**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS**
**FACULDADE DE ENGENHARIA DE ALIMENTOS**
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE ALIMENTOS**
**LABORATÓRIO DE TECNOLOGIA APROPRIADA**

# AVALIAÇÃO DA PARTIDA DE LEITOS CULTIVADOS NO TRATAMENTO DE ÁGUA RESIDUÁRIA DO PROCESSAMENTO DE DOCE DE BANANA

**JACQUELINE FIUZA DOS SANTOS**
Engenheira de Alimentos – UFRuralRJ

**Orientador:** Prof. Dr. Celso Costa Lopes

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia de Alimentos da Universidade Estadual de Campinas como requisito parcial para obtenção do Título de Mestre em Engenharia de Alimentos.

**Campinas**
**2004**

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA F.E.A. – UNICAMP

Sa59a

Santos, Jacqueline Fiuza dos
Avaliação da partida de leitos cultivados no tratamento de água residuária do processamento de doce de banana / Jacqueline Fiuza dos Santos. – Campinas, SP: [s.n.], 2004.

Orientador: Celso Costa Lopes
Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual de Campinas.Faculdade de Engenharia de Alimentos.

1.Leitos cultivados. 2.Águas residuais. 3.Tratamento de efluentes. 4.Matéria orgânica – Remoção. I.Lopes, Celso Costa. II.Universidade Estadual de Campinas.Faculdade de Engenharia de Alimentos. III.Título.

**BANCA EXAMINADORA**

---

**Prof. Dr. Celso Costa Lopes**

(Orientador)

---

**Prof. Dr. Bruno Coraucci Filho**

(Membro)

---

**Prof. Dr. José Teixeira Filho**

(Membro)

---

**Prof. Dr. Denis Miguel Roston**

(Suplente)

## Dedico este trabalho

**Aos meus pais, Jorge e Lisandre, pela educação que me deram; plena de valores como: amor, respeito, humildade, honestidade e tantos outros, sem a qual eu não teria chegado até aqui.**

**Aos meus irmãos, que eu amo e respeito muito, Anderson, carinhosamente Califa, e Lisandre, carinhosamente Pequena.**

**Ao Gilvair, meu amor pra toda vida, pelo companheirismo, compreensão, carinho, amizade e incentivo em todos os momentos de nossa vida juntos.**

**"Quando encontrar trevas diante de si não se desespere: ao contrário, procure acender uma luz".**

***Autor desconhecido.***

## AGRADECIMENTOS

A Deus por estar sempre iluminando meu caminho, em toda e qualquer situação.

Ao CNPq pela bolsa concedida.

Ao professor Celso Costa Lopes pela orientação e compreensão nos momentos difíceis.

Aos professores Denis Miguel Roston, Bruno Coraucci Filho, José Teixeira Filho e Edson Abdoul Nour pelas excelentes sugestões que só contribuíram para o desenvolvimento do trabalho.

A todos os professores do Departamento de Engenharia de Alimentos pela contribuição fundamental na minha formação, em especial ao Ranulfo, Maria Ângela, Florência, Antônio José, Roseane, Satoshi, Fernanda, Maria Isabel, Mirian e Vivaldo.

À professora Helena Teixeira Godoy (DCA/ FEA/ UNICAMP).

À minha família, em especial aos meus pais e irmãos, pelo irrestrito apoio em todo e qualquer momento.

À minha cunhada, Paula, e ao meu cunhado Isaac por fazerem meus amados irmãos mais felizes.

Aos colegas de mestrado ingressantes em 2002 pelo convívio e apoio, em especial ao César, Paulo, e Olga.

Às meninas da casa J 12 A, Ana, Kelly e Pry por terem me acolhido tão bem.

A todos do grupo de Capoeira Angola Semente do Jogo de Dentro, em especial ao Mestre Jogo de Dentro, pela energia e axé.

A todos os funcionários do DEA em especial ao Sr. Aparecido, ao Isaías, à Soninha e ao Mauro.

A todo o pessoal da manutenção da FEA pela ajuda na montagem dos leitos, em especial ao Nelson e ao Nilson.

Aos companheiros de Laboratório, Kelly e Paulo, pela paciência e incentivo.

Aos companheiros e amigos que fiz no Laboratório de Saneamento (DSA/FEC/UNICAMP), em especial ao Enelton, Renata, Camila, Martina, Adriano e Lígia pelo apoio durante a realização das análises.

Aos meus companheiros de graduação, em especial a Marcela, a Bete (baixinha) e a Bete (stress) pelo incentivo e torcida.

As minhas companheiras de alojamento da Rural (F3 407), em especial a Fabi, a Sheila e Adélia pelo incentivo, paciência e pela boa companhia.

A Dona Magna e família pelo apoio, incentivo e pelas boas conversas e risadas.

A todos que de certa forma contribuíram para a realização deste trabalho.

**SUMÁRIO**


| | | |
|---|---|---|
| | **LISTA DE FIGURAS** | xix |
| | **LISTA DE QUADROS** | xxvii |
| | **LISTA DE TABELAS** | xxix |
| | **LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS** | xxxv |
| | **NOMENCLATURA** | xxxvii |
| | **RESUMO** | xxxix |
| | **ABSTRACT** | xli |
| 1 | **INTRODUÇÃO** | 1 |
| 2 | **OBJETIVOS** | 3 |
| 2.1 | OBJETIVO GERAL | 3 |
| 2.2 | OBJETIVOS ESPECÍFICOS | 3 |
| 3 | **REVISÃO BIBLIOGRÁFICA** | 4 |
| 3.1 | ÁGUAS RESIDUÁRIAS | 4 |
| 3.1.1 | **Águas residuárias de indústrias de processamento de frutas e vegetais** | 7 |
| 3.1.1.1 | Características gerais das águas residuárias | 9 |
| 3.1.1.1.1 | *Poluentes* | 9 |
| 3.1.1.1.2 | *Legislação Ambiental* | 11 |
| 3.2 | TRATAMENTO DE EFLUENTES | 11 |
| 3.2.1 | **Etapas do tratamento de efluentes** | 11 |
| 3.2.1.1 | Tratamento preliminar | 12 |
| 3.2.1.2 | Tratamento primário | 12 |
| 3.2.1.3 | Tratamento secundário | 13 |
| 3.2.1.4 | Tratamento terciário | 15 |
| 3.3 | SISTEMAS NATURAIS | 15 |
| 3.4 | LEITOS CULTIVADOS (*CONSTRUCTED WETLANDS*) | 16 |
| 3.4.1 | **Definição, características e classificação** | 16 |
| 3.4.2 | **Possibilidades de aplicação dos leitos cultivados** | 18 |
| 3.4.3 | **Parâmetros de Projeto** | 20 |

| | | |
|---|---|---|
| 3.4.4 | **As plantas nos leitos cultivados**..... | 21 |
| 3.4.4.1 | Contribuição das plantas para o tratamento da água residuária..... | 22 |
| 3.4.5 | **Macrófitas**..... | 24 |
| 3.4.5.1 | Taboa..... | 25 |
| 3.4.6 | **Remoção de poluentes nos leitos cultivados**..... | 28 |
| 3.4.7 | **Assimilação de nutrientes**..... | 30 |
| 3.4.7.1 | Nitrogênio..... | 30 |
| 3.4.7.2 | Fósforo..... | 31 |
| 3.4.8 | **Pesquisas em leitos cultivados**..... | 33 |
| 4 | **MATERIAL E MÉTODOS**..... | 36 |
| 4.1 | PERÍODO DE REALIZAÇÃO DO EXPERIMENTO..... | 36 |
| 4.2 | LOCAL DO EXPERIMENTO..... | 37 |
| 4.3 | ÁGUA RESIDUÁRIA ESTUDADA..... | 37 |
| 4.3.1 | **Caracterização da água residuária de fábricas de doce de banana**..... | 37 |
| 4.3.1.1 | Contato com as fábricas pesquisadas..... | 38 |
| 4.3.1.2 | Caracterização do processamento do doce das fábricas visitadas..... | 38 |
| 4.3.1.3 | Coleta de amostras da água residuária das fábricas..... | 39 |
| 4.3.1.4 | Análises das amostras da água residuária das fábricas..... | 39 |
| 4.4 | DESCRIÇÃO DO EXPERIMENTO..... | 40 |
| 4.4.1 | **Projeto e montagem dos leitos cultivados**..... | 40 |
| 4.4.2 | **Esquema do sistema de tratamento por leitos cultivados**..... | 43 |
| 4.4.3 | **Origem e plantio das macrófitas**..... | 46 |
| 4.4.4 | **Preparo da água residuária**..... | 46 |
| 4.4.5 | **Alimentação dos leitos**..... | 48 |
| 4.4.6 | **Operação do sistema de tratamento**..... | 49 |
| 4.5 | MEDIDAS ANALÍTICAS..... | 52 |
| 4.5.1 | pH..... | 52 |
| 4.5.2 | **Série de Sólidos**..... | 53 |

| | | |
|---|---|---|
| 4.5.2.1 | Sólidos Totais (ST)..... | 53 |
| 4.5.2.1.1 | *Sólidos Totais Fixos (STF)*..... | 53 |
| 4.5.2.1.2 | *Sólidos Totais Voláteis (STV)*..... | 53 |
| 4.5.2.2 | Sólidos Suspensos Totais (SST)..... | 53 |
| 4.5.2.2.1 | *Sólidos Suspensos Fixos (SSF)*..... | 54 |
| 4.5.2.2.2 | *Sólidos Suspensos Voláteis (SSV)*..... | 54 |
| 4.5.2.3 | Sólidos Sedimentáveis (SSed)..... | 54 |
| 4.5.3 | **Demanda Química de Oxigênio (DQO)**..... | 54 |
| 4.5.3.1 | DQO total..... | 55 |
| 4.5.3.2 | DQO filtrada..... | 55 |
| 4.5.4 | **Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO)**..... | 55 |
| 4.5.5 | **Fósforo total**..... | 56 |
| 4.5.6 | **Série de Nitrogênio**..... | 56 |
| 4.5.6.1 | Nitrogênio Total Kjeldahl (NTK)..... | 56 |
| 4.5.6.2 | Nitrogênio Orgânico (N-Norg)..... | 56 |
| 4.5.6.3 | Nitrogênio amoniacal ($N\text{-}NH_3$)..... | 56 |
| 4.5.6.4 | Nitrato e Nitrito ($N\text{-}NO_2^- + N\text{-}NO_3^-$)..... | 57 |
| 4.5.7 | **Ocorrência de chuvas.**..... | 57 |
| 4.5.8 | **Umidade do doce utilizado para produzir a água residuária**..... | 55 |
| 5 | **RESULTADOS E DISCUSSÃO**..... | 58 |
| 5.1 | CARACTERIZAÇÃO DA ÁGUA RESIDUÁRIA..... | 58 |
| 5.2 | VAZÃO E TEMPO DE DETENÇÃO NOS LEITOS..... | 61 |
| 5.3 | OCORRÊNCIA DE CHUVAS EM CAMPINAS DURANTE O EXPERIMENTO..... | 73 |
| 5.4 | DESENVOLVIMENTO DA TABOA NOS LEITOS..... | 78 |
| 5.5 | DESEMPENHO DOS LEITOS..... | 79 |
| 5.5.1 | **pH do afluente e do efluente dos leitos**..... | 79 |
| 5.5.2 | **Sólidos Totais (ST)**..... | 83 |
| 5.5.3 | **Sólidos Suspensos Totais (SST)**..... . | 91 |
| 5.5.4 | **Demanda Química de Oxigênio (DQO)**..... | 99 |

| | | |
|---|---|---|
| 5.5.4.1 | DQO total | 99 |
| 5.5.4.2 | DQO filtrada | 106 |
| 5.5.5 | **Fósforo total** | 113 |
| 5.5.6 | **Nitrogênio** | 121 |
| 5.5.6.1 | Nitrogênio Total Kjehldahl (NTK) | 121 |
| 5.5.6.2 | Nitrogênio Orgânico (N-Norg) | 129 |
| 5.5.6.3 | Nitrogênio amoniacal ($N\text{-}NH_3$) | 137 |
| 5.5.6.2 | Nitrito e nitrato ($N\text{-}NO_2^-$ + $N\text{-}NO_3^-$) | 139 |
| 6 | **CONCLUSÕES E SUGESTÕES** | 143 |
| | **REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS** | 145 |
| | **ANEXO** | 150 |
| | **APÊNDICE A** | 154 |
| | **APÊNDICE B** | 158 |

## LISTA DE FIGURAS


**Figura 3.1** Aspecto de um brejo com taboas..... 27
**Figura 3.2** Taboa (*Typha sp*) em detalhe..... 27
**Figura 4.1** Fluxograma do processo de fabricação do doce de banana..... 38
**Figura 4.2** Esquema simplificado dos leitos cultivados..... 45
**Figura 4.3** Vista lateral dos leitos cultivados estudados..... 45
**Figura 4.4** Tanques de preparo da água residuária..... 47
**Figura 4.5** Tanques de armazenamento da água residuária..... 51
**Figura 4.6** Caixas de distribuição da água residuária..... 51
**Figura 5.1** Vazão afluente dos leitos durante o mês de novembro..... 63
**Figura 5.2** Vazão afluente dos leitos durante o mês de dezembro..... 63
**Figura 5.3** Vazão afluente dos leitos durante o mês de janeiro..... 65
**Figura 5.4** Vazão afluente dos leitos durante o mês de fevereiro..... 65
**Figura 5.5** Tempo de detenção hidráulico (TDH) nos leitos durante o mês de novembro..... 67
**Figura 5.6** Tempo de detenção hidráulico (TDH) nos leitos durante o mês de dezembro..... 69
**Figura 5.7** Tempo de detenção hidráulico (TDH) nos leitos durante o mês de janeiro..... 69
**Figura 5.8** Tempo de detenção hidráulico (TDH) nos leitos durante o mês de fevereiro..... 71
**Figura 5.9** Valores de precipitação pluviométrica (mm) durante o mês de novembro..... 73
**Figura 5.10** Valores de precipitação pluviométrica (mm) durante o mês de dezembro..... 75
**Figura 5.11** Valores de precipitação pluviométrica (mm) durante o mês de janeiro..... 77
**Figura 5.12** Valores de precipitação pluviométrica (mm) durante o mês de fevereiro..... 77

**Figura 5.13** Acompanhamento do desenvolvimento da taboa durante o experimento..... 79
**Figura 5.14** Valores do pH do afluente e do efluente dos leitos durante o experimento..... 81
**Figura 5.15** Relação entre o pH do afluente e do efluente dos leitos durante o experimento..... 83
**Figura 5.16** Variação da concentração de ST do afluente e do efluente dos leitos durante o experimento..... 85
**Figura 5.17** Remoção de ST nos leitos durante o experimento..... 87
**Figura 5.18** Remoção média de ST nos leitos durante o experimento..... 89
**Figura 5.19** Relação entre a concentração de ST do afluente e do efluente dos leitos durante o experimento..... 91
**Figura 5.20** Variação da concentração de SST no afluente e no efluente dos leitos durante o experimento..... 93
**Figura 5.21** Porcentagem de remoção de SST nos leitos durante o experimento..... 95
**Figura 5.22** Porcentagem de remoção média de SST nos leitos durante o experimento..... 97
**Figura 5.23** Relação entre a concentração de SST do afluente e do efluente dos leitos durante o experimento..... 99
**Figura 5.24** Variação da concentração de DQO total no afluente e no efluente dos leitos durante o experimento..... 101
**Figura 5.25** Porcentagem de remoção de DQO total nos leitos durante o experimento..... 103
**Figura 5.26** Porcentagem de remoção média de DQO total nos leitos durante o experimento..... 105
**Figura 5.27** Relação entre a concentração de DQO total do afluente e do efluente dos leitos durante o experimento..... 106
**Figura 5.28** Variação da concentração de DQO filtrada no afluente e no efluente dos leitos durante o experimento..... 107

**Figura 5.29** Porcentagem de remoção de DQO filtrada nos leitos durante o experimento..... 109
**Figura 5.30** Porcentagem de remoção média de DQO filtrada nos leitos durante o experimento..... 111
**Figura 5.31** Relação entre a concentração de DQO filtrada do afluente e do efluente dos leitos durante o experimento..... 113
**Figura 5.32** Variação da concentração de Fósforo total do afluente e do efluente dos leitos durante o experimento..... 115
**Figura 5.33** Porcentagem de remoção de Fósforo total nos leitos durante o experimento..... 117
**Figura 5.34** Porcentagem de remoção média de Fósforo total nos leitos durante o experimento..... 119
**Figura 5.35** Relação entre a concentração de Fósforo total do afluente e do efluente dos leitos durante o experimento..... 121
**Figura 5.36** Variação da concentração de NTK no afluente e no efluente dos leitos durante o experimento..... 123
**Figura 5.37** Porcentagem de remoção de NTK nos leitos durante o experimento..... 125
**Figura 5.38** Porcentagem de remoção média de NTK nos leitos durante o experimento..... 127
**Figura 5.39** Relação entre a concentração de NTK do afluente e do efluente dos leitos durante o experimento..... 129
**Figura 5.40** Variação da concentração de N-Norg no afluente e no efluente dos leitos durante o experimento..... 131
**Figura 5.41** Porcentagem de remoção de N-Norg nos leitos durante o experimento..... 133
**Figura 5.42** Porcentagem de remoção média de N-Norg nos leitos durante o experimento..... 135
**Figura 5.43** Relação entre a concentração de N-Norg do afluente e do efluente dos leitos durante o experimento..... 137

**Figura 5.44** Variação da concentração de N-$NH_3$ no afluente e no efluente dos leitos durante o experimento..... 139

**Figura 5.45** Variação da concentração de N-$NO_2^-$ + N-$NO_3^-$ no afluente e no efluente dos leitos durante o experimento..... 141

## LISTA DE QUADROS


| | | |
|---|---|---|
| **Quadro 3.1** | Resumo das interpretações das análises de águas residuárias | 14 |
| **Quadro 4.1** | Datas das coletas das amostras..... | 36 |
| **Quadro 4.2** | Parâmetros de projeto adotados para os leitos cultivados estudados nos três meses de experimento..... | 42 |
| **Quadro 4.3** | Informações sobre o preparo da água residuária..... | 47 |
| **Quadro A** | Dados meteorológicos referentes ao mês de novembro..... | 151 |
| **Quadro B** | Dados meteorológicos referentes ao mês de dezembro..... | 152 |
| **Quadro C** | Dados meteorológicos referentes ao mês de janeiro..... | 153 |
| **Quadro D** | Dados meteorológicos referentes ao mês de fevereiro..... | 153 |

