposta do meio filtrante deve ser o critério de dimensionamento. Entretanto, como essa área é função do tamanho da partícula e da profundidade da coluna, aumento do diâmetro das partículas do meio filtrante vai requerer, por compensação, aumento da profundidade da coluna.

As principais variáveis a serem consideradas no projeto de filtros para a remoção de resíduos sólidos suspensos são: a natureza do efluente a ser filtrado; tamanho das partículas (granulometria) do material filtrante e a taxa de filtração. De acordo com METCALF e EDDY (1991), estas são as variáveis mais importantes do processo.

As dimensões de filtros de areia devem obedecer a uma taxa de filtração máxima de 5 a 8 $\text{m}^3 \text{m}^{-2} \text{h}^{-1}$. A partir daí, pode-se calcular o diâmetro requerido para o filtro.

Filtros com pequena taxa de filtração proporcionam maior eficiência na depuração da águas residuárias, contudo um menor volume filtrado; enquanto taxas de filtração altas resultam numa capacidade maior de filtragem do sistema com relação ao volume, porém com uma eficiência menor de remoção de poluentes.

2.3.1 Classificação dos sistemas de filtração

De acordo com METCALF e EDDY (1991), os filtros podem ser classificados de acordo com a direção do fluxo, tipo de material filtrante, força motriz e método de controle da taxa de filtração.

Em função da estrutura do material filtrante utilizado, o meio poroso do sistema de filtração pode ser classificado como granular ou fibroso. O granular é usualmente constituído de um conjunto de partículas ou grãos, de forma esférica ou não, dispostas regular ou aleatoriamente, e representam a grande maioria dos meios porosos. Já o fibroso, é constituído de um conjunto de inclusões muito longas, chamadas de fibras, que podem ser naturais ou sintéticas, retas ou curvas, estando aleatoriamente dispostas ou em malhas regulares.

Meios porosos fibrosos têm aplicações como filtros para remoção de partículas finas em correntes de fluidos. Por não serem tão comuns como os granulares, eles foram menos estudados (JACKSON e JAMES, 1986). Ainda hoje, pouco se sabe como a estrutura do meio pode influenciar a resistência que proporciona ao escoamento.

Pode-se classificar o escoamento em meios porosos fibrosos em função da distribuição de suas fibras e da direção do escoamento como: escoamento longitudinal ao longo de um arranjo de fibras paralelas; escoamento normal a um arranjo de fibras paralelas; e escoamento através de malhas tridimensionais. O alinhamento das fibras tem grande influência na resistência ao escoamento. Se as fibras são alinhadas no sentido do fluxo, a resistência é bem menor do que quando elas estão orientadas perpendicularmente ao fluxo. A uniformidade da distribuição espacial das fibras também é determinante para a resistência ao escoamento. É difícil construir um material fibroso realmente homogêneo, e essa não-uniformidade pode causar um aumento na permeabilidade do meio em torno de 50% (JACKSON e JAMES, 1986).

Os filtros podem operar de forma intermitente ou contínua. A operação intermitente dos filtros possibilita, aparentemente, maior purificação e maior estabilidade no tratamento de águas residuárias, mas não há regras exatas entre o período de descanso e a operação do sistema (NIELSEN *et al.*, 1993). Filtros intermitentes, embora possam ter mais prolongado período de operação do que os contínuos devem, também, ter seu material filtrante substituído.

2.3.2 Filtração de águas residuárias de suinocultura

O aproveitamento da ARS na fertirrigação de culturas agrícolas, por se tratar de técnica de disposição que barateia os custos de tratamento e por trazer benefícios agrícolas, tem despertado o interesse de agricultores, pressionados pelas exigências estabelecidas na legislação ambiental e a necessidade de baixar custos operacionais (BRANDÃO *et al.*, 2000). Entretanto, em razão da grande quantidade de material sólido suspenso e dissolvido presente nas ARS, mesmo após ter passado por um tanque de sedimentação, muitos problemas de entupimento de bombas, tubulações e, principalmente, emissores, têm sido verificados.

Para aproveitamento das ARS na fertirrigação de culturas agrícolas, torna-se necessária a remoção dos sólidos em suspensão e de parte dos dissolvidos, principalmente no caso do uso de aplicação localizada. Neste particular, a filtragem da ARS, como etapa de tratamento do líquido antes de seu bombeamento, pode tornar menos problemática a aplicação e distribuição dessas águas na cultura agrícola. O uso de filtros convencionais de areia não é recomendável face a problemas relacionados à rápida colmatação superficial e o impedimento ao fluxo normal da água residuária (Figura 1).



Figura 1: Aspecto relacionado à aplicação inadequada da ARS no solo causando à rápida colmatação superficial

O desenvolvimento de tecnologia alternativa para tratamento ARS, de baixo custo de implantação e operação torna-se imperativo e, dentre as técnicas passíveis de utilização está o uso de filtros orgânicos (BRANDÃO *et al.* 2000; Lo MONACO, 2001; MAGALHÃES, 2002).

Embora a filtração seja uma das principais operações usadas no tratamento de água potável, a filtração de água residuária é um processo de tratamento cuja prática é relativamente recente (METCALF e EDDY, 1991).

O uso de filtros orgânicos, após ter grande parte de seus poros obstruídos por sedimentos, deverá apresentar perda de carga que induz a substituição total ou parcial do material filtrante. Essas trocas podem ser relativamente freqüentes, dependendo da taxa aplicada e da concentração de sólidos presentes na água residuária.

Materiais alternativos para uso como filtros foram avaliados por BRANDÃO *et al.* (2000), que verificaram que a casca de arroz, a casca de frutos do cafeeiro, o bagaço de cana-de-açúcar, o sabugo de milho triturado, a serragem de madeira e o fino de carvão vegetal podem constituir importante opção de material filtrante para o uso no tratamento da ARS. Dentre os materiais filtrantes avaliados, os que apresentaram maior capacidade de retenção de poluentes foram o bagaço de cana-de-açúcar e a serragem de madeira. No que se refere à eficiência na remoção de sólidos sedimentáveis (SP), de acordo com BRANDÃO *et al.* (2000), foi alcançada eficiência superior a 90% em todos os materiais filtrantes avaliados, chegando a atingir 97,2% de remoção nos primeiros volumes filtrados, quando o material filtrante utilizado foi a casca dos frutos do cafeeiro.

Ainda de acordo com BRANDÃO *et al.* (2000), com relação à concentração de ST, a eficiência máxima de remoção encontrada foi de 33%, quando o material filtrante foi o fino de carvão vegetal.

MAGALHÃES (2002) utilizou a serragem de madeira e bagaço de cana-de-açúcar como materiais filtrantes da ARS e comprovou a eficiência desses materiais em reter de poluentes. Os filtros de serragem de madeira alcançaram taxas de remoção de 90 a 99% de sólidos em suspensão e de 43 a 57 % para sólidos totais. Nos filtros de bagaço de cana-de-açúcar as remoções foram de 81 a 96 % para sólidos em suspensão e de 50 a 56 % para sólidos totais. No trabalho conduzido por MAGALHÃES (2002), quase todos os valores obtidos das concentrações relativas de sólidos nos efluentes dos filtros, montados com bagaço de cana-de-açúcar e serragem de madeira, permaneceram aquém do valor de 50 mg.L⁻¹, citado por LEON e CAVALLINI (1999) como concentração máxima admitida para um bom funcionamento do sistema de aplicação por gotejamento.

Embora as vantagens do uso de materiais orgânicas em filtros para ARS já tenham sido comprovadas (BRANDÃO *et al.* 2000; Lo MONACO, 2001; MAGALHÃES, 2002), pouco se sabe sobre critérios de otimização operacional desses filtros.

A interação filtro-contaminante é muito complexa, uma vez que muitos fenômenos físicos, químicos e biológicos podem ocorrer simultaneamente. São inúmeros os fenômenos que controlam o transporte de contaminantes em meios porosos, em que o contaminante considerado é a massa de alguma substância tóxica dissolvida (poluente), movendo-se com algum fluido (água) nos vazios do meio poroso (filtro), seja ele saturado ou não (NOBRE 1987).

A granulometria do material que compõe o filtro é a característica do meio que mais afeta a operação de filtração, já que grande parte das reações, que ocorrem no sistema filtro-água, é fenômeno de superfície, que tem a sua magnitude dependente do tamanho das partículas envolvidas. Se a granulometria do material filtrante é muito pequena, grande parte da força motriz será perdida para superar a resistência friccional proporcionada pela camada filtrante. Por outro lado, se a granulometria do material é muito grosseira, muitas das partículas de pequenas dimensões presentes no efluente passarão diretamente pela camada, baixando-se a eficiência do filtro na remoção de sólidos suspensos.

Lo MONACO *et al.* (2004) analisando a influência da granulometria da serragem de madeira como material filtrante no tratamento de águas residuárias de suinocultura, utilizou colunas de filtragem contendo o material filtrante em três faixas granulométricas (0,84 a 1,19; 1,19 a 2,00 e 2,00 a 2,83 mm), concluíram que a maior granulometria da serragem de madeira proporcionou maior eficiência de remoção de sólidos totais, obtendo-se valores em torno de 70%. A menor granulometria mostrou-se mais eficiente na remoção de nitrogênio (N-total), obtendo-se valores em torno de 50%. Para os elementos cobre e zinco Lo MONACO *et al.* (2004) obtiveram remoções superiores a 95%, tendo sido obtida maior eficiência na remoção de cobre quando se utilizou o material com menor granulometria.

2.4. Modelagem do Processo de filtração de águas residuárias

O estudo do escoamento longitudinal em regime laminar e permanente em um meio poroso fibroso é considerado como ocorrendo através de diversas fibras circulares, de mesmo diâmetro. O diâmetro das fibras é desprezível quando comparado com o comprimento das mesmas; além disso, o diâmetro delas é muito menor do que da seção transversal do meio filtrante. Quanto à disposição, as fibras estão arranjadas paralelamente umas às outras e aleatoriamente espalhadas no meio filtrante. O fluido é

newtoniano, com densidade e viscosidade constantes, e as fibras são consideradas como sendo sólidas e impermeáveis. Sendo o escoamento longitudinal somente na direção paralela às fibras.

Como o perfil de velocidades em uma seção transversal do meio fibroso não varia ao longo de seu comprimento, é de fundamental importância conhecer como o fluido se comporta em uma única seção do meio, o que torna o escoamento bidimensional, em que o único componente da velocidade na direção longitudinal é função das duas coordenadas espaciais em um plano transversal.

BERGELIN *et al.* (1950) estudaram o escoamento de óleo através de tubos de trocadores de calor dispostos em arranjos regulares. Este trabalho foi importante, por ser um dos poucos trabalhos experimentais que descreveu, precisamente, a disposição das “fibras” e a direção do escoamento.

HAPPEL (1959) resolveu as equações de conservação da energia para o problema do escoamento lento em meios regulares, considerando, ao invés de um polígono regular, um círculo como forma de célula elementar. O diâmetro do círculo foi calculado de forma que esta célula tivesse a mesma concentração (relação de volume de material sólido e volume total) que o meio poroso. No contorno do círculo foi imposta a condição de tensão de cisalhamento nula. Esta análise simplificou, consideravelmente, o problema, mas afastou a solução de um arranjo real.

A resistência do meio poroso ao escoamento tem sido apresentada de diversas formas: em função do fator de atrito pelo Número de Reynolds; como uma relação entre o gradiente de pressões e a vazão volumétrica; e como uma força de arrasto do escoamento sobre as fibras.

Filtros fibrosos são largamente utilizados para a remoção de partículas de fluidos. São usualmente representados, em teoria, por um arranjo randômico de cilindros iguais e paralelos. Em um filtro real, que pode ter suas fibras deslocadas, proporcionando uma não-uniformidade no espaçamento entre as fibras, a resistência ao escoamento pode ser reduzida consideravelmente (YU e SOONG, 1975).

Em virtude da grande complexidade dos meios porosos reais, é muito difícil descrevê-los geometricamente de forma precisa. Em teoria, um meio poroso é especificado pelas equações analíticas que definem o espaço entre os poros. Para objetivos práticos, estas equações são impossíveis de se descrever. Algumas aproximações geométricas são, então, consideradas, de modo a tornar possível o estudo do meio, obtendo-se características muito próximas das reais.

Estudo do comportamento do escoamento em meios porosos fibrosos, de geometrias regulares, tanto longitudinal quanto transversal às fibras, foi desenvolvido por JACKSON e JAMES (1986). Apesar de geometrias randômicas serem bastante freqüentes, poucos foram os estudos relativos ao comportamento de fluídos em percolação em filtros que apresentem este tipo de arranjo de fibras.

A modelagem matemática é um processo complexo que não se resume simplesmente a montagem e resolução de uma equação. Ao executar a modelagem de um sistema, não se deve perder de vista a distinção entre modelo e sistema: o modelo a ser desenvolvido deve ser uma representação adequada do sistema. MARLIN (2000) apresenta um procedimento estruturado que ressalta alguns cuidados essenciais para a aplicação prática da modelagem, envolvendo as etapas de definição dos objetivos; preparação das informações disponíveis; formulação do modelo; resolução; análise da solução e validação do modelo.

O desenvolvimento de abordagens analíticas para descrever o escoamento em meios porosos fibrosos deve utilizar diversas técnicas matemáticas, devendo ser, porém, aperfeiçoados os processos de determinação da permeabilidade destes meios. Os modelos teóricos da ciência, de lógica-matemática, são reducionistas, por definição. Abstraem do fenômeno a ser explicado apenas as características relacionais com alto potencial de conceitualização e conseqüente poder de generalização.

Quando o meio poroso (filtro) encontra-se com todos os poros cheios de água, o potencial matricial é nulo e a condutividade hidráulica é denominada saturada. Nesse caso, o filtro que tiver maior quantidade de macroporos (poros que efetivamente permitem a condução da água no filtro) será o mais condutivo, já que dispõe de maior área de transporte. Como o arranjo das partículas proporciona a formação de maior quantidade de espaço macroporoso, filtros de estrutura granular são mais condutivos, quando saturados.

A água move-se sempre que existirem diferenças de potencial nos diferentes pontos do sistema. Este movimento dá-se no sentido do decréscimo do potencial, isto é, a água sempre se move de pontos de maior potencial para os pontos de menor potencial. De acordo com REICHARDT (1996), foi Darcy, em 1856, o primeiro a estabelecer uma equação que possibilitou a quantificação do movimento de água em materiais porosos saturados. Ele verificou que o fluxo de água é proporcional ao gradiente do potencial dentro do filtro.

O gradiente do potencial da água é uma força responsável pelo movimento da água no filtro, quando o gradiente é nulo, não há força e, conseqüentemente, não há movimento. Devido às variações da forma, direção e largura dos poros, a velocidade da água no filtro é altamente variável, dificultando a modelagem, a nível microscópico, do meio. Portanto, para fins práticos adota-se uma abordagem macroscópica, na qual a velocidade é representada por uma velocidade média.

Em geral, a modelagem matemática da remoção de particulados no espaço e no tempo, dentro do filtro, está baseada na equação da continuidade.

A equação de continuidade para a operação de filtração pode ser desenvolvida fazendo-se o balanço de massa de sólidos suspensos em um volume de controle de área A e espessura (dx), na direção do fluxo, em que a taxa de acúmulo de sólidos no filtro é o resultado entre a diferença da taxa de entrada e a taxa de saída de sólidos do filtro, e cuja representação matemática de balanço de massa, segundo METCALF e EDDY (1991), é:

$$\left(\frac{\partial q}{\partial t} + \alpha \frac{\partial \bar{C}}{\partial t} \right) dV = Q C - Q \left(C + \frac{\partial C}{\partial x} dx \right) \quad (2)$$

em que:

$\frac{\partial q}{\partial t}$ = variação na quantidade de sólidos depositados no filtro com o tempo ($M L^{-3} T^{-1}$);

α = porosidade média do meio filtrante ($L^3 L^{-3}$);

$\frac{\partial \bar{C}}{\partial t}$ = variação na concentração média de sólidos na suspensão contida no espaço poroso do material filtrante, em relação ao tempo ($M L^{-3} T^{-1}$);

dV = diferencial do volume (L^3);

Q = vazão filtrada ($L^3 T^{-1}$);

C = concentração de sólidos suspensos ($M L^{-3}$);

$\frac{\partial C}{\partial x}$ = variação na concentração de sólidos suspensos na suspensão com a distância ($M L^{-3} L^{-1}$)

x = coordenada espacial na direção do escoamento (L)

Substituindo na equação 2, Q por Av , em que v é o fluxo ou taxa de filtração ($L T^{-1}$) e lembrando que $A dx = dV$, tem-se:

$$\frac{\partial q}{\partial t} + \alpha \frac{\partial \bar{C}}{\partial t} = -v \frac{\partial C}{\partial x} \quad (3)$$

Em um processo corrente, a quantidade de sólidos em suspensão contida na camada filtrante é pequena, quando comparada com o volume de líquido que atravessa a camada filtrante, assim, a equação 3 pode ser reduzida a:

$$-v \frac{\partial C}{\partial x} = \frac{\partial q}{\partial t} \quad (4)$$

Esta equação é uma das mais comumente citadas na literatura para descrever a filtração.

Considerando-se que a forma da curva de remoção de sólidos no filtro varie apenas com o tempo, a equação 4 pode ser escrita como uma equação diferencial ordinária.

$$-v \frac{dC}{dx} = \frac{dq}{dt} \quad (5)$$

Nos filtros orgânicos, diferentemente do que ocorre em filtros que utilizam areia como material filtrante, a variação na eficiência de filtragem de água residuária é significativamente alterada com o tempo. Enquanto a escala de tempo para os filtros orgânicos corresponde a aproximadamente 120 minutos de operação (vida útil) e, em seguida, é feito o seu descarte, em filtros de areia a escala de tempo corresponde a maiores períodos de operação, sem ter sua eficiência comprometida, sendo realizada a retrolavagem semanalmente (STEEL e MCGHEE, 1971).

A variação da concentração de sólidos na camada filtrante com a distância é proporcional ao coeficiente de remoção que varia com o grau de tratamento ou a remoção alcançada no filtro. Considerando-se que a probabilidade de remover partículas na primeira camada filtrante seja p_1 , na segunda camada seja p_2 ; sendo p_2 menor que p_1 , já que as partículas maiores serão removidas pela primeira *camada*, este fenômeno pode ser matematicamente expresso por meio da seguinte equação:

$$\frac{dC}{dx} = (1 + a x)^{-n} r_o C \quad (6)$$

em que:

$$\frac{dC}{dx} = \text{Variação na concentração de sólidos com a profundidade da camada filtrante (mg L}^{-1} \text{ cm}^{-1}\text{)}$$

r_o = taxa de remoção de sólidos (L^{-1});

a, n = parâmetros de ajuste (adimensionais)

Na equação 6, o termo dentro do parêntesis é chamado de fator de retardamento. Quando o termo $n = 0$, o termo dentro de parênteses é igual a 1,0 e, sob estas condições, a equação 6 representa uma curva de remoção logarítmica METCALF e EDDY (1991).

O valor de r_o representa a declividade da curva de remoção quando a espessura da camada tende a zero, já que $(1 + ax)^n \cong 1$. Os parâmetros a e n podem ser determinados ajustando-se a equação aos dados obtidos experimentalmente ou por procedimentos matemáticos que se iniciam reescrevendo a equação 6 da seguinte forma:

$$\left(\frac{C_o r_o}{dC/dx} \right)^{1/n} = 1 + ax \quad (7)$$

em que:

C_o = concentração de sólidos do afluente ($M L^{-3}$);

Analisando a equação, verifica-se que o valor de n será aquele que proporciona a obtenção de equação linear no segundo termo da igualdade. Nesse caso, a declividade da reta será igual a constante a .

Existem cinco importantes fatores que afetam a remoção de sólidos suspensos no espaço e no tempo em processo de sedimentação dentro de um filtro de material com forma granular, para uma dada temperatura. Esses fatores são a granulometria do material filtrante, a taxa de filtração, o tamanho e a distribuição dos sólidos em suspensão no efluente e a capacidade do sistema em acumular de sólidos. Então, uma equação geral para a filtração deve levar em consideração o efeito desses fatores.

De acordo com GOLD *et al.* (1992), em filtros de areia, o tempo do uso do depende dentre outras coisas de fatores como temperatura do material a ser filtrado, qualidade de água, quantidade de matéria orgânica e incidência luminosa, que atuam diretamente sobre o desenvolvimento da biomassa microbiana no filtro, provocando gradativa obstrução dos poros do leito filtrante e aumento da perda de carga.

Embora várias formulações diferentes sejam possíveis, uma equação geral de filtração pode ser desenvolvida multiplicando-se a equação 6 por um fator que leva em

conta o efeito do material acumulado no filtro. A equação geral de filtração proposta é, então:

$$\frac{dC}{dx} = -\frac{1}{(1+ax)^n} r_o C_o \left(1 - \frac{q}{q_u}\right)^m \quad (8)$$

em que:

q = massa de sólidos suspensos depositados na camada filtrante ($M L^{-3}$);

q_u = máxima massa de sólidos a ser retida na camada filtrante ($M L^{-3}$);

m = constante relacionada à capacidade do sistema em acumular sólidos (adimensional)

Inicialmente, quando a quantidade de sólidos removidos pelo material filtrante é baixa, $q = 0$; $(1-q/q_u)^m = 1$, e a equação 8 passa a ser equivalente à equação 6. Quando as camadas superiores do filtro começarem a apresentar entupimento, o termo $(1-q/q_u)^m$ tende a zero, e a taxa de variação da concentração com a distância passa a ser igual a zero. Ainda assim, em camadas mais profundas do filtro, a quantidade de sólidos removidos pode ser diferente de zero, podendo, desta forma, serem aplicadas às considerações feitas anteriormente.

As equações obtidas contêm variáveis cujo valor deve ser obtido mediante medidas ou observações do fenômeno. Tais medidas devem ser as mais precisas possíveis, para que as soluções das equações também o sejam.

A previsão por meio de modelo físico-matemático está baseada no fato de que, se conhecermos o estado de um sistema em um certo momento, então utilizando-se as equações adequadamente ajustadas para descrevê-lo, pode-se conhecer seu estado em qualquer instante.

A dificuldade encontrada em usar as mesmas equações de perda de carga utilizadas no escoamento de água “limpa” é que, no caso de águas residuárias, a porosidade varia com o tempo de operação do filtro, em razão do seu entupimento pelos sólidos em suspensão. Uma abordagem alternativa para estimar a perda de carga para diferentes tempos de operação está baseada na evolução da perda carga que aumenta com a quantidade de sólidos removidos pelo material filtrante (METCALF e EDDY, 1991).

A equação para evolução da perda de carga, na i -ésima camada no instante $(h_i)_t$ devido a deposição de sólidos pode ser assim descrita:

$$(h_i)_t = z (q_i)_t^b \Rightarrow h_{i,t} = z q_{i,t}^b \quad (9)$$

em que:

$h_{i,t}$ = perda de carga adicional na i -ésima camada, no tempo t , causada pelos sólidos;

$q_{i,t}$ = quantidade de sólidos depositados na i -ésima camada, num determinado tempo t , ($M L^{-3}$);

z, b = constantes (adimensionais)

Assim, a estimativa da perda de carga total no filtro no instante “ t ”, pode ser obtida utilizando-se a expressão:

$$H_t = H_o + H_{o,t} = H_o + \sum_{i=1}^n h_{i,t} \quad (10)$$

em que:

H_t = perda de carga total no tempo t , (L);

H_o = perda de carga com água “limpa”, (L);

$H_{o,t}$ = perda de carga adicional em toda camada, no tempo t , causada pela deposição de sólido

Considerando-se que a variação da massa retida, por camada, com o tempo de operação do filtro é de difícil obtenção experimental, pode-se obter a equação da evolução da perda de carga pelo monitoramento de piezômetros instalados no filtro.

No intuito de alcançar níveis mais elevados de eficiência operacional dos filtros, é de fundamental importância se considerar o tipo de material orgânico utilizado na coluna filtrante; a granulometria do material; o grau de compactação aplicado sobre o filtro quando da montagem da coluna filtrante e a qualidade da ARS utilizada, notadamente quanto à concentração de sólidos, considerando que os fatores supra mencionados são determinantes no nível de eficiência dos filtros.

Contrariamente ao que já foi citado para filtros de areia, no caso de filtros orgânicos não se pode atribuir a perda de carga ao desenvolvimento da biomassa microbiana no filtro, pois após a operação das colunas de filtração o material filtrante é descartado, não ocorrendo formação de biomassa microbiana. A obstrução dos poros dos filtros orgânicos causando perda de carga, neste caso, pode ser atribuída aos sedimentos presentes na água residuária e que são retidos no meio filtrante.

O desenvolvimento de modelos que possam descrever, com alguma confiabilidade, a filtração da ARS tornam-se necessários para que se possa, de uma

maneira mais eficiente e menos dispendiosa, definir as formas mais adequadas de sua operação. As informações obtidas com a modelagem do processo servem de ferramenta facilitadora para a tomada de decisão e de planejamento da forma da montagem, operação e descarte do filtro após a perda da sua eficiência operacional. A modelagem é a instância técnica inicial de um projeto com ordenação lógica das etapas da sua preparação (THIRY-CHERQUES, 2002). Um projeto estará bem ordenado se, e quando, for administrável e passível de avaliação. A disponibilização de um modelo hidráulico operacional calibrado e validado, certamente permitirá aplicações específicas no futuro, que ajudarão nas atividades de planejamento, engenharia e treinamento dos operadores do sistema de tratamento da ARS.

3. MATERIAL E MÉTODOS

A serragem de madeira, o bagaço de cana-de-açúcar e o pergaminho dos grãos de café, por serem subprodutos abundantes de atividades agropecuárias e industriais, de baixo custo, de fácil aquisição e por serem capazes de absorver/adsorver solutos e reter sólidos em suspensão, foram utilizados no preenchimento das colunas de filtração.