## LISTA DE TABELAS


**Tabela 3.1** Principais poluentes em águas residuárias e suas características..... 4

**Tabela 3.2** Características físicas, químicas e biológicas de águas residuárias e suas origens..... 5

**Tabela 3.3** Constituintes importantes em relação ao tratamento da água residuária..... 6

**Tabela 3.4** Características dos despejos de conservas de algumas frutas..... 7

**Tabela 3.5** Características físicas e químicas do efluente cítrico..... 8

**Tabela 3.6** Aplicações dos leitos cultivados..... 19

**Tabela 3.7** Vantagens e desvantagens da aplicação dos leitos cultivados.. 20

**Tabela 3.8** Critérios de projeto para os leitos cultivados de fluxo superficial (LCFS) e fluxo subsuperficial (LCFSS)..... 21

**Tabela 3.9** Principais macrófitas emergentes usadas em leitos cultivados.. 24

**Tabela 3.10** Processos envolvidos no tratamento de efluentes em leitos cultivados..... 28

**Tabela 3.11** Distribuição das espécies químicas de nitrogênio segundo diferentes condições..... 30

**Tabela 3.12** Desempenho de leitos cultivados no tratamento de águas residuárias em leitos cultivados nos Estados Unidos..... 33

**Tabela 4.1** Orientações para coleta e estocagem de amostras..... 40

**Tabela 4.2** Especificações dos leitos cultivados estudados..... 41

**Tabela 4.3** Condições hidráulicas para a operação dos leitos..... 52

**Tabela 5.1** Caracterização da água residuária do processamento de doce de banana de diferentes fábricas..... 58

**Tabela 5.2** Acompanhamento do desenvolvimento da taboa durante o experimento..... 78

**Tabela A1** Variação da vazão afluente (L/dia) dos leitos durante o mês de novembro de 2003..... 155

**Tabela A2** Variação da vazão afluente (L/dia) dos leitos durante o mês de dezembro de 2003..... 155
**Tabela A3** Variação da vazão afluente (L/dia) dos leitos durante o mês de janeiro de 2003..... 155
**Tabela A4** Variação da vazão afluente (L/dia) dos leitos durante o mês de fevereiro de 2003..... 155
**Tabela A5** Variação do tempo de detenção hidráulico (TDH) nos leitos durante o mês de novembro de 2003..... 156
**Tabela A6** Variação do tempo de detenção hidráulico (TDH) nos leitos durante o mês de dezembro de 2003..... 156
**Tabela A7** Variação do tempo de detenção hidráulico (TDH) nos leitos durante o mês de janeiro de 2003..... 156
**Tabela A8** Variação do tempo de detenção hidráulico (TDH) nos leitos durante o mês de fevereiro de 2003..... 157
**Tabela B1** Resultados de pH do afluente e do efluente dos leitos ao longo do experimento..... 159
**Tabela B2** Resultados de ST (mg/L) do afluente e do efluente durante o experimento..... 159
**Tabela B3** Resultados de SST (mg/L) do afluente e do efluente dos leitos durante o experimento..... 159
**Tabela B4** Resultados de DQO total (mg/L) do afluente e do efluente dos leitos durante o experimento..... 160
**Tabela B5** Resultados de DQO filtrada (mg/L) do afluente e do efluente dos leitos durante o experimento..... 160
**Tabela B6** Resultados de Fósforo Total (mg/L) do afluente e do efluente dos leitos durante o experimento..... 160
**Tabela B7** Resultados de NTK (mg/L) do afluente e do efluente dos leitos durante o experimento..... 161
**Tabela B8** Resultados de N-Norg (mg/L) do afluente e do efluente dos leitos durante o experimento..... 161

**Tabela B9** Resultados de $N\text{-}NH_3$ (mg/L) do afluente e do efluente dos leitos durante o experimento..... 161

**Tabela B10** Resultados de $N\text{-}NO_2^-$ + $N\text{-}NO_3^-$ (mg/L) do afluente e do efluente dos leitos durante o experimento..... 161

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

| | |
|---|---|
| **CEPAGRI** | Centro de Ensino e Pesquisa em Agricultura da UNICAMP |
| **DBO** | Demanda bioquímica de oxigênio |
| **DQO** | Demanda química de oxigênio |
| **FEAGRI** | Faculdade de Engenharia Agrícola |
| **FS** | Fluxo superficial |
| **FSS** | Fluxo subsuperficial |
| **FV** | Fluxo vertical |
| **LC** | Leito cultivado |
| **LCFS** | Leito cultivado de fluxo superficial |
| **LCFSS** | Leito cultivado de fluxo subsuperficial |
| **LCFV** | Leito cultivado de fluxo vertical |
| **LTA** | Laboratório de Tecnologia Apropriada |
| **OD** | Oxigênio dissolvido |
| **N-$NH_3$** | Nitrogênio amoniacal |
| **N-Norg** | Nitrogênio orgânico |
| **NTK** | Nitrogênio Total Kjeldahl |
| **SDV** | Sólidos dissolvidos voláteis |
| **SSed** | Sólidos sedimentáveis |
| **SSF** | Sólidos suspensos fixos |
| **SST** | Sólidos suspensos totais |
| **SSV** | Sólidos suspensos voláteis |
| **ST** | Sólidos totais |
| **STF** | Sólidos totais fixos |
| **STV** | Sólidos totais voláteis |
| **SV** | Sólidos voláteis |
| **TD** | Tempo de detenção hidráulico |
| **TDH** | Tempo de detenção hidráulico |

## NOMENCLATURA

| | |
|---|---|
| $V_{util}$ | Volume útil do leito ($m^3$) |
| $Q_{leito}$ | Vazão do leito (L/dia) |
| $Prof_{leito}$ | Profundidade do leito (m) |
| $Poros_{brita}$ | Porosidade da brita (admensional) |
| **CH** | Carga hidráulica |
| **L1** | 1º Leito da série (retangular cultivado com taboa) |
| **L2** | 2º Leito da série (retangular cultivado com taboa) |
| **L3** | Controle retangular |
| **L4** | Leito cilíndrico cultivado com taboa |
| $E_1$ | Posição de entrada de afluente do leito 1 |
| $E_2$ | Posição de entrada de afluente do leito 2 |
| $E_3$ | Posição de entrada de afluente do leito 3 |
| $E_4$ | Posição de entrada de afluente do leito 4 |
| $S_1$ | Posição de saída de efluente do leito 1 |
| $S_2$ | Posição de saída de efluente do leito 2 |
| $S_3$ | Posição de saída de efluente do leito 3 |
| $S_4$ | Posição de saída de efluente do leito 4 |
| **Q** | Vazão (L/dia) |
| $T_{max}$ | Temperatura ambiente máxima (ºC) |
| $T_{min}$ | Temperatura ambiente miníma (ºC) |
| **C** | Concentração do parâmetro no efluente dos leitos |
| **Co** | Concentração do parâmetro no afluente dos leitos |

## RESUMO

Esta pesquisa teve como finalidade avaliar o desempenho de um leito cultivado com macrófitas na redução de matéria orgânica e na remoção de sólidos de água residuária característica do processamento de doce de banana. Existem poucos relatos sobre tratamento em leitos cultivados para águas residuárias do processamento de alimentos, não sendo encontrada nenhuma pesquisa sobre a aplicação desta tecnologia para a água residuária estudada. Neste trabalho identificou-se que esta água residuária é composta, principalmente, por água de lavagem dos tachos de cozimento. Foi utilizado um sistema de leitos de fluxo subsuperficial cultivado com taboa (*Typha sp*), planta encontrada abundantemente em várias regiões do Estado de São Paulo e eficiente neste tipo de tratamento por leitos cultivados; foram utilizadas britas como meio de suporte, estudando-se três configurações montadas em caixas d'água de fibrocimento: dois leitos retangulares em série cultivados com taboa, um leito retangular como controle e um leito cilíndrico cultivado com taboa, objetivando-se estudar a diferença entre as formas cilíndrica e retangular e o efeito das plantas. O sistema de leitos foi estudado apenas durante os três primeiros meses de funcionamento, caracterizando um estudo da partida do sistema. O desempenho do sistema, medido pela redução da demanda química de oxigênio (DQO) e da quantidade de sólidos suspensos e totais, foi avaliado em função da porcentagem de remoção destes parâmetros. Além disso, foram determinadas as quantidades de fósforo total e nitrogênio, pelas espécies químicas: total Kjeldahl, orgânico, amoniacal e nitrito + nitrato, na entrada e nas saídas dos leitos. As condições climáticas foram registradas de maneira que pôde ser verificada sua influência sobre o desempenho do sistema. Os resultados mostraram que esta tecnologia pode ser aplicada a água residuária estudada. Não foi encontrada diferença significativa entre os leitos de forma cilíndrica e retangular.

## ABSTRACT

The purpose of this research was to test the performance of a constructed macrophytes wetland in the reduction of organic material and solids clearance of wastewater characteristic of the banana candy processing. There are few reports about the use of constructed wetlands in the treatment of wastewater from food processing and none of them refers to its kind of application. In this work the wastewater contains water used to wash tanks. It was used a subsurface flow constructed wetland system with *Typha sp*, a macrophyte encountered in many regions of Sao Paulo state and efficient in this kind of treatment; gravels (stones) were used to support plants and three configurations were studied to the constructed wetlands: two rectangular wetlands placed in series, one rectangular and one cylindrical; which were built-up in cement tanks. The system performance, measured in terms of COD (Chemical Demand of Oxygen), TSS (Total Suspended Solids), was estimated according to percentage of reduction of these parameters. Moreover, it was determined phosphorus and nitrogen quantity (Total Kjeldahl, organic, amoniacal and nitrite + nitrate) in the influent and effluent constructed wetlands. The climatic conditions were registered and it was verified its influence on the system performance. The results show that this technology can be applied to this wastewater. It wasn't observed significative difference between cylindrical and rectangular form.

# 1 INTRODUÇÃO

Um projeto de implementação e gestão de sistema agroindustrial para produção de alimentos com certificação social e ambiental por comunidades de agricultores familiares está sendo desenvolvido por uma equipe de pesquisadores da Unicamp em parceria com o ISA (Instituto Socioambiental) e com a Associação Quilombo Ivaporunduva (Vale do Ribeira – SP) junto a essa comunidade, objetivando a instalação de uma unidade piloto de processamento de frutas. A grande motivação do presente trabalho foi gerada pela necessidade de tratamento de efluentes desta unidade através de uma tecnologia adequada, devido às restrições ambientais, aos poucos recursos financeiros e a baixa qualificação da mão-de-obra.

Uma tecnologia adequada para o tratamento de águas residuárias, neste caso, deve focar o uso de sistemas de tratamentos que sejam simples, não mecanizados, baratos e de fácil construção e aplicação, utilizando material de construção acessível, em sua maior parte possível de ser obtido na própria localidade onde é construído, e mão-de-obra não especializada, aplicando-se, desta forma, a regiões com pouca disponibilidade de recursos.

Esta demanda tecnológica motivou este trabalho, no qual foi estudado um leito de fluxo subsuperficial (LCFSS) cultivado com taboa, que atende a todas estas características, realizando o tratamento primário da água residuária. Além disso, este sistema pode ser incorporado à paisagem local, mantendo a harmonia do ambiente.

As pesquisas realizadas sobre este tipo de tratamento utilizaram tanto efluente doméstico quanto industrial, porém não foram encontrados dados sobre o uso desta tecnologia para agroindústrias de doces de banana, ou de outras frutas, que será o efluente estudado nesta pesquisa. Embora não tenham sido encontrados dados na literatura sobre o uso desta tecnologia para o efluente desejado, supõe-se que o mesmo seja favorecido devido ao alto teor de matéria orgânica presente.

O uso de sistemas de leitos cultivados constitui um importante exemplo do desenvolvimento de técnicas de engenharia ambiental para uso em gerenciamento de águas e águas residuárias. Além disso, os leitos cultivados são uma tecnologia de baixo custo para o controle da poluição ambiental, o que facilita o acesso de comunidades com baixos recursos a esta tecnologia.

Existem vários tipos de leitos cultivados, sendo que os leitos que possuem escoamento subsuperficial (LCFSS), nos quais a lâmina d'água fica abaixo do meio suporte, necessitam menor área do que os leitos cultivados de fluxo superficial (LCFS), para a mesma qualidade de água, e são mais eficientes na remoção de sólidos suspensos e fósforo, por isso optou-se pelo mesmo para a realização desta pesquisa.

Os leitos cultivados com macrófitas podem garantir um melhor controle do regime hidráulico do sistema, quando comparados aos leitos naturais, tendo em conseqüência um melhor desempenho.

Vale ressaltar que a aplicação deste tipo de sistema para diferentes tipos de situações é favorecida pelas condições climáticas brasileiras, necessidade de poucos recursos e facilidade de montagem, manutenção e operação, proporcionando o desenvolvimento de pesquisas para diferentes tipos de situações. Outro aspecto importante é que a vegetação é um componente importante no tratamento por leitos cultivados devido à transferência de oxigênio através de suas raízes e rizomas para o fundo do leito, fornecendo condições para que os microrganismos desempenhem o tratamento biológico.

# 2 **OBJETIVOS**

## 2.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo geral nesta pesquisa consistiu em construir uma unidade piloto de tratamento de efluentes do tipo leito cultivado com taboa de fluxo subsuperficial e avaliar seu desempenho durante a partida, três primeiros meses de funcionamento, sob diferentes condições de trabalho.

## 2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Os objetivos específicos da presente pesquisa foram os seguintes:

- Caracterizar a água residuária do processamento de doce de banana através da determinação de alguns parâmetros: pH, sólidos, demanda química de oxigênio (DQO), fósforo e nitrogênio;
- Construir um sistema de leitos de fluxo subsuperficial cultivados com taboa, sendo dois leitos retangulares em série cultivados com taboa (L1 e L2), um controle retangular preenchido apenas com brita (L3), e um leito cilíndrico cultivado com taboa (L4);
- Verificar a influência de diferentes tempos de detenção hidráulicos (TDH) no desempenho dos leitos;
- Comparar o desempenho de leitos de diferentes formas frente às mesmas condições de entrada de água residuária;
- Registrar a ocorrência de chuvas, parâmetro não controlável, e, possivelmente, verificar sua influência no desempenho dos leitos.

# 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

## 3.1 ÁGUAS RESIDUÁRIAS

Águas residuárias são o tipo de resíduo mais importante em muitos processos industriais devido a sua abundância e variedade (YANG,1996). A caracterização da água residuária é especialmente importante tanto para águas residuárias comerciais quanto para industriais. Em alguns casos pode ser necessário fornecer suplementos de nutrientes para possibilitar a atividade biológica no leito ou fazer um tratamento preliminar (REED *et al.*, 1995).

Águas produzidas por diferentes atividades domésticas e industriais são conhecidas como águas residuárias. Grande quantidade de água é exigida por atividades industriais devido à urbanização e a industrialização, sendo que apenas uma pequena parte é realmente incorporada ao produto ou perdida por evaporação, indo o restante parar nos cursos d'água como águas residuárias (TOMAR, 1999).

Na Tabela 3.1 estão apresentados os principais poluentes em águas residuárias e suas características.

**Tabela 3.1** – Principais poluentes em águas residuárias e suas características.

| Categoria de Poluentes | Índices ou substâncias | Indústria (exemplo) | Tratamento (exemplo) |
|---|---|---|---|
| Material orgânico | DBO, DQO | Processamento de alimentos | Tratamento biológico |
| Micropoluentes orgânicos perigosos | PCB, pesticidas, tricloroetileno | Pesticidas – fábrica, lavagem | Combustão, etc. |
| Metais pesados | Cd, Pr, Pb | Eletrogalvanização | Separação |
| Ácidos ou álcalis | pH, alcalinidade | Têxteis | Neutralização |
| Radioatividade | Elementos radioativos | Energia nuclear | Separação |
| Calor | Temperatura | Usinas de energia | Resfriamento |
| Inorgânicos | Nutrientes (N, P) | Eletrogalvanização, fertilizadores | Tratamento químico |
| Microrganismos | Vírus, coliforme | Esgoto hospitalar | Esterilização |

Fonte: Adaptado de Polprasert citado por YANG (1996).

Na Tabela 3.2 estão apresentadas as principais propriedades físicas, constituintes químicos e biológicos das águas residuárias e suas origens.

**Tabela 3.2** – Características físicas, químicas e biológicas de águas residuárias e suas origens.

| **Características** | **Fontes** |
|---|---|
| **Propriedades físicas:** | |
| Cor | Resíduos domésticos e industriais, deterioração natural de matéria orgânica. |
| Odor | Decomposição da água residuária, resíduos industriais. |
| Sólidos | Fonte doméstica de água, resíduos domésticos e industriais, erosão do solo. |
| Temperatura | Resíduos domésticos e industriais. |
| **Constituintes químicos:** | |
| **Orgânicos:** | |
| Carboidratos | Resíduos domésticos, comerciais e industriais. |
| Gorduras, óleos e graxa. | Resíduos domésticos, comerciais e industriais. |
| Pesticidas | Resíduos da agricultura. |
| Fenóis | Resíduos industriais. |
| Proteínas | Resíduos domésticos e comerciais. |
| Surfactantes | Resíduos domésticos e industriais. |
| Outros | Deterioração natural de matéria orgânica. |
| **Inorgânicos:** | |
| Alcalinidade | Resíduos domésticos, fornecimento de água doméstica. |
| Cloretos | Fornecimento de água doméstica, resíduos domésticos. |
| Metais pesados | Resíduos industriais. |
| Nitrogênio | Resíduos domésticos e da agricultura. |
| PH | Resíduos industriais. |
| Fósforo | Resíduos domésticos e industriais. |
| Enxofre | Fornecimento de água doméstica, resíduos domésticos e industriais. |
| Componentes tóxicos | Resíduos industriais. |
| **Gases:** | |
| Sulfito de hidrogênio | Decomposição de resíduos domésticos. |
| Metano | Decomposição de resíduos domésticos. |
| Oxigênio | Fornecimento de água doméstica. |
| **Constituintes biológicos:** | |
| Animais | Cursos de água e plantas de tratamento abertas. |
| Plantas | Cursos de água e plantas de tratamento abertas. |
| Vírus | Resíduos domésticos. |

Fonte: Adaptado de METCALF & EDDY (1991).

Na Tabela 3.3 estão apresentados os principais constituintes de interesse no tratamento de águas residuárias.