Para triturar a serragem de madeira e o bagaço de cana-de-açúcar foi utilizado o equipamento Desintegrador/Picador/Moedor (DPM), nº 01, constituído de 4 conjuntos de 3 martelos (total de 12 martelos), peneira com malha de 10 mm e motor de 5 cv. Depois de triturado, os materiais orgânicos foram peneirados em diferentes malhas, de forma a se obter duas faixas granulométricas: 2,0 e 3,0 mm e 5,0 e 8,0 mm.

A escolha das faixas granulométricas para o material filtrante foi baseada nos resultados obtidos por Lo MONACO (2001), que recomendou o uso de granulometrias entre 2,0 e 3,0 mm, por serem as que proporcionaram filtração mais eficiente sem, contudo, aumentar em demasia a perda de carga no sistema filtrante. A faixa granulométrica de 5,0 e 8,0 mm foi usada, entretanto, para constituir a camada superficial do filtro, para evitar que ocorra rápida colmatação na superfície do material filtrante e, com isso, diminuir muito rapidamente a taxa de filtração da água residuária.

Na Figura 2 (a, b e c), são apresentadas fotos dos materiais orgânicos utilizados nas colunas de filtração.



(a) (b) (c)
Figura 2: Fotos da serragem de madeira (a), do bagaço de cana-de-açúcar (b) e de pergaminho de café, utilizados como materiais filtrantes

Após a preparação dos materiais orgânicos (secagem ao ar livre, trituração e peneiramento para se obter materiais na faixa granulométrica entre 2,0 e 3,0 mm), amostras desses materiais foram recolhidas e utilizadas para que se pudesse quantificar o volume de poros, e assim se determinar a porosidade do meio filtrante. Para isso, amostras de bagaço de cana-de-açúcar, serragem de madeira e pergaminho dos grãos de café foram colocados em recipientes de volume conhecido (1000 mL^3), tendo-se o cuidado de efetuar o mesmo procedimento utilizado quando da montagem dos filtros, isto é, submeter os materiais filtrantes à mesma compressão de $16,7 \text{ kN m}^{-2}$. Após esses recipientes estarem completamente ocupados pelas amostras, foi aplicado sobre estas, o tolueno, líquido indicado para se avaliar porosidade, por ser uma solução de baixa tensão superficial, sendo esta uma característica que lhe permite alta eficiência para ocupar os espaços vazios do material. Com o auxílio de uma pipeta, o tolueno foi aplicado sobre o material contido no recipiente, até que o volume total do recipiente fosse completado. O volume de tolueno usado no preenchimento do volume de poros do material orgânico foi considerado no cálculo da porosidade. O procedimento foi repetido por três vezes.

3.1 Instalação, operação e monitoramento das colunas filtrantes segmentadas

Para a obtenção das equações matemáticas para estimativa da concentração de sólidos, como função da profundidade do filtro e do tempo de sua operação, ajuste da equação da evolução da perda de carga e para validação do modelo proposto para filtração da ARS em materiais orgânicos, foram instaladas, operadas e monitoradas colunas filtrantes segmentadas e não segmentadas.

Esta etapa do trabalho foi desenvolvida na Área Experimental de Hidráulica/Irrigação e Drenagem do Departamento de Engenharia Agrícola da UFV e no Laboratório de Qualidade de água do Departamento de Engenharia Agrícola da UFV.

Para obtenção da massa de sólidos retidos, por camadas, ao longo da coluna de filtração, e da concentrações de sólidos totais na solução afluyente do filtro, foi usada ARS bruta peneirada na tela de malha de 0,635 mm de diâmetro (40 mesh).

O sistema de filtração segmentado foi constituído por 10 filtros (Figuras 3, 4 e 5), com 13 cm de altura cada, utilizando tubo de PVC de 200 mm.

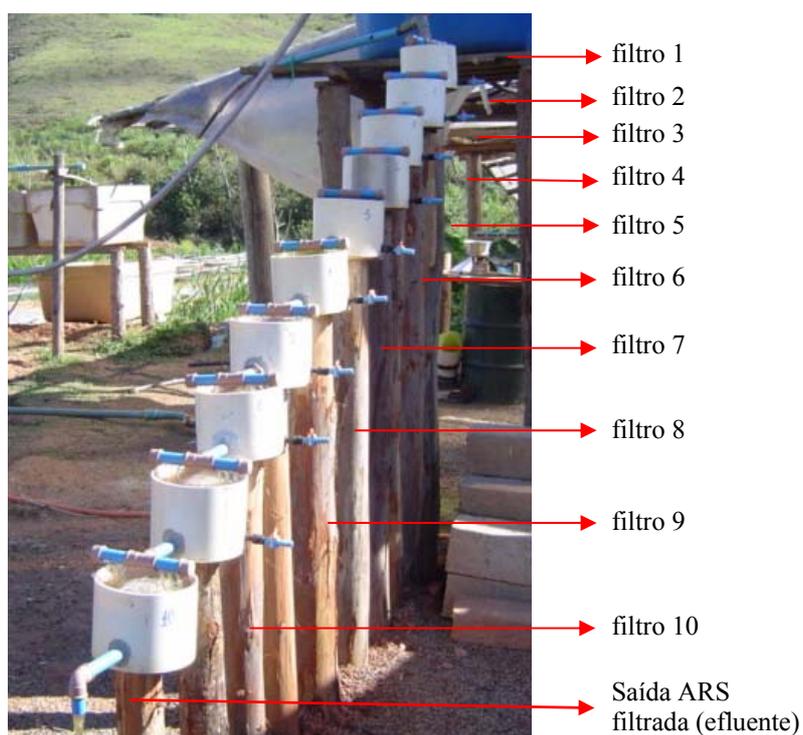


Figura 3: Sistema de filtração em coluna segmentada, construída para avaliação da capacidade filtrante de cada camada de material orgânico



Figura 4: Vista parcial dos filtros individualizados



Figura 5: Detalhe da entrada ARS no filtro

Os filtros segmentados foram preenchidos com material orgânico e, em seguida, submetidos a uma compressão de $0,167 \text{ kgf cm}^{-2}$ ($16,7 \text{ kN m}^{-2}$), até ser alcançada a altura de 12 cm. Esta taxa de compressão foi sugerida por MAGALHÃES (2002), que submeteu os resíduos orgânicos a diferentes graus de deformação do filtro para se determinar a melhor relação entre grau de compactação e a eficiência de filtração do material, no que se refere à concentração de sólidos em suspensão contidos na ARS. Após o preenchimento desses filtros com material orgânico e antes de se iniciar a operação de filtração da ARS, cada filtro foi umedecido com água limpa, até ser obtida a saturação do material orgânico. Por um período suficiente para drenar a água utilizada para a saturação do material, os filtros foram deixados em posição inclinada (no sentido da válvula instalada para coleta de efluente) e, em seguida, o conjunto (filtro + material orgânico úmido) foi pesado (P_1).

Cada conjunto foi disposto de forma ordenada, conforme apresentado na Figura 5 e, sobre o primeiro conjunto, aqui denominado de filtro 1, foi aplicada a ARS que, em fluxo descendente, passou pela seção da coluna filtrante de 12 cm de altura, seguindo para o segundo filtro (filtro 2) e assim, sucessivamente, até alcançar o último filtro (o filtro 10). O somatório das alturas desses filtros equivale à altura da coluna filtrante de 1,20m.

Iniciada a operação seqüenciada dos filtros, os sólidos presentes na ARS não retidos pelo filtro 1 passaram para os filtros subseqüentes, onde poderiam ou não ser retidos. Pelo fato desses filtros serem operados em série, quando o filtro 1 perdeu a capacidade filtrante, isto é, os interstícios dessa camada filtrante apresentaram-se obstruídos pelos sólidos da ARS, o fluxo cessou, mesmo que as filtros subseqüentes ainda apresentassem capacidade para continuar filtrando.

O tempo de operação das colunas filtrantes segmentadas foi condicionado à observação da primeira coluna filtrante, sendo encerrado no momento em que a filtração da ARS passou a ser considerada demasiadamente lenta.

Encerrada a operação, os filtros segmentados foram deixados por um período suficiente para drenar a água utilizada para a saturação do material, em posição inclinada a fim de permitir o escoamento da suspensão drenável através da válvula de coleta do efluente sendo, em seguida, pesados (P_2). A quantidade de sólidos retidos em cada filtro foi determinada por diferença entre a massa das amostras do material antes (P_1) e após o uso na filtração (P_2).

As amostras coletadas do afluente e do efluente de cada filtro foram analisadas no Laboratório de Qualidade da Água do Departamento de Engenharia Agrícola da UFV,

para determinação das concentrações de ST e SS, seguindo-se a metodologia apresentada em APHA (1995).

Os dados obtidos das amostras do efluente da ARS foram submetidos à análise de variância e análise de regressão linear múltipla. Para cada filtro orgânico testado, escolhida com base nos critérios de significância dos estimadores dos coeficientes de regressão até o nível de 1% e nos valores de R^2 , foi ajustada uma equação de regressão relacionando-se os valores de SS com o tempo de operação do filtro e a profundidades de camada dos filtros. Para a execução das análises e confecção dos gráficos de superfície de resposta foram utilizados os programas estatísticos SAEG versão 9.0 e Sigma Plot versão 8.0, respectivamente.

Uma vez suplantada a capacidade dos filtros em reter poluentes, os materiais utilizados como meio filtrante foram removidos das colunas filtrantes.

Os dados gerados no experimento de colunas segmentadas foram utilizados, para validação da equação geral de filtração.

Na simulação de filtração da ARS, considerou-se a concentração de sólidos na ARS no final de cada camada, seja a condição inicial da ARS para a camada subsequente.

De acordo com ALVAREZ V. (1994), usam-se constantemente modelos determinísticos e modelos probabilísticos para estudar a natureza dos fenômenos. Em virtude dos dois fatores tempo e profundidade da camada filtrante influenciarem, o fenômeno, foram ajustadas superfícies de respostas para estimativa de C e de q como função do tempo e da profundidade da camada filtrante.

Para cada material filtrante avaliado foi ajustada uma equação de regressão, escolhida com base nos critérios de significância dos estimadores dos coeficientes de regressão, até o nível de 5 % de probabilidade nos valores de R^2 . Para a execução das análises e confecção dos gráficos foram utilizados os programas estatísticos SAEG, versão 9.0 e Sigma Plot, versão 8.0, respectivamente.

3.2 Instalação, operação e monitoramento das colunas filtrantes não segmentadas

O sistema de filtração instalado, operado e monitorado na Área Experimental de Hidráulica/Irrigação e Drenagem do Departamento de Engenharia Agrícola da UFV, foi constituído por recipientes metálicos (tonéis) como colunas filtrante, com as seguintes dimensões: 0,58 m de diâmetro por 1,30 m altura.

Os materiais orgânicos (bagaço de cana-de-açúcar, serragem de madeira e pergaminho de grãos de café) foram triturados e peneirados e em seguida, acondicionados nas colunas filtrantes não segmentadas, de forma gradual, em camadas de aproximadamente 10 cm, até ser alcançada a altura total de 1,30 m.

As colunas de filtração foram montadas da seguinte forma:

- No fundo de cada recipiente foi instalado um sistema de drenagem, por onde foi coletado o efluente filtrado, constituído por tubos de PVC de 50 mm de diâmetro, perfurados (furos com \varnothing 2,0 mm). Para evitar a passagem de partículas do material filtrante e entupimento dos drenos, uma camada (h_1) de 0,20 m, constituída de material grosseiro (partículas do mesmo material orgânico, nos diâmetros de 3,0 – 8,0 mm), foi disposta no fundo dos recipientes, cobrindo o dreno;
- Sobre a camada de material mais grosseiro (h_1), foi disposta uma camada de material filtrante com 0,90 m de altura (h_2) e com granulometria de 2,5 a 3,0 mm, conforme esquema apresentado na Figura 6;

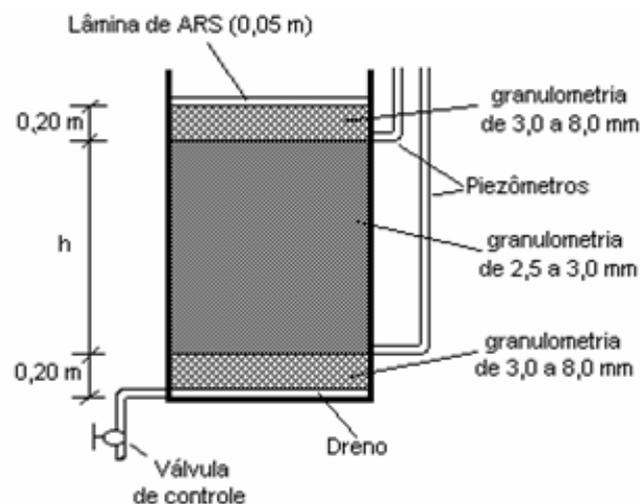


Figura 6: Esquema de montagem do filtro orgânico não segmentado

- Para evitar que ocorresse rápida colmatção da camada superficial do filtro, foi disposta, sobre a coluna filtrante, uma camada de 20 cm de altura (h_3), constituída de material de mesma granulometria do material que foi colocado junto aos drenos (3-8 mm).

Após a disposição de cada camada de resíduo na coluna, foi feita a compactação do material, sob compressão de $16,7 \text{ kN m}^{-2}$, equivalente à pressão exercida por um homem com massa de 50 kgf de peso, apoiado em um só pé. Esta carga é considerada

ideal para montagem do filtro, de acordo com MAGALHÃES (2002). Para minimizar o fluxo preferencial na parede interna da coluna, o material de preenchimento foi comprimido com as pontas dos dedos em toda a periferia do filtro, durante a fase de enchimento dos mesmos.

Após a compactação do material filtrante acondicionado na coluna de filtração, foi aplicada lâmina da ARS, por fluxo descendente, para que este operasse na condição saturada, durante todo o tempo.

Nas colunas de filtração, foram instalados 10 piezômetros (Figura 7) a fim de se poder quantificar e monitorar, ao longo do tempo, a perda de carga no sistema. Nas colunas de filtração foram fixadas válvulas em sua base, com as quais foi possível coletar amostras para determinação da concentração de sólidos totais (ST) e sólidos em suspensão (SS) no líquido em escoamento.

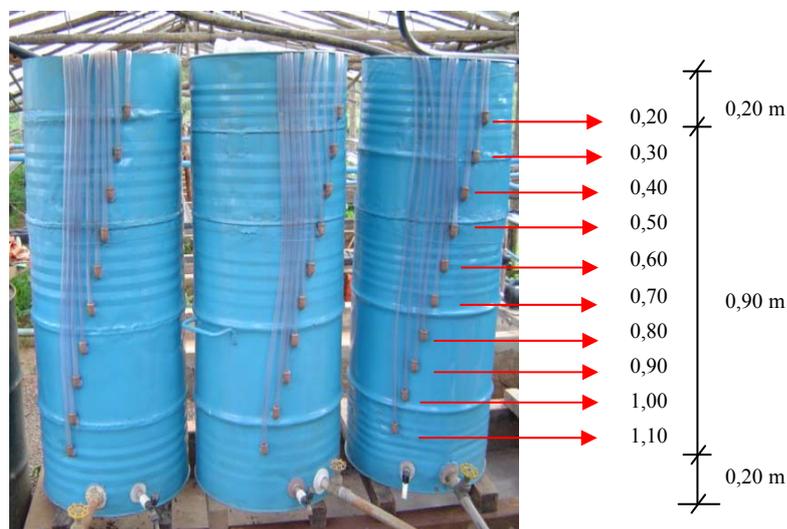


Figura 7: Colunas de filtração, não segmentadas, com detalhamento dos piezômetros

O monitoramento da perda de carga nos filtros orgânicos foi feito por meio de leituras das alturas do líquido nos piezômetros, efetuadas a cada 15 minutos, utilizando-se réguas graduadas (cm), fixadas paralelamente aos piezômetros.

O primeiro piezômetro (P_1) foi instalado a 0,20m do nível superior do filtro, isto é, imediatamente após o término da camada denominada h_1 , na transição entre o material mais grosseiro (3,0-8,0mm) e o material filtrante com granulometria mais fina (2,5-3,0mm). A partir deste piezômetro foram instalados mais nove piezômetros espaçados entre si de 0,10 m de diferença de nível, até alcançar a camada denominada h_3 , transição

entre o material filtrante com granulometria mais fina e o material mais grosseiro, posicionado no fundo dos filtros.

Antes de se iniciar a operação dos filtros orgânicos com ARS foi feita a aplicação de água “limpa” para se avaliar a perda de carga ocorrida nas colunas de filtração, tendo-se o cuidado de manter a vazão de entrada de água “limpa” no sistema, ajustada à vazão de saída.

A água residuária utilizada no experimento foi coletada em tanque de concreto de 5m x 3m x 3m, onde são estocados os efluentes gerados nas instalações da suinocultura da UFV, e conduzida ao tanque de distribuição, de onde foi transferida, por gravidade, aos filtros. O tanque de estocagem das águas residuárias brutas peneiradas ficou localizado em local que possibilitou a sua distribuição, por gravidade, sobre a superfície dos filtros não segmentados.

A ARS coletada passou, previamente, por um processo de pré-filtração através de uma tela (Figura 8) com malha de 0,635 mm de diâmetro (40 mesh), com o objetivo de reter os materiais mais grosseiros que poderiam a vir comprometer, rapidamente, o desempenho dos filtros orgânicos. A tela foi fixada numa estrutura de madeira, cujo conjunto foi instalado sobre o tanque, sendo instalado com uma inclinação de, aproximadamente, 45° e operou de forma estática, com limpeza automática, por gravidade.

Os dados de perda de carga nas colunas filtrantes, obtidas por leituras da variação de nível da ARS nos piezômetros, durante a operação dos filtros de serragem de madeira, bagaço de cana-de-açúcar e pergaminhos de grãos de café, foram utilizados para ajuste de uma superfície de resposta tendo a perda de carga como variável dependente e a profundidade da camada e o tempo de operação de cada como variáveis independentes. Para execução das análises foram utilizados o Programa Estatístico SAEG, versão 9,0.



Figura 8: Tela utilizada para filtração da ARS

Embora a temperatura do fluido influencie a sua viscosidade, o efeito da temperatura na viscosidade da ARS foi desconsiderado, uma vez que a temperatura do líquido permaneceu entre 20 e 30°C, durante a condução do experimento. Segundo HERUM *et al.*, 1966; CHEN e HASHIMOTO, 1976, KUMAR *et. al.*, 1972, nesta faixa de temperatura apenas o solvente (água) e não o conjunto de partículas em suspensão, que é o fator determinante do fluido pseudoplástico, é afetado. Em altas temperaturas, a estrutura das partículas em suspensão é afetada, modificando as propriedades do fluido.

Na tubulação que conduziu a água residuária até a coluna de filtração foi instalada uma válvula para permitir controle da vazão de alimentação do sistema.

Antes dos filtros serem operados tomou-se o cuidado de eliminar o ar presente no espaço poroso do material filtrante. A eliminação do ar foi feita mediante o enchimento da coluna filtrante, vagarosamente com ARS, para permitir a eliminação do ar dos espaços porosos. Durante esse enchimento, a válvula de controle instalada na base do filtro foi mantida fechada, até o enchimento total do filtro com a ARS. Em seguida, iniciada a aplicação da ARS, a válvula de saída do efluente foi aberta para dar vazão ao líquido, permitindo o movimento do líquido nos interstícios do material filtrante, sendo as colunas mantidas saturadas, na condição de filtro lento. Durante todo o período de filtração, procurou-se manter uma lâmina permanente de 10,0 cm da ARS sobre a superfície do filtro, por meio de controle nas válvulas, o que constituiu a carga hidrostática sobre o material filtrante.

No período de operação dos filtros, as águas residuárias armazenadas na caixa de distribuição foram sistematicamente revolvidas para que não houvesse sedimentação do material no fundo do recipiente.

Para avaliar a capacidade dos filtros, não segmentados, de removerem sólidos, presentes em ARS de diferentes concentrações de sólidos e gerar dados experimentais a serem usados para validação do modelo proposto, o afluente foi submetido a diferentes níveis de diluição da ARS bruta peneirada com água limpa (AL): 100 % ARS + 0% AL; 75 % ARS + 25% AL; 50 % ARS + 50% AL e 25 % ARS + 75% AL.

Durante a operação dos filtros, coletas de amostras do efluente foram efetuadas em intervalos de 15 minutos, com o objetivo de se obter dados para calcular a taxa de filtração da água residuária (medição de vazão) e para que se pudesse quantificar a eficiência na remoção de ST e SS, em função do tempo de operação e da quantidade de ST e SS no afluente.

As amostras coletadas no afluente e efluente dos filtros não segmentados foram analisadas da mesma forma e a operação desses filtros foi realizada de forma similar ao descrito no item 4.1 (Instalação, operação e monitoramento das colunas filtrantes segmentadas).

O período de operação dos filtros não segmentados foi condicionado à observação dos valores de perda de carga da coluna filtrante. Monitorando a perda de carga por meio de leituras feitas nos piezômetros, a operação dos filtros foi encerrada no momento em a perda de carga aumentou, de tal forma a proporcionar taxa de filtração menor que $0,2 \text{ L m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, observando-se a partir daí filtração da ARS demasiadamente lenta. Uma vez suplantada a capacidade dos filtros em reter poluentes, os materiais utilizados como meio filtrante foram removidos das colunas e descartados para tratamento pelo processo de compostagem.

O experimento foi conduzido com quatro concentrações de sólidos em suspensão dos afluentes e três repetições para cada material.

O volume de efluente coletado durante a condução dos ensaios foi convertido em lâmina filtrada, proporcionando, assim, a construção de curvas relacionando as concentrações de SS, ST e a lâmina filtrada.

Os dados de concentração de SS e ST do efluente (C) do filtro foram divididos pela concentração média desses parâmetros no afluente (C_0), para se obter os valores da concentração relativa (C/C_0).

Os dados de concentração relativa de ST e SS com o tempo de operação dos diferentes filtros orgânicos foram usados para ajuste de equações de concentração relativa desses atributos em função do tempo e para validação do modelo matemático proposto para a simulação do processo de filtração de ARS.

Para se verificar a relação existente entre as curvas ajustadas para quatro diferentes concentrações relativas de SS e ST na ARS bruta peneirada, aplicadas nos filtros de serragem de madeira, bagaço de cana-de-açúcar e de pergaminho de grãos de café, procedeu-se ao teste de identidade de modelo, conforme recomendado por REGAZZI (2003). Os resultados foram submetidos à análise com uso do aplicativo computacional SAEG (Sistema de Análises Estatística e Genética).

3.3 Avaliação da capacidade dos filtros segmentados na remoção de óleos e graxas

Para a quantificação da concentração de óleos e graxas presentes na ARS, amostras do afluente e do efluente foram coletadas e analisadas de acordo com os métodos padrões descritos pela APHA (1995), cujo método de quantificação recomenda-se a utilização do equipamento Extrator Soxhlet (condensador), sendo utilizado o solvente orgânico n-hexano (éter de petróleo) para a solubilização desse atributo.

3.4 Simulação do processo de filtração e validação do modelo

Para validação do modelo ajustado para a equação geral de filtração, foi feita a simulação do processo utilizando-se os dados obtidos com o uso dos filtros não segmentados operando com as quatro concentrações de sólidos em suspensão (diluição da ARS com água limpa) já definidas.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Características do meio filtrante

Dentre os materiais orgânicos avaliados como meio filtrante, o bagaço de cana-de-açúcar foi o que apresentou a menor porosidade (Quadro 2), característica que pode ser atribuída ao fato desse material apresentar fibras longas e finas, forma geométrica que proporciona maior aproximação entre as partículas, além de ser um material mais compressível do que os outros materiais orgânicos avaliados. O pergaminho dos grãos de café, ao contrário, tem formação geométrica que dificulta o assentamento das partículas no filtro, o que lhe confere maior porosidade. Além disso, apresenta menor compressibilidade do que os outros materiais orgânicos avaliados.

Quadro 2: Características dos materiais orgânicos na granulometria de 2,5-3mm utilizados como meio filtrante

| Material orgânico | Porosidade ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$) | Teor de água ^(*) (dag kg^{-1}) |
|-----------------------------|--|---|
| serragem de madeira | 0,849 | 12,7 |
| bagaço de cana-de-açúcar | 0,805 | 13,8 |
| pergaminho de grãos de café | 0,881 | 10,5 |

(*) cada material foi previamente secado ao ar, pois o teor de água influencia na porosidade e compressibilidade dos materiais orgânicos utilizados como meio filtrante

Os resultados obtidos por BRANDÃO *et al.* (2000) referentes a porosidade de serragem de madeira e bagaço de cana-de-açúcar foram, respectivamente, 0,841 e 0,787 $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$. Estes valores estão bem próximos aos resultados apresentados na Quadro 2.

4.2 Remoção de sólidos da ARS nos filtros orgânicos

A massa de sólidos em suspensão retidos nos materiais orgânicos dos filtros segmentados, determinadas por diferença entre a massa das amostras do material antes e após 120 minutos de filtragem seqüencial com ARS bruta peneirada estão apresentados nos Quadros 3, 4 e 5.

Quadro 3: Massa de sólidos em suspensão retidos na serragem de madeira, contidos nos filtros segmentados, após 120 min de operação com ARS bruta peneirada

| Camada (*) | Profundidade da camada (cm) | Sólidos retidos na camada (g) | % | % acumulado |
|------------|-----------------------------|-------------------------------|--------|-------------|
| 1 | 0 - 13 | 1219 | 23,23 | 23,23 |
| 2 | 13 - 26 | 822 | 15,66 | 38,89 |
| 3 | 26 - 39 | 571 | 10,88 | 49,77 |
| 4 | 39 - 52 | 505 | 9,62 | 59,39 |
| 5 | 52 - 65 | 474 | 9,03 | 68,42 |
| 6 | 65 - 78 | 431 | 8,21 | 76,63 |
| 7 | 78 - 91 | 415 | 7,91 | 84,54 |
| 8 | 91 - 104 | 368 | 7,01 | 91,55 |
| 9 | 104 - 117 | 238 | 4,54 | 96,09 |
| 10 | 117 - 130 | 205 | 3,91 | 100,00 |
| Total | | 5.248 | 100,00 | |

(*) cada camada corresponde a 13 cm de altura de material filtrante

Modelo logarítmico: $q = - 321,9 \ln(x) + 1696,4$; sendo "x" a profundidade; $R^2 = 0,9732$

Quadro 4: Massa de sólidos em suspensão retidos no bagaço de cana-de-açúcar, contidos nos filtros segmentados, após 120 min de operação com ARS bruta peneirada

| Camada (*) | Profundidade da camada (cm) | Sólidos retidos na camada (g) | % | % acumulado |
|------------|-----------------------------|-------------------------------|--------|-------------|
| 1 | 0 - 13 | 988 | 18,11 | 18,11 |
| 2 | 13 - 26 | 776 | 14,22 | 32,33 |
| 3 | 26 - 39 | 758 | 13,89 | 46,22 |
| 4 | 39 - 52 | 541 | 9,91 | 56,13 |
| 5 | 52 - 65 | 518 | 9,49 | 65,62 |
| 6 | 65 - 78 | 473 | 8,67 | 74,29 |
| 7 | 78 - 91 | 459 | 8,41 | 82,70 |
| 8 | 91 - 104 | 395 | 7,24 | 89,94 |
| 9 | 104 - 117 | 341 | 6,25 | 96,19 |
| 10 | 117 - 130 | 208 | 3,81 | 100,00 |
| Total | | 5.475 | 100,00 | |

(*) cada camada corresponde a 13 cm de altura de material filtrante

Modelo logarítmico: $q = - 245,2 \ln(x) + 1438,1$; sendo "x" a profundidade; $R^2 = 0,9356$

Quadro 5: Massa de sólidos em suspensão retidos no pergaminho dos grãos de café, contido nos filtros segmentados, após 120 min de operação com ARS bruta peneirada

| Camada (*) | Profundidade da camada (cm) | Sólidos retidos na camada (g) | % | % acumulado |
|------------|-----------------------------|-------------------------------|--------|-------------|
| 1 | 0 - 13 | 694 | 18,24 | 18,24 |
| 2 | 13 - 26 | 522 | 12,97 | 31,21 |
| 3 | 26 - 39 | 443 | 11,01 | 42,22 |
| 4 | 39 - 52 | 399 | 9,91 | 52,13 |
| 5 | 52 - 65 | 368 | 9,14 | 61,27 |
| 6 | 65 - 78 | 346 | 8,60 | 69,87 |
| 7 | 78 - 91 | 331 | 8,22 | 78,09 |
| 8 | 91 - 104 | 323 | 8,03 | 86,12 |
| 9 | 104 - 117 | 310 | 7,70 | 93,82 |
| 10 | 117 - 130 | 289 | 6,18 | 100,00 |
| Total | | 4.025 | 100,00 | |

(*) cada camada corresponde a 13 cm de altura de material filtrante

Modelo logarítmico: $q = -134,4 \ln(x) + 891,7$; sendo "x" a profundidade; $R^2 = 0,9890$

As quantidades da massa de sólidos em suspensão retidos nos filtros segmentados, apresentados nos Quadros 3, 4 e 5, foram utilizadas para plotar o gráfico apresentado na Figura 9.

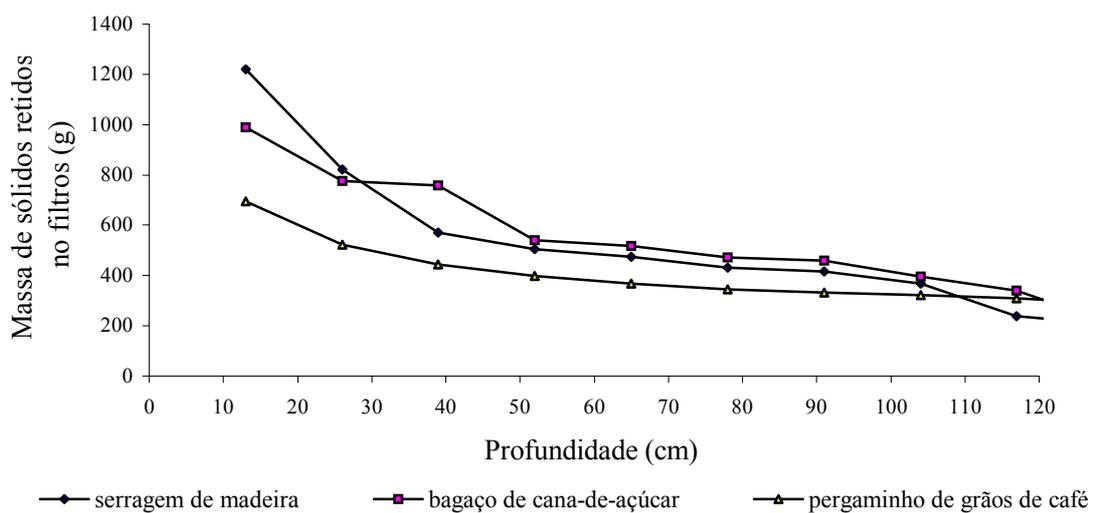


Figura 9: Massa de sólidos retidos nos filtros segmentados após filtragem, por 120 minutos, da ARS bruta peneirada

Tomando-se por base a quantidade da massa de sólidos que ficaram retidos na primeira camada de cada filtro, após 120 min de operação do sistema com ARS bruta peneirada, a serragem de madeira é, dentre os materiais orgânicos avaliados, o mais eficiente quanto à capacidade de reter sólidos da ARS, alcançando $0,19 \text{ g cm}^{-3}$ de sólidos de material filtrante. Para o bagaço de cana-de-açúcar este valor foi de $0,16 \text{ g cm}^{-3}$ e para o pergaminho dos grãos de café foi de $0,11 \text{ g cm}^{-3}$.

É de fundamental importância para o manejo operacional da coluna filtrante avaliar a quantidade da massa de sólidos que ficam retidos na primeira camada do filtro, pois quando essa camada fica obstruída, a vazão da ARS cessa para as camadas subsequentes.

Além de terem sido feitas pesagens das quantidades de massas de sólidos retidos nos filtros segmentados, operados em filtração seqüencial, também foram coletadas amostras do afluente e efluente para avaliação de ST, cujos resultados estão apresentados nos Quadros 6, 7 e 8, e para avaliação de SS, os resultados estão apresentados nos Quadros 9, 10 e 11.

Quadro 6: Concentração de ST (mg L^{-1}) no efluente ARS em função do tempo de filtração, em filtros segmentados de serragem de madeira, operados em seqüência

| Tempo operação do filtro (min) | Camadas | | | | | | | | | |
|--------------------------------|---------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| 1 | 298,8 | 279,5 | 253,0 | 248,7 | 237,6 | 232,2 | 228,8 | 226,2 | 219,7 | 218,0 |
| 15 | 284,9 | 272,7 | 244,5 | 236,4 | 229,9 | 223,7 | 219,9 | 213,7 | 212,6 | 210,6 |
| 30 | 264,3 | 250,4 | 232,4 | 229,3 | 226,2 | 219,0 | 216,5 | 212,3 | 210,9 | 208,8 |
| 45 | 249,2 | 239,6 | 224,5 | 221,5 | 219,4 | 215,4 | 212,0 | 211,8 | 210,1 | 206,3 |
| 60 | 236,2 | 230,0 | 222,0 | 218,0 | 215,0 | 211,8 | 206,9 | 201,3 | 199,8 | 195,7 |
| 75 | 234,6 | 225,6 | 219,5 | 214,5 | 210,4 | 206,4 | 201,3 | 191,0 | 188,2 | 183,9 |
| 90 | 226,9 | 222,7 | 211,4 | 205,6 | 197,4 | 190,4 | 180,4 | 170,4 | 166,3 | 162,1 |
| 105 | 211,6 | 199,6 | 194,7 | 191,2 | 188,5 | 178,2 | 166,2 | 143,2 | 142,5 | 141,2 |
| 120 | 201,1 | 192,3 | 184,3 | 179,8 | 175,1 | 164,5 | 133,1 | 131,1 | 130,4 | 127,2 |

ST na ARS bruta = $317,3 \text{ mg L}^{-1}$ de ST

Volume da ARS filtrada = 6.000 L

Quadro 7: Concentração de ST (mg L^{-1}) no efluente ARS em função do tempo de filtração, em filtros segmentados de bagaço de cana-de-açúcar, operados em seqüência

| Tempo operação do filtro (min) | Camadas | | | | | | | | | |
|--------------------------------|---------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| 1 | 367,5 | 357,8 | 347,9 | 338,2 | 334,1 | 330,8 | 327,5 | 317,3 | 306,9 | 301,5 |
| 15 | 357,4 | 349,2 | 338,0 | 328,7 | 324,6 | 322,2 | 320,8 | 308,2 | 297,7 | 287,4 |
| 30 | 346,0 | 342,7 | 334,5 | 324,4 | 319,9 | 312,7 | 304,1 | 294,7 | 284,0 | 276,0 |
| 45 | 330,4 | 323,5 | 322,4 | 319,3 | 306,2 | 300,9 | 297,8 | 290,5 | 282,9 | 273,5 |
| 60 | 300,7 | 294,6 | 288,5 | 279,5 | 274,4 | 270,7 | 263,6 | 252,3 | 248,6 | 240,7 |
| 75 | 282,2 | 279,0 | 265,0 | 264,0 | 258,5 | 253,0 | 242,9 | 231,8 | 227,9 | 222,2 |
| 90 | 269,6 | 265,6 | 253,8 | 251,5 | 242,4 | 240,9 | 221,7 | 211,3 | 208,2 | 206,6 |
| 105 | 246,9 | 242,7 | 232,7 | 223,6 | 221,8 | 217,4 | 210,9 | 204,4 | 201,3 | 200,0 |
| 120 | 234,0 | 229,6 | 219,3 | 209,2 | 206,5 | 202,2 | 200,2 | 198,1 | 196,6 | 190,0 |

ST na ARS bruta = $458,9 \text{ mg L}^{-1}$ de ST

Volume da ARS filtrada = 6.000 L

Quadro 8: Concentração de ST (mg L^{-1}) no efluente ARS em função do tempo de filtração, em filtros segmentados de pergaminho dos grãos de café, operados em seqüência

| Tempo operação do filtro (min) | Camadas | | | | | | | | | |
|--------------------------------|---------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| 1 | 337,5 | 329,8 | 321,9 | 315,0 | 309,0 | 303,8 | 300,5 | 295,0 | 291,9 | 289,2 |
| 15 | 321,4 | 315,2 | 308,0 | 302,7 | 298,6 | 294,2 | 290,8 | 286,2 | 284,3 | 281,0 |
| 30 | 310,0 | 302,7 | 296,5 | 292,4 | 288,9 | 284,7 | 281,7 | 276,7 | 273,6 | 270,6 |
| 45 | 293,5 | 287,4 | 283,4 | 279,3 | 276,2 | 273,0 | 269,5 | 265,3 | 261,9 | 258,8 |
| 60 | 278,7 | 266,6 | 261,5 | 257,5 | 254,4 | 250,4 | 246,0 | 243,8 | 240,0 | 236,2 |
| 75 | 252,2 | 245,0 | 240,0 | 236,0 | 232,0 | 230,8 | 225,9 | 221,3 | 219,8 | 215,7 |
| 90 | 239,6 | 235,6 | 231,5 | 225,5 | 220,4 | 216,4 | 212,3 | 210,0 | 208,2 | 203,9 |
| 105 | 226,9 | 212,7 | 206,7 | 199,6 | 195,4 | 190,4 | 185,4 | 180,4 | 176,3 | 172,1 |
| 120 | 214,0 | 209,6 | 201,3 | 189,2 | 182,5 | 178,2 | 172,2 | 168,1 | 162,5 | 156,8 |

ST na ARS bruta = $361,6 \text{ mg L}^{-1}$ de ST

Volume da ARS filtrada = 6.000 L

Quadro 9: Concentração de SS (mg L^{-1}) no efluente ARS em função do tempo de filtração, em filtros segmentados de serragem de madeira, operados em seqüência

| Tempo operação do filtro (min) | Camadas | | | | | | | | | |
|--------------------------------|---------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| 1 | 164,8 | 152,5 | 143,1 | 138,7 | 134,6 | 132,2 | 128,8 | 126,2 | 119,7 | 106,3 |
| 15 | 136,9 | 132,7 | 130,5 | 124,4 | 120,0 | 116,7 | 113,7 | 113,7 | 100,6 | 90,6 |
| 30 | 114,3 | 110,4 | 106,4 | 104,3 | 102,2 | 100,0 | 92,5 | 90,3 | 80,9 | 78,0 |
| 45 | 99,2 | 94,5 | 90,5 | 87,5 | 86,6 | 82,2 | 79,0 | 75,8 | 70,0 | 66,6 |
| 60 | 81,2 | 71,0 | 68,0 | 64,0 | 62,0 | 61,8 | 60,9 | 58,3 | 56,8 | 55,2 |
| 75 | 68,7 | 62,6 | 59,5 | 55,5 | 52,5 | 51,4 | 50,3 | 47,0 | 44,3 | 43,8 |
| 90 | 62,9 | 52,7 | 51,4 | 50,6 | 49,8 | 46,4 | 40,4 | 39,4 | 36,3 | 32,4 |
| 105 | 54,6 | 49,6 | 40,7 | 39,3 | 38,8 | 38,2 | 36,2 | 33,1 | 28,5 | 21,0 |
| 120 | 46,1 | 42,3 | 39,3 | 36,8 | 35,2 | 31,5 | 28,1 | 25,1 | 20,4 | 12,7 |

SS na ARS bruta = $189,3 \text{ mg L}^{-1}$ de SS

Volume da ARS filtrada = 6.000 L

Quadro 10: Concentração de SS (mg L^{-1}) no efluente ARS em função do tempo de filtração, em filtros segmentados de bagaço de cana-de-açúcar, operados em seqüência

| Tempo operação do filtro (min) | Camadas | | | | | | | | | |
|--------------------------------|---------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| 1 | 317,5 | 306,8 | 284,9 | 268,2 | 248,1 | 228,8 | 217,5 | 207,3 | 201,9 | 197,1 |
| 15 | 287,4 | 285,2 | 273,0 | 238,7 | 226,6 | 218,2 | 210,8 | 198,2 | 187,7 | 174,0 |
| 30 | 256,0 | 242,7 | 234,5 | 224,4 | 209,9 | 196,7 | 185,1 | 174,7 | 164,0 | 153,6 |
| 45 | 233,5 | 230,4 | 212,4 | 209,3 | 199,2 | 178,9 | 163,8 | 153,5 | 142,9 | 132,8 |
| 60 | 228,7 | 214,6 | 193,5 | 186,5 | 174,4 | 156,7 | 143,6 | 132,3 | 121,6 | 110,2 |
| 75 | 202,2 | 193,0 | 145,0 | 134,0 | 129,5 | 124,0 | 118,9 | 111,8 | 102,9 | 91,7 |
| 90 | 181,6 | 160,6 | 143,8 | 123,5 | 112,4 | 106,9 | 101,7 | 93,3 | 88,2 | 72,9 |
| 105 | 146,9 | 128,7 | 109,7 | 97,6 | 88,8 | 73,4 | 67,9 | 61,4 | 56,3 | 51,1 |
| 120 | 114,0 | 101,6 | 89,3 | 79,2 | 66,5 | 58,2 | 46,2 | 34,1 | 23,6 | 18,4 |

SS na ARS bruta = $345,8 \text{ mg L}^{-1}$ de SS

Volume da ARS filtrada = 6.000 L

Quadro 11: Concentração de SS (mg L^{-1}) no efluente ARS em função do tempo de filtração, em filtros segmentados de pergaminho dos grãos de café, operados em seqüência

| Tempo operação do filtro (min) | Camadas | | | | | | | | | |
|--------------------------------|---------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| 1 | 267,5 | 259,8 | 251,9 | 245,0 | 238,0 | 227,8 | 207,5 | 197,0 | 186,9 | 178,8 |
| 15 | 257,4 | 145,2 | 133,0 | 128,7 | 124,6 | 122,2 | 120,8 | 116,2 | 114,7 | 113,5 |
| 30 | 246,0 | 142,7 | 134,5 | 124,4 | 119,9 | 116,7 | 113,7 | 113,7 | 112,6 | 112,0 |
| 45 | 233,5 | 130,4 | 122,4 | 119,3 | 116,2 | 113,0 | 112,5 | 112,3 | 110,9 | 109,8 |
| 60 | 218,7 | 124,6 | 114,5 | 112,5 | 112,4 | 112,4 | 112,0 | 111,8 | 110,0 | 106,2 |
| 75 | 192,2 | 119,0 | 112,0 | 112,0 | 112,0 | 111,8 | 111,9 | 111,3 | 109,8 | 85,7 |
| 90 | 169,6 | 115,6 | 111,5 | 111,5 | 111,4 | 111,4 | 111,3 | 111,0 | 108,2 | 63,9 |
| 105 | 136,9 | 112,7 | 110,7 | 110,6 | 110,4 | 110,4 | 110,4 | 110,4 | 106,3 | 42,1 |
| 120 | 114,0 | 109,6 | 106,3 | 101,2 | 95,5 | 80,2 | 66,2 | 53,1 | 35,5 | 21,2 |

SS na ARS bruta = $322,2 \text{ mg L}^{-1}$ de SS

Volume da ARS filtrada = 6.000 L

Foram observadas diferenças entre a quantidade da massa de sólidos retidos nos filtros segmentados (Quadros 3, 4 e 5), e, as quantidades da massa de sólidos calculadas através das concentrações de ST no efluente, (Quadros 6, 7 e 8). Essas diferenças devem-se, possivelmente, ao fato de que, mesmo deixando os filtros inclinados para drenar o excesso da água antes e após encerrar a operação, as pesagens das massas de sólidos podem ter incorporado teor umidade não removido do sistema, diferentemente do que ocorre na determinação da concentração de ST, cujas amostras passam previamente em estufa para remover todo o teor de umidade, antes de serem pesadas.

A eficiência dos filtros segmentados, quanto à capacidade de reter ST da ARS bruta peneirada, conforme dados apresentados nas Quadros 6, 7 e 8, variou entre o início e o final de operação de 31,3 a 59,9%, no filtro de serragem de madeira, de 36,6 a 57,9% no filtro de bagaço de cana-de-açúcar e de 20,0 a 56,6% no filtro de pergaminho dos grãos de café. Nos filtros não segmentados, de acordo com os dados contidos no Anexo (Quadros 1A, 2A e 3A), à eficiência, variou entre o início e o final de operação de 31,8 a 62,8%, no filtro de serragem de madeira, de 37,9 a 58,7% no filtro de bagaço de cana-de-açúcar e de 21,4 a 58,0% no filtro de pergaminho dos grãos de café. De acordo com os resultados obtidos pode se observar para cada tipo de material orgânico avaliado, que os filtros segmentados e não segmentados, apresentaram mesma tendência quanto a eficiência na retenção de ST.

Esses percentuais estão compatíveis com os resultados obtidos por MAGALHÃES (2002) que obteve eficiência dos filtros não segmentados variando entre o início e o final de operação de 43 a 57%, no filtro de serragem de madeira, de 50 a 56% no filtro de bagaço de cana-de-açúcar.

Para o atributo SS a eficiência dos filtros segmentados, de acordo com os dados contidos Quadros 9, 10 e 11, variou entre o início ao final de operação de 66,5 a 96,0% no filtro de serragem de madeira, de 57,0 a 96,0% no filtro de bagaço de cana-de-açúcar e de 50,5 a 94,1% no filtro de pergaminho dos grãos de café. Nos filtros não segmentados, de acordo com os dados contidos no Anexo (Quadros 4A, 5A e 6A), variou entre o início ao final de operação de 69,8 a 97,2% no filtro de serragem de madeira, de 59,0 a 97,4% no filtro de bagaço de cana-de-açúcar e de 54,2 a 95,3% no filtro de pergaminho dos grãos de café. De acordo com os resultados obtidos pode se observar para cada tipo de material orgânico avaliado, que os filtros segmentados e não segmentados, apresentaram mesma tendência quanto a eficiência na retenção de SS.

Esses percentuais estão compatíveis com os resultados obtidos por MAGALHÃES (2002) que obteve eficiência dos filtros não segmentados, variando entre o início ao final de operação de 90 a 99%, no filtro de serragem de madeira, de 81 a 96% no filtro de bagaço de cana-de-açúcar.

As concentrações relativas (C/C_0) ST e SS dos filtros expressam a relação entre a concentração de ST e SS no efluente e no afluente. Assim, um valor de C/C_0 menor que um significa que o efluente contém uma menor concentração do atributo que o afluente.

Como os materiais orgânicos utilizados como filtros podem liberar alguns elementos durante o processo de lavagem ou lixiviação de solutos do material filtrante, ocorreram alguns acréscimos nas concentrações das primeiras lâminas filtradas (LO MONOCO, 2000).

Os resultados de concentração relativas (C/C_0) de ST dos filtros não segmentados (1,30m de altura e 0,58 m de diâmetro) em função do tempo de operação, estão apresentados na Figura 10.

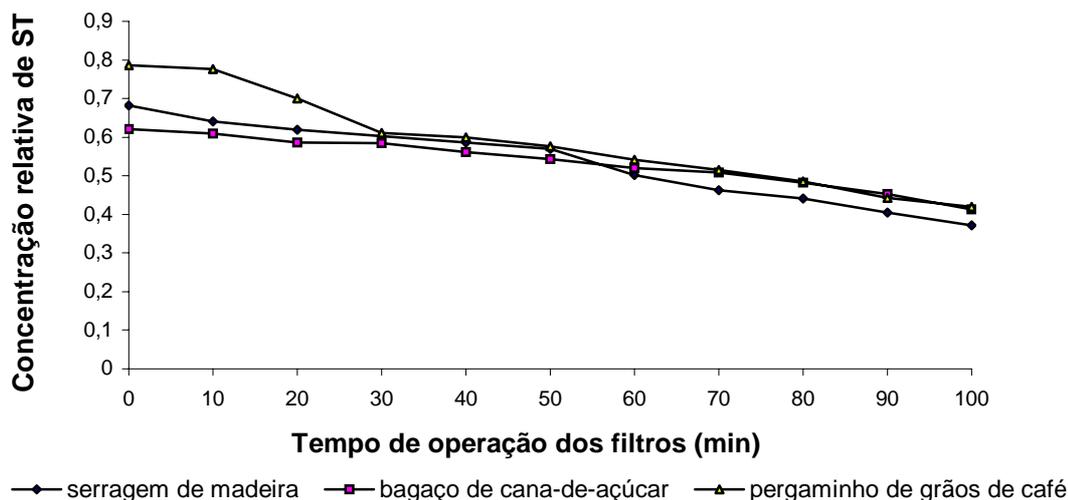


Figura 10: Concentração relativa de ST nos efluentes dos filtros não segmentados de serragem de madeira, bagaço de cana-de-açúcar e pergaminho dos grãos de café

De acordo com os resultados apresentados na Figura 10, as concentrações relativas de ST nos efluentes das colunas filtrantes de serragem de madeira, bagaço de cana-de-açúcar e de pergaminho dos grãos de café diminuem com o tempo de operação dos filtros.

Os resultados de concentrações relativas (C/C_0) de SS dos filtros não segmentados (1,30m de altura e 0,58 m de diâmetro) em função do tempo de operação estão apresentados na Figura 11.

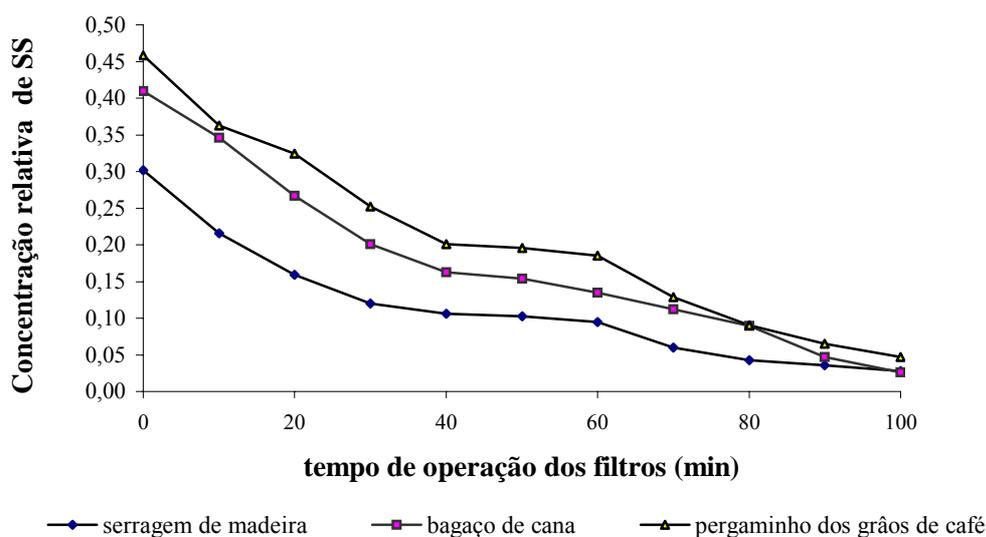


Figura 11: Concentrações relativas de SS em filtros não segmentados de serragem de madeira, bagaço de cana-de-açúcar e pergaminho dos grãos de café

De acordo com o que está apresentada na Figura 11, a concentração relativa de SS nos efluentes das colunas filtrantes diminuiu com o tempo de operação dos filtros, isto é, os SS presentes na ARS ficaram retidos no material filtrante, diminuindo o diâmetro dos poros dos filtros, e, com isso, passam a reter maior quantidade de sólidos.

A maior eficiência na remoção de SS no filtro de serragem de madeira deve-se à característica intrínseca desse material, isto é, o formato das partículas da serragem de madeira é fator determinante entre a superfície de contato desse material e os sólidos presentes na água residuária, comparativamente aos outros materiais orgânicos avaliados.