**Tabela 3.3 –** Constituintes importantes em relação ao tratamento da água residuária.

| **Contaminantes** | **Razão da importância** |
|---|---|
| Sólidos suspensos | Podem levar ao desenvolvimento de depósito de lodo e condições anaeróbias quando a água residuária não tratada é despejada no ambiente aquático. |
| Orgânicos biodegradáveis | Compostos principalmente de proteínas, carboidratos e gorduras, são medidos mais comumente em termos de DBO e DQO. Se a água residuária não tratada é despejada nas fontes naturais, sua estabilização biológica pode levar a exaustão de oxigênio e ao desenvolvimento de condições sépticas. |
| Patógenos | Doenças contagiosas podem ser transmitidas por organismos patogênicos nas águas residuárias. |
| Nutrientes | Nitrogênio, fósforo e carbono são nutrientes essenciais para o crescimento. Quando lançados no ambiente aquático podem levar ao crescimento de vida aquática indesejável. Quando lançados em quantidades excessivas no solo, podem levar a poluição do lençol freático. |
| Orgânicos recalcitrantes | Tendem a resistir aos métodos convencionais de tratamento de águas residuárias. Exemplos típicos incluem surfactantes, fenóis e pesticidas. |
| Metais pesados | São usualmente adicionados a águas residuárias de atividades industriais e domésticas, devendo ser removidos se a água residuária for reutilizada. |
| Sólidos inorgânicos dissolvidos | Constituintes inorgânicos como cálcio, sódio e sulfato são adicionados ao fornecimento da água doméstica bem como podem resultar do uso da água devendo ser removidos se a água residuária for reutilizada. |

Fonte: Adaptado de METCALF & EDDY (1991).

A maioria dos efluentes industriais possui uma DBO muito alta, todavia a concentração de coliformes fecais é menor que nos efluentes domésticos e esta diferença faz com que os resíduos industriais constituam um problema ambiental e que os esgotos domésticos constituam um problema de saúde pública. Ambas influenciam na deterioração geral da água (LÉON & CAVALLINI, 1999).

### 3.1.1 Águas residuárias de indústrias de processamento de frutas e vegetais

O primeiro passo no estudo do tratamento de águas residuárias é a caracterização das mesmas. As características gerais de águas residuárias industriais estão diretamente associadas ao processo e ao produto produzido. As características dos resíduos bem como os processos industriais devem ser conhecidos para que o tratamento e o controle dos resíduos produzidos pelas indústrias sejam adequados (YANG, 1996).

As características dos despejos da industrialização de frutas e vegetais variam em função da matéria prima usada. Os valores da DBO podem atingir 60.000mg/L e os despejos podem ser fortemente ácidos ou alcalinos (BRAILE & CAVALCANTI, 1993). Na Tabela 3.4 encontram-se as características dos despejos de conservas de algumas frutas.

**Tabela 3.4 –** Características dos despejos de conservas de algumas frutas.

| Produtos | SS (mg/L) | DBO (mg/L) | pH | Água (L/ton de mat. prima) |
|---|---|---|---|---|
| Pêssego | 600 | 1.350 | 7,6 | 10.000 |
| Pêra | --- | --- | --- | 10.000 |
| Damasco | 260 | 380 | 7,6 | 10.000 |
| Cereja | 20 | 750 | 6,2 | --- |
| Uvas | 1.650 | 720 | 4,6 | --- |

Fonte: Adaptado de BRAILE & CAVALCANTI (1993).

A Tabela 3.5 apresenta as características encontradas num estudo de caracterização do efluente cítrico bruto nas 4 fases do respectivo trabalho experimental: tratamento de efluentes de uma indústria cítrica pelo processo de escoamento superficial no solo. Nesta tabela são apresentadas faixas de variação dos parâmetros determinados. Nas fases 1, 2 e 3 foram obtidos os mais precisos valores de taxa e período de aplicação, através de variações pré-estabelecidas.

Enquanto que na fase 4 foi verificada a eficiência de remoção de alguns parâmetros frente a adição de nutrientes ao efluente bruto.

**Tabela 3.5 –** Características físicas e químicas do efluente cítrico.

| | Fases de Operação | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| **Parâmetro** | **1ª fase** | **2ª fase** | **3ª fase** | **4ª fase** | **4ª fase*** |
| pH | 7,05 a 12,13 | 5,74 a 11,86 | 10,31 a 12,25 | 3,37 a 11,34 | 2,78 a 6,75 |
| Alc. Total (mg $CaCO_3$/l) | 129 a 1.370 | 132 a 1.042 | 350 a 1.826 | 0 a 695 | 0 a 411 |
| DQO (mg/L) | 2.379 a 7.439 | 5.112 a 10.618 | 3.877 a 5.802 | 5.059 a 6.368 | 5.770 a 8.012 |
| DBO (mg/L) | --- | 3.600 a 4.500 | 2.144 a 3.480 | 3.550 | 2.600 a 5.325 |
| Fósforo Total (mg PO4-P/l) | 1,4 a 6,7 | 4,4 a 8,8 | 2,4 a 5,8 | 3,6 a 8,5 | 94,0 a 164,0 |
| Condut (μS/cm) | 631 a 5.810 | 1.004 a 2.025 | 1.328 a 7.387 | 996 a1.834 | 1.444 a 1.560 |
| S. Sedim. (mL/L) | 3,6 a 76 | 3,0 a 200,0 | 14,0 a 36,0 | 8,4 a 39,0 | 9,0 a 74,0 |
| ST (mg/L) | 1.555,0 a 4.412,0 | 1.678,1 a 5.969,7 | 3.147,9 a 5.972,8 | 2207,3 a 4260,2 | 3010,0 a 4331,6 |
| STV (mg/L) | 878,9 a 2.977,5 | 1.470,1 a 3.982,5 | 1.723,9 a 2919,9 | 1403,9 a 2644,4 | 1937,2 a 2609,7 |
| STF (mg/L) | 367,1 a 2706,5 | 813,2 a 2.287,3 | 1309,6 a 3288,2 | 373,8 a 2536,9 | 682,7 a 2279,8 |
| SST (mg/L) | 166,4 a 703,0 | 512,2 a 961,2 | 563,0 a 991,6 | 643,5 a 1001,6 | 804,0 a 1118,0 |
| SSV (mg/L) | 124,2 a 528,8 | 440,8 a 785,2 | 416,5 a 804,2 | 613,0 a 752,4 | 733,5 a 745,2 |
| SSF (mg/L) | 42,2 a 190,5 | 13,3 a 201,6 | 111,2 a 283,2 | 30,5 a 249,2 | 70,5 a 372,8 |

Fonte: Adaptado de NOUR (1991).

* Efluente bruto com adição de nutriente.

Observa-se na tabela acima que o efluente cítrico possui altos teores de DQO, DBO, e STV, o que caracteriza um efluente extremamente rico em matéria

orgânica, como é o caso da maioria dos resíduos líquidos do processamento de alimentos.

#### 3.1.1.1 Características gerais das águas residuárias

A composição da água residuária das indústrias de processamento de frutas e vegetais é determinada por dois fatores fundamentais: produto final e processo utilizado. Essa água residuária é gerada principalmente nas etapas de lavagem, descascamento, branqueamento e resfriamento e, ainda, na limpeza da planta de processamento (BARNES *et al.*, 1984).

O entendimento da natureza da água residuária é essencial no projeto e operação da coleta, tratamento e esquemas para disposição da mesma e na gestão da engenharia da qualidade ambiental (MUTTAMARA, 1996).

Embora o tipo de processamento possa causar variações consideráveis nas características da água residuária, a maioria das plantas industriais apresenta algumas características e problemas comuns associados com o tratamento de águas residuárias, detalhados a seguir (BARNES *et al.*, 1984).

Os resíduos líquidos de indústrias de alimentos, bebidas e farmacêuticas contém, principalmente, poluentes orgânicos. Além disso, têm alta DBO e grande quantidade de sólidos suspensos orgânicos e de matéria orgânica dissolvida (MANCY *et al.*, 1971). Os resíduos do processamento de alimentos geralmente têm altas cargas orgânicas, que são facilmente biodegradáveis (HABERL, *et al.*, 2003).

A matéria orgânica presente nos efluentes provém na maioria das vezes da redução de componentes de substâncias vegetais e animais e o oxigênio é capaz de transformar essa matéria perecível em produtos estáveis (IMHOFF, 2002).

##### *3.1.1.1.1 Poluentes*

Águas residuárias oriundas do processamento de frutas e vegetais contêm principalmente componentes orgânicos dissolvidos e altamente disponíveis para

degradação quando em contato com bactérias. Os principais fatores que causam problemas no tratamento de águas residuárias são (BARNES *et al.*, 1984):

- Alta demanda de oxigênio, necessário para o tratamento aeróbio;
- Grandes variações sazonais;
- Altas variações na intensidade e volume dos resíduos;
- Baixo pH;
- Falta de nutrientes na água residuária e mudanças nas características dos resíduos com mudanças nos produtos.

Devido a variações na quantidade de águas residuárias produzidas é necessária uma equalização do escoamento e das características. Os maiores problemas nestas águas são: demanda bioquímica de oxigênio (DBO), sólidos suspensos totais (SST), sólidos sedimentáveis (SSed), pH da água residuária, nitrogênio, óleo e gordura, dependendo da matéria-prima utilizada.

As águas residuárias da maioria das plantas de processamento de frutas têm uma DBO consideravelmente mais alta por unidade de escoamento do que águas residuárias domésticas e outras. Além disso, diferem também quanto à taxa de DBO disponível para oxidação biológica. Açúcares solúveis, por exemplo, contidos em resíduos de frutas, têm uma taxa de oxidação muito rápida quando comparado com a maioria dos outros resíduos que exigem uma quebra seqüencial para simplificar as substâncias antes que elas se tornem disponíveis para síntese por bactérias (BARNES *et al.*, 1984).

Outro problema importante, de acordo com o referido autor, é o conteúdo de sólidos associado ao escoamento. Esse conteúdo é usualmente medido pelos sólidos sedimentáveis ou sólidos suspensos totais.

O pH da água residuária de plantas industriais de processamento de frutas também é um problema comum em muitas dessas plantas. A descarga de águas residuárias com baixo pH pode resultar na corrosão excessiva de concreto e nas tubulações das redes de esgotos, inibição do processo biológico. Além disso, a falta de nutrientes disponíveis, especialmente o nitrogênio, tem sido,

historicamente, um problema no tratamento de resíduos de frutas e vegetais devido à necessidade de uma relação de 100: 5: 1 entre DBO: N: P para o tratamento biológico (BARNES *et al.*, 1984; BRAILE E CAVALCANTI, 1993).

*3.1.1.1.2 Legislação Ambiental*

Todo lançamento de dejetos líquidos em um corpo receptor está obrigado a seguir padrões de qualidade contemplados nas legislações municipais, estaduais, federais e internacionais que dizem respeito à proteção dos cursos d'água. Estes padrões se baseiam no princípio de restabelecimento do equilíbrio e da autodepuração do corpo receptor, sendo que estes são os responsáveis pela conversão de compostos orgânicos inertes e não prejudiciais do ponto de vista ecológico. É de importância fundamental conhecer e quantificar esses mecanismos para desenvolver processos de tratamento de águas residuárias que otimizem o que ocorre na natureza (VON SPERLING(a), 1996).

O Artigo 15 da Resolução CONAMA Nº 20 de 18 de junho de 1986 estabelece que os órgãos de controle ambiental poderão acrescentar novos parâmetros ou tornar mais restritivos os estabelecidos nessa Resolução, tendo em vista as condições locais. Tal disposição obedece à distribuição constitucional de competências entre a União, os Estados e os Municípios, em matéria de normas sanitárias, prevalecendo sempre, desde que compatíveis, as normas e padrões mais exigentes.

## 3.2 TRATAMENTO DE EFLUENTES

### 3.2.1 Etapas do tratamento de efluentes

Na maioria das vezes o tratamento de efluentes exige que várias etapas sejam realizadas para que seja obtido um efluente de qualidade que atenda às especificações vigentes para descarga num corpo receptor.

#### 3.2.1.1 Tratamento Preliminar

É a remoção de constituintes da água residuária que possam causar problemas operacionais e de manutenção nos sistemas de operações do tratamento, de processo e sistemas auxiliares. Já o pré-tratamento é o condicionamento da água residuária para descarga no sistema de esgotos (METCALF & EDDY, 1991; RAMALHO, 1983).

#### 3.2.1.2 Tratamento Primário

A seleção de um processo de tratamento ou seqüência de processos depende de um número de fatores. Alguns desses fatores são (RAMALHO, 1983):

- Características da água residuária: DBO (demanda bioquímica de oxigênio), percentagem de sólidos suspensos, pH, presença de materiais tóxicos;
- Exigência de qualidade do efluente;
- Custo e disponibilidade de terra;
- Consideração de um possível aumento dos padrões de qualidade de água, necessitando o projeto de um tipo de tratamento mais sofisticado para o futuro.

O tratamento primário de uma água residuária implica na remoção de uma porção de sólidos suspensos e matéria orgânica, realizada usualmente através de operações físicas como gradeamento e sedimentação (METCALF & EDDY, 1991; RAMALHO, 1983). O efluente do tratamento primário conterá matéria orgânica considerável e terá uma DBO relativamente alta.

### 3.2.1.3 Tratamento secundário

O termo tratamento secundário inclui todos os processos biológicos de tratamento de águas residuárias, incluindo aeróbios e anaeróbios (RAMALHO, 1983). Porém, o tratamento biológico se compõe quase que exclusivamente de processos aeróbios, portanto há fenômenos que se verificam na água contendo ar em solução. Os principais tipos de tratamento secundário aeróbio são: lodo ativado, lagoas aeradas, lagoas de estabilização. Já o tratamento anaeróbio é utilizado para águas residuárias bem como para digestão de lodos. Os produtos finais da degradação de lodos são gases, principalmente metano ($CH_4$), dióxido de carbono ($CO_2$), e pequenas quantidades de ácido sulfídrico ($H_2S$) e hidrogênio ($H_2$) (IMHOFF, 2002).

O tratamento biológico de esgotos é um fenômeno que pode ocorrer naturalmente no solo ou na água desde que predominem condições apropriadas para evolução, reprodução e crescimento de organismos que decompõem a matéria orgânica. É o que ocorre na disposição de esgotos brutos no solo ou em corpos receptores naturais como lagoas, rios, oceanos, quando não há uma sobrecarga (CAMPOS, 1994).

Os processos biológicos são usados no tratamento dos efluentes cítricos devido ao alto teor de matéria orgânica presente nestes despejos. Em contrapartida os despejos cítricos apresentam deficiência em nitrogênio e fósforo, havendo necessidade de complementação destes nutrientes nos tratamentos biológicos (GUIMARÃES, 1998).

Na aplicação do tratamento biológico para o tratamento de resíduo, algumas recomendações são importantes (SCHIAVOLIN, 2001):

- Não permitir o lançamento de águas residuárias com sólidos dissolvidos ou despejos tóxicos ao sistema de tratamento;
- Corrigir o pH e manter a temperatura ideal para a ação dos microrganismos;
- Dosar substâncias ricas em nutrientes (nitrogênio e fósforo);

- Evitar a entrada de altas cargas orgânicas no sistema de tratamento;
- Manter o lodo biológico em atividade constante.

O tratamento secundário é direcionado principalmente à remoção de orgânicos biodegradáveis e sólidos suspensos (METCALF & EDDY, 1991). É importante saber que existe grande possibilidade de toda a matéria orgânica presente no efluente ser biodegradável quando há uma baixa relação entre DQO e DBO ($\frac{DQO}{DBO} < 2$)*. A confirmação da biodegradabilidade pode se dar pelas seguintes situações (BRAILE & CAVALCANTI, 1993):

- O despejo bruto, após envelhecimento, deverá ficar com seu pH reduzido;
- O oxigênio dissolvido (OD), se inicialmente existente, deverá diminuir, podendo desaparecer.

**Quadro 3.1** – Resumo das interpretações das análises de águas residuárias.

| Resultados | Alternativas | | Tratamentos possíveis |
|---|---|---|---|
| $\frac{DQO}{DBO} < 2$** | | | Biológico convencional<br>$\frac{DQO}{DBO} afluente \approx \frac{DQO}{DBO} efluente$ |
| $\frac{DQO}{DBO} > 2$** | **1ª alternativa** – A parte não biodegradável não é importante do ponto de vista da poluição. | | Tratamento biológico convencional<br>$\frac{DQO}{DBO} afluente < \frac{DQO}{DBO} efluente$ |
| | **2ª alternativa** – A parte não biodegradável é também causadora de poluição | **1ª hipótese** $\frac{SSV}{SV} > 0{,}8$** | Decantação: simples, com a alteração de pH, com auxílio de um floculante (precipitação química). Flotação. |
| | | **2ª hipótese** $\frac{SDV}{SV} > 0{,}8$** | Adsorção em leitos de carvão ativado.<br>Oxidação química.<br>Combustão, etc. |

Fonte: Adaptado de BRAILE & CAVALCANTI, 1993.

* Se possível $DBO_{20}$, senão $DBO_5$.
** Não existe maneira ideal de fixar um quociente único. Os números 2 e 0,8 servem apenas para orientação.

É necessária a relação de 100: 5: 1 entre DBO: N: P, para que ocorra o adequado tratamento biológico, já que os microrganismos necessitam destes nutrientes para seu crescimento e reprodução (BRAILE & CAVALCANTI, 1993).

#### 3.2.1.4 Tratamento Terciário

O tratamento terciário, também chamado de tratamento avançado de água residuária, consiste de processos que são projetados para alcançar uma qualidade melhor do efluente do que os tratamentos secundários citados anteriormente (RAMALHO, 1983). Este tratamento poderá constar da redução adicional de matéria orgânica consumidora de oxigênio, e redução de fósforo ou de nitrogênio (IMHOFF, 2002).

## 3.3 SISTEMAS NATURAIS

Os sistemas naturais são processos de tratamento de águas residuárias que têm como principais componentes: a força da gravidade para sedimentação, microrganismos, plantas e animais. O termo sistema natural, neste caso, pretende descrever aqueles processos que dependem principalmente dos seus componentes naturais para alcançar os objetivos pretendidos, embora possam usar componentes externos (REED *et al.*, 1995).

As tecnologias de tratamento de águas residuárias incluídas na categoria de sistemas naturais englobam a infiltração localizada no solo, a aplicação lenta no solo, a infiltração rápida no solo, o escoamento superficial no solo, as lagoas de estabilização, as lagoas rasas contendo plantas flutuantes e os alagados (Kadlec *et al.*, 1996; citado por MANSOR, 1998).

Os sistemas naturais são capazes de remover pelo menos uma parte dos poluentes de águas residuárias: sólidos suspensos, matéria orgânica, nitrogênio, fósforo, elementos traço, componentes orgânicos traço e microrganismos (METCALF & EDDY, 1991).

## 3.4 LEITOS CULTIVADOS (*CONSTRUCTED WETLANDS)*

### 3.4.1 Definição, características e classificação

Os leitos cultivados (LC) podem ser definidos como um sistema natural de tratamento de águas residuárias baseado nos alagados, nas várzeas ou *wetlands* naturais, que são áreas de solo hidromórfico permanentemente inundadas ou saturadas por águas superficiais ou subterrâneas e onde vegetam várias espécies de plantas que são diretamente dependentes da hidrologia, do meio suporte e dos nutrientes característicos da região onde se encontram (U.S.E.P.A., 1998; WOOD & MCATAMNEY, 1996).