Aspecto visual de uma amostra do afluente (Figura 12a) e uma amostra do efluente (Figura 12b), indicando eficiente remoção de SS de ARS.

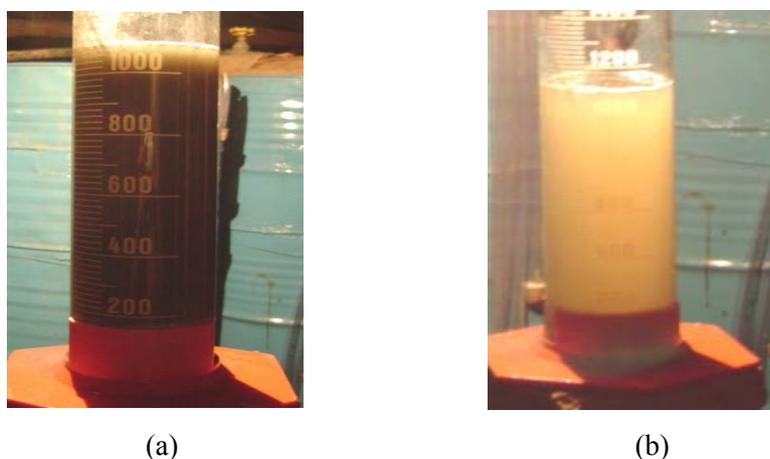


Figura 12: Aspecto visual de uma amostra da ARS antes da filtração (a) e após filtração (b)

O Quadro 12 é apresentado a análise de variância para os valores de SS do efluente da ARS obtidos por meio da equação empírica de filtração para filtros orgânicos de serragem de madeira, bagaço de cana-de-açúcar e de pergaminho dos grãos de café. Em nível de 1% de probabilidade, todos os tratamentos foram altamente significativos para as variáveis “tempo”, “altura da camada” do filtro e das interações “tempo x altura da camada filtrante”.

Quadro 12: Análise de variância para os valores de SS do efluente da ARS obtidos por meio de filtros orgânicos

| Fonte de variação | G.L | SQ | QM | F |
|-------------------|------|----------|----------|------------|
| | | Serragem | | |
| Tratamentos | 89 | 358216,8 | 4024,908 | 109,521*** |
| Resíduo | 180 | 6615,033 | 36,75019 | |
| C.V. (%) | 8,12 | - | - | - |

Continuação do Quadro 12

| Fonte de variação | G.L | SQ | QM | F |
|-------------------|------|-----------|----------|-------------|
| Bagaço | | | | |
| Tratamentos | 89 | 1299115,0 | 14596,79 | 3194,202*** |
| Resíduo | 180 | 822,5600 | 4,569778 | |
| C.V. (%) | 1,33 | - | - | - |
| Pergaminho | | | | |
| Tratamentos | 89 | 670594,0 | 7534,764 | 160,632*** |
| Resíduo | 180 | 8443,273 | 46,90707 | |
| C.V. (%) | 5,30 | - | - | - |

*** nível de significância a 1% de probabilidade

Nas Figuras 13, 14 e 15 estão apresentadas às superfícies de resposta e equações de ajustadas de SS do efluente da ARS, em função de “t” o tempo de operação dos filtros orgânicos e de “p” a profundidade da camada filtrante.

$$\hat{C} = 157,99 - 1,525**t + 0,0049**t^2 - 0,357**p + 0,00082**tp \quad R^2 = 0,97$$

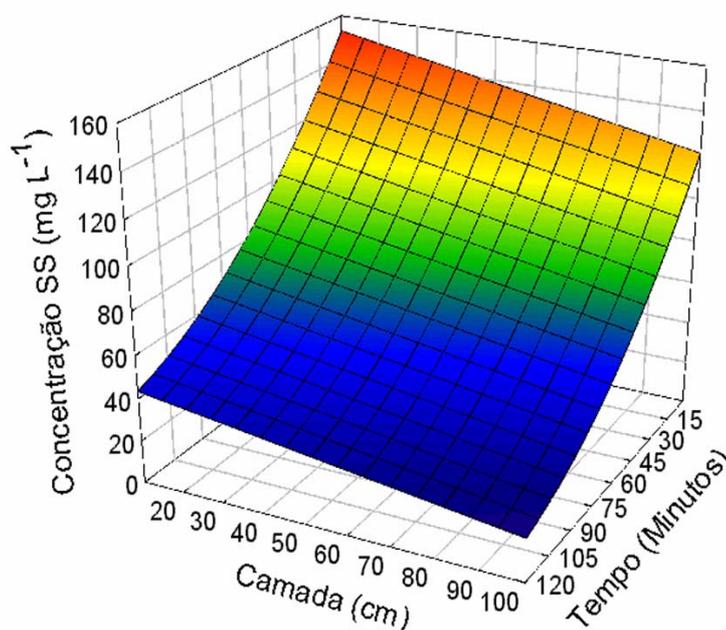


Figura 13. Superfície de resposta e equação ajustada da estimativa de SS em função do tempo de operação e da altura do filtro não segmentado de serragem de madeira, sendo “p” a profundidade do filtro e “t” o tempo de operação

$$\hat{C} = 334,826 - 1,4595**t - 0,0019**t^2 - 1,9232**p + 0,0026**tp \quad R^2 = 0,99$$

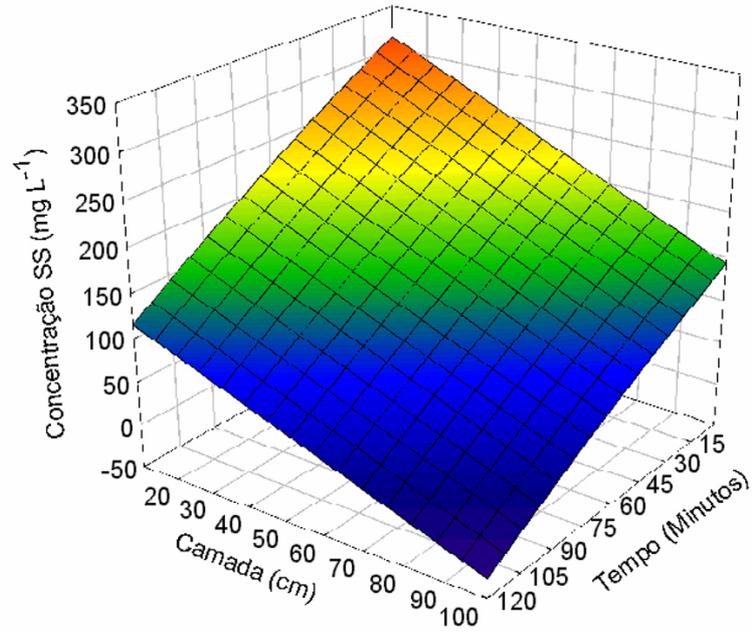


Figura 14. Superfície de resposta e equação ajustada da estimativa de SS em função do tempo de operação e da altura do filtro não segmentado de bagaço de cana-de-açúcar, sendo “*p*” a profundidade do filtro e “*t*” o tempo de operação

$$\hat{C} = 264,394 - 1,77189**t + 0,00779423**t^2 - 2,02983*p + 0,0111940**p^2 \quad R^2 = 0,69$$

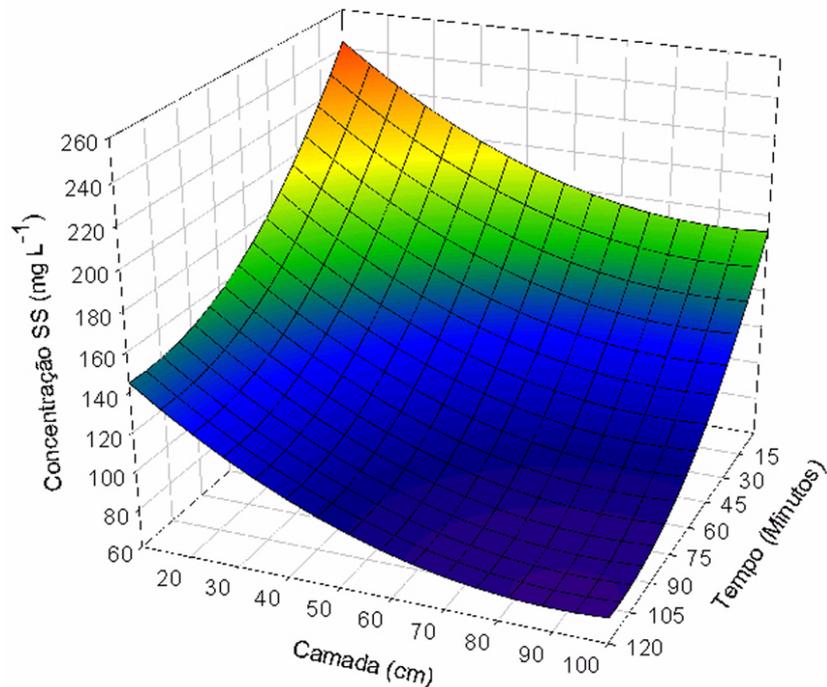


Figura 15. Superfície de resposta e equação ajustada da estimativa de SS em função do tempo de operação e da altura do filtro não segmentado de pergaminho de grãos de café, sendo “*p*” a profundidade do filtro e “*t*” o tempo de operação

Observa-se nas Figuras 13, 14 e 15, respectivamente referentes às superfícies de resposta obtidas para concentração de SS como função da profundidade e do tempo de operação dos filtros não segmentados, que os modelos preditivos proporcionaram bons ajustes, considerando-se que foram obtidos altos coeficientes de determinação, exceto para pergaminho dos grãos de café ($R^2 = 0,69$).

O movimento da ARS no meio poroso orgânico é limitado por restrições, de modo que a relação entre o fluxo de ARS e a geometria real do material filtrante é muito complexa para ser estudada em detalhes quanto aos aspectos relacionados à velocidade de percolação do líquido no meio poroso orgânico e o tempo de operação do sistema.

A equação de continuidade para a operação de filtração proposta por METCALF e EDDY (1991), cuja representação esta apresentada na equação 2, foi alterado por substituições de termos e efetuadas simplificações, até se obter a equação 8, denominada pelos autores supra citados como equação geral de filtração. Como o último termo dessa equação apresentada na descrição físico-matemática do processo de filtração de água residuária é de difícil obtenção na prática, optou-se por realizar uma alteração na taxa de remoção (r_0) que deixou de ser uma constante, passando a variar com o tempo.

Usando a equação 8, os dados obtidos na filtração de ARS nos filtros segmentado foi ajustado o modelo semi-empírico para cada material orgânico avaliado.

$$\frac{dC}{dx} = \frac{1}{(1 + 0,0015 x)^{19,2}} r_0 C K^m \quad (8)$$

No Quadro 13 estão apresentados os valores dos parâmetros ajustados à equação geral da filtração semi-empírica para cada material orgânico avaliado.

Quadro 13: Valores dos parâmetros ajustados à equação geral da filtração semi-empírica.

| Atributo | Material filtrante | r_0 cm ⁻¹ | K – primeira camada adimensional | K restante das camadas adimensional | m adimensional |
|----------|-----------------------------|---------------------------|-------------------------------------|--|-------------------|
| ST | Serragem | 0,00330 | K = 0,0781 t + 2,5075 | 2,3 | 1,0 |
| | Bagaço de cana de açúcar | 0,00245 | K = 0,1191 t + 8,3465 | 2,3 | 1,1 |
| | Pergaminho de grãos de café | 0,00195 | K = 0,1071 t + 2,2352 | 2,3 | 1,2 |
| SS | Serragem | 0,00451 | K = 0,0953 t + 3,9935 | 2,3 | 1,1 |
| | Bagaço de cana de açúcar | 0,00900 | K = 0,1580 t + 3,2210 | 2,3 | 0,7 |
| | Pergaminho de grãos de café | 0,00621 | K = 0,1306 t + 3,9694 | 2,3 | 0,9 |

No cálculo da variação da concentração em função da profundidade foi ajustado o modelo semi-empírico, por regressão, para os dados de ST na filtração de ARS para serragem de madeira. Obteve-se para a primeira camada o valor de K como função do tempo de operação do filtro segmentado, a seguinte equação:

$$\frac{dC}{dx} = \frac{0,00330}{(1 + 0,0015x)^{19,2}} C (0,0781 t + 2,5075)$$

Nas demais camadas do filtro segmentado de serragem de madeira, para o atributo ST o valor de K deve ser considerado constante.

$$\frac{dC}{dx} = \frac{0,00330}{(1 + 0,0015x)^{19,2}} C (2,3)$$

Procedimento similar foi realizado no cálculo da variação da concentração de SS em função da profundidade. O modelo semi-empírico também foi ajustado, por regressão, para os atributos ST e SS do efluente dos filtros segmentados de bagaço de cana-de-açúcar e para pergaminho de grãos de café.

No caso dos filtros segmentados de bagaço de cana-de-açúcar e de pergaminho de grãos de café, o ajuste mostrou-se adequado, à exceção da camada superficial, para todos os tempos de operação de filtros avaliados. A subestimativa no valor de dC/dx na primeira camada pode ser evitada com a obtenção de uma equação específica para estimativa de r_o como função do tempo. Em função disso, as seguintes equações devem ser obtidas.

Com base na variação da concentração, dados estimados (est) e experimentais (real) e profundidade em função do tempo de operação dos filtros, foram plotadas as Figuras 16 e 17, respectivamente para ST e SS.

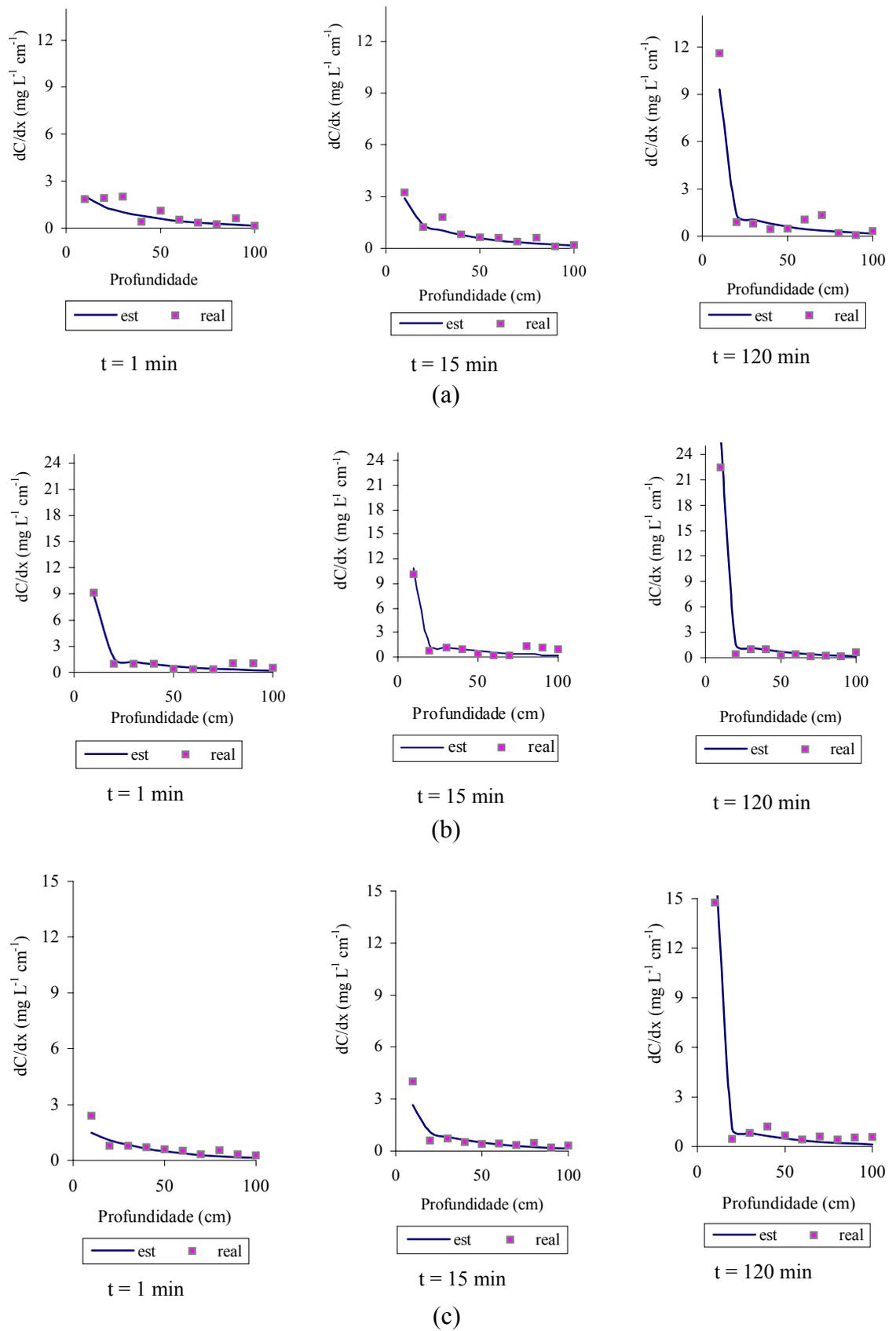


Figura 16: Variação da concentração de ST (dC/dx) e profundidade (cm) em função do tempo de operação (min) dos filtros segmentado de serragem de madeira (a), bagaço de cana-de-açúcar (b) e de pergaminho de grãos de café (c)

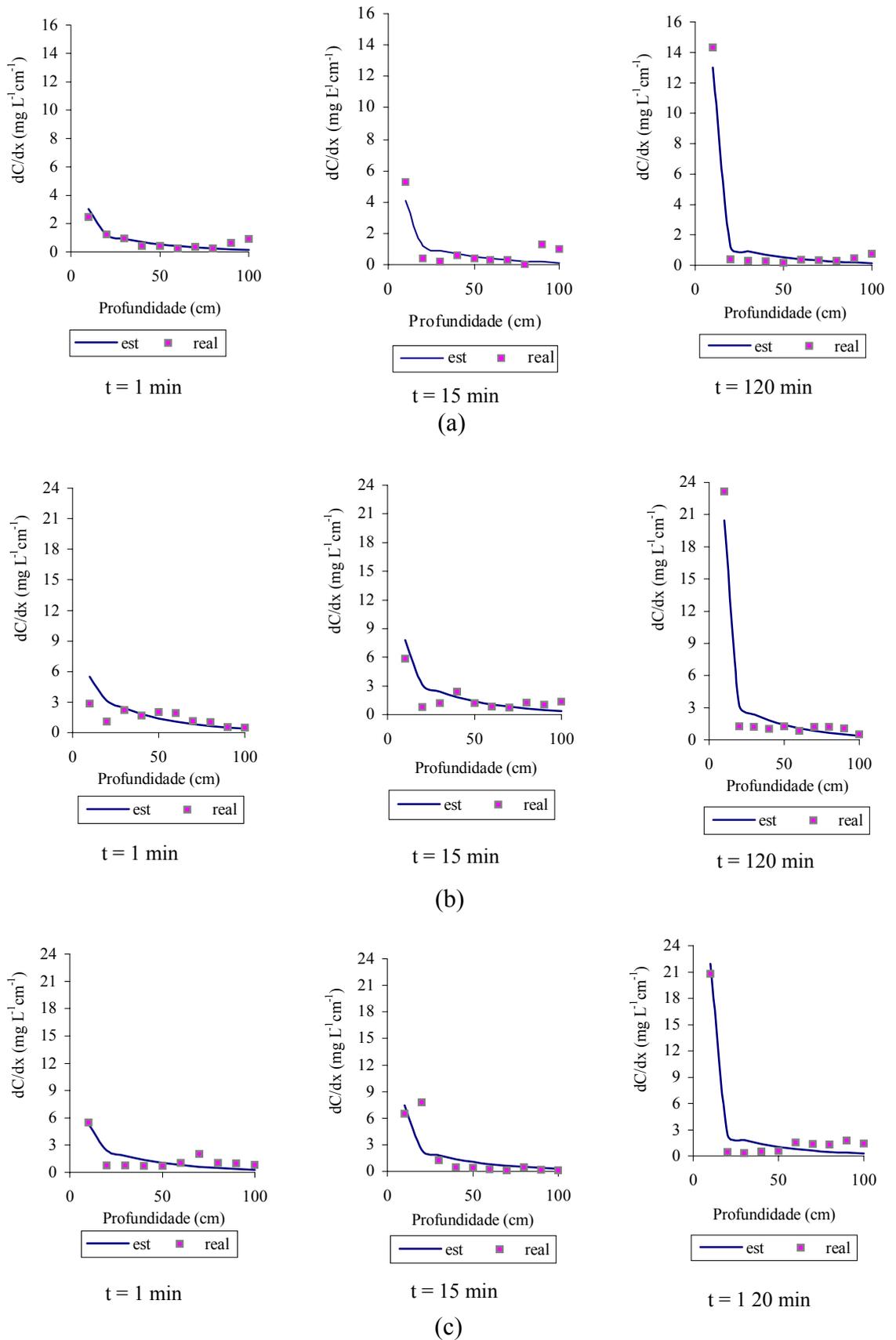


Figura 17: Variação da concentração de SS e profundidade em função do tempo de operação dos filtros segmentados de serragem de madeira, bagaço de cana-de-açúcar e de pergaminho de grãos de café

Pode-se afirmar que o modelo matemático semi-empírico ajustado para a equação geral de filtração possibilitou descrever satisfatoriamente o processo, considerando que o comportamento das curvas plotadas na Figura 16, apresentou os dados estimados e experimentais bem ajustados, nas diferentes profundidades e tempo de operação dos filtros.

A utilização da equação semi-empírica ajustada aos dados experimentais mostrou necessidade de ajuste de equação específica para o valor de r_o em função do tempo para a camada superficial do filtro segmentado de serragem de madeira.

No caso do bagaço de cana-de-açúcar, a variação da concentração de SS (dC/dx) foi superestimada na camada superficial, além de não ter sido ajuste adequado da equação aos dados experimentais, notadamente no início do tempo de operação do filtro.

No filtro segmentado de pergaminho de grãos de café, embora tenha sido obtido razoável estimativa de dC/dx nas primeiras camadas, não foi observado adequado ajuste da equação aos dados, ao longo da profundidade do filtro, nos diferentes tempos de operação avaliados.

O valor de “K” nas equações interfere na concavidade das curvas em razão da variação na concentração em relação à distância, enquanto o exponencial “m” proporciona alteração no valor de dC/dx , principalmente na primeira camada filtrante.

Aumentos no valor de “K” proporcionam maior concavidade da curva, ou seja, fazem diminuir a curvatura da mesma. O valor ajustado para “K” na primeira camada filtrante, como é fortemente dependente do tempo de operação do filtro, teve de ser estimado com a utilização de uma equação linear em que está como função do tempo.

Com base no valor ajustado para a declividade dessas curvas lineares (Quadro 13), verifica-se que, tanto no caso do ajuste para ST como para SS, o bagaço de cana-de-açúcar foi o material filtrante que proporcionou rápida alteração de dC/dx com o tempo de operação do filtro, seguido pelo pergaminho de grão de café e, finalmente pela serragem.

Como o filtro de bagaço de cana-de-açúcar e, principalmente o de pergaminho de grãos de café, não apresentaram a mesma eficiência na remoção de sólidos da ARS que os filtro de serragem de madeira, atribui-se que a maior variação em dC/dx com o tempo esteja associada ao maior entupimento dos poros, fazendo diminuir a velocidade de escoamento da ARS, o que pode ser confirmado pelas vazões mais altas obtidas nesses filtros. Suspeita-se que isso deva estar associado à alteração no tamanho dos poros de percolação no bagaço de cana-de-açúcar, decorrente do entumescimento e conseqüente

“inchamento” do material, que proporcionou a redução no espaço macroporoso. Nas outras camadas, o valor de “K” foi ajustado como uma constante, o que demonstrou serem as curvaturas das curvas de dC/dx muito semelhantes para os diferentes materiais filtrantes.

Aumentos no valor de “m” proporcionam aumento do valor de dC/dx , na primeira camada em relação às subseqüentes nos filtros. Quando da filtração de ST, o pergaminho de grãos de café apresentou valores de dC/dx muito superiores ao das camadas filtrantes subseqüentes, haja vista que apresentou maior valor de “m”. A serragem de madeira apresentou menor valor para “m”, o que ocorreu em razão da mais forte retenção de ST pelas camadas filtrantes subseqüentes. Avaliando-se os valores encontrados de “m” presente nas equações ajustadas para variação na concentração de SS com a distância, verifica-se que o bagaço de cana-de-açúcar foi o material filtrante com menor diferença de dC/dx entre a primeira camada e as subseqüentes, enquanto a serragem de madeira foi a que apresentou a maior diferença. Essa característica pode ser um indicativo de que esse filtro opera de forma mais homogênea na remoção de SS, sendo efetuada a retenção de SS de forma mais distribuída na coluna filtrante e não apenas na primeira camada.

O valor de “K” nas equações dá a contundência da concavidade das curvas de razão da variação na concentração em relação à distância enquanto o exponencial “m” proporciona alteração no valor de dC/dx principalmente na primeira camada filtrante.

Aumentos no valor de “K” proporcionam maior linearização da curva, ou seja, fazem diminuir a curvatura da mesma. O valor ajustado para “K” na primeira camada filtrante, como é fortemente dependente do tempo de operação do filtro, teve de ser estimado com a utilização de uma equação em que está como função do tempo. Com base no valor ajustado para a declividade da curva linear, verifica-se que, tanto no caso do ajuste para ST como para SS, o bagaço de cana-de-açúcar foi o material filtrante que proporcionou mais rápida alteração de dC/dx com o tempo de operação do filtro, seguido pelo pergaminho de grão de café e, finalmente pela serragem. Como o filtro de bagaço de cana-de-açúcar e, principalmente de pergaminho de grãos de café, não apresentaram mais eficiente remoção de sólidos da ARS do que os de filtro de serragem de madeira, a maior variação em dC/dx com o tempo ao deve estar associada ao maior entupimento dos poros, fazendo diminuir a velocidade de escoamento da ARS, o que pode ser confirmado pelas mais altas vazões obtidas nesses filtros. Suspeita-se que isso deva estar associado à alteração no tamanho dos poros de percolação no bagaço de cana-de-açúcar, decorrente do entumescimento e conseqüente “inchamento” do material, que proporcionou a redução

no espaço macroporoso. Nas outras camadas, o valor de “K” foi ajustado como uma constante, o que demonstrou serem as curvaturas das curvas de dC/dx muito semelhantes para os diferentes materiais filtrantes.