Os leitos cultivados oferecem toda a capacidade de tratamento de alagados naturais, porém sem as restrições associadas à descarga num ecossistema natural. Além disso, água residuária pré-tratada é normalmente aplicada continuamente aos leitos cultivados e o tratamento ocorre devido ao lento escoamento através do caule e raízes da vegetação emergente (METCALF & EDDY, 1991).

Os leitos cultivados são uma tecnologia de baixo custo para o controle da poluição ambiental, o que facilita seu acesso às comunidades com baixos recursos a esta tecnologia (AYAZ, 2000).

Os alagados construídos são em geral considerados similares aos sistemas convencionais no que concerne à legislação. Estes sistemas têm a vantagem de permitir o controle sistemático e a otimização das habilidades dos sistemas de alagados naturais em remover ou transformar os poluentes das águas residuárias, além de possuírem flexibilidade de localização (HABERL *et al*., 1995; WOOD, 1995).

Os alagados construídos ou leitos cultivados podem garantir um controle muito mais seguro do regime hidráulico do sistema quando comparados aos alagados (leitos) naturais e, portanto, têm um melhor desempenho. A construção de um leito cultivado evita complicações ambientais associadas com o uso de

alagados naturais e permite um projeto do leito para um tratamento ótimo da água residuária (REED *et al.*, 1995).

Existem ao menos quatro combinações importantes envolvendo águas residuárias e alagados que podem ser observadas nos Estados Unidos (REED *et al.*, 1995):

- Uso de alagados naturais para renovação adicional da água residuária;
- Uso de efluentes ou águas residuárias parcialmente tratadas para intensificação, restauração ou criação de alagados;
- Uso de leitos cultivados como um processo de tratamento de águas residuárias;
- Uso de leitos cultivados para tratamento de escoamento superficial (*runoff*) da agricultura, escoamento combinado de esgotos e de drenagem de minas.

Os leitos cultivados podem ser classificados de acordo com seu fluxo em superficial (FS), subsuperficial (FSS) e vertical (FV), possuindo as seguintes características (U.S.E.P.A., 1988; WOOD, 1995; VYMAZAL, 1998; REED *et al.*, 1995):

- **Leitos cultivados de fluxo superficial (LCFS):** constituído de canais com algum tipo de barreira subsuperficial, em geral o próprio solo, que fornece condições de desenvolvimento para as plantas, sendo que a água flui a uma pequena profundidade (0,1 a 0,3m). Neste tipo a superfície da água fica exposta à atmosfera, o leito contém vegetação aquática emergente, uma camada de solo para afixar as raízes, um limite para proteger o lençol freático, e estruturas apropriadas de entrada e saída. Este sistema fornece bons resultados como tratamento terciário. Nos Estados Unidos é muito utilizado no tratamento de grandes volumes de águas residuárias.

- **Leitos cultivados de fluxo subsuperficial (LCFSS):** são essencialmente filtros lentos horizontais preenchidos com brita ou areia como meio suporte, onde as raízes das plantas se desenvolvem. Este sistema é eficiente no tratamento secundário de águas residuárias e não oferece boas condições para o desenvolvimento e proliferação de mosquitos, além de impossibilitar o contato de pessoas e animais com a lâmina d'água (ROSTON, 1994; SOUZA & BERNARDES, 1996).

- **Leitos cultivados de fluxo vertical (LCFV):** são filtros de vazão vertical intermitente preenchidos com brita ou areia com o nível d'água abaixo do meio suporte, impossibilitando seu contato com animais ou pessoas. É o sistema que está sendo analisado mais detalhadamente devido ao seu grande potencial para nitrificação. Os primeiros leitos de fluxo vertical surgiram na Europa na década de 1970 e eram conhecidos como "campos de infiltração" na Holanda.

### 3.4.2 Possibilidades de aplicação dos leitos cultivados

Os leitos cultivados são usualmente aplicados como estágios biológicos para águas residuárias pré-tratadas. Além disso, os leitos cultivados podem ser usados como um estágio de polimento após uma planta de tratamento convencional (HABERL *et al.,* 1995).

Os leitos cultivados são usados no tratamento de águas residuárias de operações de polpa e papel, refinarias de óleo, produção química e processamento de alimentos, sendo usado na maioria dos casos como um estágio de polimento depois de tratamento biológico convencional (REED *et al.*, 1995).

Resíduos do processamento de alimentos geralmente possuem altas cargas orgânicas, que são facilmente biodegradáveis (HABERL *et al.*, 2003). Neste sentido, leitos cultivados têm sido usados para tratar água residuária do processamento de batata (BURGOON *et al.*, 1999) e água residuária de fábricas de laticínios (KARPISCAK *et al.*, 1999; GEARY and MOORE, 1999).

As possibilidades de aplicação dos leitos cultivados foram resumidas na Tabela 3.6 (BAVOR *et al.,* 1995).

**Tabela 3.6 –** Aplicações dos leitos cultivados.

| **Aplicação** | **Aspectos Principais** |
|---|---|
| Tratamento primário e secundário de esgoto | Promove um completo tratamento do esgoto, incluindo remoção de nutrientes, para pequenas comunidades e habitações simples. |
| Polimento terciário do efluente | Longo tempo de detenção, principalmente com relação à remoção de fósforo. |
| Desinfecção | Determina as condições mais apropriadas de remoção de muitos indicadores de microrganismos em relação à legislação e exigências de monitoramento.<br>Explora o potencial do leito cultivado de fornecer águas limpas em reservatórios degradados. |
| Elevação da assimilação de nutrientes da corrente de entrada/afluente | Estabelecimento da diversidade apropriada de espécies. |
| Manejo do escoamento superficial urbano e rural | Identificação de locais e estratégias apropriadas para introdução do manejo. |
| Manejo de materiais tóxicos | Entendimento e modelagem de processos pelos quais metais e matéria orgânica possam ser imobilizados e/ou transformados. |
| Efluentes industriais | Idem a anterior. |
| Manejo de lodo | Longo tempo de disposição de resíduos que podem conter níveis substanciais de metais pesados e materiais tóxicos. |
| Produção de biomassa | Identificação e desenvolvimento de usos e mercado viável para produtos de leitos cultivados. |
| Recarga de águas subterrâneas | Entendimento dos impactos na hidrologia das águas subterrâneas, por exemplo, nos solos com sulfato ácido. |
| Pré-tratamento e estocagem de águas para esquemas de reuso | Avaliação de níveis de tratamento apropriado para diferentes opções de reuso e economia local. |

Fonte: Adaptado de BAVOR *et al.* (1995).

Algumas vantagens e desvantagens do uso de sistemas de leitos cultivados para tratamento de efluentes estão apresentadas na Tabela 3.7.

**Tabela 3.7** – Vantagens e desvantagens da aplicação dos leitos cultivados.

| **Vantagens** | **Desvantagens** |
|---|---|
| Baixo custo de construção | Alta demanda de área |
| Fácil operação e manejo | Necessidade de substrato/ meio suporte |
| Remove satisfatoriamente matéria orgânica e sólidos suspensos, nitrogênio e fósforo | Susceptível a entupimento dos espaços vazios do substrato |
| Considerável redução de patógenos | Necessidade de manejo das macrófitas |

Fonte: Adaptado de CHERNICHARO (2001).

### 3.4.3 Parâmetros de Projeto

Em estudo realizado sobre a utilização dos leitos cultivados para o tratamento de águas residuárias conclui-se que as várzeas naturais requerem aproximadamente 10 vezes mais área por unidade de volume que os LCFS, e estes 10 vezes mais que os LCFSS para a mesma qualidade de água. Os LCFSS estão geralmente integrados a um sistema global onde seu efluente passa por um LCFS para polimento (Knight, 1992; citado por WOOD, 1995).

Os LCFV requerem uma área 5 vezes menor que os LCFSS, sendo mais aeróbios que estes e bons para a nitrificação e remoção de DBO, porém não provocam uma boa desnitrificação e são menos eficientes na remoção de sólidos suspensos e fósforo que os outros sistemas (Vymajal, 1998; citado por VALENTIM, 1999).

Na Tabela 3.8 estão apresentados os critérios de projeto para os leitos cultivados de fluxo superficial (LCFS) e fluxo subsuperficial (LCFSS).

**Tabela 3.8** – Critérios de projeto para os leitos cultivados de fluxo superficial (LCFS) e fluxo subsuperficial (LCFSS).

| Parâmetros | Fluxo Superficial | Fluxo Subsuperficial |
|---|---|---|
| Tempo de detenção (dias) | 5-14 | 2-7 |
| Altura da coluna d'água (m) | 0,1-0,5 | 0,1-1 |
| Área por vazão (ha/$m^3$.d) | 0,002-0,014 | 0,001-0,007 |
| Razão comprimento : largura do leito | 2:1 a 10:1 | 0,25:1 a 5:1 |
| Controle de mosquitos | Requer | Não requer |
| Freqüência de colheita (ao ano) | 3-5 | 3-5 |
| Carga orgânica máxima (kgDBO/ha.dia) | 80 | 75 |
| Carga hidráulica ($mm^3/mm^2$.d) | 7-60 | 2-30 |

Fonte: Adaptado de WOOD (1995).

### 3.4.4 As plantas nos leitos cultivados

A vegetação é um componente importante no tratamento por leitos cultivados devido à transferência de oxigênio através de suas raízes e rizomas para o fundo do leito fornecendo condições para que os microrganismos desempenhem o tratamento biológico (METCALF & EDDY, 1991).

Existem vários termos para definir as plantas que habitam as várzeas naturais devido à ambigüidade nas definições e à complexidade de sua classificação, sendo os termos usuais: hidrófitas, macrófitas aquáticas, hidrófitas vasculares, plantas aquáticas e plantas aquáticas vasculares. Utilizaremos aqui o termo macrófitas que é o mais difundido (Guntensperg *et al*., 1998; citado por VALENTIM, 1999).

Uma grande variedade de plantas aquáticas tem sido estudada em leitos cultivados (*constructed wetlands*) projetados para o tratamento de águas residuárias. As macrófitas aquáticas emergentes são as mais comumente encontradas nestes sistemas (REED *et al*., 1995).

Dentre os vários tipos de macrófitas indicadas para os leitos cultivados, os gêneros *Typha sp* (taboa) e *Eleocharis sp* (junco manso) são bem utilizados por serem facilmente encontrados.

3.4.4.1 Contribuição das plantas para o tratamento da água residuária

O cultivo das macrófitas emergentes nos leitos é essencial para um bom desempenho no tratamento de águas residuárias, tendo em vista que a rizosfera e outras partes submersas da planta, juntamente com o substrato, funcionam como meio de suporte e fixação dos microrganismos aeróbios e anaeróbios, responsáveis pela quebra biológica dos componentes orgânicos contidos no resíduo líquido. Além disso, as macrófitas também são responsáveis pela retenção de sólidos suspensos (Cooper, 1993; citado por MANSOR, 1998).

A principal contribuição das macrófitas nos leitos cultivados é o transporte de oxigênio para a água ligada aos seus rizomas e suas raízes (WOOD & MCATAMNEY, 1996). O transporte de oxigênio dentro da rizosfera cria nichos locais para microrganismos anaeróbios nas cercanias do leito e algum oxigênio pode ser utilizado na decomposição. Segundo o referido autor, longe da rizosfera, condições anaeróbicas favorecem anaeróbios facultativos e obrigatórios e processos tais como desnitrificação (Brix, 1993; citado por WOOD & MCATAMNEY, 1996).

Devido à inundação contínua, o meio suporte, em um leito cultivado de fluxo subsuperficial é anaeróbico, não fornecendo boas condições para o desenvolvimento da maioria das espécies vegetativas. Porém as plantas emergentes têm a capacidade de absorver oxigênio e outros gases necessários da atmosfera através de suas folhas e de seu caule acima da água e transferi-los através de seus vasos condutores, para as raízes. Acredita-se que parte deste oxigênio alcança a superfície das raízes e rizomas criando nichos aeróbicos nestes pontos (REED *et al.,* 1995). Entretanto, a bibliografia afirma que quando comparada a quantidade de oxigênio levada da atmosfera para o sistema, via convecção e difusão, a perda de oxigênio pelas raízes das plantas pode ser negligenciada (HABERL *et al.*, 2003).

Os efeitos mais importantes das macrófitas em relação aos processos de tratamento de águas residuárias são os efeitos físicos que promovem controle da erosão, efeito de filtração, provisão de área superficial para ligação dos

microrganismos. Além disso, o metabolismo das macrófitas (assimilação de nutrientes e liberação de oxigênio) afeta os processos de tratamento que ocorrem nos leitos (BRIX, 1994).

Os benefícios das plantas no tratamento de águas residuárias podem ser resumidos da seguinte forma (WOOD, 1995):

- Estético – O benefício primário de um leito vegetado quando comparado com um simples filtro de solo ou pedra para redução de sólidos suspensos e carga orgânica é que as plantas somam um apelo estético e ecológico à unidade de tratamento.
- Controle de odor – Um benefício secundário é que as plantas, associadas aos sedimentos, proporcionam um biofiltro natural de odor, restringindo o odor do sistema, o que possibilita a instalação do sistema próximo à comunidade que irá servir.
- Tratamento da água residuária – Um terceiro benefício das plantas e do meio suporte é promover o tratamento aeróbico e anaeróbico do efluente, filtrando os sólidos suspensos.
- Controle de insetos – A massa superficial (plantas e meio suporte) também limita o desenvolvimento de insetos incômodos, tais como mosquitos, pernilongos, moscas, em alguma água que tenha empoçado, por absorção da água residuária dentro desta massa.

Dentre as funções das plantas aquáticas as seguintes merecem destaque (CHERNICHARO, 2001):

- Utilização de nutrientes e metais pesados;
- Transferência de oxigênio para a rizosfera;
- Suporte para o crescimento e ação dos microrganismos, pela presença de rizomas e raízes, bem como a absorção de material particulado pelo sistema radicular das macrófitas.

### 3.4.5 Macrófitas

As macrófitas possuem como maiores representantes as plantas aquáticas vasculares florescentes, mas incluem também os musgos aquáticos e a maioria das macroalgas. As formas em água doce variam em tamanho desde a minúscula *Wolfia sp*, aproximadamente do tamanho de uma cabeça de alfinete, passando pelas taboas, *Typha sp*, até as árvores de cipestres, *Taxodium sp* (APHA, 1995).

Entre os vários fatores que determinam a presença, densidade e morfologia das macrófitas, encontram-se: meio suporte onde estão fixadas, turbidez da água, presença de correnteza, concentração de nutrientes, profundidade da água, presença de herbívoros e atividades humanas (APHA, 1995).

As formas de crescimento das macrófitas geralmente reconhecidas são:

**Flutuantes** – Podem estar fixadas ou flutuando livremente, sua folhagem principal flutua livremente na superfície da água.

**Submergentes** – Quase toda folhagem cresce embaixo da superfície da água, quase todas as plantas vasculares submersas tem raízes.

**Emergentes** – Sua folhagem principal fica em contato com o ar ou acima da superfície da água, são fixadas pelas raízes.

Na Tabela 3.9, a seguir, encontram-se as principais macrófitas emergentes freqüentemente usadas em leitos cultivados.

**Tabela 3.9** – Principais macrófitas emergentes usadas em leitos cultivados.

| Espécie emergente | Temperatura desejável (ºC) | Tolerância à salinidade (mg/L) | Faixa ótima de pH |
|---|---|---|---|
| *Typha* | 10 a 30 | 30.000 | 4,0 a 10,0 |
| *Juncus* | 16 a 26 | 20.000 | 5,0 a 7,5 |
| *Phragmites* | 12 a 33 | 45.000 | 2,0 a 8,0 |
| *Schoenoplectus* | 16 a 27 | 20.000 | 4,0 a 9,0 |
| *Carex* | 14 a 32 | 20.000 | 5,0 a 7,5 |

Fonte: Adaptado de Reed (1992) citado por CHERNICHARO (2001).

#### 3.4.5.1 Taboa

O nome científico da taboa é *Typha angustifolia* L. Esta macrófita possui como características e importância (LORENZI, 2000):

**Características gerais** – É uma planta perene, herbácea, ereta rizomatosa, aquática, de caule cilíndrico, com 2-3 m de altura, nativa da América do Sul. A propagação ocorre por sementes e vegetativamente através de rizomas.

**Importância** – Planta daninha aquática muito freqüente em margens de lagos, lagoas ou represas, canais de drenagem e baixadas pantanosas em geral. A produção chega a 7.000kg/ha de rizomas. Seus rizomas são comestíveis, contendo teor de proteína igual ao do milho e de carboidratos igual ao da batata. A folha pode fornecer fibra para a fabricação de papel. Fornecem um pequeno potencial para remoção de nitrogênio e fósforo quando a colheita é praticada (LORENZI, 2000; U.S.E.P.A, 1988).

Para alcançar ótimas taxas de tratamento do efluente líquido, o nível da água para a taboa deve estar entre 50cm acima e 20cm abaixo do nível do meio suporte, enquanto que o pH na superfície da água deve estar entre 5,5 e 7,5 (PRICE & PROBERT, 1997). Porém a bibliografia também indica uma faixa mais ampla para o pH ótimo entre 4 a 10 (REED *et al.*, 1995).

Nas Figuras 3.1 e 3.2 estão apresentadas fotos da taboa, no período de floração.

**Figura 3.1** – Aspecto de um brejo com taboas.

Fonte: LORENZI, 2000.

Na Figura 3.2 observa-se a taboa em detalhe durante sua floração.

**Figura 3.2** – Taboa (*Typha sp*) em detalhe.

Fonte: LORENZI, 2000.

### 3.4.6 **Remoção de poluentes nos leitos cultivados**

Os componentes mais importantes do sistema que podem influenciar os processos de tratamento nos leitos são as plantas, detritos, solo e microrganismos. Suas funções e o desempenho do sistema são influenciados pela profundidade da água, temperatura, pH e concentração de oxigênio dissolvido (REED *et al.*, 1995).

Embora as plantas sejam os componentes mais óbvios dos ecossistemas dos leitos cultivados, o tratamento da água residuária é realizado por uma combinação integrada de interações biológicas, físicas e químicas entre as plantas, o substrato e a comunidade microbiana inerente (WOOD, 1995).

A retirada de impurezas orgânicas dos efluentes não deve ser atribuída somente às bactérias, mas também ao processo de adsorção, porém este processo seria interrompido imediatamente se as substâncias adsorvidas não fossem constantemente metabolizadas pelas bactérias (IMHOFF, 2002).

Na Tabela 3.10 é apresentado o resumo dos principais processos que ocorrem no tratamento da água residuária em leitos cultivados.