Aumentos no valor de “m” proporcionam aumento do valor de dC/dx , na primeira camada em relação às subseqüentes nos filtros. Quando da filtração de ST, o pergaminho de grãos de café apresentou valores de dC/dx muito superiores ao das camadas filtrantes subseqüentes, haja vista que apresentou maior valor de “m”. A serragem de madeira apresentou menor valor para “m”, o que ocorreu em razão da mais forte retenção de ST pelas camadas filtrantes subseqüentes. Avaliando-se os valores encontrados de “m” presente nas equações ajustadas para variação na concentração de SS com a distância, verifica-se que o bagaço de cana-de-açúcar foi o material filtrante com menor diferença de dC/dx entre a primeira camada e as subseqüentes, enquanto a serragem de madeira foi a que apresentou a maior diferença. Essa característica pode é um indicativo de que esse filtro opera de forma mais homogênea na remoção de SS, sendo efetuada a retenção de SS de forma mais distribuída na coluna filtrante e não apenas na primeira camada.

4.3 Perda de carga de filtros orgânicos não segmentados

No início da operação dos filtros não segmentado para se determinar a perda de carga total com água “limpa” (H_0), foram observados valores totais de 1,6, 2,0 e 1,1 cm. c. a. respectivamente, para filtros de serragem de madeira, bagaço de cana-de-açúcar triturado e pergaminho dos grãos de café.

Verificou-se que a perda de carga no filtro operando com água “limpa” até reduziu com o tempo, pois ocorreu aumento de desobstrução de poros dos filtros na medida em que alguns sólidos que estavam aderidos às partículas dos materiais filtrantes foram removidos pela água “limpa”. Após aproximadamente 5 minutos de operação, foram observadas maior regularidade e estabilidade na perda de carga desses filtros, não mais se alterando com o tempo.

Após 30 minutos de operação dos filtros de serragem de madeira, bagaço de cana-de-açúcar triturado e pergaminho dos grãos de café as perdas de cargas com água “limpa”, mantiveram-se inalterados em respectivamente, 1,3, 1,6 e 0,9 cm. c. a.

Ao contrário do que ocorreu nos filtros orgânicos operados com água “limpa”, cuja perda de carga permaneceu constante, para todos os materiais avaliados, no caso de

filtros orgânicos operados com ARS, a perda de carga aumentou com o tempo de sua operação.

Na Figura 18 estão apresentados as perdas de carga total (H_0) dos filtros, não segmentados, operados com ARS peneirada em função do tempo de operação.

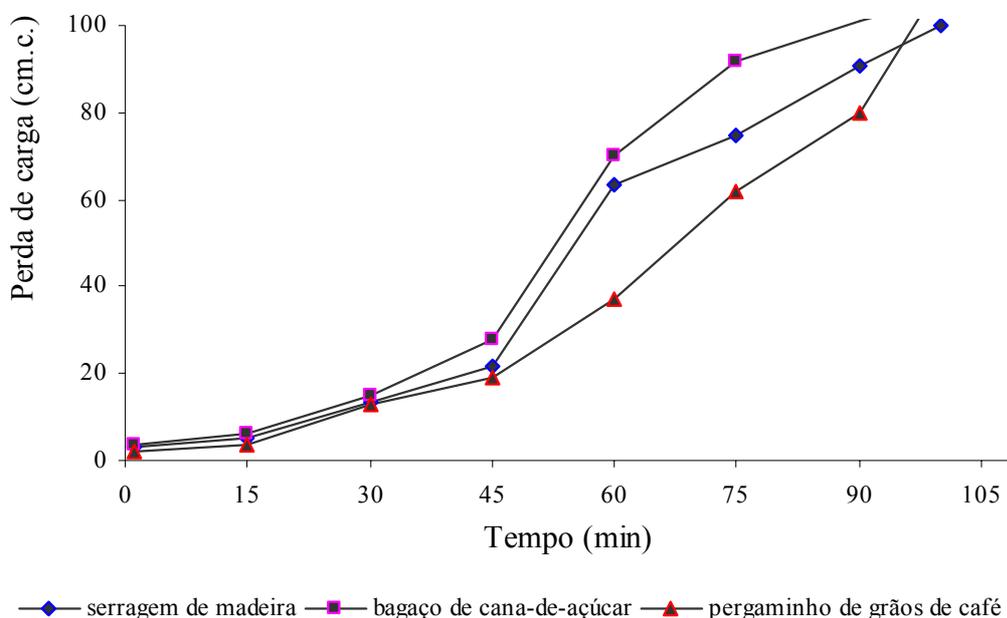


Figura 18: Perda de carga com o tempo de operação nos filtros não segmentados, operando com ARS

Nos filtros de bagaço de cana-de-açúcar ocorreram as maiores perdas de carga, com o tempo de operação com ARS, isto ocorre, provavelmente, devido ao bagaço de cana-de-açúcar triturado apresentar fibras longas e finas, as quais proporcionaram maior aproximação entre as partículas, facilitando o entupimento mais rápido dos macroporos com o tempo de operação dos filtros. Além disso, o bagaço de cana-de-açúcar apresenta a característica de ser mais expansivo, em termos volumétrico, do que os outros materiais orgânicos avaliados. O pergaminho dos grãos de café, ao contrário, tem formação geométrica que dificulta o assentamento das partículas no filtro, o que lhe confere maior macroporosidade. Além disso, apresenta menor compressibilidade do que os outros materiais orgânicos avaliados.

A variação da perda de carga ao longo dos filtros, não segmentados, de bagaço de cana-de-açúcar com o tempo de operação, pode ser visualizada nos piezômetros apresentados na Figura 19.



(a) no início de operação



(b) após 15 min de operação



(c) após 45 min de operação



(d) no final da operação

Figura 19: Visualização da perda de carga no filtro de bagaço de cana-de-açúcar após diferentes tempos de operação

A perda de carga nos filtros não segmentados com o tempo de operação, para ARS bruta peneirada e as vazões estão apresentados nos Quadro 14, 15 e 16.

Quadro 14: Perdas de carga obtida em diferentes camadas e vazões nos filtros não segmentados de serragem de madeira, em função do tempo de operação, durante a filtração da ARS bruta peneirada

| Tempo (min) | Camadas (cm) | | | | | | | | | | Vazão L s ⁻¹ |
|-------------|----------------------------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|-------------------------|
| | 0-20 | 0-30 | 0-40 | 0-50 | 0-60 | 0-70 | 0-80 | 0-90 | 0-100 | 0-110 | |
| | perda de carga (cm. c. a.) | | | | | | | | | | |
| 1 | 2,00 | 2,00 | 2,00 | 2,00 | 2,00 | 2,10 | 2,20 | 2,70 | 2,80 | 3,00 | - |
| 15 | 2,00 | 3,00 | 3,70 | 3,80 | 3,90 | 4,00 | 4,00 | 4,50 | 4,90 | 5,00 | 1,00 |
| 30 | 4,00 | 5,10 | 6,20 | 6,60 | 6,60 | 7,20 | 8,30 | 8,80 | 10,00 | 13,30 | 0,90 |
| 45 | 4,60 | 6,20 | 6,80 | 7,00 | 8,50 | 9,70 | 11,30 | 14,00 | 18,00 | 21,40 | 0,85 |
| 60 | 6,20 | 6,70 | 7,30 | 7,50 | 9,90 | 12,00 | 16,00 | 25,00 | 34,00 | 63,20 | 0,76 |
| 75 | 6,80 | 7,00 | 8,00 | 9,00 | 11,70 | 14,00 | 21,00 | 33,00 | 45,00 | 74,50 | 0,50 |
| 90 | 7,00 | 8,10 | 10,30 | 11,00 | 13,70 | 16,80 | 24,20 | 39,60 | 52,00 | 90,60 | 0,30 |
| 100 | 8,00 | 9,20 | 18,00 | 18,30 | 20,00 | 22,00 | 29,00 | 49,00 | 65,00 | 100,00 | < 0, 20 |

Quadro 15: Perdas de carga obtida em diferentes profundidades nos filtros não segmentados de bagaço de cana-de-açúcar, em função do tempo de operação, durante a filtração da ARS bruta peneirada

| Tempo (min) | Camadas (cm) | | | | | | | | | | Vazão L s ⁻¹ |
|-------------|----------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|-------------------------|
| | 0-20 | 0-30 | 0-40 | 0-50 | 0-60 | 0-70 | 0-80 | 0-90 | 0-100 | 0-110 | |
| | perda de carga (cm. c. a.) | | | | | | | | | | |
| 1 | 3,00 | 3,00 | 3,00 | 3,00 | 3,00 | 3,00 | 3,00 | 3,10 | 3,20 | 3,40 | - |
| 15 | 3,50 | 3,60 | 3,60 | 3,70 | 3,80 | 4,00 | 4,00 | 4,50 | 5,00 | 6,00 | 1,10 |
| 30 | 3,90 | 5,10 | 6,20 | 6,40 | 6,60 | 6,60 | 8,30 | 9,80 | 11,00 | 15,00 | 0,92 |
| 45 | 4,60 | 6,20 | 6,80 | 7,00 | 8,50 | 10,70 | 16,30 | 24,00 | 26,00 | 28,00 | 0,88 |
| 60 | 6,40 | 6,70 | 7,90 | 8,50 | 10,90 | 16,00 | 22,00 | 35,00 | 44,00 | 70,00 | 0,69 |
| 75 | 7,20 | 7,60 | 11,00 | 13,00 | 19,70 | 22,00 | 31,00 | 43,00 | 75,00 | 92,00 | 0,45 |
| 90 | 8,00 | 9,10 | 16,30 | 19,00 | 29,70 | 36,80 | 50,20 | 64,60 | 92,00 | 101,00 | 0,27 |
| 100 | 9,00 | 12,20 | 18,00 | 22,30 | 33,00 | 42,00 | 58,00 | 77,00 | 95,00 | 106,00 | < 0, 20 |

Quadro 16: Perdas de carga obtida em diferentes profundidades nos filtros não segmentados de pergaminho dos grãos de café, em função do tempo de operação, durante a filtração da ARS bruta peneirada

| Tempo (min) | Camadas (cm) | | | | | | | | | | Vazão L s ⁻¹ |
|-------------|----------------------------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|-------------------------|
| | 0-20 | 0-30 | 0-40 | 0-50 | 0-60 | 0-70 | 0-80 | 0-90 | 0-100 | 0-110 | |
| | perda de carga (cm. c. a.) | | | | | | | | | | |
| 1 | 1,50 | 1,50 | 1,50 | 1,50 | 1,50 | 1,50 | 1,60 | 1,70 | 1,80 | 1,90 | - |
| 15 | 1,50 | 1,60 | 2,10 | 2,20 | 2,60 | 2,80 | 3,00 | 3,00 | 3,20 | 3,40 | 1,20 |
| 30 | 3,90 | 4,20 | 4,20 | 4,60 | 4,60 | 5,20 | 8,30 | 8,80 | 10,00 | 12,80 | 0,98 |
| 45 | 5,20 | 6,00 | 6,10 | 6,90 | 7,00 | 9,40 | 11,30 | 14,00 | 18,00 | 19,00 | 0,89 |
| 60 | 6,10 | 6,70 | 7,00 | 7,30 | 9,00 | 11,00 | 14,00 | 23,00 | 31,00 | 37,00 | 0,80 |
| 75 | 6,60 | 6,90 | 9,00 | 9,00 | 11,70 | 14,00 | 21,00 | 33,00 | 45,00 | 62,00 | 0,55 |
| 90 | 7,00 | 8,10 | 12,30 | 18,00 | 23,70 | 36,80 | 44,20 | 59,60 | 72,00 | 80,00 | 0,33 |
| 100 | 7,20 | 8,30 | 14,00 | 26,30 | 30,00 | 42,00 | 69,00 | 79,00 | 95,00 | 110,00 | < 0, 20 |

Conforme pode-se observar, a perda de carga nos filtros aumentou com o tempo de operação dos mesmos, ou seja com a quantidade de material SS retido no material filtrante, até causar o entupimento dos poros das camadas superficiais.

No geral, a vazão de ARS foi maior nos filtros constituídos por pergaminho de grãos de café indicando apresentar nesse material maior macroporosidade e menor potencial de entupimento com o tempo. Esse comportamento, não pode ser tomado, no entanto, como positivo para a filtração, tendo em vista que, quanto maior a velocidade de percolação, menor é a eficiência do filtro na remoção dos sólidos.

A análise de variância para os valores de perda de carga dos filtros de serragem de madeira, bagaço de cana-de-açúcar e de pergaminho de grãos de café estão apresentadas na Quadro 17.

Quadro 17: Análise de variância para os valores de perda de carga dos filtros orgânicos

| Fonte de variação | G.L | SQ | QM | F |
|-------------------|-------|----------|----------|------------|
| Serragem | | | | |
| Tratamentos | 79 | 100629,3 | 1273,788 | 492,674*** |
| Resíduo | 160 | 413,6733 | 2,585458 | |
| C.V. (%) | 9,982 | - | - | - |

Continuação do Quadro 17

| Fonte de variação | G.L | SQ | QM | F |
|-------------------|--------|----------|----------|------------|
| Bagaço | | | | |
| Tratamentos | 79 | 167174,6 | 2116,134 | 605,792*** |
| Resíduo | 160 | 558,9067 | 3,493167 | |
| C.V. (%) | 8,583 | - | - | - |
| Pergaminho | | | | |
| Tratamentos | 79 | 157541,5 | 1994,196 | 22,126*** |
| Resíduo | 160 | 14420,37 | 90,12729 | |
| C.V. (%) | 51,688 | - | - | - |

*** nível de significância a 1% de probabilidade

As equações de regressão ajustadas para a variável perda de carga em função da profundidade e do tempo, para os diferentes materiais orgânicos estudados estão apresentados na Quadro 18.

Quadro 18: Equações de regressão ajustadas para a variável perda de carga em função da profundidade e do tempo, para os diferentes materiais orgânicos estudados

| Material orgânicos | Equações ajustadas | R ² |
|-----------------------------|--|----------------|
| Serragem de madeira | $H_t = -1,2535 + 0,2582^{***} t + 0,2880^* p - 0,01766^{***} tp - 0,003208^{***} p^2 + 0,0003873^{***} t^2 p + 0,0002140^{***} tp^2$ | 0,94 |
| Bagaço de cana-de-açúcar | $H_t = 2,6046 + 0,1090^{***} t - 0,0108^{***} tp + 0,0001379^{***} tp^2 + 0,00007025 t^2 p$ | 0,98 |
| Pergaminho de grãos de café | $H_t = 3,5531 + 0,3085^{***} t - 0,003261^{***} t^2 - 0,01612^{***} tp + 0,0001738^{***} t^2 p + 0,0001042^{***} tp^2$ | 0,94 |

H_t = perda de carga

t = tempo

p = profundidade

Nas Figuras 20, 21 e 22 estão apresentadas, respectivamente às superfícies de resposta da perda de carga dos filtros de serragem de madeira, de bagaço de cana-de-açúcar e de pergaminho de grãos de café, em função do tempo de operação dos filtros orgânicos e da profundidade da camada filtrante.

$$H_t = 1,2535 + 0,2582 \cdot t + 0,288 \cdot p - 0,01766 \cdot t \cdot p - 0,003208 \cdot p^2 + 0,0000387 \cdot t^2 \cdot p + 0,000214 \cdot t \cdot p^2 \quad R^2 = 0,94$$

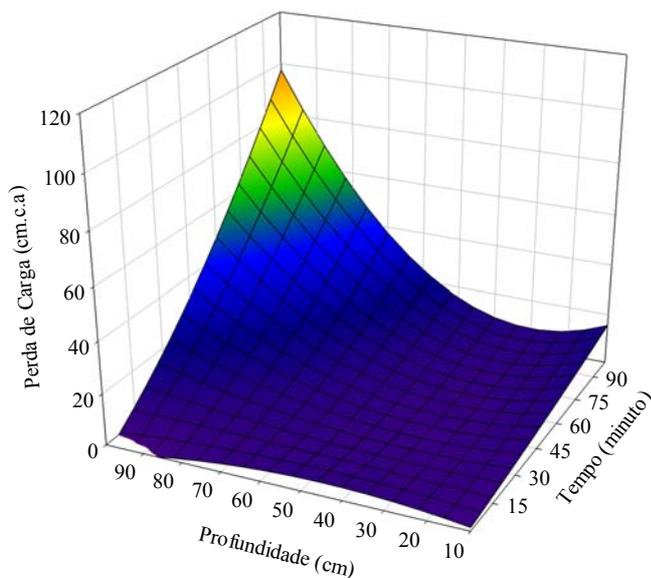


Figura 20. Superfície de resposta da perda de carga em função do tempo de operação e da profundidade do filtro de serragem de madeira

$$H_t = 2,6046 + 0,1090 \cdot t - 0,0108 \cdot t \cdot p + 0,0001379 \cdot t \cdot p^2 + 0,00007025 \cdot t^2 \cdot p \quad R^2 = 0,98$$

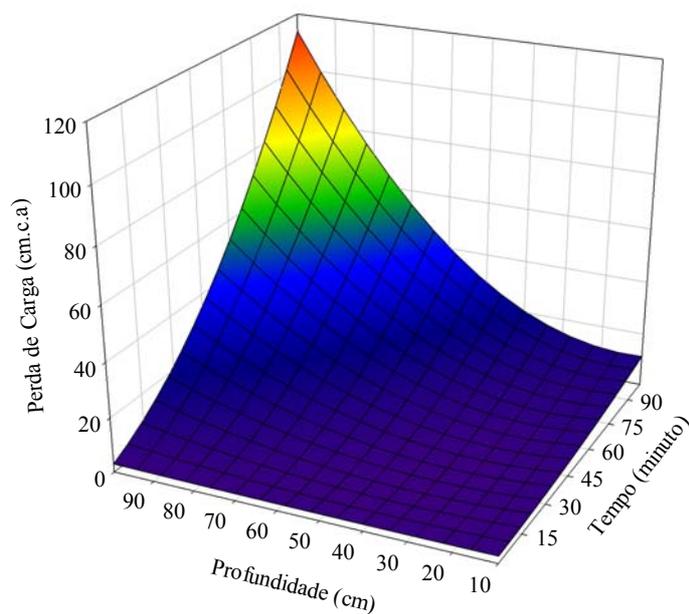


Figura 21. Superfície de resposta da perda de carga em função do tempo de operação e da profundidade do filtro de bagaço de cana-de-açúcar triturado

$$H_t = 3,5531 + 0,3058t - 0,003261t^2 - 0,01612tp + 0,0001738t^2p + 0,0001042tp^2 \quad R^2 = 0,94$$

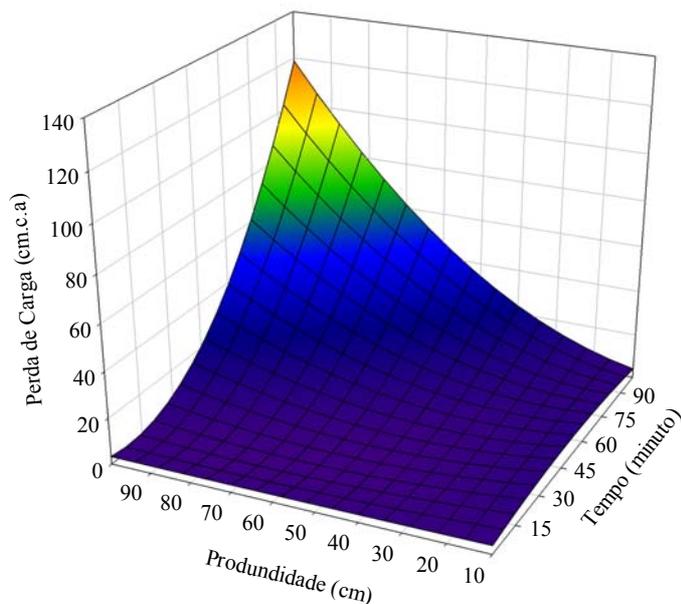


Figura 22. Superfície de resposta da perda de carga em função do tempo de operação e da profundidade do filtro de pergaminho de grãos de café

4.4 Remoção de óleos e graxas da ARS nos filtros orgânicos

Os valores de concentração de óleos e graxas no afluente e efluente e eficiência de remoção pelos filtros orgânicos não segmentados, estão apresentados na Quadro 19.

Quadro 19: Eficiência na remoção de óleos e graxas presentes na ARS por diferentes materiais orgânicos utilizados em colunas filtrantes não segmentados

| Material Filtrante | Amostra ARS | Óleos e graxas (mg L ⁻¹) | Remoção de óleos e graxas |
|------------------------------|--------------------|--------------------------------------|---------------------------|
| Bagaço de cana-de-açúcar | antes de filtrar | 2.461 | 96% |
| | depois de filtrada | 99 | |
| Serragem de madeira | antes de filtrar | 3.508 | 89% |
| | depois de filtrada | 389 | |
| Pergaminho dos grãos de café | antes de filtrar | 2.582 | 76% |
| | depois de filtrada | 620 | |

Os filtros orgânicos de bagaço de cana-de-açúcar, serragem de madeira e pergaminho dos grãos de café apresentaram grande capacidade para retenção de óleos e graxas da na ARS, tendo sido obtidos eficiências de remoção, de 96%; 89% e 76%, respectivamente. Apesar disso, esses filtros não foram eficientes o suficiente para atender a legislação do CONAMA que, estabelece que para lançamento de efluentes em corpos hídricos, a concentração de óleos vegetais e gorduras animais deva ser inferior a 50 mg L⁻¹. Mesmo não atendendo a legislação do CONAMA, indubitavelmente o uso de filtro orgânico permitiu melhoria considerável na qualidade do efluente, o que facilita enormemente as etapas subseqüentes do tratamento da ARS.

Considerando que o uso de filtros constitui tratamento primário da ARS, para remoção de poluentes presentes nas águas residuárias, além da remoção de sólidos em suspensão, o processo de filtração pode remover parte dos sólidos solúveis (STEEL e McGHEE, 1979). Contudo, outras etapas de tratamento devem ser incluídas, com as quais pode-se, com relativa facilidade adequar o efluente aos padrões de lançamento.

Há de se considerar, no entanto, que houve adequação das características da ARS, de forma a torná-lo em condições de ser aplicado por meio de sistemas localizados (micro aspersão e gotejamento), no que se refere à concentrações de óleos e graxas.

4.5 Remoção de sólidos do afluente sob diferentes cargas de sólidos

Os resultados das concentrações relativas de ST da ARS bruta peneirada, submetida a diferentes níveis diluições com água limpa e aplicadas nos filtros, não segmentados, de serragem de madeira, bagaço de cana-de-açúcar e de pergaminho de grãos de café estão apresentados no Anexo, respectivamente, Quadros 7A, 8A e 9A.

Na Figura 23, estão apresentados os valores da concentração relativa de ST da ARS bruta peneirada, submetida a diferentes cargas de sólidos, contidas em ARS, preparada em diferentes diluições com água “limpa” e aplicada nos filtros não segmentados, de serragem de madeira, como função do tempo de operação dos filtros.

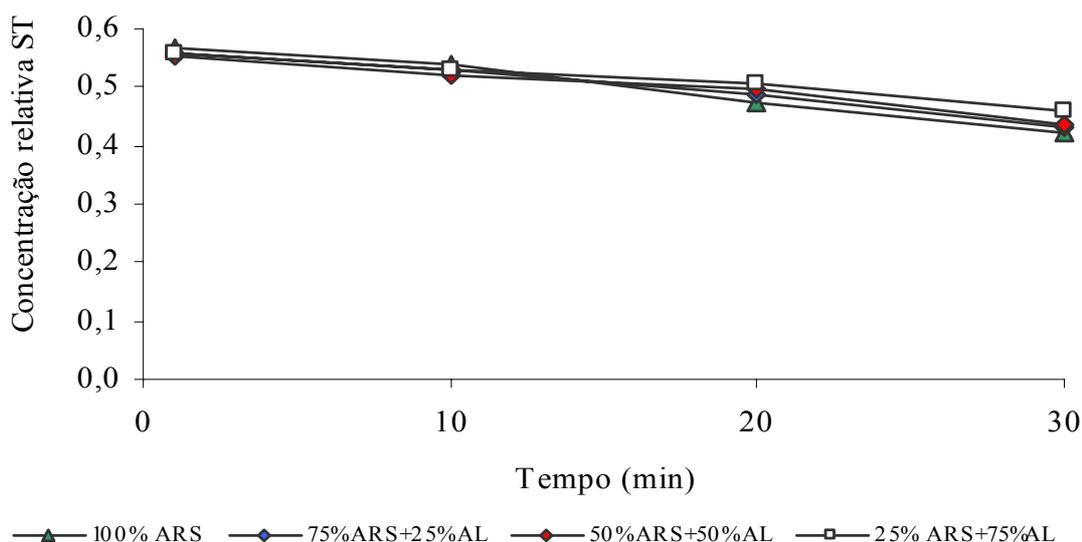


Figura 23: Concentração relativa de ST no efluente no filtro não segmentado de serragem de madeira, como função do tempo de operação dos filtros

A fim de se verificar se o desempenho dos filtros para as diferentes diluições de água residuária submetida a filtração, foram traçadas curvas de concentração de sólidos no efluente em função do tempo e efetuado o Teste de Identidade dos modelos matemáticos ajustados. Os resultados obtidos no Teste de Identidade dos modelos estão apresentados na Quadro 20.

Quadro 20: Teste de identidade entre as curvas de concentração relativa de ST no efluente, em função do tempo de operação do filtro, não segmentado, de serragem de madeira

| Material filtrante | Diluição ARS | Equação | R ² |
|---------------------|-----------------------|---|----------------|
| serragem de madeira | 1. 100 % ARS + 0% AL | $CR = - 0,46 \times 10^{-2} T + 0,5632$ | 0,9732 |
| | 2. 75 % ARS + 25% AL | $CR = - 0,38 \times 10^{-2} T + 0,5501$ | 0,9839 |
| | 3. 50 % ARS + 50% AL | $CR = - 0,35 \times 10^{-2} T + 0,5449$ | 0,9901 |
| | 4. 25 % ARS + 75% AL | $CR = - 0,31 \times 10^{-2} T + 0,5517$ | 0,9883 |
| | equação comum 1, 2, 3 | $CR = - 0,40 \times 10^{-2} T + 0,5527$ | 0,9470 |

CR = Concentração Relativa de ST na ARS (adimensional) e T = tempo de operação (minutos)

De acordo com os resultados obtidos no teste de identidade de modelos, as curvas 1, 2 e 3, apresentadas na Figura 23, não diferiram estatisticamente, entre si, em nível de 5% de probabilidade, podendo ser representadas por uma equação comum ($CR = - 0,40 \times 10^{-2} T + 0,5527$). Com base nisso, pode-se considerar que para ARS com concentração de ST entre 212,8 e 421,1 mg L⁻¹ pode-se considerar que o desempenho do filtro de serragem de madeira é semelhante. Os resultados obtidos indicaram que os filtros de serragem de madeira, quando submetidos a cargas de sólidos mais baixas (25% ARS + 75%AL), são menos eficientes que os submetidos a cargas de sólidos mais altas ($\geq 50\%$ ARS).

Na Figura 24, estão apresentados os valores de concentração relativa de ST da ARS bruta peneirada, submetida a diferentes cargas de sólidos, contidas em ARS, preparada em diferentes diluições com água “limpa” e aplicada nos filtros, não segmentado, de bagaço de cana-de-açúcar, como função do tempo de operação dos filtros.

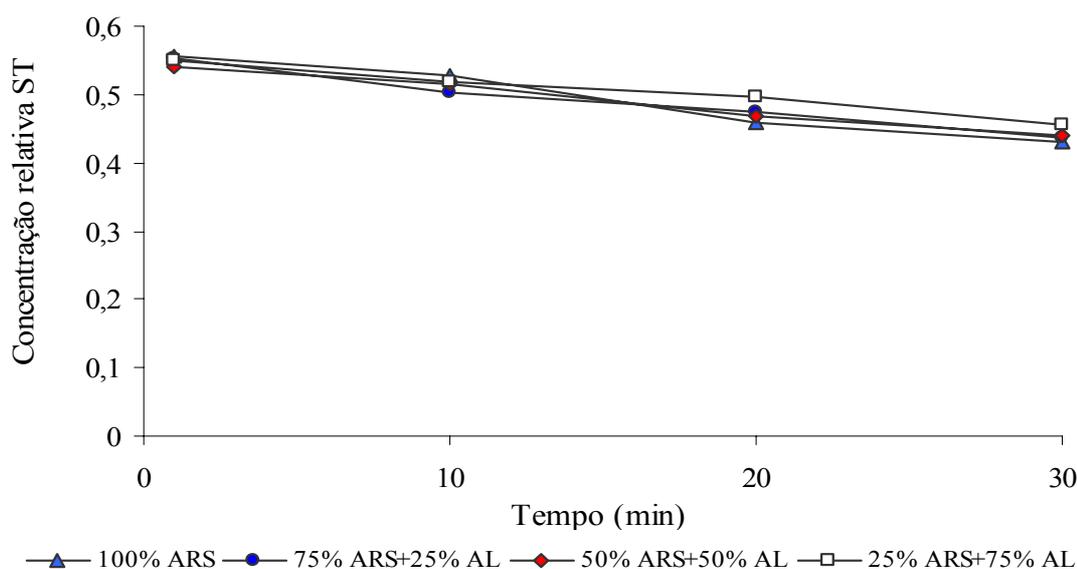


Figura 24: Concentração relativa de ST no efluente do filtro não segmentado de bagaço de cana-de-açúcar, como função do tempo de operação dos filtros

Os resultados obtidos no Teste de Identidade dos modelos estão apresentados na Quadro 21.

Quadro 21: Teste de identidade entre as curvas de concentração relativa de ST no efluente, em função do tempo de operação do filtro não segmentado, de bagaço de cana-de-açúcar

| Material filtrante | Diluição ARS | Equação | R ² |
|--------------------------|----------------------|---|----------------|
| bagaço de cana-de-açúcar | 1. 100 % ARS + 0% AL | $CR = - 0,45 \times 10^{-2} T + 0,5631$ | 0,9729 |
| | 2. 75 % ARS + 25% AL | $CR = - 0,38 \times 10^{-2} T + 0,5502$ | 0,9818 |
| | 3. 50 % ARS + 50% AL | $CR = - 0,35 \times 10^{-2} T + 0,5451$ | 0,9862 |
| | 4. 25 % ARS + 75% AL | $CR = - 0,31 \times 10^{-2} T + 0,5518$ | 0,9698 |
| | equação comum 1 e 2 | $CR = - 0,42 \times 10^{-2} T + 0,5566$ | 0,9687 |

CR = Concentração Relativa de ST na ARS (adimensional) e T = tempo de operação (minutos)

De acordo com os resultados obtidos no teste de identidade de modelos, a relação existente entre as curvas 1 e 2 apresentadas na Figura 24, não diferiram estatisticamente, entre si, em nível de 5% de probabilidade, podendo ser representadas por uma equação comum ($CR = - 0,42 \times 10^{-2} T + 0,5566$), nas diluições avaliadas para ARS, apresentando comportamento hidráulico similar ao dos filtros de bagaço de cana-de-açúcar. Esses resultados indicam que filtros de bagaço de cana-de-açúcar apresentam semelhante desempenho na filtragem de ARS com concentração de ST entre 212,8 e 421,1 mg L⁻¹.

Na Figura 25 está apresentada a concentração relativa de ST do filtro de pergaminho dos grãos de café, para ARS bruta peneirada submetido a diferentes diluições com água “limpa” como função do tempo de operação dos filtros.

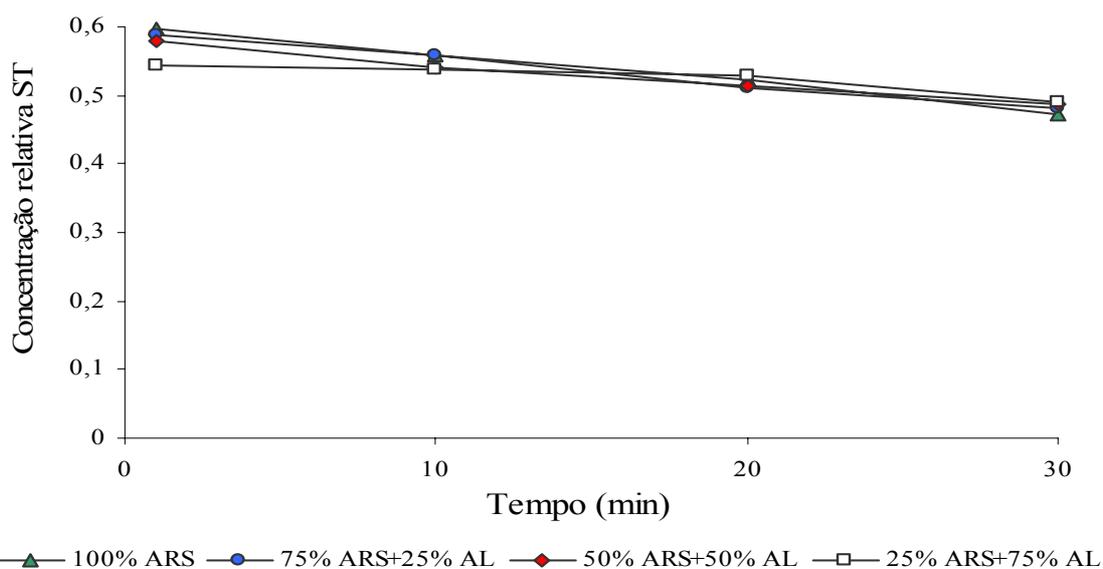


Figura 25: Concentração relativa de ST no efluente do filtro não segmentado, de pergaminho dos grãos de café, como função do tempo de operação dos filtros

É importante observar que esse material proporcionou menor eficiência na remoção de sólidos totais. Porém, acredita-se que isso se deva à solubilização de ST do próprio material filtrante. Lo MONACO (2002) observou que o material filtrante pode enriquecer a solução percolante com alguns íons, notadamente os mais facilmente solubilizados, como o sódio e potássio. O pergaminho de grãos de café é capaz de liberar grande quantidade de potássio quando por entre o material escoar água ou solução aquosa.

Os resultados obtidos no Teste de Identidade dos Modelos estão apresentados no Quadro 22.

Quadro 22: Teste de identidade entre as curvas de concentração relativa de ST no efluente, em função do tempo de operação do filtro não segmentado, de pergaminho dos grãos de café

| Material filtrante | Diluição ARS | Equação | R ² |
|---------------------------------|----------------------|---|----------------|
| pergaminho dos Grãos de café | 1. 100 % ARS + 0% AL | CR = - 0,41×10 ⁻² T + 0,6022 | 0,9944 |
| | 2. 75 % ARS + 25% AL | CR = - 0,37×10 ⁻² T + 0,5918 | 0,9943 |
| | 3. 50 % ARS + 50% AL | CR = - 0,31×10 ⁻² T + 0,5781 | 0,9829 |
| | 4. 25 % ARS + 75% AL | CR = - 0,26×10 ⁻² T + 0,5712 | 0,9508 |
| | equação comum 3 e 4 | CR = - 0,29×10 ⁻² T + 0,5747 | 0,9620 |

CR = Concentração Relativa de ST na ARS (adimensional) e T = tempo de operação (minutos)

Pelo Teste de Identidade de Modelos, as curvas 3 e 4 apresentadas na Figura 25, não diferiu estatisticamente, entre si, em nível de 5% de probabilidade, podendo ser representada para os filtros de pergaminho dos grãos de café por uma equação comum (CR = - 0,29 x 10⁻² T + 0,5747), para a ARS avaliada. Esses resultados indicam que o uso de pergaminho dos grãos de café como material filtrante de ARS apresentam o comportamento semelhante para concentração de ST entre 101,3 e 195,4 mg L⁻¹.

Na Figura 26 estão apresentadas as curvas da concentração relativa de SS no efluente do filtro de serragem de madeira, em função do tempo, para ARS submetida a diferentes diluições com água “limpa”.

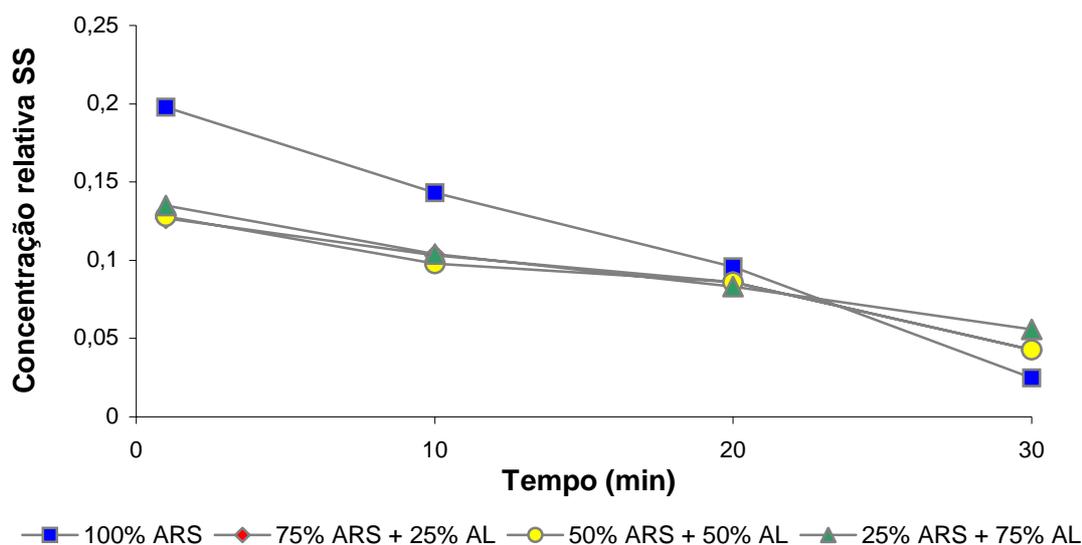


Figura 26: Concentração relativa de SS no efluente do filtro não segmentado, de serragem de madeira, como função do tempo de operação dos filtros

Observando-se o comportamento das curvas, verifica-se que águas residuárias com maior concentração de SS apresentaram maior aumento na taxa de remoção com o tempo. Isso pode ser explicado pelo maior entupimento dos poros com o tempo, proporcionando, com isso, maior retenção do material em suspensão.

Os resultados obtidos no Teste de Identidade dos Modelos estão apresentados na Quadro 23.

Quadro 23: Teste de identidade entre as curvas de concentração relativa de SS no efluente em função do tempo de operação do filtro, não segmentado, de serragem de madeira

| Material filtrante | Diluição ARS | Equação | R ² |
|---------------------|------------------------|---|----------------|
| serragem de madeira | 1. 100 % ARS + 0% AL | $CR = - 0,58 \times 10^{-2} T + 0,2045$ | 0,9940 |
| | 2. 75 % ARS + 25% AL | $CR = - 0,28 \times 10^{-2} T + 0,1321$ | 0,9655 |
| | 3. 50 % ARS + 50% AL | $CR = - 0,28 \times 10^{-2} T + 0,1307$ | 0,9570 |
| | 4. 25 % ARS + 75% AL | $CR = - 0,27 \times 10^{-2} T + 0,1350$ | 0,9915 |
| | equação comum 2, 3 e 4 | $CR = - 0,27 \times 10^{-2} T + 0,1326$ | 0,9635 |

CR = Concentração Relativa de SS na ARS (adimensional) e T = tempo de operação (minutos)

De acordo com os resultados do teste de identidade de modelos, as curvas 2, 3 e 4 apresentadas na Figura 26, não diferiram estatisticamente, entre si, em nível de 5% de

probabilidade, podendo ser representadas por uma equação comum ($CR = - 0,27 \times 10^{-2} T + 0,1326$), nas diluições avaliadas da ARS, apresentando comportamento hidráulico similar nos filtros de serragem de madeira. Com base nisso, pode-se afirmar que, na faixa de concentração de SS entre 29,7 e 82,9 mg L⁻¹, filtros de serragem de madeira apresentam comportamento semelhante.

Da mesma forma como foi observado no filtro de serragem de madeira, houve maior aumento na taxa de remoção de SS com o tempo, no filtro de bagaço de cana-de-açúcar, quando da filtração da água residuária com maior concentração de SS, confirmando o aumento da eficiência de remoção de SS dos poros do material filtrante.

Na Figura 27 estão apresentados os valores da concentração relativa de SS no efluente do filtro não segmentado, de bagaço de cana-de-açúcar, para ARS submetido a diferentes diluições com água “limpa” como função do tempo de operação dos filtros.

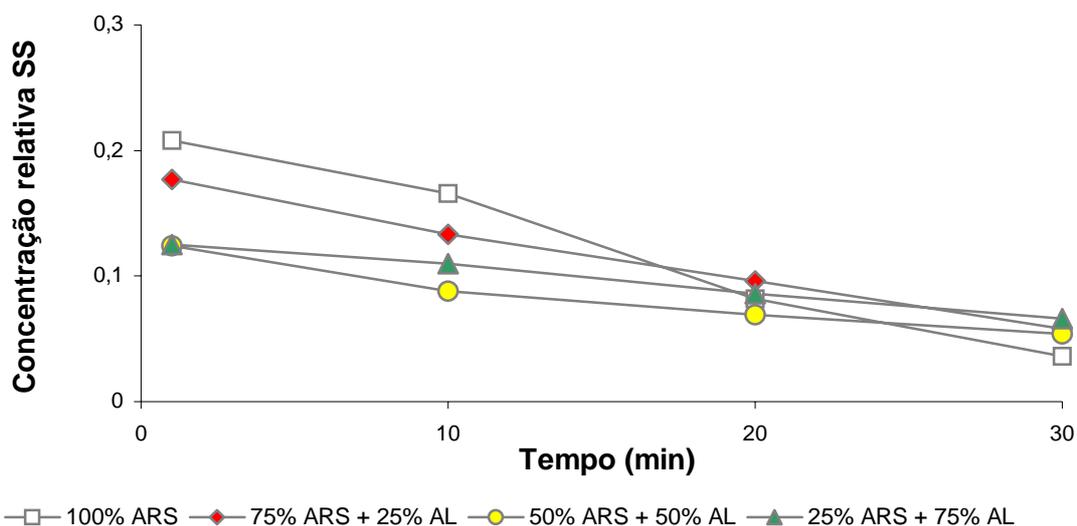


Figura 27: Concentração relativa de SS no efluente do filtro não segmentado, de bagaço de cana-de-açúcar, como função do tempo de operação dos filtros

Os resultados obtidos no Teste de Identidade dos modelos estão apresentados na Quadro 24.

Quadro 24: Teste de identidade entre as curvas de concentração relativa de SS no efluente em função do tempo de operação do filtro, não segmentado, de bagaço de cana-de-açúcar

| Material filtrante | Diluição ARS | Equação | R ² |
|--------------------------|----------------------|---|----------------|
| bagaço de cana-de-açúcar | 1. 100 % ARS + 0% AL | CR = - 0,62×10 ⁻² T + 0,2174 | 0,9851 |
| | 2. 75 % ARS + 25% AL | CR = - 0,41×10 ⁻² T + 0,1778 | 0,9958 |
| | 3. 50 % ARS + 50% AL | CR = - 0,23×10 ⁻² T + 0,1195 | 0,9460 |
| | 4. 25 % ARS + 75% AL | CR = - 0,21×10 ⁻² T + 0,1284 | 0,9960 |
| | equação comum 3 e 4 | CR = - 0,22×10 ⁻² T + 0,1240 | 0,9000 |

CR = Concentração Relativa de SS na ARS (adimensional) e T = tempo de operação (minutos)

De acordo com os resultados do Teste de Identidade de modelos, as curvas 3 e 4 apresentadas na Figura 27, não diferiram estatisticamente, entre si, em nível de 5% de probabilidade, podendo ser representadas por uma equação comum ($CR = - 0,22 \times 10^{-2} T + 0,1240$), nas diluições avaliadas da ARS, apresentando comportamento hidráulico similar nos filtros de bagaço de cana-de-açúcar.

Com base no resultado obtido pode-se considerar que entre 34,8 a 69,1 mg L⁻¹ de SS, filtro de bagaço de cana-de-açúcar apresenta desempenho similar.

Na Figura 28 estão apresentados os valores da concentração relativa de SS no efluente do filtro de pergaminho dos grãos de café, para ARS submetido a diferentes diluições com água “limpa”, como função do tempo de operação dos filtros.

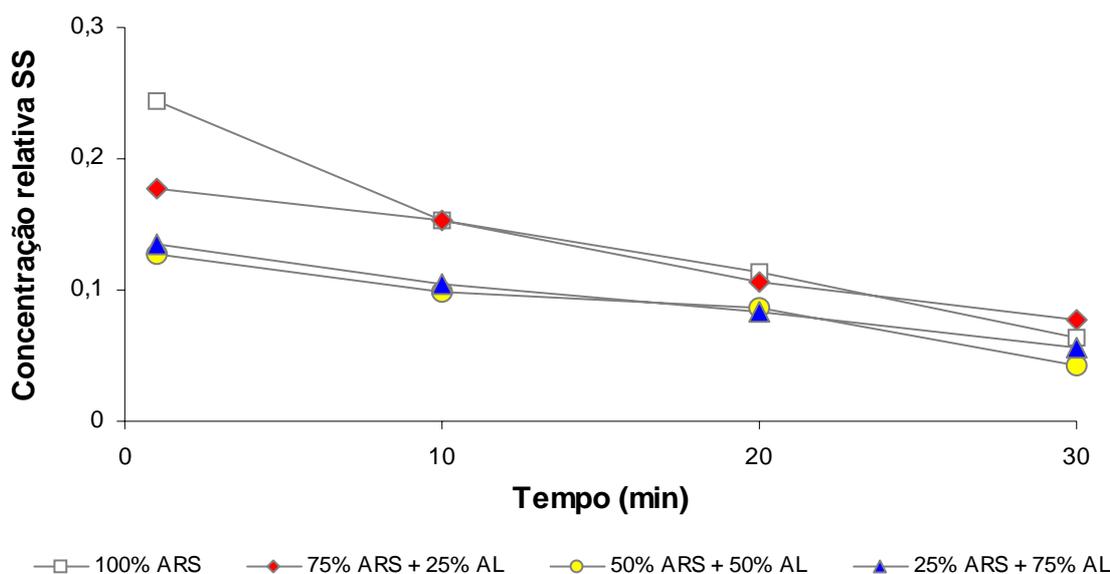


Figura 28: Concentração relativa de SS no efluente do filtro não segmentado, de pergaminho dos grãos de café, como função do tempo de operação dos filtros

De forma semelhante ao que foi observado no outro filtro, o entupimento dos poros, houve aumento na remoção de SS no filtro de pergaminho de grãos de café.

Os resultados obtidos no Teste de Identidade de modelo estão apresentados na Quadro 25.

Quadro 25: Teste de identidade entre as curvas de concentração relativa de SS no efluente em função do tempo de operação do filtro não segmentado, de pergaminho dos grãos de café

| Material filtrante | Diluição ARS | Equação | R ² |
|------------------------------|----------------------|---|----------------|
| pergaminho dos grãos de café | 1. 100 % ARS + 0% AL | CR = - 0,59×10 ⁻² T + 0,2342 | 0,9546 |
| | 2. 75 % ARS + 25% AL | CR = - 0,36×10 ⁻² T + 0,1826 | 0,9877 |
| | 3. 50 % ARS + 50% AL | CR = - 0,28×10 ⁻² T + 0,1307 | 0,9570 |
| | 4. 25 % ARS + 75% AL | CR = - 0,27×10 ⁻² T + 0,1350 | 0,99150 |
| | equação comum 3 e 4 | CR = - 0,27×10 ⁻² T + 0,1329 | 0,9640 |

CR = Concentração Relativa de SS na ARS (adimensional) e T = tempo de operação (minutos)

De acordo com os resultados do teste de identidade de modelos, a relação existente entre as curvas 3 e 4, apresentadas na Figura 28, não diferiram estatisticamente, entre si, em nível de 5% de probabilidade, podendo ser representadas por uma equação comum (CR = - 0,27 x 10⁻² T + 0,1329), nas diluições avaliadas da ARS, apresentando comportamento hidráulico similar ao dos filtros de pergaminho dos grãos de café. Com isso, ARS com concentração de SS entre 38,4 a 70,0 mg L⁻¹ proporcionam semelhante comportamento dos filtros.

Embora os resultados obtidos com os filtros segmentados, quanto à eficiência na remoção de ST e SS tenham sido inferiores aos obtidos com o uso dos filtros não segmentados (colunas de 1,30m de altura e 0,58 m de diâmetro), podem ser considerados próximos. Atribui-se o melhor desempenho dos filtros não segmentados ao fato da ARS passar numa velocidade mais baixa do que nos filtros segmentados, uma vez que a coluna contínua proporcionou perda de carga acumulada.

Os resultados das concentrações relativas de SS da ARS bruta peneirada, submetida a diferentes níveis diluições com água limpa e aplicadas nos filtros, não segmentados, de serragem de madeira, bagaço de cana-de-açúcar e de pergaminho de grãos de café estão apresentados no Anexo, respectivamente, Quadros 13A, 14A e 15A.

4.6 Validação do modelo semi-empírico de filtração da ARS baseado na Equação Geral da Filtração

Os dados da concentração inicial da ARS obtidos para diferentes diluições da ARS, quando da operação dos filtros não segmentados de serragem de madeira, bagaço de cana-de-açúcar e de pergaminho de grãos de café, foram utilizados para validação do modelo semi-empírico ajustado à equação geral de filtração (equação 8), estando as curvas de distribuição da concentração do efluente de ST e SS em função do tempo apresentadas, respectivamente, nas Figuras 29 e 30.