**Tabela 3.10** – Processos envolvidos no tratamento de efluentes em leitos cultivados.

| Processos | Funções |
|---|---|
| **Físicos** | |
| Filtração | Como a água passa através da planta e do meio suporte, partículas coloidais e outras são filtradas. Os rizomas abrem o solo para conferirem um caminho hidráulico através do meio. |
| Sedimentação | Floculação e sedimentação gravitacional de sólidos. |
| Adsorção | Adsorção de sólidos coloidais por forças moleculares entre partículas. |
| **Químicos** | |
| Precipitação | Formação e precipitação de componentes insolúveis tal como $CaPO_4$. A adição de Al, Fe ou Ca precipitará fósforo. |
| Decomposição | Oxidação, redução e irradiação de componentes menos estáveis. |
| Adsorção | Adsorção de metais pesados pelo solo. |
| **Biológicos** | |

**Tabela 3.10** – Processos envolvidos no tratamento de efluentes em leitos cultivados (Continuação).

| | |
|---|---|
| Metabolismo bacteriano | Decomposição bacteriana de componentes orgânicos e nitrificação – desnitrificação. É o principal mecanismo para remoção de DBO e N. |
| Crescimento da planta | Assimilação sazonal temporária de nutrientes e metais traço pelas plantas, que podem ser permanentemente removidas por colheita. Contudo a assimilação de nutrientes é negligenciável comparada às perdas por transformações microbianas. Consumo de água e transpiração. |
| Tempo de residência | Decaimento natural de organismos patógenos e outros. |

Fonte: Adaptado de WOOD & McATAMNEY (1996).

Os principais processos de remoção dos poluentes nos sistemas de leitos cultivados estão descritos a seguir (METCALF & EDDY, 1991; Cooper *et al.*, 1996; citado por CHERNICHARO, 2001):

**Sólidos Suspensos –** São removidos em parte por sedimentação e por filtração através da vegetação.

**Matéria orgânica –** A matéria orgânica, em suspensão ou solúvel, é removida por degradação microbiana, aeróbia e anaeróbia, amonificação, nitrificação e desnitrificação.

**Nitrogênio** – Os principais mecanismos de remoção são utilização pela planta e volatilização da amônia.

**Fósforo** – É removido principalmente por adsorção, utilização pela planta, adsorção e troca de cátions.

**Metais** – Os metais são removidos por complexação, precipitação, utilização pela planta, oxidação-redução (bioquímica), sedimentação, filtração.

**Patógenos** – São removidos por predação, morte natural, irradiação UV, excreção de antibióticos provenientes das raízes das macrófitas.

### 3.4.7 Assimilação de nutrientes

#### 3.4.7.1 Nitrogênio

No meio aquático o nitrogênio pode ser encontrado nas seguintes formas (VON SPERLING(b), 1996):

- Nitrogênio molecular, $N_2$, escapando para atmosfera;
- Nitrogênio orgânico dissolvido e em suspensão (uréia e matéria protéica);
- Amônia (livre-$NH_3$ e ionizada $NH_4^+$);
- Íon nitrito ($NO_2^-$);
- Íon nitrato ($NO_3^-$).

Todas estas formas de nitrogênio são bioquimicamente interconversíveis e são componentes do complexo ciclo de nitrogênio nos alagados.

Na Tabela 3.11 encontra-se a distribuição das espécies químicas de nitrogênio perante diferentes condições.

**Tabela 3.11** – Distribuição das espécies químicas de nitrogênio segundo diferentes condições.

| Condição | Forma predominante do nitrogênio |
|---|---|
| Água Residuária Bruta | - Nitrogênio orgânico<br>- Amônia |
| Poluição recente em um curso d'água | - Nitrogênio orgânico<br>- Amônia |
| Estágio intermediário da poluição em curso d'água | - Nitrogênio orgânico<br>- Amônia<br>- Nitrito (em menores concentrações)<br>- Nitrato |
| Poluição remota em um curso d'água | - Nitrato |
| Efluente de tratamento sem nitrificação | - Amônia |
| Efluente de tratamento com nitrificação | - Nitrato |
| Efluente de tratamento com nitrificação/desnitrificação | - Concentrações mais reduzidas de todas as formas de nitrogênio |

Fonte: Adaptado de VON SPERLING(b), (1996).

O nitrogênio está susceptível a sofrer diversas transformações nos leitos cultivados, as quais estão listadas a seguir (IMHOFF, 2002; VON SPERLING(b), 1996):

- Assimilação da amônia ($NH_4^+$) e do nitrato ($NO_3^-$) pelas plantas formando seus tecidos e células (Norg);
- Fixação biológica do gás nitrogênio ($N_2$ e $N_2O$) por bactérias autotróficas e heterotróficas e algas gerando nitrogênio orgânico (Norg).
- Amonificação – Transformação do nitrogênio orgânico (uréia e matéria protéica) em amônia (GHOSH & BHAT, 1998);
- Nitrificação – Conversão da amônia a nitrito ($NO_2^-$) e posteriormente a nitrato ($NO_3^-$);
- Desnitrificação – Conversão do nitrato ($NO_3^-$) a gás nitrogênio ($N_2$ e $N_2O$) (GHOSH & BHAT, 1998).

3.4.7.2 Fósforo

Este componente não apresenta problemas de ordem sanitária nas águas de abastecimento, porém está associado a eutrofização das águas superficiais, pelo fato de ser um nutriente essencial para o crescimento de algas, podendo em certas ocasiões conduzir à eutrofização dos corpos d'água, sendo limitado seu lançamento a 1,0mg/L de fósforo total para lagos e lagoas já eutrofizados (VON SPERLING(a), 1996). O fósforo, bem como o nitrogênio, também é usado pelos microrganismos responsáveis pela estabilização da matéria orgânica para a formação de suas células e tecidos.

Quando presente em águas residuárias, o fósforo encontra-se principalmente nas seguintes formas (VON SPERLING(a), 1996):

- **Ortofosfatos** – Diretamente disponíveis para o metabolismo biológico sem necessidade de conversões a formas mais simples, sendo apresentados nas formas $PO_4^{3-}$, $HPO_4^{2-}$ (mais comum em pH 6,5 e 7,5), $H_2PO_4^-$, $H_3PO_4$.

As principais fontes são o solo, detergentes, fertilizantes, despejos industriais e esgotos domésticos;

- **Polifosfatos** – São moléculas mais complexas com dois ou mais átomos de fósforo, se transformam em ortofosfatos por hidrólise, porém tal transformação é usualmente lenta;
- **Fósforo orgânico** – É normalmente de menor importância nos esgotos domésticos típicos, mas pode ser importante em águas residuárias industriais e lodos oriundos do tratamento de esgotos. No tratamento de esgotos e nos corpos d'água receptores o fósforo orgânico é convertido a ortofosfatos.

As principais formas de remoção de fósforo em sistemas naturais incluem o consumo pelas plantas, outros processos biológicos, adsorção e precipitação. A remoção de fósforo por aguapés e outras plantas aquáticas fica limitada às necessidades das plantas não excedendo 50-70% do fósforo presente no afluente (REED *et al.*, 1995). Já a remoção deste parâmetro por processos biológicos alcança no máximo 30% (IMHOFF, 2002).

A retirada pelas plantas pode ser significante quando a colheita da vegetação é praticada rotineiramente. Nestes casos a colheita pode representar de 20 a 30% da remoção de fósforo, porém a vegetação usada nos leitos cultivados não é considerada um fator significante na remoção de fósforo. Se não for realizada a colheita o fósforo volta para o sistema aquático devido ao decaimento natural da vegetação. As reações no solo envolvem certos elementos como a argila, os óxidos de ferro e alumínio, os componentes de cálcio presentes e o pH do solo. Solos de textura muito fina, bem como os de alto teor de argila, tendem a ter um alto potencial de adsorção, mas aumentam o tempo hidráulico de residência. A brita e a areia que possuem textura grosseira têm baixa capacidade de adsorção do fósforo, e os solos hidromórficos, que são ácidos e orgânicos, têm um elevado potencial de adsorção devido à presença de ferro e alumínio (REED *et al.*, 1995).

### 3.4.8 Pesquisas em leitos cultivados

Há poucos relatos sobre tratamento em leitos cultivados para águas residuárias do processamento de alimentos (KADLEC *et al.,* 1997). Leitos, de escoamento horizontal e vertical, foram usados com sucesso na indústria de fécula de batata (Zeeuw *et al*., 1990; citado por KADLEC *et al.,* 1997). Vários tipos de leitos foram usados para o tratamento de vários tipos de águas de processamento de carne (van Oostrom and Cooper, 1990; van Oostrom and Russel, 1992; van Oostrom, 1995; citados por KADLEC *et al.*,1997).

Os sistemas de leitos cultivados podem tratar efetivamente altos níveis de DBO, sólidos suspensos, nitrogênio, bem como níveis significantes de metais, traços orgânicos, e patógenos. Os mecanismos básicos de tratamento incluem sedimentação, precipitação química e adsorção, além de interações microbiológicas no caso de DBO e nitrogênio, bem como alguma assimilação pela vegetação (REED *et al*., 1995).

A Tabela 3.12 apresenta os resultados de desempenho de distintos sistemas norte-americanos, aproximadamente 300, numa faixa de tamanho de 40m$^2$ a 1093ha.

**Tabela 3.12 –** Desempenho de leitos cultivados no tratamento de águas residuárias em leitos cultivados nos Estados Unidos.

| Parâmetros | Efluente Final (mg/L) | % Remoção |
|---|---|---|
| **DBO** | 10,5 | 73 |
| **Sólidos Suspensos** | 15,3 | 69 |
| **Amônia – N** | 4,2 | 44 |
| **Nitrogênio Total** | 5,0 | 64 |
| **Fósforo Total** | 1,9 | 55 |

Fonte: Adaptado de Knight (1992), citado por WOOD (1995).

MANSOR (1998) fez uma avaliação durante os seis primeiros meses de funcionamento do desempenho de 4 leitos cultivados de fluxo subsuperficial,

construídos em alvenaria de blocos, de área útil de 4,24m$^2$ e altura de 0,60m, no tratamento secundário de águas residuárias com características de esgoto doméstico, oriundas de gradeamento e lagoa primária (tratamento primário), do Centro Pluridisciplinar de Pesquisas Químicas, Biológicas e Agrícolas – CPQBA/UNICAMP. A autora concluiu que os leitos apresentaram bom desempenho na remoção de nutrientes e redução de DQO. Dois leitos foram cultivados com *Typha dominguensis Pers. x Typha latifólia L.*, porém um foi preenchido com brita nº 3 (55-90mm) e outro com brita nº4 (90-135mm). Um outro leito foi cultivado com *Eleocharis fistulosa* e preenchido com brita nº 3 e um leito foi preenchido somente com brita nº 3. A taxa orgânica média aplicada foi de 142,6kg DQO/ha.dia e o tempo de detenção de 2,5 dias. O leito preenchido com brita nº 3 e *Typha dominguensis Pers. x Typha latifólia L.* forneceu os melhores resultados médios mensais, sendo 82,7% a máxima redução da DQO e 86,4% a máxima remoção de $PO_4^{3-}$. O leito preenchido com *Eleocharis fistulosa* forneceu a máxima redução de NTK (Nitrogênio Total Kjeldahl), 91,8%.

Num estudo realizado por VALENTIM (1999) foi feita uma avaliação do desempenho de leitos cultivados com macrófitas de fluxo subsuperficial no tratamento de efluente de tanque séptico modificado durante 4,5 meses. Foram construídos três leitos de forma quadrada e três de forma retangular, dispostos em paralelo com o mesmo tipo de brita (nº 2 – 55 a 90mm), cultivados com duas espécies de macrófitas emergentes (*Typha sp* ou *Eleocharis* sp). A área de cada leito foi de 4m$^2$ e a altura de 0,70m; um leito quadrado e um retangular permaneceram sem cultivo para controle. Os resultados obtidos demonstraram que os leitos que apresentaram os maiores valores de remoção foram o leito quadrado cultivado com *Eleocharis sp*, com redução de sólidos suspensos entre 91 e 97%, coliformes totais entre 59 e 96%, nitrogênio total Kjeldahl entre 35 e 90% e fósforo total de 41 a 65%; o controle retangular, com redução de turbidez de 87 a 98% e nitrogênio amoniacal de 35 a 78%; o retangular cultivado com *Eleocharis sp*, com redução de DQO entre 70 e 97% e *E. Coli* entre 94 e 97%; e o quadrado cultivado com *Typha sp*, com redução de nitrato de 71 a 83%. O autor também concluiu que não houve diferenças significativas nos níveis de remoção

entre as formas quadrada e retangular. O resíduo líquido estudado era uma mistura de dejetos domésticos e sanitários com águas residuárias de lavagem de vidraria dos laboratórios e de equipamentos da oficina mecânica da Faculdade de Engenharia Agrícola (FEAGRI/ UNICAMP).

Uma pesquisa em um sistema integrado para tratamento de água residuária do processamento de batata durante dois anos, onde o sistema era composto de um LCFS, um LCFV e uma lagoa de estocagem (facultativa) forneceu os seguintes resultados para um afluente com 2800mg/L de DQO, 150mg/L de NT e 350 mg/L de SST (BURGOON *et al*., 1999):

- Durante o verão (18ºC) – Remoção de 95% de DQO (LCFS e LCFV), 85% de $NH_3$-N.
- Durante o inverno (3ºC) – Remoção de 75% de DQO, 30-50% de $NH_3$-N.

Os seguintes resultados foram encontrados para um LCFSS para tratamento de água residuária do processamento de alimentos em operação desde 1991 com carga hidráulica de 5$m^3$/dia, DQO afluente de 3674mg/L, $DBO_5$ afluente de 962mg/L: remoção de 92% de DQO, 89% de DBO, 96% de ortofosfato, 86% de amônia, 65% de nitrato e 99% de coliformes (VRHOVSEK *et al.,* 1996).

# 4 MATERIAL E MÉTODOS

## 4.1 PERÍODO DE REALIZAÇÃO DO EXPERIMENTO

A construção e montagem dos leitos tiveram início em julho de 2003, porém devido a várias dificuldades em sua execução somente foi concluída no início do mês de novembro do mesmo ano. O plantio de mudas de taboa (*Typha sp*) foi realizado no dia 30/10/2003 e até o início do experimento o sistema foi alimentado com água a uma baixa vazão. O experimento teve duração de três meses, contados a partir do (do início da alimentação dos leitos com a água residuária do processamento de doce de banana) plantio de mudas de taboa (*Typha sp*) em 30/10/03.

A alimentação dos leitos, em fluxo contínuo a partir da caixa de armazenamento de água residuária, foi iniciada em 07/11/03. Neste período de sete dias, a partir do plantio, o sistema foi alimentado continuamente com água da rede pública a uma baixa vazão.

As primeiras amostras foram coletadas em 11/11/03, 4º dia após o início de funcionamento do sistema. A partir de então a coleta foi realizada semanalmente às terças-feiras na parte da manhã até a última coleta em 20/01/04. No período de 19/12/03 a 04/01/04 não foram realizadas coletas devido ao recesso na Universidade. Foram realizadas 13 coletas durante todo o período experimental conforme observado no Quadro 4.1.

**Quadro 4.1** – Datas das coletas das amostras.

| Mês | Datas de coleta |
|---|---|
| Novembro | 11, 18 e 25. |
| Dezembro | 02, 09, e 16. |
| Janeiro | 06, 13, 20, 28. |
| Fevereiro | 03, 10 e 17, |

## 4.2 LOCAL DO EXPERIMENTO

O experimento foi realizado na área de extensão do Laboratório de Tecnologia Apropriada (LTA) da Faculdade de Engenharia de Alimentos da Universidade Estadual de Campinas (FEA/UNICAMP), localizada na Cidade Universitária Zeferino Vaz, distrito de Barão Geraldo da cidade de Campinas (SP).

## 4.3 ÁGUA RESIDUÁRIA ESTUDADA

A água residuária utilizada neste estudo foi produzida no Laboratório de Tecnologia Apropriada (DEA/FEA/UNICAMP) de acordo com as características de águas residuárias de fábricas de doce de banana, determinadas na primeira etapa desta pesquisa.

### 4.3.1 Caracterização da água residuária de fábricas de doce de banana

A caracterização da água residuária estudada constou de três etapas, descritas a seguir:

- Na primeira etapa contactou-se fábricas de doce de banana com objetivo de averiguar o interesse das mesmas na caracterização de suas águas residuárias;
- Na segunda etapa foram feitas visitas às fábricas, com objetivo de coletar amostras da água residuária para posterior análise;
- A terceira etapa contemplou a análise das amostras coletadas. As análises foram realizadas de acordo com os métodos descritos no item 4.5 no Laboratório de Saneamento da Faculdade de Engenharia Civil (DSA/FEC/UNICAMP).

4.3.1.1 Contato com as fábricas pesquisadas

As fábricas foram selecionadas de acordo com sua proximidade de Campinas e com o tipo de processamento de banana utilizado. Foram escolhidas fábricas que processassem doce de banana em tachos de cozimento. O contato com as fábricas foi feito por telefone, inicialmente, e por carta, posteriormente. Um total de quatro fábricas manifestou interesse pela visita, sendo este o número de fábricas visitadas.

4.3.1.2 Caracterização do processamento do doce das fábricas visitadas

O processo de fabricação do doce de banana nas fábricas visitadas era realizado conforme Figura 4.1 a seguir.

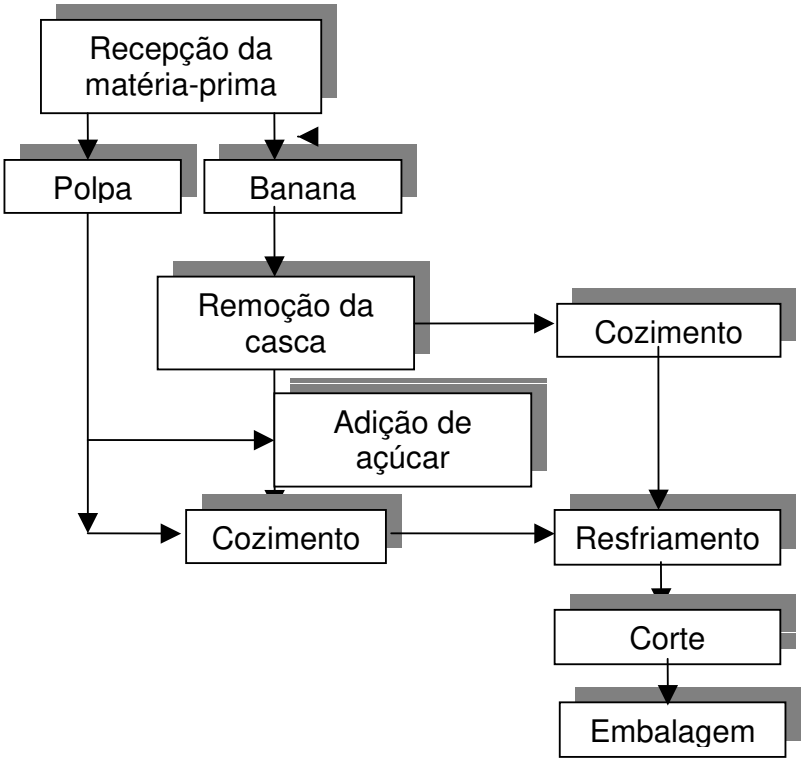



**Figura 4.1** – Fluxograma do processo de fabricação do doce de banana.

Após a fabricação do doce, no final do expediente ou no início do expediente do dia seguinte era realizada a lavagem dos tachos utilizados para cozimento do doce.