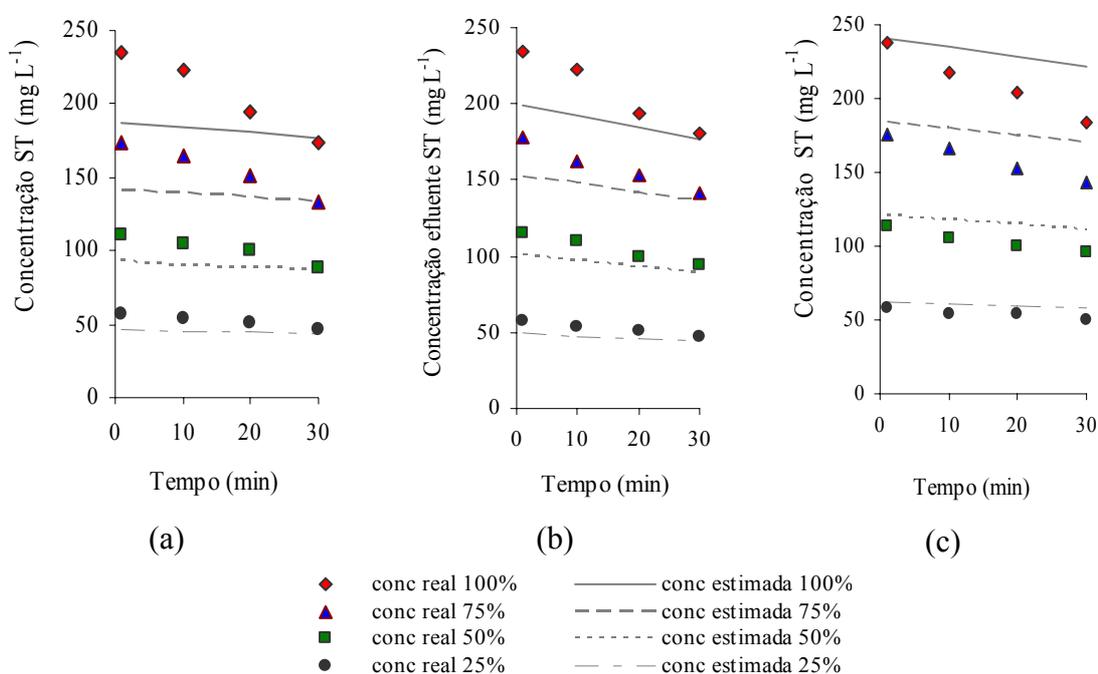


Figura 29: Concentração de ST experimental (real) e estimada, utilizando-se a equação semi-empírica, em função do tempo de operação dos filtros de serragem de madeira (a), bagaço de cana-de-açúcar (b) e de pergaminho de grãos de café (c) com ARS de diferentes diluições

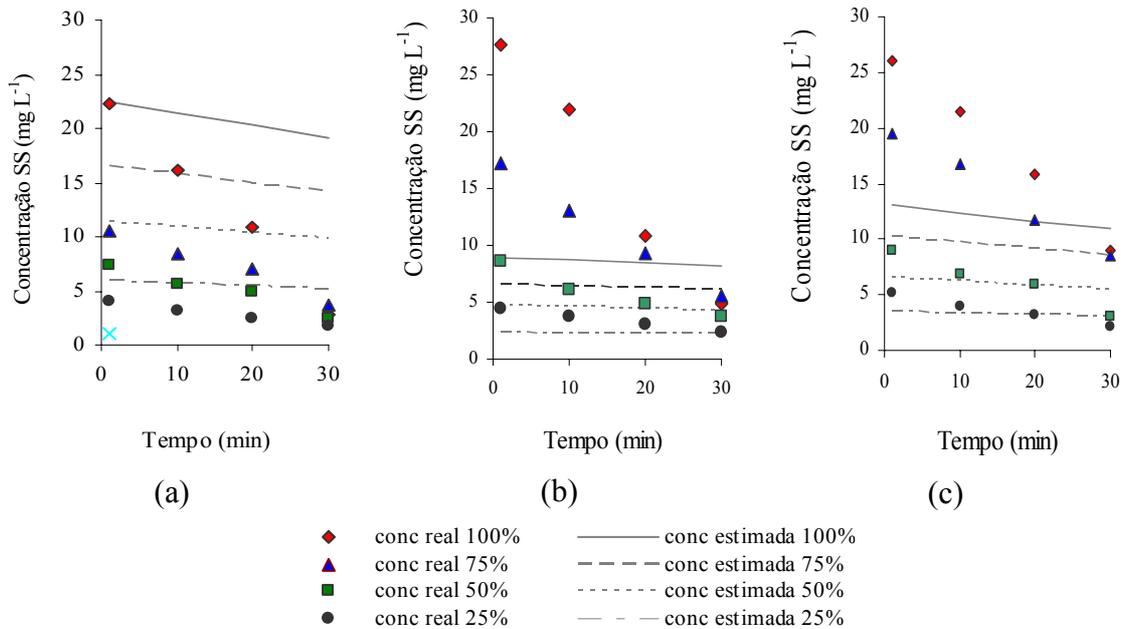


Figura 30: Concentração de SS experimental (real) e estimada no efluente, utilizando-se a equação semi-empírica, em função do tempo de operação dos filtros de serragem de madeira (a), bagaço de cana-de-açúcar (b) e de pergaminho de grãos de café (c) com ARS de diferentes diluições

Tanto para concentração de ST como para concentração SS, efluente estimada utilizando-se o modelo semi-empírico ajustado para todos os materiais orgânicos avaliados, com base nos resultados obtidos nos filtros segmentados, os valores obtidos foram inferiores aos experimentais. Esses resultados são indicativos de que o modelo ajustado superestima a remoção de sólidos da ARS nos filtros de serragem de madeira e de bagaço de cana-de-açúcar. No filtro de pergaminho de grãos de café, ao contrário houve pequena subestimativa dessa remoção.

Alterando-se os parâmetros r_o e os componentes de estimativa de K como função do tempo pode-se adequar melhor as curvas aos dados obtidos nos filtros não segmentados. As curvas obtidas após a alteração desses parâmetros estão apresentadas nas Figuras 31 e 32, respectivamente para concentrações de ST e SS do efluente.

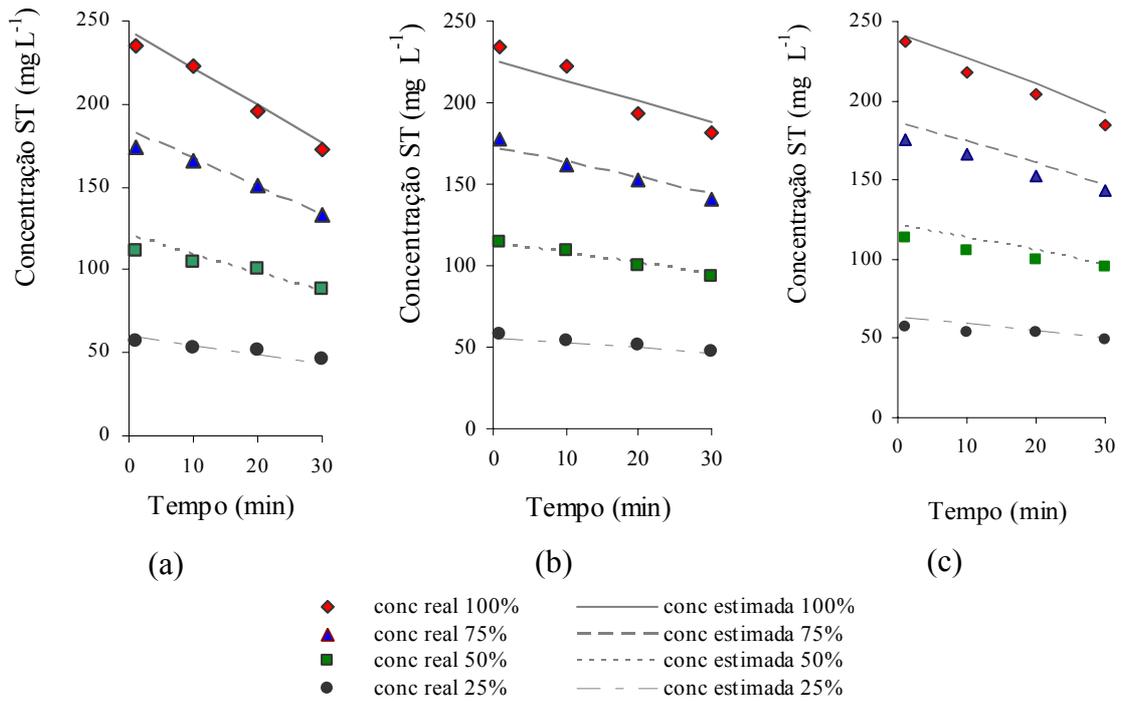


Figura 31: Concentração de ST experimental (real) e estimada no efluente, utilizando-se a equação semi-empírica ajustada, em função do tempo de operação dos filtros de serragem de madeira (a), bagaço de cana-de-açúcar (b) e de pergaminho de grãos de café (c) com ARS de diferentes diluições

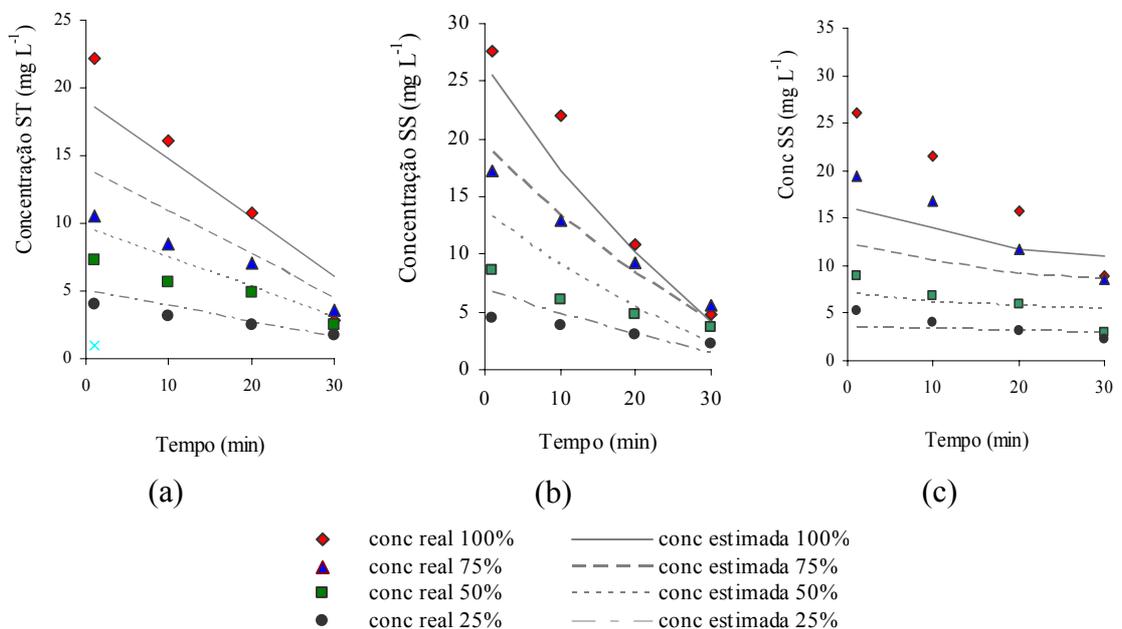


Figura 32: Concentração de SS experimental (real) e estimada no efluente, utilizando-se a equação semi-empírica ajustada, em função do tempo de operação dos filtros de serragem de madeira (a), bagaço de cana-de-açúcar (b) e de pergaminho de grãos de café (c) com ARS de diferentes diluições

Na Quadro 26 estão apresentados os “novos” parâmetros “ r_o ” e “K” como função do tempo, ajustados para a equação semi-empírica utilizando-se os dados experimentais obtidos com filtros orgânicos operando com ARS com diferentes diluições.

Quadro 26: Parâmetros ajustados para a equação semi-empírica

| Parâmetro | serragem de madeira | | bagaço de cana-de-açúcar | | pergaminho de grãos de café | |
|-----------|---------------------|-------------------|--------------------------|-------------------|-----------------------------|---------------------|
| | r_o | K | r_o | K | r_o | K |
| ST | 0,019 | $0,078 t - 1,508$ | 0,0045 | $0,119 t + 2,347$ | 0,006 | $0,1071 t + 0,7352$ |
| SS | 0,018 | $0,095 t + 1,994$ | 0,037 | $0,158 t + 0,30$ | 0,0162 | $0,131 t + 0,970$ |

4.7 Simulação do processo de filtração utilizando-se a equação empírica ajustada aos dados obtidos nos filtros segmentados

Com os dados de concentração inicial da ARS obtidos para diferentes diluições da ARS, quando da operação de filtros segmentados de serragem de madeira, bagaço de cana-de-açúcar e de pergaminho de grãos de café, utilizados para validação do modelo empírico ajustado à equação geral de filtração, foram obtidas curvas de distribuição da concentração do efluente de SS em função do tempo, que estão apresentadas na Figura 33.

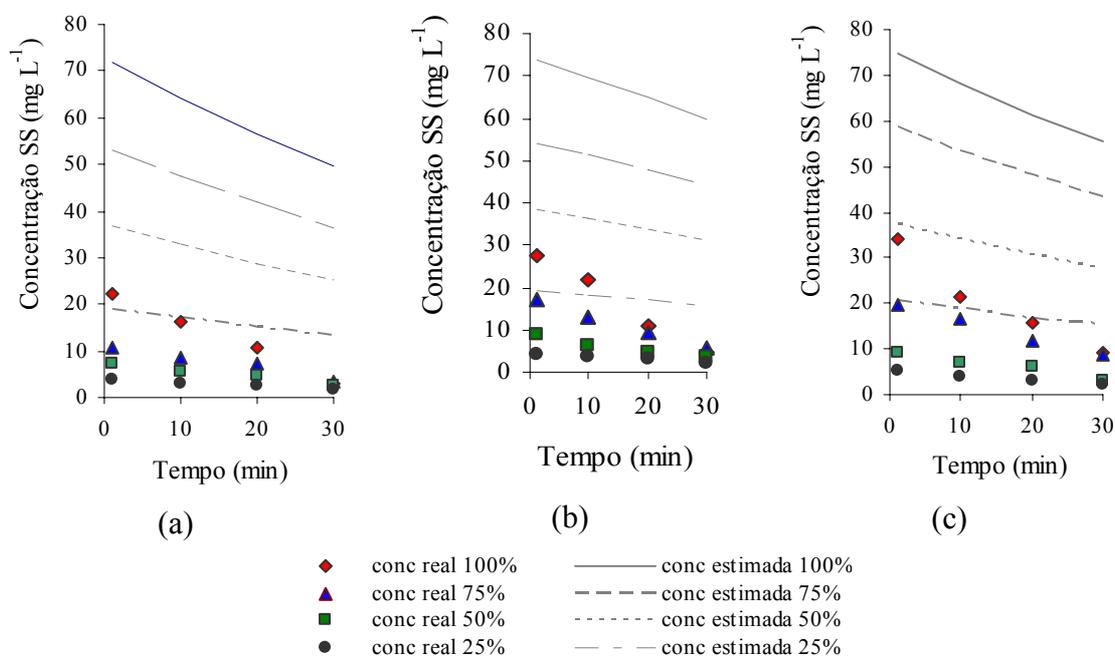


Figura 33: Concentração de SS experimental e estimada do efluente, utilizando-se a equação empírica ajustada aos dados obtidos em filtros segmentados, em função do tempo de operação dos filtros não segmentados de serragem de madeira (a), bagaço de cana-de-açúcar (b) e de pergaminho de grãos de café (c) com ARS de diferentes diluições

Plotando-se os resultados de concentração efluente de SS, obtidos experimentalmente no filtro não segmentado e os estimados utilizando-se a equação empírica ajustada para dados obtidos em filtros segmentados, verifica-se que houve subestimativa de remoção de SS. Esses resultados comprovam que filtros segmentados não representam adequadamente filtros não segmentados. A menor velocidade de escoamento da ARS no filtro não segmentado possibilitou maior retenção de SS no material poroso do que foi obtida em filtros segmentados.

5. RESUMO E CONCLUSÕES

A atividade suinícola em regime intensivo gera um grande volume de água rica em material orgânico e inorgânico e devido ao seu grande potencial poluidor têm-se transformado em sério problema ambiental.

Dentre os tratamentos propostos para redução da carga orgânica da água residuária de suinocultura está a filtração.

O objetivo geral deste trabalho foi ajustar equações existentes e incorporar novas, para constituição de modelo matemático capaz de descrever o processo de remoção de sólidos em filtros de diferentes materiais orgânicos (bagaço de cana-de-açúcar triturado, “pergaminho” dos grãos do café e serragem de madeira), utilizados no tratamento de águas residuárias de suinocultura.

Para obtenção de dados de operação de filtros orgânicos com o objetivo de comparar com os resultados obtidos por simulação, foram realizados testes de filtração com 3 diferentes materiais orgânicos, serragem de madeira, bagaço de cana-de-açúcar e pergaminho de grãos de café. Os ensaios da coluna de filtração foram conduzidos em tonéis de 1.30 m de comprimento e 0,58 m de diâmetro. Durante 2 horas de teste, o sistema de tratamento foi avaliado coletando-se amostras do afluente e do efluente dos filtros, com três repetições para cada tratamento.

Para ajuste de equação que relaciona a concentração de SS como função da profundidade e do tempo de operação dos filtros, colunas filtrantes segmentadas em camadas de 13 cm foram operadas, efetuando-se a quantificação da massa retida na camada, a cada 15 min.

A serragem de madeira foi, dentre os materiais orgânicos avaliados, o mais eficiente quanto à capacidade de reter sólidos da ARS, alcançando o máximo de 0,19 g de sólidos para cada cm^{-3} de camada filtrante, seguido do bagaço de cana-de-açúcar com 0,16 g de sólidos cm^{-3} de camada filtrante e o pergaminho dos grãos de café com de 0,11 g de sólidos cm^{-3} de camada filtrante.

Os filtros orgânicos proporcionaram uma remoção razoavelmente alta de óleos e graxas da ARS, tendo sido obtidos valores de 96%, 89% e 75%, respectivamente para serragem de madeira, bagaço de cana-de-açúcar triturado e pergaminho de grãos de café.

As equações de estimativa da concentração de sólidos em suspensão da água residuária de suinocultura como função do tempo e da profundidade da coluna, ajustaram-se bem aos dados experimentais obtidos nos filtros segmentados de serragem de madeira e bagaço de cana-de-açúcar triturado, enquanto que, para o pergaminho de grãos de café, o ajuste obtido foi apenas razoável, o que pode ser atribuído à característica do próprio resíduo orgânico, utilizado como material filtrante (superfície de contato entre as partículas do material filtrante).

As equações empíricas para a estimativa da concentração de sólidos em suspensão da ARS como função do tempo e da profundidade da coluna, ajustaram-se bem aos dados experimentais obtidos nos filtros segmentados de serragem de madeira e bagaço de cana-de-açúcar triturado, enquanto que, para o pergaminho de grãos de café, o ajuste obtido apenas razoável foi obtido, o que pode ser atribuído à maior dificuldade em se realizar e se manter material filtrante sob compressão. As equações obtidas não explicaram adequadamente a filtração de ARS em filtros não segmentados.

A equação semi-empírica utilizada para a simulação do processo de filtração da ARS, baseada na equação geral de filtração, apresentou resultados satisfatórios, pois ajustou-se razoavelmente aos dados experimentais, podendo ser usada na estimativa da concentração de sólidos totais (ST) e sólidos em suspensão (SS) na água residuária em percolação e efluente de filtros orgânicos segmentados. Porém, quando as equações obtidas para descrever a filtração em filtros segmentados foram validadas para as condições de operação de filtros não segmentados, os ajustes não foram bons, notadamente para a concentração efluente de SS. Assim, ajustes de outros parâmetros tiveram que ser implementados para se tentar adequar as equações semi-empíricas de forma que pudessem ser utilizadas na predição da remoção de ST e SS de águas residuárias da suinocultura com diferentes concentrações de sólidos.

As equações de perda de carga como função da profundidade e do tempo de operação dos filtros explicaram, com adequada eficiência, o comportamento dos filtros constituídos por serragem de madeira, bagaço de cana-de-açúcar e pergaminho de grãos de café.

Concentrações de efluente de SS, obtidos experimentalmente no filtro não segmentado e os estimados, utilizando-se a equação empírica ajustada para dados obtidos em filtros segmentados subestimou remoção de SS.

Filtro não segmentado possibilitou maior retenção de SS no material poroso do que foi obtida em filtros segmentados em função da menor velocidade de escoamento da ARS.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALVAREZ V., V.H. Avaliação da fertilidade do solo - superfície de resposta – modelos aproximativos para expressar a relação fator–resposta. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, 1994, 75p. (Caderno Didático nº 228).

ANUÁRIO DA PECUÁRIA BRASILEIRA - **ANUALPEC 2004** – 11. ed. São Paulo: FNP Consultoria e Agroinformativos. Ed. Argos Comunicação, São Paulo, p.63-67, 84-87, 250-255, 2004.

APHA - AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION - **Standard methods for the examination of water and wastewater**. New York: APHA, WWA, WPCR, 19nd. ed., 1995.

BARKER, C.J. Manure liquid – Solids separation “Water quality & Waste Management”. [S.l.]. [s.n.]. 1996.

BAVARESCO, A.S.L.; MEDRI, W.; DA COSTA, R. H. R. Lagoas de aguapés no tratamento terciário de dejetos de suínos. In: 20^o CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, Rio de Janeiro, **Anais...** Rio de Janeiro: ABES, p 817-823, 1999.

BLEY JÚNIOR, C. Instalações para tratamento de dejetos. In: CICLO DE PALESTRAS SOBRE DEJETOS DE SUÍNOS, MANEJO E UTILIZAÇÃO, DO SUDESTE GOIANO, 1, 1997, Rio Verde. **Anais...** Rio Verde: Fundação do Ensino Superior de Rio Verde, ESUCARV. 1997. p. 48-68.

BOURNE, M.C. **Food texture and viscosity (concept and management)**. New York: Academic Press, 1982. 325p.

BRANDÃO, V. S.; MATOS, A.T.; MARTINEZ, M.A; FONTES, M.P.P. Tratamento de águas residuárias da suinocultura utilizando-se filtros orgânicos. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola**, Campina Grande, v.4, n.3, p. 327-333, 2000.

BRASIL Resolução nº 001/86 do CONAMA, de 23 de janeiro de 1986. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil**, Brasília, 17.02.86.

CHEN, Y.R.; HASHIMOTO, A.G. Rheological properties of aerated poultry waste slurries. **Transactions of ASAE**, St. Joseph, v. 19, n. 5, p. 128-133, 1976.

CLANTON, C.J.; SLACK, D.C. Land application of farm dairy effluent: results from a case study Wairarapa, New Zealand. Hydraulic properties. **Journal of Agricultural Research**, New Zealand. 2003, v. 46, p.339-346.

CRUZ VELEZ, C.H. **Filtração direta ascendente com alta taxa**. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos Universidade de São Paulo. São Carlos, 1993.

Di BERNARDO, L.; LIMA R.I.; MIRANDA S.J.C. Influência do estado da areia - estratificada ou misturada - na eficiência da filtração direta ascendente. In: 20º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental. **Anais...** Rio de Janeiro, p.1545-1554. 1999.

ELBACHÁ, A. T **Estudo da influência de alguns parâmetros no transporte de massa em filtros argilosos**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Departamento de Engenharia Civil, Rio de Janeiro. 1989. 178p.

EMARP Empresa Municipal de Águas e Resíduos de Portimão, Portugal. Disponível em: <www.emarp.pt/ambiente/livroagua/historiacronologia/1791/1791.php-17k>. Última atualização desta página: 4/maio/ 2004. Acesso em: 12/jan/2005.

FERNANDES, L.C. **Influência das características da camada suporte e dos métodos de descargas de fundo intermediárias no desempenho de sistemas de filtração direta ascendente.** Dissertação (Mestrado) Escola de Engenharia de São Carlos – USP, São Carlos, 1987.

FOX, R.W.; McDONALD, A.T., **Introduction to fluid mechanics**, John Wiley, New York, 5th ed. 1998.

GOLD, A.J., LAMB, B.E., LOOMIS, G.W., BOYD, J.R., CABELLI, V.J., MCKIEL, C.G. Wastewater renovation in buried and recirculation sand filter. **Journal Environmental Quality**, v.21, p.720-725, 1992.

GOMES, M.F.M; GIROTTO, A.F; TALAMINI, D.J.D; LIMA, G.J.M.M.; MORES, N.; TRAMONTINI, P. **Análise prospectiva do complexo agro-industrial de suínos no Brasil.** Concórdia: EMBRAPA-CNPSA, 1992. 108p. (EMBRAPA-CNPSA. Documento, 26).

HALL, T.; CROLL B. **Particle size as tools for managing Cryptosporidium risk in water treatment.** Wat. Sci. Tech., v. 36, n. 4, p. 143-149, 1997.

HERUM, F.L.; ISAACS, G.W.; PEART, R.M. Flow Properties of Highly Viscous Organic Pastes and Slurries. **Transactions of ASAE**, St. Joseph, v.30, n.2, p. 45-51, 1966.

HUGHES, H.F.; BRIGHTON, J.A. **Dinâmica dos fluídos.** São Paulo: McGraw-Hill, 1974. 358p.

JACKSON, G.W.; JAMES, D.F. The Permeability of fibrous porous media, **Can. J. Chem. Eng.**, vol.64, p. 364-374, 1986.

JOHNETER, M.H.K.; CHRISTOPHER W. Response Surface Methodology. In: JOHNETER, M.H.K.; CHRISTOPHER W. **Applied linear statistical models.** [S.l.]. 1996, 1427p.

KAMINSKI, I.; VESCAN, N.; ADIN, A. **Particle size distribution and wastewater filter performance**. Wat. Sci. Tech., v. 36, n. 4, p. 217-224, 1997.

KOBLER, D.; BOLLER, M. **Particle removal in different filtration systems for tertiary wastewater treatment – a comparison**. Wat. Sci. Tech., v. 36, n. 04, p. 259-267, 1997.

KONZEN, E.A. Valorização agrônômica dos dejetos de suínos: Utilização dos dejetos de suínos como fertilizantes. In: CICLO DE PALESTRAS SOBRE DEJETOS DE SUÍNOS, MANEJO E UTILIZAÇÃO, DO SUDESTE GOIANO, 1, 1997, Rio Verde. **Anais...** Rio Verde: Fundação do Ensino Superior de Rio Verde, ESUCARV. 1997. p.113-137.

KUMAR, M.; BARTELETT, H.D.; MOHSENIN, N.N. Flow properties animal waste slurries. **Transactions of ASAE**, St. Joseph, v.30, n.2, p.718-722, 1972.

LARA PINTO, D.M.C. **Influência das descargas de fundo intermediárias no desempenho da filtração direta ascendente de alta taxa**. Dissertação (Mestrado) Escola de Engenharia de São Carlos – USP, São Carlos, 1994.

LAWLER, D.F. **Particle size distribution in treatment processes: theory and practice**. Wat. Sci. Tech., v. 36, n. 04, p. 15-23, 1997.

LEON, S.G., CAVALLINI, J.M. **Tratamento e uso de águas residuárias**; tradução de: Treatment and use of wastewater. Campina Grande, UFPB, 1999. 110p.