4.3.1.3 Coleta de amostras da água residuária das fábricas

Durante as visitas às quatro fábricas de doce de banana foi possível perceber que a maior fonte de efluente líquido nestas fábricas era a água de lavagem dos tachos por dois motivos principais:

- Segundo informações dos funcionários das fábricas esta etapa do processo foi identificada como potencialmente geradora de água residuária, considerando apenas as respectivas plantas de processamento;
- Impossibilidade de realizar a coleta em outros pontos (uma rede coletora) das plantas de processamento.

A coleta de amostra foi concentrada na água de lavagem dos tachos. Foi coletada a água das diversas etapas da lavagem dos tachos. Inicialmente, nas visitas às três primeiras fábricas, foram coletadas quantidades de água iguais de cada etapa da lavagem. Somente na quarta fábrica foram coletadas quantidades proporcionais à quantidade de água usada em cada etapa da lavagem. A água coletada de cada etapa de lavagem do tacho foi homogeneizada antes e após a composição da amostra em liquidificador de uso doméstico. Sendo que foi coletada uma amostra da água de lavagem dos tachos por fábrica visitada.

4.3.1.4 Análises das amostras da água residuária das fábricas

Até o momento de realização das análises das amostras as mesmas foram mantidas sob refrigeração, inclusive durante o transporte. A preservação das amostras foi feita de acordo com a Tabela 4.1 (APHA, 1998).

**Tabela 4.1** – Orientações para coleta e estocagem de amostras.

| Parâmetros | Quantidade de amostra (mL) | Recipiente | Preservação | Estocagem máxima recomendada |
|---|---|---|---|---|
| **DQO** | 100 | P, V | Analisar o quanto antes ou adicionar $H_2SO_4$ até pH<2 e refrigerar. | 7d |
| **DBO** | 1000 | P, V | Refrigerada. | 6h |
| **NTK** | 500 | P, V | Analisar o quanto antes ou adicionar $H_2SO_4$ até pH<2 e refrigerar. | 7d |
| **pH** | 50 | P, V | Analisar imediatamente. | 0,25h |
| **Fósforo** | 100 | V* | Adicionar $H_2SO_4$ até pH<2 e refrigerar. | **28d** |
| **Sólidos:** | | | | |
| ***Totais*** | 200 | P, V | Refrigerada. | 7d |
| ***Suspensos*** | 200 | P, V | Refrigerada. | 7d |
| ***Sedimentáveis*** | 1000 | P, V | Refrigerada. | 7d |

* O recipiente deve ser lavado com HCl 1:1. P – Plástico. V – Vidro.
Fonte: Adaptado de APHA (1998).

## 4.4 DESCRIÇÃO DO EXPERIMENTO

### 4.4.1 Projeto e montagem dos leitos cultivados

Para montagem dos leitos foram caixas d'água de fibrocimento, disponíveis no mercado. Esta medida foi tomada com objetivo de não alterar o cronograma do projeto e de testar estes tipos de caixas. As caixas de fibrocimento adotadas na construção dos leitos possuem as seguintes dimensões e características:

- **Leitos 1, 2** – Foram utilizadas duas caixas retangulares em série. Cada caixa com 90cm de comprimento, 76cm de largura e 60cm de altura. Estes leitos foram cultivados com taboa.
- **Leito 3** – Foi utilizada uma caixa retangular com as mesmas dimensões das caixas utilizadas nos leitos 1 e 2. Este leito foi utilizado apenas como controle, não sendo cultivado com taboa.
- **Leito 4** – Foi utilizada uma caixa cilíndrica para montagem deste leito. Esta caixa possuía diferentes dimensões ao longo de sua altura. A parte inferior desta

caixa, até 12cm de altura, possuía 103,5cm de diâmetro, enquanto que a parte superior, com 42cm de altura, possuía 96cm de diâmetro.

A Tabela 4.2 apresenta as especificações dos leitos estudados na presente pesquisa.

**Tabela 4.2 –** Especificações dos leitos cultivados estudados.

| Item | Leitos retangulares (L1, L2 e L3) | Leito cilíndrico (L4) |
|---|---|---|
| **Área superficial ($m^2$)** | 0,6840 | 0,7238 |
| **Profundidade útil (m)** | 0,45 | 0,41 |
| **Altura da coluna d'água** | 0,45 | 0,41 |
| **Especificação da brita** | nº 2 | nº 2 |
| **Volume útil* ($m^3$)** | 0,1539 | 0,1539 |

*Calculado a partir da porosidade da brita (~50%).

No Quadro 4.2 estão apresentados os resultados dos cálculos dos parâmetros de projeto para os leitos montados em caixas de fibrocimento para os três meses de experimento.

**Quadro 4.2 –** Parâmetros de projeto adotados para os leitos cultivados estudados nos três meses de experimento.

| **Parâmetro** | | **Período** | | |
|---|---|---|---|---|
| | | **Novembro** | **Dezembro** | **Janeiro** |
| Tempo de detenção (dias) | | 1 | 3 | |
| Área por vazão (ha/m$^3$.d) | Caixas retangulares | 0,0004 | 0,0013 | |
| | Caixa cilíndrica | 0,0005 | 0,0015 | |
| Razão comprimento: largura | | Retangular = 0,9 : 0,76 | | |
| Carga hidráulica | Caixas retangulares | 225 | 75 | |
| | Caixas cilíndricas | 213 | 71 | |

* Para estimativa da DBO máxima foi adotado.

Para determinação do volume útil ($V_{útil}$), tempo de detenção hidráulico (TDH), área por vazão e carga hidráulica (CH) foram utilizadas as equações 4.1, 4.2, 4.3 e 4.4 respectivamente:

$$V_{útil} = Área_{leito} * \Pr of_{leito} * Poros_{brita} \qquad \text{Eq 4.1}$$

$$TD = \frac{V_{útil}}{Q_{leito}} \qquad \text{Eq 4.2}$$

$$\text{Área por vazão} = \frac{Área_{leito}}{Q_{leito}} \qquad \text{Eq 4.3}$$

$$CH = \frac{Q(\frac{m^3}{dia}) * 1x10^9 \frac{mm^3}{m^3}}{A(m^2) * 1x10^6 \frac{mm^2}{m^2}} \quad \text{Eq 4.4}$$

### 4.4.2 Esquema do sistema de tratamento por leitos cultivados

Na Figura 4.2 está representado um esquema simplificado dos leitos de fluxo subsuperficial cultivados com taboa. Neste esquema e na Figura 4.3 observa-se que o sistema de leitos é composto por dois leitos, cultivados com taboa (*Typha sp*), retangulares em série (L1 e L2), no qual a saída do primeiro leito corresponde à entrada do segundo; um leito retangular preenchido com brita para controle (L3) e outro leito cultivado com taboa (*Typha sp*) de forma cilíndrica (L4). Todos os leitos possuem brita como meio suporte. As entradas dos leitos são independentes e provenientes da mesma fonte, garantindo que o afluente de todos os leitos tenha as mesmas características. As tubulações de entrada do afluente no sistema de leitos foram feitas com canos de PVC de ¾", que distribuíam o afluente na parte superior central dos leitos. Já na saída dos leitos foram utilizados canos de ½", sendo que nas caixas retangulares foram utilizados dois canos eqüidistantes parte inferior e no leito cilíndrico foi utilizado apenas um cano na parte inferior. Os leitos L1 e L2 foram montados com um desnível de 10cm entre a saída de L1 e a entrada de L2.

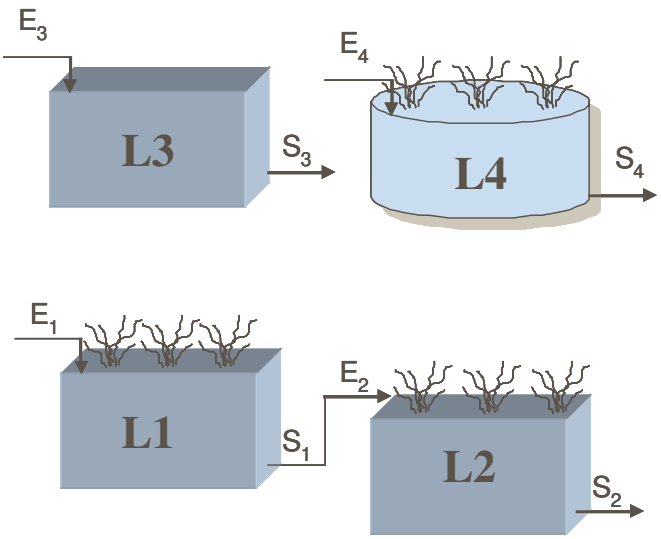



**Figura 4.2** – Esquema simplificado dos leitos cultivados.

Na Figura 4.3 estão apresentados, em perspectiva lateral, os leitos cultivados estudados, montados em caixas de fibrocimento. A posição dos leitos nesta figura é a mesma do esquema apresentado na Figura 4.2.

**Figura 4**.3 – Vista lateral dos leitos cultivados estudados.

### 4.4.3 Origem e plantio das macrófitas

As macrófitas utilizadas no experimento foram coletadas no sistema de leitos cultivados do campo experimental da Faculdade de Engenharia Agrícola da UNICAMP (FEAGRI) e mantidas com água até o plantio nos leitos cultivados 1, 2 e 4 em 30/10/2003. Foram plantadas 12 mudas em cada leito retangular (1 e 2) e 13 mudas no leito cilíndrico, correspondendo a 18 mudas por metro quadrado. O leito 3, de forma retangular, permaneceu apenas com meio suporte (brita nº 2) servindo como controle para avaliação da eficiência das plantas.

### 4.4.4 Preparo da água residuária

A água residuária estudada foi preparada de acordo com as características da água residuária do processamento de doce de banana, conhecidas a partir da etapa de caracterização descrita no item 4.3.1. O doce, preparado na planta piloto do DTA/ FEA como parte de um outro trabalho de pesquisa do Laboratório de Tecnologia Apropriada (DEA/FEA), era pesado em balança portátil Ohaus LS2000 e homogeneizado em liquidificador de uso doméstico com adição de água. Em seguida a água residuária era produzida em tanques de 500L (Figura 4.4) conforme descrição contida no Quadro 4.3 e de acordo com a faixa de concentração encontrada no levantamento feito na etapa de caracterização. Foi determinada a umidade do doce para indicar a quantidade a ser usada para obtenção da concentração desejada.

**Figura** 4.4 **–** Tanques de preparo da água residuária.

O Quadro 4.3 apresenta algumas informações sobre o preparo da água residuária, bem como datas em que a mesma foi produzida, quantidade preparada e características do doce utilizado.

**Quadro** 4.3 – Informações sobre o preparo da água residuária.

| Data | Quantidade de doce (kg) | Quantidade de água residuária (L) |
|---|---|---|
| 05/11/03 | 5,0 | 1.000 |
| 07/11/03 | 2,5 | 500 |
| 10/11/03 | 2,5 | 500 |
| 12/11/03 | 2,5 | 500 |
| 13/11/03 | 2,5 | 500 |
| 14/11/03 | 2,5 | 500 |
| 15/11/03 | 5,0 | 1.000 |
| 17/11/03 | 2,5 | 500 |
| 18/11/03 | 2,5 | 500 |
| 19/11/03 | 2,5 | 500 |
| 20/11/03 | 2,5 | 500 |

**Quadro** 4.3 – Informações sobre o preparo da água residuária (Continuação).

| Data | Quantidade de doce (kg) | Quantidade de água residuária (L) |
|---|---|---|
| 21/11/03 | 4,5 | 1.500 |
| 25/11/03 | 1,0 | 500 |
| 26/11/03 | 1.5 | 500 |
| 01/12/03* | 0,6 | 500 |
| 05/12/03 | 0,6 | 500 |
| 08/12/03 | 0,6 | 500 |
| 12/12/03 | 0,6 | 500 |
| 15/12/03 | 0,6 | 500 |
| 19/12/03 | 1,2 | 1.000 |
| 04/01/04 | 0,3 | 500 |
| 09/01/04 | 0,6 | 500 |
| 11/01/04 | 0,6 | 500 |
| 13/01/04 | 0,6 | 500 |
| 15/01/04 | 0,6 | 500 |
| 19/01/04 | 0,6 | 500 |
| 23/01/04 | 0,6 | 500 |
| 30/01/04 | 0,6 | 500 |
| 06/02/04 | 0,6 | 500 |
| 13/02/04 | 0,6 | 500 |

* A partir desta data a água residuária foi preparada a partir da umidade do doce, determinada no dia 27/11/03, objetivando concentração de sólidos igual a 1000mg/L.

### 4.4.5 Alimentação dos leitos

Inicialmente foram utilizadas válvulas gaveta para fixar a vazão de alimentação dos leitos, porém, estas não foram muito eficientes para baixas vazões. Então, as válvulas de alimentação dos leitos foram trocadas para válvulas do tipo agulha no dia 07/12/03 e a alimentação dos leitos passou a ser feita com estas válvulas, que tinham como função controlar a vazão de entrada, porém este dispositivo também não foi muito eficiente no controle da vazão, permitindo variação da mesma.

As vazões de entrada foram monitoradas ao longo dos dias de funcionamento do sistema de leitos, sendo medidas duas vezes ao dia, inclusive no dia de coleta de amostras. Para medida dos valores das vazões de alimentação dos leitos foram utilizados proveta e cronômetro. Sabe-se que baixas vazões de entrada nestes tipos de sistema são de difícil controle permitindo variações. Em pesquisa realizada na FEAGRI/ UNICAMP utilizando-se um divisor

de vazão as variações médias diárias ficaram entre 15-30% alcançando um máximo de 40% (VALENTIM, 1999).

### 4.4.6 Operação do sistema de tratamento

Uma etapa de adaptação seria necessária, ou seja, criar condições apropriadas para o funcionamento do processo, propiciando o aparecimento da população microbiana formadora da camada de lodo biológico, responsável pelo processo biológico de degradação (NOUR, 1991). Porém, devido à escassez de tempo, foi avaliada apenas a partida do leito cultivado, ou seja, os três primeiros meses de funcionamento. A primeira coleta de amostra foi realizada quatro dias após o início do funcionamento do sistema.

O ideal seria iniciar o experimento com uma vazão menor, correspondente a um tempo de detenção (TD) maior, para devida estabilização da comunidade microbiana responsável pelo tratamento biológico no sistema e para que o mesmo entrasse em regime. Porém, devido à inflexibilidade da válvula inicialmente utilizada o sistema foi alimentado da seguinte forma:

- No primeiro mês o sistema foi alimentado a uma vazão de entrada de 153,9L/dia, equivalente a 1 dia de tempo de detenção (TD).
- A partir do segundo mês o sistema foi alimentado com uma vazão de 51,3L/dia, equivalente a um tempo de detenção (TD) de 3 dias.

Os leitos foram alimentados em fluxo contínuo, durante vinte e quatro horas por dia durante todo o período experimental, a partir de escoamento gravitacional da caixa de armazenamento da água resíduária para as caixas de distribuição e em seguida para os leitos. A regulagem da vazão era feita diariamente através das válvulas agulha em cada saída das caixas de distribuição.

As caixas utilizadas para armazenamento da água residuária eram de polietileno com capacidade para 500L, conforme Figura 4.5, e as caixas utilizadas para distribuição da água residuária eram de fibrocimento com capacidade para 50L, conforme Figura 4.6. Ambas eram mantidas tampadas para evitar entupimento da tubulação por insetos, folhas e evitar transbordamento quando da ocorrência de chuvas, além da proliferação de mosquitos.

**Figura 4.5 –** Tanques de armazenamento da água residuária.

**Figura 4.6 –** Caixas de distribuição da água residuária.

No dia 02 de dezembro de 2003 foi realizada a última coleta do primeiro ensaio. Então no dia seguinte, 03 de dezembro foi alterada a vazão de entrada do sistema para 51,3L/dia, equivalente a um tempo de detenção de 3 dias, como pode ser observado na Tabela 4.3. Observa-se, também nesta tabela, que foram estudados apenas os três primeiros meses de funcionamento do sistema, caracterizando um estudo da partida do sistema de leitos cultivados.

**Tabela 4.3 –** Condições hidráulicas para a operação dos leitos.

| Meses | Vazão (L/dia) | Tempo de detenção (dia) |
|---|---|---|
| **Novembro** | 153,9 | 1 |
| **Dezembro** | 51,3 | 3 |
| **Janeiro** | 51,3 | 3 |

## 4.5 MEDIDAS ANALÍTICAS

As medidas analíticas realizadas neste experimento, bem como métodos e equipamentos utilizados, estão descritos a seguir. Além disso, foram coletados no Centro de Ensino e Pesquisa em Agricultura da UNICAMP (CEPAGRI) dados de precipitação.

### 4.5.1 pH

O princípio básico da medida do pH é a determinação da atividade de íons hidrogênio por medida potenciométrica. É um dos testes químicos mais importantes e freqüentemente usados em águas (APHA, 1995).

Foi utilizado um pHmetro TERMO ORION/ Modelo 410 para determinação deste parâmetro conforme método 4500 $H^+$ (APHA, 1998).

### 4.5.2 Série de Sólidos

4.5.2.1 Sólidos Totais (ST)

É o resíduo que permanece após evaporação e secagem de uma amostra a temperatura definida. Os sólidos totais incluem os sólidos suspensos totais e os sólidos totais dissolvidos (APHA, 1995).

Esta determinação era feita levando-se uma quantidade conhecida de amostra em cápsulas de porcelana a estufa a 103-105ºC por 1 hora. Posteriormente as amostras eram pesadas e a diferença entre o peso inicial das cápsulas e o peso final (pós-estufa) fornecia a quantidade de sólidos totais conforme método 2540 B (APHA, 1998).

*4.5.2.1.1 Sólidos Totais Fixos (STF)*

Eram determinados a partir da determinação de ST. Após a estufa as cápsulas de porcelana eram levadas a mufla a 550ºC durante 1 hora. O aumento no peso das cápsulas representava a quantidade de sólidos suspensos fixos conforme método 2540 E (APHA, 1998).

*4.5.2.1.2 Sólidos Totais Voláteis (STV)*

Eram determinados por diferença entre a quantidade de sólidos suspensos totais e suspensos fixos conforme método 2540 E (APHA, 1998).