LEVINE, A.D.; TCHOBANOGLOUS, G.; ASANO, T. **Characterization of the size distribution of contaminants in wastewater: treatment and reuse implications**. J. Wat. Pollut. Control Fed., v. 57, n. 07, p.805-816, 1985.

LINDNER, E.A. **Diagnóstico Ambiental no Meio Oeste de Santa Catarina**. Concórdia: Embrapa -CNPSA. Workshop sobre Dejetos de Suínos. 1997.

LOEHR, R.C. Composition of Animal Waste. **Pollution Control for Agriculture**, [S.l.]. 1977. p.376-376.

Lo MONACO, P.A. **Influência da granulometria do Material orgânico filtrante na eficiência de tratamento de águas residuárias**. Viçosa – MG: UFV, 2001, Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, 2001. 115p.

Lo MONACO, P.A.; MATOS, A. T.; JORDÃO, C.P.; CECON, P.R.; MARTINEZ, M.A. Influência da granulometria da serragem de madeira como material filtrante no tratamento de águas residuárias. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande: DEAg/UFCG, v.8, n.1, p. 116-119. 2004.

MAGALHÃES, A.M. **Parâmetros para projeto e operação de filtros orgânicos utilizados no tratamento de águas residuárias de suinocultura**. Viçosa – MG: UFV, 2002, Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, 2002. 103p.

MARLIN, T.E. Process Control: **Designing processes and control systems for dynamic performance**. Second Edition. McGraw-Hill Chemical Engineering. 2000.

MATOS, A.T.; SEDIYAMA, M.A. Riscos potenciais ao ambiente pela aplicação de dejetos líquidos de suínos ou compostos orgânicos no solo. In: SEMINÁRIO MINEIRO SOBRE MANEJO E UTILIZAÇÃO DE DEJETOS DE SUINOCULTURA, 1, 1995, Ponte Nova – MG. **Anais...** Ponte Nova: EPAMIG/ EMATER/ UFV/ ASSUVAP/ CRZM, p.44-45, 1995.

METCALF e EDDY. **Wastewater Engineering: Treatment Disposal end Reuse**. 3rd ed. New York: McGraw - Hill, Inc. 1991. 1334p.

METCALF e EDDY Ingeniería de Aguas Residuales: **Tratamiento, Vertido y Reutilización**. Tercera Edición, McGraw-Hill / Interamericana de España, S.A., Madrid, España. 1995.

NIELSEN, J.N, LYNGGAARD - JENSEN, A., HASLING, A. Purification efficiency of Danish biological sand filter systems. **Water Science Technology**, v.28, n.10, p.89-97, 1993.

NOBRE, M.M.M. **Estudo experimental do transporte de poluentes em filtros argilosos compactados**. 1987. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Departamento de Engenharia Civil, PUC, Rio de Janeiro. 1987. 214 p.

OLIVEIRA, P.A.; FORESTI, E. Produção de biogás em reatores anaeróbicos de fluxo ascendente com manta de lodo (UASB) no tratamento de águas residuárias de suinocultura. In: XXVII CONGRESSO BRASILEIRO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA – CONBEA. **Anais...** Poços de Caldas. 1998.

OLIVEIRA, R.A.V. (coord) **Manual de manejo e utilização dos dejetos de suínos**. Concórdia: EMBRAPA; CNPSA, 1993. 188p. (EMBRAPA - CNPS, documentos, 27).

PATTERNIANI, J.E.S. **Estudo da influência de descargas de fundo na eficiência de remoção de microrganismos em sistemas de filtração direta ascendente**. Dissertação (Mestrado) Escola de Engenharia de São Carlos - USP. São Carlos, 1986.

PERDOMO, C.C. Uso racional da água no manejo de água de suínos. In: SEMINÁRIO MINEIRO SOBRE MANEJO E UTILIZAÇÃO DE DEJETOS DE SUINOCULTURA, 1, 1995, Ponte Nova – MG. **Anais...** Ponte Nova: EPAMIG/ CRZM, p. 08-23, 1995.

PERDOMO, C.C. LIMA, G J.M.M.; NONES, K. Produção de suínos e meio ambiente. In: 9º Seminário Nacional de Desenvolvimento da Suinocultura, Gramado. **Anais ...** Gramado: ABCS, 2001. 58p.

PESSOA, C.A. **Tratamento de esgotos domésticos: concepções clássicas de tratamento de esgotos**. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental: BNH. v.1, 2. ed., 1982, 536p.

POVINELLI, J. e MARTINS, F. Pesquisa sobre a eficiência de filtros lentos em unidades piloto. In: 7º CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA, Salvador, 1973, **Anais ...**, Salvador: Departamento de Hidráulica e Saneamento, Universidade de São Carlos, USP, 1973. 20 p. (Separata).

REICHARDT, K. **Dinâmica da matéria e da energia em ecossistemas** Piracicaba: USP/ESALQ, 1996, 513p, 2. ed., 1996.

REGAZZI, A.J. Teste para verificar igualdade de parâmetros e identidade de modelos de regressão não linear. **Revista Ceres**, 50 (2897): 9-26, 2003.

SAMPAIO, S.C. **Perda de carga em tubulações comerciais conduzindo águas residuárias de bovinocultura e suinocultura**. Viçosa, MG: UFV, 1999. 158p. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, 1999.

SANTOS, H.R.; PRADO, G.S.; VIDAL, C.M.S.; MORUZZI, R.B.; CAMPOS, Jr. Aplicabilidade das técnicas de determinação de tamanho de partículas em sistemas de tratamento de água e esgoto sanitário. **Revista da Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 9, n. 4 - out/dez 2004, p.291-300

SCALOPPI, E.J.; BAPTISTELLA, J.R. Considerações sobre a aplicação de efluentes no solo. In: CONGRESSO NACIONAL DE IRRIGAÇÃO E DRENAGEM, Brasília. 1986. **Anais ...** Brasília: ABID. 1986. v.3. p.1049-1066.

SCHERER, E.E., BALDISSERA, I.T. Aproveitamento dos dejetos de suínos como fertilizantes. In: MANEJO E UTILIZAÇÃO DE DEJETOS SUÍNOS. **Anais...** Concórdia: EMBRAPA-CNPS, 1994, p.33-38 (Documento 32).

SCHNEIDER, R.P.; TSUTIYA, M.T. **Membranas filtrantes para o tratamento de água, esgoto e água de reuso**. 1.ed., São Paulo: Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2001. 234p.

STEEL, E.W., MCGHEE, T.J. **Water supply and sewerage**. 5. ed. New York: McGraw-Hill Book Company, 1979. 665p.

STEFFE, J.F.; MORGAN, R.G. Pipeline design and pump selection for non-newtonian fluid foods. **Food Technology**, Chicago, v.40, n.12, p.78-85, 1986.

STOLL, U; GUPTA, H. Management strategies for oil and grease residues. **Waste management and research**, v. 15, p. 23-32, 1997.

SUTTON, A.L. Proper animal manure utilization. **Journal of soil and water conservation**, Special Supplement on Nutrient Management, v.49, n.2, p.65-70, 1994.

TAGLIAFERRE, C. **Perda de carga em tubulações de polietileno e Avaliação da Suscetibilidade ao entupimento de microaspersores operando com água residuária de suinocultura**. Viçosa – MG: UFV, 2003, Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, 2003. 75p.

TCHOBANOGLIOUS, G. Particle size characterization: the next frontier. **Journal of Environmental Engineering**, ASCE. v. 121, n.12, p.844-845, 1995.

TEIXEIRA, B.A.N. **Influências das características da camada suporte e da areia na eficiência da filtração direta ascendente**. Dissertação (Mestrado) Escola de Engenharia de São Carlos – USP. São Carlos, 1987.

THIRY-CHERQUES, H.R. **Modelagens de Projetos**. São Paulo: Editora Atlas, 2002. 263p.

van HAANDEL, A.C.; LETTINGA, G. **Tratamento anaeróbio de esgotos: um manual para regiões de clima quente**, s.n.t., 1994.

von SPERLING, M. **Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos**. 2^a ed. – Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental da Universidade Federal de Minas Gerais. 1996. 243p.

von SPERLING, M.; NASCIMENTO, L.V.A. A resolução do CONAMA 20/86 e as legislações estaduais de classificação das águas e lançamento de efluentes. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 20, 1999, Rio de Janeiro. **Anais...** ABES, 1999, p. 2413 - 2419. 1999.

ANEXOS

ANEXO 1

Quadros

Quadro 1A: Eficiência dos filtros de serragem de madeira, não segmentados, quanto à capacidade de reter ST da ARS bruta peneirada

| Amostra da ARS | Tempo da coleta (min) | Concentração ST (mg L ⁻¹) | Relação C/Co |
|----------------|-----------------------|---------------------------------------|--------------|
| Afluente (Co) | - | 136,2 (*) | - |
| Efluente (C) | 0 | 92,9 | 0,682 |
| | 10 | 87,3 | 0,641 |
| | 20 | 84,4 | 0,620 |
| | 30 | 82,1 | 0,603 |
| | 40 | 80,0 | 0,587 |
| | 50 | 77,5 | 0,569 |
| | 60 | 68,4 | 0,502 |
| | 70 | 63,1 | 0,463 |
| | 80 | 60,1 | 0,441 |
| | 90 | 55,0 | 0,404 |
| | 100 | 50,7 | 0,372 |

(*) concentração média

Quadro 2A: Eficiência dos filtros de bagaço de cana-de-açúcar triturado, não segmentados, quanto à capacidade de reter ST da ARS bruta peneirada

| Amostra da ARS | Tempo da coleta (min) | Concentração ST (mg L ⁻¹) | Relação C/Co |
|----------------|-----------------------|---------------------------------------|--------------|
| Afluente (Co) | - | 142,2 (*) | - |
| Efluente (C) | 0 | 88,3 | 0,621 |
| | 10 | 86,7 | 0,610 |
| | 20 | 83,5 | 0,587 |
| | 30 | 83,0 | 0,584 |
| | 40 | 73,4 | 0,561 |
| | 50 | 77,2 | 0,543 |
| | 60 | 73,9 | 0,520 |
| | 70 | 72,4 | 0,509 |
| | 80 | 68,5 | 0,482 |
| | 90 | 64,3 | 0,452 |
| | 100 | 58,7 | 0,413 |

(*) concentração média

Quadro 3A: Eficiência dos filtros de pergaminho dos grãos de café, não segmentados, quanto à capacidade de reter ST da ARS bruta peneirada

| Amostra da ARS | Tempo da coleta (min) | Concentração ST (mg L ⁻¹) | Relação C/Co |
|----------------|-----------------------|---------------------------------------|--------------|
| Afluente (Co) | - | 163,2 (*) | - |
| Efluente (C) | 0 | 128,3 | 0,786 |
| | 10 | 126,6 | 0,776 |
| | 20 | 114,4 | 0,701 |
| | 30 | 99,7 | 0,611 |
| | 40 | 97,9 | 0,600 |
| | 50 | 94,2 | 0,577 |
| | 60 | 88,3 | 0,541 |
| | 70 | 84,0 | 0,515 |
| | 80 | 79,2 | 0,485 |
| | 90 | 72,1 | 0,442 |
| | 100 | 68,5 | 0,420 |

(*) concentração média

Quadro 4A: Eficiência dos filtros de serragem de madeira, não segmentados, quanto à capacidade de reter SS da ARS bruta peneirada

| Amostra da ARS | Tempo da coleta (min) | Concentração SS (mg L ⁻¹) | Relação C/Co |
|----------------|-----------------------|---------------------------------------|--------------|
| Afluente (Co) | - | 108,3 (*) | - |
| Efluente (C) | 0 | 32,7 | 0,302 |
| | 10 | 23,4 | 0,216 |
| | 20 | 17,2 | 0,159 |
| | 30 | 13,0 | 0,120 |
| | 40 | 11,6 | 0,107 |
| | 50 | 11,1 | 0,103 |
| | 60 | 10,3 | 0,095 |
| | 70 | 6,5 | 0,060 |
| | 80 | 5,1 | 0,047 |
| | 90 | 3,9 | 0,036 |
| | 100 | 3,0 | 0,028 |

(*) concentração média

Quadro 5A: Eficiência dos filtros de bagaço de cana-de-açúcar, não segmentados, quanto à capacidade de reter SS da ARS bruta peneirada

| Amostra da ARS | Tempo da coleta (min) | Concentração SS (mg L ⁻¹) | Relação C/Co |
|----------------|-----------------------|---------------------------------------|--------------|
| Afluente (Co) | - | 96,3 (*) | - |
| Efluente (C) | 0 | 39,5 | 0,410 |
| | 10 | 33,3 | 0,346 |
| | 20 | 25,7 | 0,267 |
| | 30 | 19,4 | 0,201 |
| | 40 | 15,7 | 0,163 |
| | 50 | 14,8 | 0,154 |
| | 60 | 13,0 | 0,135 |
| | 70 | 10,8 | 0,112 |
| | 80 | 8,7 | 0,090 |
| | 90 | 4,5 | 0,047 |
| | 100 | 2,5 | 0,026 |

(*) concentração média

Quadro 6A: Eficiência dos filtros de pergaminho dos grãos de café, não segmentados, quanto à capacidade de reter SS da ARS bruta peneirada

| Amostra da ARS | Tempo da coleta (min) | Concentração SS (mg L ⁻¹) | Relação C/Co |
|----------------|-----------------------|---------------------------------------|--------------|
| Afluente (Co) | - | 116,4 (*) | - |
| Efluente (C) | 0 | 53,3 | 0,458 |
| | 10 | 42,1 | 0,362 |
| | 20 | 37,7 | 0,324 |
| | 30 | 29,3 | 0,252 |
| | 40 | 23,4 | 0,201 |
| | 50 | 22,7 | 0,195 |
| | 60 | 21,5 | 0,185 |
| | 70 | 15,0 | 0,129 |
| | 80 | 10,5 | 0,090 |
| | 90 | 7,6 | 0,065 |
| | 100 | 5,5 | 0,047 |

(*) concentração média

Quadro 7A: Concentração de ST da ARS bruta peneirada, submetida a diferentes níveis diluições com água limpa e aplicada nos filtros, não segmentados, de serragem de madeira

| Amostra da ARS | Tempo de operação do filtro (min) | Diluição ARS | | | |
|----------------------------|-----------------------------------|---------------------------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| | | 100 % ARS + 0 % AL | 75 % ARS + 25 % AL | 50 % ARS + 50 % AL | 25 % ARS + 75 % AL |
| | | Concentração ST (mg L ⁻¹) | | | |
| Afluente (C ₀) | - | 412,3 | 310,4 | 202,4 | 101,0 |
| Efluente (C) | 1 | 234,7 | 173,8 | 111,5 | 56,5 |
| | 10 | 222,6 | 165,1 | 105,2 | 53,3 |
| | 20 | 195,0 | 151,2 | 100,8 | 51,0 |
| | 30 | 173,2 | 133,2 | 88,4 | 46,5 |

Quadro 8A: Concentração de ST da ARS bruta peneirada, submetida a diferentes níveis diluições com água limpa e aplicada nos filtros, não segmentados, de bagaço de cana-de-açúcar

| Amostra da ARS | Tempo de operação do filtro (min) | Diluição ARS | | | |
|----------------------------|-----------------------------------|---------------------------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| | | 100 % ARS + 0 % AL | 75 % ARS + 25 % AL | 50 % ARS + 50 % AL | 25 % ARS + 75 % AL |
| | | Concentração ST (mg L ⁻¹) | | | |
| Afluente (C ₀) | - | 421,1 | 322,4 | 212,8 | 104,3 |
| Efluente (C) | 1 | 234,1 | 178,0 | 114,9 | 57,3 |
| | 10 | 221,9 | 162,2 | 109,4 | 53,9 |
| | 20 | 193,3 | 152,8 | 99,6 | 51,6 |
| | 30 | 181,1 | 140,9 | 93,6 | 47,5 |

Quadro 9A: Concentração de ST da ARS bruta peneirada, submetida a diferentes níveis diluições com água limpa e aplicada nos filtros, não segmentados, de pergaminho dos grãos de café

| Amostra da ARS | Tempo de operação do filtro (min) | Diluição ARS | | | |
|----------------|-----------------------------------|---------------------------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| | | 100 % ARS + 0 % AL | 75 % ARS + 25 % AL | 50 % ARS + 50 % AL | 25 % ARS + 75 % AL |
| | | Concentração ST (mg L ⁻¹) | | | |
| Afluente (Co) | - | 389,9 | 298,4 | 195,4 | 101,3 |
| Efluente (C) | 1 | 237,8 | 175,5 | 113,3 | 57,8 |
| | 10 | 218,0 | 166,2 | 105,7 | 54,4 |
| | 20 | 204,3 | 152,8 | 100,2 | 53,5 |
| | 30 | 184,4 | 143,8 | 95,3 | 49,5 |

Quadro 10A: Concentração de SS da ARS bruta peneirada, submetida a diferentes níveis diluições com água limpa e aplicada nos filtros, não segmentados, de serragem de madeira

| Amostra da ARS | Tempo de operação do filtro (min) | Diluição ARS | | | |
|----------------|-----------------------------------|---------------------------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| | | 100 % ARS + 0 % AL | 75 % ARS + 25 % AL | 50 % ARS + 50 % AL | 25 % ARS + 75 % AL |
| | | Concentração SS (mg L ⁻¹) | | | |
| Afluente (Co) | - | 112,4 | 82,9 | 57,3 | 29,7 |
| Efluente (C) | 1 | 22,2 | 10,5 | 7,3 | 4,0 |
| | 10 | 16,1 | 8,5 | 5,6 | 3,1 |
| | 20 | 10,8 | 7,1 | 4,9 | 2,5 |
| | 30 | 2,8 | 3,6 | 2,5 | 1,7 |

Quadro 11A: Concentração de SS da ARS bruta peneirada, submetida a diferentes níveis diluições com água limpa e aplicada nos filtros, não segmentados, de bagaço de cana-de-açúcar

| Amostra da ARS | Tempo de operação do filtro (min) | Diluição ARS | | | |
|----------------|-----------------------------------|---------------------------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| | | 100 % ARS + 0 % AL | 75 % ARS + 25 % AL | 50 % ARS + 50 % AL | 25 % ARS + 75 % AL |
| | | Concentração SS (mg L ⁻¹) | | | |
| Afluente (Co) | - | 132,6 | 97,4 | 69,1 | 34,8 |
| Efluente (C) | 1 | 27,6 | 17,2 | 8,6 | 4,4 |
| | 10 | 22,0 | 13,0 | 6,1 | 3,8 |
| | 20 | 10,9 | 9,3 | 4,8 | 3,0 |
| | 30 | 4,8 | 5,6 | 3,7 | 2,3 |

Quadro 12A: Concentração de SS da ARS bruta peneirada, submetida a diferentes níveis diluições com água limpa e aplicada nos filtros, não segmentados, de pergaminho dos grãos de café

| Amostra da ARS | Tempo de operação do filtro (min) | Diluição ARS | | | |
|----------------|-----------------------------------|---------------------------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| | | 100 % ARS + 0 % AL | 75 % ARS + 25 % AL | 50 % ARS + 50 % AL | 25 % ARS + 75 % AL |
| | | Concentração SS (mg L ⁻¹) | | | |
| Afluente (Co) | - | 140,3 | 110,1 | 70,0 | 38,4 |
| Efluente (C) | 1 | 34,2 | 19,5 | 9,0 | 5,2 |
| | 10 | 21,5 | 16,8 | 6,9 | 4,0 |
| | 20 | 15,8 | 11,7 | 6,0 | 3,2 |
| | 30 | 9,0 | 8,6 | 3,0 | 2,2 |

ANEXO 2

Exemplo de dimensionamento de filtros orgânicos para tratamento de ARS

É de fundamental importância o suinocultor ter conhecimento da quantidade (volume) e qualidade (composição) dos resíduos sólidos e líquidos gerados na atividade, pois, essas informações são essenciais para definir a estratégia de gestão dos resíduos e permitir o adequado dimensionamento do sistema, de modo a compatibilizar o número de animais e a fase de desenvolvimento (idade) dos animais que compõe o plantel.

O dimensionamento do sistema de tratamento das ARS pelo processo de filtração foi feito com base nos índices zootécnicos sugeridos pelo Departamento de Zootecnia (DZO) da Universidade Federal de Viçosa, conforme apresentado no Quadro 13A.

Quadro 13A: Índice Zootécnico da atividade suinícola

| Índice | Unidade | Valor |
|---|---------|--------|
| Intervalo de produção | dias | 30 |
| Idade de mercado | dias | 180 |
| Intervalo entre partos de uma mesma porca | dias | 151 |
| Porcentagem de volta ao cio após a cobertura | % | 20 |
| Taxa de reposição de matrizes | % / mês | 4 |
| Nº de varrões / porca | - | 1 / 20 |
| Prolificidade (nº de leitões nascidos vivos / parto) | - | 11 |
| Idade de desmama | dias | 30 |
| Nº de leitões desmamados / porca / parto | - | 10 |
| Produtividade (nº de porcos terminados/ porca/ parto) | - | 9,5 |

Fonte: Prof. Paulo César Brustoline (DZO/UFV)

Com base nos índices zootécnicos apresentados no Quadro 13A, está sendo apresentado um exemplo de cálculo para uma granja com 78 matrizes.

| <i>A. Grupo de matrizes:</i> | | nº animais |
|------------------------------|--------------|------------|
| • Em cobertura | 15 + 3 (*) = | 18 |
| • Com 1 mês de cobertura | 15 | 15 |
| • Com 2 meses de cobertura | 15 | 15 |
| • Com 3 meses de cobertura | 15 | 15 |
| • Em aleitamento | 15 | 15 |
| Total matrizes | <u>75</u> | <u>78</u> |

(*) Recomenda-se trabalhar com margem de segurança de 20% de matrizes no lote, considerando que este é o percentual de porcas submetidas a cobertura que não se

consegue sucesso de fertilização, deste modo, deve-se acrescentar ao grupo de porcas em cobrição mais 3 matrizes.

B. Grupo de matrizes para reposição

Recomenda-se uma taxa de reposição de matrizes de 4% ao mês. Assim sendo, para cada lote de 78 matrizes deveremos ter:

| | |
|----------------------|----------|
| • porcas com 5 meses | 3 |
| • porcas com 6 meses | 3 |
| Total de porcas | <u>6</u> |

C. Grupo de varrões

Recomenda-se adotar relação entre varrão e matrizes de 1:20. Assim sendo, para cada lote de 78 matrizes deveremos ter 4 varrões.

D. Grupo de Leitões

Considerando que 15 matrizes parindo por mês com prolificidade média de 11 leitões por parto, teremos:

| | nº porcas x nº leitões = total leitões | | |
|-------------------------------------|--|---|----------------------------------|
| • em aleitamento | 15 | x | 11 = 165 |
| • leitões até 30 dias | 15 | x | 10 ^(*) = 150 |
| • de 30 aos 60 dias (creche) | 15 | x | 9,5 ^(**) = 143 |
| • de 60 aos 90 dias (crescimento) | 15 | x | 9,5 ^(**) = 143 |
| • de 90 aos 120 dias (crescimento) | 15 | x | 9,5 ^(**) = 143 |
| • de 120 aos 150 dias (crescimento) | 15 | x | 9,5 ^(**) = 143 |
| • de 150 aos 180 dias (terminação) | 15 | x | 9,5 ^(**) = <u>143</u> |
| • Total de leitões | | | 1.030 |

(*) Nº de leitões desmamados / porca / parto

(**) Produtividade (nº de porcos terminados / porca / parto)

Número total de animais do plantel (NA)

NA = Σ grupos A, B, C e D

NA = matrizes + matrizes para reposição + varrões + leitões

NA = 78 + 6 + 4 + 1.030

NA = 1.118 animais

Apesar da quantidade de água residuária gerada por animal dia variar de acordo com o manejo adotado pelo suinocultor, nesse exemplo foi adotado 10 L ARS suíno⁻¹ dia⁻¹

¹. Assim, estima-se que o lote de 1.118 animais gere um volume de água residuária equivalente a 11.180 L dia⁻¹ ou 11,18 m³.

As dimensões do filtro deverão ter 1,3 m altura por 3,4 m² de área superficial. As recomendações das dimensões dos filtros, aqui apresentadas, são baseadas nos Parâmetros para projetos e operações de filtros orgânicos, utilizados no tratamento de águas residuárias de suinocultura (MAGALHÃES, 2002).

Nas condições em que o trabalho foi conduzido, cada filtro apresenta capacidade média para filtrar cerca de 6,0 m³ ARS dia⁻¹, portanto, dois filtros nas dimensões supra citadas são suficientes para filtrar todo o volume de ARS gerado diariamente.

Para dimensionamento de um sistema de filtração, considerando a taxa de filtração média como sendo equivalente a 0,5 m² s⁻¹ ou 43.200 L m⁻² d⁻¹, obtida após estabilização da taxa de filtração, e admitindo-se a geração 10 L suíno⁻¹ dia⁻¹ de ARS, pode-se estimar que, operando o filtro por cerca de 2 h é possível promover o tratamento de ARS gerado por 360 animais em cada metro quadrado de área superficial de filtro.

Para que se possa fazer o sistema de filtração operar por maiores períodos de tempo e, com isso, possibilitar o tratamento de maior volume de ARS, pode - se instalar outros filtros para operação em paralelo, mas não simultaneamente, dessa forma, assim que a perda de carga máxima em um filtro for alcançada, a água residuária passaria a ser direcionada a outro filtro e, assim sucessivamente, possibilitando nessa ocasião a troca de material filtrante.

Em regiões com topografias acidentadas ou que apresentem restrições para a implantação de lagoas para tratamento das ARS o uso dos filtros orgânicos constitui-se em alternativa para a gestão desses resíduos, possibilitando após a filtração da ARS o seu posterior uso em projetos de fertirrigação, reduzindo riscos de entupimento dos equipamentos ou constituir-se numa etapa prévia de tratamento para posterior disposição em lagoas, que nesta situação necessitará de menores áreas para as suas implantações.