4.5.2.2 Sólidos Suspensos Totais (SST)

É a porção de sólidos retida por um filtro. Uma amostra bem misturada era filtrada através de um micro filtro de fibra de vidro da marca Schleicher & Schuell GF 52-C com 1,2µm de porosidade com peso padrão e o resíduo retido no filtro era seco em estufa FANEM/ Modelo 315SE a uma temperatura de 103 – 105ºC durante 1 hora. O aumento no peso dos filtros representava os sólidos suspensos

totais. As amostras permaneciam em dessecador para esfriar e posteriormente eram pesadas em balança METTLER, Modelo H20T, com cinco casas decimais, conforme método 2540 D (APHA, 1998).

*4.5.2.2.1 Sólidos Suspensos Fixos (SSF)*

Eram encontrados a partir da determinação de SST. Após a estufa os filtros de fibra de vidro eram levados a mufla FORID/ Modelo M.E.L.F a 550ºC durante 1 hora. O aumento no peso dos filtros representava a quantidade de sólidos suspensos fixos conforme método 2540 E (APHA, 1998).

*4.5.2.2.2 Sólidos Suspensos Voláteis (SSV)*

Eram determinados por diferença entre a quantidade de sólidos suspensos totais e suspensos fixos conforme método 2540 E (APHA, 1998).

4.5.2.3 Sólidos Sedimentáveis (SSed)

É o termo aplicado ao material sedimentado de uma suspensão dentro de um período definido (APHA, 1995). Foi utilizado o cone Imhoff para determinação deste parâmetro na etapa de caracterização da água residuária das fábricas de doce de banana conforme método 2540 F (APHA, 1998).

### 4.5.3 Demanda Química de Oxigênio (DQO)

É usada como uma medida do oxigênio equivalente ao conteúdo de uma amostra que é susceptível à oxidação por um oxidante químico forte (APHA, 1995; MANSOR, 1998). A maioria dos tipos de matéria orgânica é oxidada por uma mistura em ebulição de ácidos crômico e sulfúrico. Uma amostra é refluxada por 2h em uma solução fortemente ácida com um excesso conhecido de dicromato de potássio ($K_2Cr_2O_7$). Depois da digestão o $K_2Cr_2O_7$ remanescente não reduzido é titulado com sulfato de amônio ferroso para determinar a quantidade de $K_2Cr_2O_7$

consumida e a matéria orgânica oxidável é calculada em termos de oxigênio equivalente (APHA, 1995).

A determinação deste parâmetro foi realizada de acordo com método 5220 D (APHA, 1998).

#### 4.5.3.1 DQO total

Corresponde a DQO suspensa e dissolvida da amostra. A determinação deste parâmetro foi realizada de acordo com método 5220 D (APHA, 1998).

#### 4.5.3.2 DQO filtrada

Corresponde apenas a DQO dissolvida, pois antes da determinação deste parâmetro a amostra bem misturada era filtrada através de um micro filtro de fibra de vidro da marca Schleicher & Schuell GF 52-C com 1,2µm de porosidade. A determinação deste parâmetro foi realizada de acordo com método 5220 D (APHA, 1998).

### 4.5.4 Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO)

É a quantidade de oxigênio necessária para que microrganismos aeróbios mineralizem a matéria orgânica carbonada de uma amostra, sob determinadas condições (APHA, 1995; BRAILE & CAVALCANTI, 1993). Este teste tem grande utilidade na determinação do grau de poluição de curso de água, no estudo de cargas poluidoras e na avaliação da eficiência dos sistemas de tratamento e aplica-se a amostras de efluentes, águas residuárias, despejos industriais, águas de rios, lagos e represas (BRAILE & CAVALCANTI, 1993).

O método consiste em preencher um recipiente com amostra até o transbordamento, tomando cuidado para não deixar bolhas de ar. Em seguida este frasco é incubado a 20 $\pm$ 1ºC por cinco dias. Mede-se o oxigênio dissolvido (OD) antes e após a incubação, e estima-se a DBO com base nos valores de OD conforme método 5210 B (APHA, 1998).

### 4.5.5 Fósforo total

Essa análise é necessária para caracterização de águas bem como para avaliar a necessidade de um tratamento específico. A análise de fósforo foi feita pelo método do ácido ascórbico e posterior determinação colorimétrica em espectrofotômetro da HACH/ Modelo DR/ 4000U a 880nm conforme método 4500 P E (APHA, 1998).

### 4.5.6 Série de Nitrogênio

Toda a série de Nitrogênio foi determinada pelo FIA (Flow Injection Analysis). Esta técnica surgiu em 1995 e seu conceito está baseado na injeção ou inserção de uma amostra líquida em um fluido carregador não segmentado por bolhas de ar (FARIA, 1992).

#### 4.5.6.1 Nitrogênio Total Kjeldahl (NTK)

Este parâmetro é o somatório de nitrogênio orgânico e amoniacal contido em uma determinada amostra.

Apenas durante a etapa de caracterização da água residuária das fábricas de doce de banana este parâmetro foi determinado pelos métodos 4500 Norg B e 4500 $NH_3$ C (APHA, 1992).

#### 4.5.6.2 Nitrogênio Orgânico (N-Norg)

A quantidade de N-Norg presente em uma amostra é dada pela diferença entre o conteúdo de NTK e o conteúdo de nitrogênio amoniacal.

#### 4.5.6.3 Nitrogênio amoniacal (N-$NH_3$)

Amônia está naturalmente presente em águas residuárias e águas superficiais. É amplamente produzida por amonificação de componentes contendo nitrogênio orgânico e por hidrólise da uréia.

4.5.6.4 Nitrato e nitrito ($N\text{-}NO_2^-$ + $N\text{-}NO_3^-$)

São gerados através do processo de nitrificação da amônia em águas residuárias.

### 4.5.7 Ocorrência de chuvas

Foram obtidos, através de um *site* do governo, dados de precipitação potencial da estação da estação de Campinas – FEAGRI (UNICAMP), fornecidos pelo Centro de Ensino e Pesquisa em Agricultura da UNICAMP (CEPAGRI), para verificação da influência deste parâmetro no desempenho do sistema. Os dados obtidos foram relativos ao período de realização do experimento, novembro de 2003 a janeiro de 2004.

### 4.5.8 Umidade do doce utilizado para produzir a água residuária

Para determinação da umidade no doce de banana, uma quantidade de amostra foi colocada em cadinhos de alumínio e este conjunto foi levado à estufa FANEM/ Modelo 320 SE com circulação mecânica de ar a 70ºC durante 24 horas. As amostras foram pesadas em balança analítica digital Bel Engineering/ Modelo Bel Mark 500 com precisão de três casas decimais.

# 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados aqui apresentados refletem a partida do sistema de leitos cultivados, equivalendo aos três primeiros meses de funcionamento.

## 5.1 CARACTERIZAÇÃO DA ÁGUA RESIDUÁRIA

A caracterização da água residuária de quatro fábricas de doce de banana localizadas no Estado de São Paulo forneceu os resultados apresentados na Tabela 5.1.

A Tabela 5.1 apresenta os resultados da etapa de caracterização da água residuária das fábricas de doce de banana visitadas.

**Tabela 5.1 –** Caracterização da água residuária do processamento de doce de banana de diferentes fábricas.

| Parâmetros | Fábrica 1 | Fábrica 2 | Fábrica 3 | Fábrica 4 |
|---|---|---|---|---|
| **pH** | 5,2 | 12,4 | 4,6 | 4,61 |
| **DQO (mg/l)** | 4.473 | 50.000 | 57.416 | 196.049 |
| **NTK (mg/l)** | 60 | 65 | 41 | 2.026 |
| **Fósforo (mg/L)** | 8 | 0,07 | 45 | 421 |
| **SSed (mL/l)** | 26 | 500 | 300 | 920 |
| **ST (mg/l)** | 4.618 | 94.807 | 45.506 | 143.226 |
| **STF (mg/l)** | 112 | 27 | 655 | 4.981 |
| **STV (mg/l)** | 4.506 | 94.789 | 44.851 | 138.245 |
| **SST (mg/l)** | 428 | 15.747 | 2.384 | 39.390 |
| **SSF (mg/l)** | 8 | 4.797 | 37 | 966 |
| **SSV (mg/l)** | 420 | 10.590 | 2.347 | 38.424 |
| **DBO (mg/l)** | | | | |
| ***Total (mg/l)*** | --- | --- | --- | 75.625 |
| ***Filtrada (mg/l)*** | --- | --- | --- | 18.806 |

Os resultados apresentados na Tabela 5.1 permitiram extrair as seguintes informações:

- O pH encontrado na etapa de caracterização para as quatro fábricas investigadas variou entre 4,6 e 12,4, sendo que este último valor foi encontrado para fábrica que utiliza soda cáustica no processo de lavagem dos tachos. Estes dados estão coerentes com a bibliografia que destaca que os despejos da industrialização de frutas e vegetais podem ser fortemente ácidos ou alcalinos (BRAILE & CAVALCANTI, 1993).
- A DQO total da água residuária das fábricas estudadas variou entre 4.473 e 196.049mg/L, este último valor foi encontrado em fábrica que utilizou menor quantidade de água na lavagem do tacho.
- As fábricas pesquisadas continham entre 41 e 65mg/L de NTK na água de lavagem. A Fábrica 4 apresentou um valor muito superior as demais para este parâmetro, o que pode ter ocorrido devido a eventual erro na determinação colorimétrica utilizada, ocasionado pela grande quantidade de matéria orgânica presente na amostra, gerando viscosidade elevada e cor intensa da água de lavagem do tacho desta fábrica causando interferência positiva na determinação deste parâmetro.
- A Fábrica 2 apresentou pequena quantidade de Fósforo Total devido ao fato de utilizar soda cáustica, ao invés de detergente, na lavagem do tacho. Já a Fábrica 4, embora não tenha utilizado detergente na lavagem do tacho apresentou uma alta concentração deste parâmetro, o que também pode ter ocorrido devido a eventual erro na determinação colorimétrica ocasionado pela grande quantidade de matéria orgânica presente na amostra, que também pode ter gerado interferência positiva na determinação.
- Todas as fábricas apresentaram grande quantidade de sólidos em todas as suas formas. A quantidade de sólidos sedimentáveis (SSed) variou entre 26 e 920mL/L.

A quantidade de sólidos totais (ST) encontrada na etapa de caracterização apresentou altos valores, na faixa de 4.618 a 143.226mg/L.

A quantidade de sólidos totais fixos (STF) encontrada na água residuária de todas as fábricas apresentou valores menores em relação à quantidade de sólidos totais voláteis (STV), o que é um indício de alta quantidade de matéria orgânica.

A quantidade de sólidos suspensos totais (SST) encontrada na etapa de caracterização também apresentou altos valores, na faixa de 428 a 39.390mg/L.

A quantidade de sólidos suspensos fixos (SSF) apresentou valores menores em relação aos sólidos suspensos voláteis (SSV), o que também sugere uma alta quantidade de matéria orgânica.

O fato de terem sido encontrados baixos valores para os sólidos fixos, suspensos e totais, é um indício de alta quantidade de matéria orgânica, porém não é uma garantia já que pode ocorrer volatilização de alguns sais minerais na determinação deste parâmetro (APHA, 1995).

A quantidade de sólidos encontrada (sedimentáveis, totais e suspensos) nas águas residuárias das diferentes fábricas variou em função da quantidade de água utilizada pelas mesmas. Os menores valores para estes parâmetros foram encontrados nas fábricas que utilizavam maior quantidade de água no processo de lavagem dos tachos enquanto que maiores valores foram encontrados quando a quantidade de água utilizada pela fábrica era menor.

- A demanda bioquímica de oxigênio (DBO) só foi determinada para a Fábrica 4, na qual foram encontrados valores altos tanto para a DBO total (75.625mg/L) quanto para a filtrada (18.806mg/L), o que confirma os indícios de alta quantidade de matéria orgânica, o que era esperado, pois conforme a bibliografia os valores da DBO de despejos da industrialização de frutas e vegetais podem atingir 60.000mg/L (BRAILE & CAVALCANTI, 1993). A alta DBO encontrada para a Fábrica 4 pode ser estendida para as outras fábricas pois, conforme observado na Tabela 5.1, todas as fábricas apresentaram altos valores para DQO e sólidos voláteis, o que indica alta quantidade de matéria orgânica e, conseqüentemente, alta DBO. A diferença entre os valores de DQO encontrados para as fábricas é função da maior ou menor quantidade de água utilizada na lavagem do tacho.

É possível observar que a água residuária deste processamento possui alto teor de matéria orgânica, pois os resultados encontrados para sólidos totais voláteis (STV) e sólidos suspensos voláteis (SSV) apresentam altos valores (BARNES *et al.*, 1984; MANCY *et al.*, 1971; BRAILE & CAVALCANTI, 1993). Além

disso, a Fábrica 4 apresentou altos valores de DBO, o que representa grande quantidade de matéria orgânica biodegradável (VRHOVSEK *et al.,* 1996).

A água residuária das fábricas de doce de banana é composta principalmente por água de lavagem dos tachos de cozimento, contendo um alto teor de matéria orgânica, que é removida, no tratamento de efluentes, através da degradação por bactérias e outros microrganismos.

## 5.2 VAZÃO E TEMPO DE DETENÇÃO NOS LEITOS

A vazão e o tempo de detenção hidráulico (TDH) deveriam ser fixos durante o experimento, conforme previamente estabelecido, porém o sistema montado ficou sujeito à variação destes parâmetros. A variação da vazão (L/dia) ao longo do experimento pode ser observada nas Figuras 5.1, 5.2, 5.3 e 5.4 e nas Tabelas A1, A2, A3 e A4 (APÊNDICE A). Já a variação do TDH pode ser observada nas Figuras 5.5, 5.6, 5.7 e 5,8 a seguir e nas Tabelas A5, A6, A7 e A8 (APÊNDICE A). Os dados apresentados representam a média diária, tanto de vazão quanto do tempo de detenção hidráulico (TDH).

Inicialmente fixou-se o tempo de detenção hidráulico (TDH) em 1 dia, correspondente a uma vazão de 153,9L/dia. Após um mês de experimento fixou-se o tempo de detenção hidráulico (TDH) em 3 dias, correspondente a uma vazão de 51,3L/dia. Porém, conforme já foi dito, houve variação destes parâmetros.

O dispositivo usado para fixar a vazão no valor desejado, inicialmente uma válvula esfera e posteriormente uma válvula agulha, não foi muito eficiente, permitindo variação deste parâmetro.

Observa-se na Figura 5.1 que os valores de vazão afluente dos leitos começaram a apresentar maior variação a partir do dia 20/11/2003.

**Erro! Vínculo não válido.**

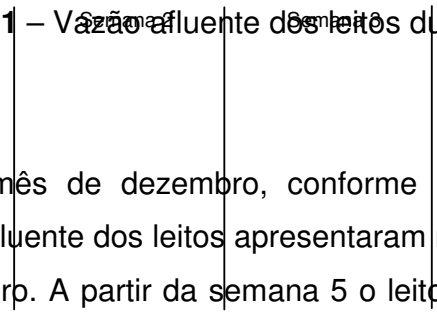
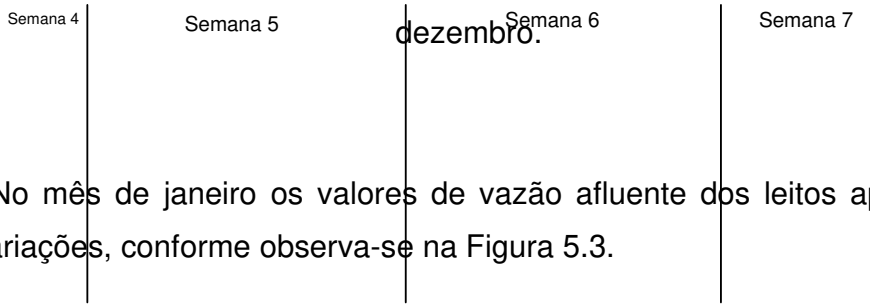



**Figura 5.1** – Vazão afluente dos leitos durante o mês de novembro.

Durante o mês de dezembro, conforme observa-se na Figura 5.2, os valores de vazão afluente dos leitos apresentaram menor variação comparando-se ao mês de novembro. A partir da semana 5 o leito começou a operar com vazão de 51,3L/dia.

**Erro! Vínculo não válido.** **Figura 5.2** – Vazão afluente dos leitos durante o mês de dezembro.




No mês de janeiro os valores de vazão afluente dos leitos apresentaram altas variações, conforme observa-se na Figura 5.3.

**Erro! Vínculo não válido.**

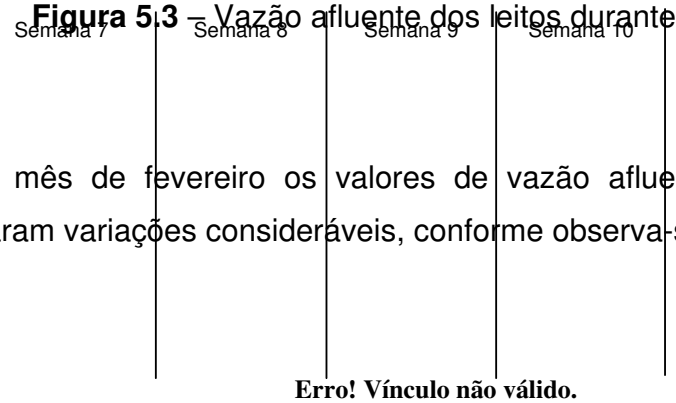



**Figura 5.3** – Vazão afluente dos leitos durante o mês de janeiro.

No mês de fevereiro os valores de vazão afluente dos leitos também apresentaram variações consideráveis, conforme observa-se na Figura 5.4.

**Erro! Vínculo não válido.**

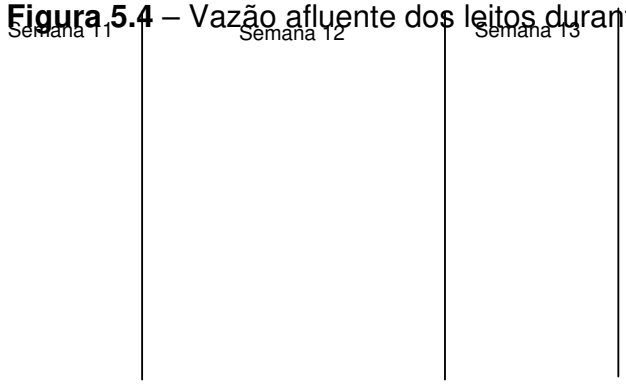



**Figura 5.4** – Vazão afluente dos leitos durante o mês de fevereiro.

Na Figura 5.5 observa-se que os valores de tempo de detenção apresentaram pouca variação durante o mês de novembro. Apenas no dia 27/11 houve grande variação deste parâmetro nos leitos 1 e 3.

Na Tabela A5 (APÊNDICE A) observa-se que os valores médios de tempo de detenção ficaram em 1,44 para o leito 1; 1,10 para o leito 2; 1,87 para o leito 3 e 1,06 para o leito 4.

**Erro! Vínculo não válido.**

Semana 2 Semana 3 Semana 4

**Figura 5.5** – Tempo de detenção hidráulico (TDH) nos leitos durante o mês de novembro.

Na Figura 5.6 observa-se que os valores de tempo de detenção hidráulico (TDH) apresentaram maior variação durante o mês de dezembro em relação ao mês de novembro. Na Tabela A6 (APÊNDICE A) observa-se que os valores médios de tempo de detenção ficaram em 3,58 para o leito 1; 3,36 para o leito 2; 3,88 para o leito 3 e 5,03 para o leito 4. O TDH para este último leito ficou bem acima do valor desejado de 3 dias.

**Erro! Vínculo não válido.**



**Figura 5.6** – Tempo de detenção hidráulico (TDH) nos leitos durante o mês de dezembro.

Já no mês de janeiro os valores de TDH apresentaram variação ainda maior, em relação aos meses de novembro e dezembro, conforme pode ser observado na Figura 5.7. Observa-se na Tabela A7 (APÊNDICE A) que os valores médios de tempo de detenção hidráulico (TDH) ficaram em 8,34 para o leito 1; 8,20 para o leito 2; 5,54 para o leito 3 e 10,52 para o leito 4, valores estes bem superiores ao valor desejado de 3 dias.

**Erro! Vínculo não válido.**



**Figura 5.7** – Tempo de detenção hidráulico (TDH) nos leitos durante o mês de janeiro.

No mês de fevereiro os valores de TDH apresentaram variação ainda maior, em relação aos meses de novembro, dezembro e janeiro, conforme pode ser observado na Figura 5.8. Observa-se na Tabela A8 (APÊNDICE A) que os valores médios de tempo de detenção hidráulico (TDH) ficaram em 12,89 para os leitos 1 e 2; 7,62 para o leito 3 e 11,20 para o leito 4, valores estes bem superiores ao valor desejado de 3 dias.

**Erro! Vínculo não válido.**

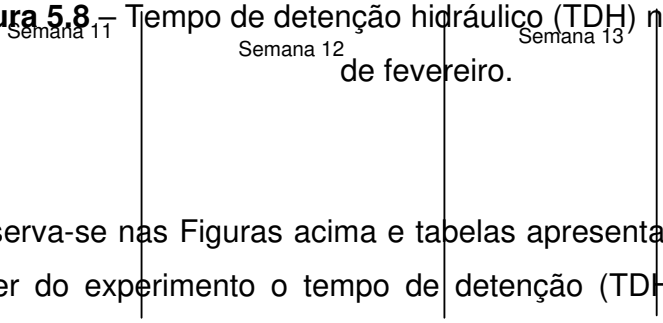



**Figura 5.8** – Tempo de detenção hidráulico (TDH) nos leitos durante o mês de fevereiro.

Observa-se nas Figuras acima e tabelas apresentadas (APÊNDICE A) que no decorrer do experimento o tempo de detenção (TDH) e a vazão dos leitos começaram a apresentar maior variação, o que pode ter ocorrido devido à formação de um biofilme na tubulação de alimentação dos leitos provocando oscilações da vazão afluente e, conseqüentemente, do tempo de detenção (TDH).

## 5.3 OCORRÊNCIA DE CHUVAS EM CAMPINAS DURANTE O EXPERIMENTO

A ocorrência de chuvas pode ser observada nas Figuras 5.9, 5.10, 5.11 e 5,12 a seguir e nos Quadros A, B e C (ANEXO) durante os meses de novembro, dezembro e janeiro respectivamente, conforme dados do Centro de Ensino e Pesquisa em Agricultura da UNICAMP (CEPAGRI, 2004).

Na Figura 5.9 e no Quadro A, este em anexo, pode ser observada a intensidade na quantidade de chuvas na véspera e no dia da coleta de 18/11/03, bem como no dia da coleta de 25/11/2003. No dia 17/11/03 a precipitação observada foi de 51mm, no dia 18/11/03 foi de 31,2mm e no dia 25/11/03 foi de 16,8mm.

**Erro! Vínculo não válido.**

**Figura 5.9** – Valores de precipitação pluviométrica (mm) durante o mês de novembro.

Na Figura 5.10 e no Quadro B, este último em anexo, pode ser observada a intensidade na quantidade de chuvas na véspera e no dia da coleta de 02/12/03, bem como nos dias das coletas de 09/12/03 e 16/12/03. Na véspera da coleta de 16/12/03 também foi observada ocorrência chuva. No Quadro B é possível confirmar que a precipitação foi mais intensa na véspera da coleta de 02/12/03, 78,5mm, já no dia desta coleta a precipitação foi de 14mm. A precipitação observada nos outros dias de coleta foi menos intensa, 9,6mm no dia 09/12/03 e 17,8mm nos dias 15 e 16/12/03.

**Erro! Vínculo não válido.**

**Figura 5.10** – Valores de precipitação pluviométrica (mm) durante o mês de dezembro.

Semana 5

Semana 6

Na Figura 5.11 e no Quadro C percebe-se que o mês de janeiro não teve muitos dias de chuva. Pode ser observada grande intensidade na precipitação apenas nos dias 05, 08 e 20/01/04.

Foi observada ocorrência de chuva na véspera, 53,6mm, e no dia da coleta de 6/01/2004, 26,4mm.

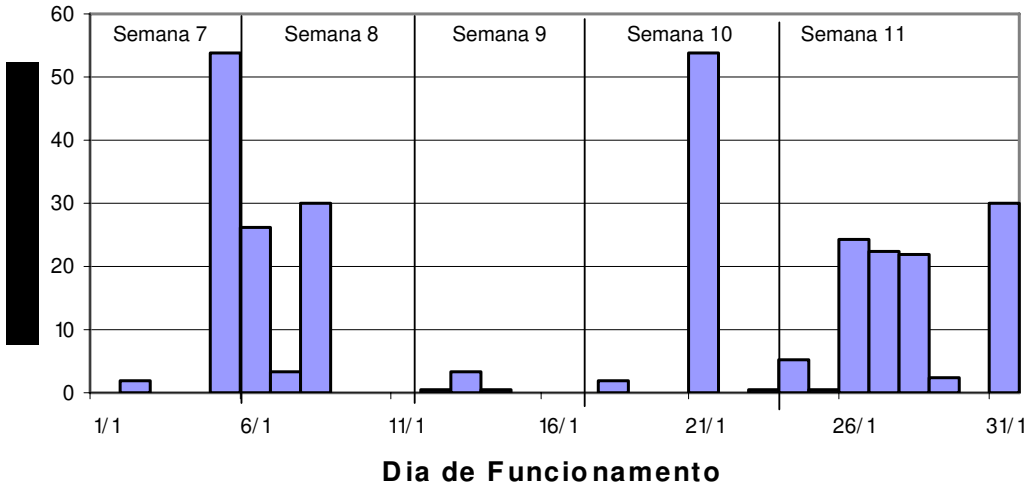



**Figura 5.11** – Valores de precipitação pluviométrica (mm) durante o mês de janeiro.

Na Figura 5.12 e no Quadro C observa-se a ocorrência de chuvas em fevereiro de 2004.

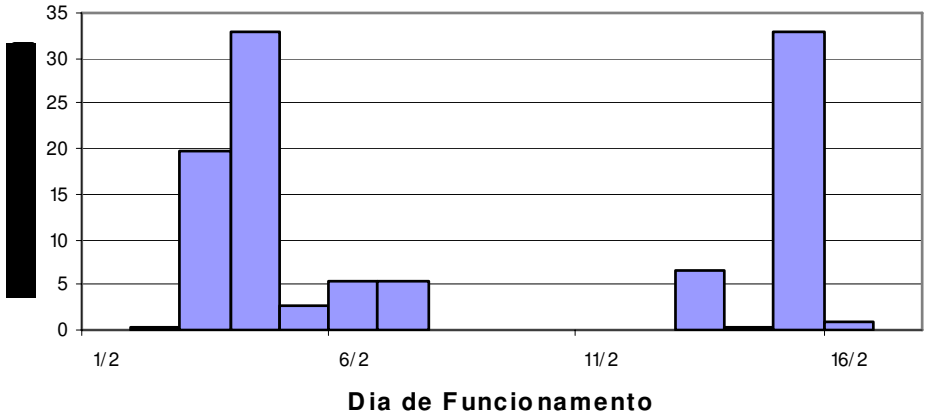



**Figura 5.12** – Valores de precipitação pluviométrica (mm) durante o mês de fevereiro.

## 5.4 DESENVOLVIMENTO DA TABOA NOS LEITOS

A Tabela 5.2 apresenta o desenvolvimento da taboa, em número de plantas, durante o período em que foi realizado o experimento.

As taboas não apresentaram um bom desenvolvimento durante o primeiro mês do experimento, o que pode ter ocorrido devido à necessidade pelas mesmas de um tempo para adaptação à água residuária estudada. Porém, embora as taboas apresentassem algumas folhas secas, foi possível notar re-brotamento de seus rizomas, aumentando o número de plantas nos leitos cultivados.

**Tabela 5.2** – Acompanhamento do desenvolvimento da taboa durante o experimento.

| Data | Tempo decorrido (dias) | Nº de plantas | | |
|---|---|---|---|---|
| | | Leito1 | Leito 2 | Leito 4 |
| 31/10/2003 | 0 | 12 | 12 | 13 |
| 30/11/2003 | 30 | 13 | 19 | 18 |
| 02/01/2004 | 63 | 25 | 27 | 27 |
| 24/01/2004 | 85 | 27 | 28 | 29 |
| 17/02/2004 | 109 | 31 | 33 | 30 |

No segundo mês houve um maior desenvolvimento das taboas nos leitos cultivados, o que é mais evidente no leito 1, conforme é possível observar na Figura 5.13, o que pode ter ocorrido devido a maior adaptação das taboas às condições dos leitos.

No terceiro mês o desenvolvimento das plantas não foi significativo em termos de quantidade de plantas.

**Erro! Vínculo não válido.**

**Figura 5.13** – Acompanhamento do desenvolvimento da taboa durante o experimento.

## 5.5 DESEMPENHO DOS LEITOS

O desempenho dos leitos foi avaliado em função da remoção dos parâmetros analisados.

### 5.5.1 pH do afluente e do efluente dos leitos

O pH do afluente variou entre 4,19 e 7,40, dentro da faixa ótima para desenvolvimento da *Typha sp* que encontra-se entre 4 a 10 (Reed *et al.*, 1992 citado por CHERNICHARO, 2001). O pH é um parâmetro importante na caracterização de águas residuárias, pois exerce influência sobre vários mecanismos que ocorrem durante o tratamento destas águas.

Além disso, muitas bactérias responsáveis pelo tratamento de resíduos líquidos sobrevivem em condições em que o pH varie entre 4,0 e 9,5 apenas (MANSOR, 1998), condições estas encontradas nos leitos.

É possível observar na Figura 5.14 a seguir e na Tabela B1 (APÊNDICE B) que o pH do efluente de todos os leitos apresentou um comportamento crescente em relação ao afluente. O pH do efluente de todos os leitos aumentou em relação ao pH do afluente. Com o decorrer do experimento o pH das saídas dos leitos apresentou valores mais próximos à neutralidade, o que reflete possível capacidade de tamponamento dos leitos cultivados. Esta tendência também ocorreu no sistema integrado de leitos cultivados estudados por KADLEC *et al.* (1997) para tratamento de água residuária do processamento de batata.

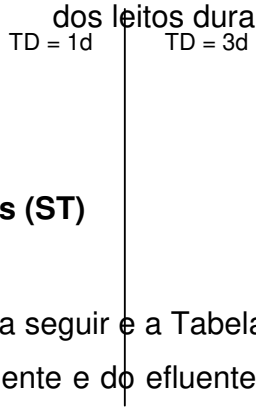
**Erro! Vínculo não válido.**

**Figura 5.14** – Valores do pH do afluente e do efluente dos leitos durante o experimento.

TD = 1d | TD = 3d

A relação entre os valores de pH do afluente e do efluente dos leitos ficou em torno de 1,2 para TDH = 1 dia e em torno de 1,6 para TDH = 3 dias, como é possível observar na Figura 5.15, mostrando estabilização do sistema.

**Erro! Vínculo não válido.Figura 5.15** – Relação entre o pH do afluente e do efluente dos leitos durante o experimento.




### 5.5.2 Sólidos Totais (ST)

A Figura 5.16 a seguir e a Tabela B2 (APÊNDICE B) apresentam os valores de ST (mg/L) do afluente e do efluente dos leitos cultivados. Na 1ª semana todos os leitos apresentaram baixos valores de remoção. Nas semanas 3, 4 e 5 os leitos apresentaram um comportamento inesperado, a quantidade de sólidos no efluente dos leitos foi maior do que do afluente, o que pode ser explicado pela ocorrência de chuvas na véspera da coleta (semanas 3 e 4) e no dia da coleta (semana 5) promovendo arraste de sólidos nas saídas dos leitos.

**Erro! Vínculo não válido.**

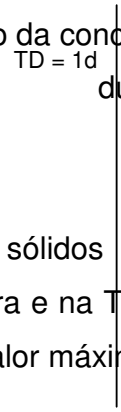
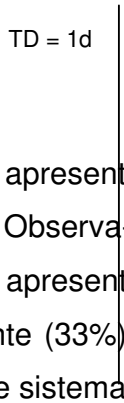



**Figura 5.16** – Variação da concentração de ST do afluente e do efluente dos leitos durante o experimento.

A remoção de sólidos totais nos leitos variou conforme a Figura 5.17. Observa-se nesta figura e na Tabela B2 (Apêndice B) que os valores de remoção de ST alcançaram o valor máximo de 69%.

**Erro! Vínculo não válido.** **Figura 5.17** – Remoção de ST nos leitos durante o experimento.




A Figura 5.18 apresenta os valores médios de remoção de sólidos totais nos leitos estudados. Observa-se nesta figura e na Tabela B2 (Apêndice B) que os leitos em série 1 e 2 apresentaram maior remoção média (44%) em comparação ao leito 1 isoladamente (33%), que foi responsável pela maior parte da remoção de sólidos totais neste sistema de leitos.

A remoção média máxima de sólidos totais ocorreu no leito 1 (33%), para um mesmo TDH.

**Erro! Vínculo não válido.**

**Figura 5.18** – Remoção média de ST nos leitos durante o experimento.

A relação entre a concentração de sólidos totais do afluente e do efluente dos leitos é apresentada na Figura 5.19. Para um TDH = 3 dias esta relação começou a apresentar valores menores, o que representa maior remoção deste parâmetro. É possível observar que esta relação começou a apresentar menor variação com o decorrer do experimento.

**Erro! Vínculo não válido.**

**Figura 5.19** – Relação entre a concentração de ST do afluente e do efluente dos leitos durante o experimento.

TD = 1d TD = 3d

### 5.5.3 Sólidos Suspensos Totais (SST)

É possível observar na Figura 5.20 a seguir e na Tabela B3 (APÊNDICE B) que todos os leitos apresentaram remoção de sólidos suspensos. Apenas na semana 5 a quantidade de sólidos na saída dos leitos 1 e 2 foi maior que na entrada devido, provavelmente, a ocorrência de chuva no dia anterior à coleta. Observa-se na Tabela B3 (APÊNDICE B) que na semana 5 o efluente dos leitos 1 e 2 apresentaram maior quantidade de sólidos suspensos em relação ao afluente, o que também ocorreu nas saídas dos leitos 3 (semana 6) e 2 (semana 7). Sabe-se que os leitos de fluxo subsuperficial são efetivos na redução de elevada quantidade de sólidos suspensos, o que se dá através dos processos físicos que ocorrem no meio suporte: sedimentação, filtração e adsorção. Porém, pode ocorrer geração de material particulado nos leitos cultivados, através da produção de fragmentos e detritos por decaimento e morte das raízes e rizomas das

macrófitas (MANSOR, 1998). Este fato pode ter acarretado maior quantidade de sólidos suspensos nas saídas dos leitos citados acima.

**Erro! Vínculo não válido.**

**Figura 5.20** – Variação da concentração de SST no afluente e no efluente dos leitos durante o experimento.

TD = 1d TD = 3d

A remoção de sólidos suspensos totais nos leitos variou conforme a Figura 5.21. Observa-se nesta figura e na Tabela B3 (Apêndice B) que os valores de remoção de SST apresentaram ampla variação. Observa-se também que os valores de remoção aumentaram com o decorrer do experimento.

**Erro! Vínculo não válido.**

**Figura 5.21** – Porcentagem de remoção de SST nos leitos durante o experimento.

TD = 1d TD = 3d

Conforme é possível observar na Figura 5.22, a maior remoção média de sólidos suspensos totais, para um mesmo TDH, foi apresentada pelo leito 3 (71%). É possível observar também que houve boa remoção no sistema de leitos 1 e 2 em série, sendo que o leito 1 isoladamente apresentou 62% de remoção média enquanto que o sistema apresentou 75% de remoção média. Esta remoção foi inferior a encontrada por KADLEC *et al.* (1997) num sistema integrado de leitos para tratamento de água residuária do processamento de batata (94% no verão e 82% no inverno). Porém em projeto piloto anterior, os referidos autores obtiveram 57% de remoção deste parâmetro num primeiro ensaio e 69% de remoção num segundo ensaio.

**Erro! Vínculo não válido.**

**Figura 5.22** – Porcentagem de remoção média de SST nos leitos durante o experimento.

A relação entre a concentração de sólidos suspensos totais do afluente e do efluente dos leitos é apresentada na Figura 5.23. Para um TDH = 3 dias esta relação apresentou valores menores, o que representa maior remoção deste parâmetro. A relação apresentou certa estabilidade com o decorrer do experimento, o que indica que a remoção deste parâmetro tornou-se aproximadamente constante.

**Erro! Vínculo não válido.**

**Figura 5.23** – Relação entre a concentração de SST do afluente e do efluente dos leitos durante o experimento.



### 5.5.4 Demanda Química de Oxigênio (DQO)

#### 5.5.4.1 DQO total

Na Figura 5.24 a seguir e na Tabela B4 (APÊNDICE B) é possível observar que houve redução da DQO total em todos os leitos estudados. Apenas na semana 3 ocorreu um comportamento inesperado em todos os leitos em relação à remoção de DQO total, ocorrendo aumento da DQO total dos efluentes dos leitos em relação ao afluente. Na semana 4 este fato ocorreu também nos leitos 3 e 4.

**Erro! Vínculo não válido.**

**Figura 5.24** – Variação da concentração de DQO total no afluente e no efluente dos leitos durante o experimento.

TD = 1d TD = 3d

A remoção de DQO total nos leitos variou conforme a Figura 5.25. Observa-se nesta figura e na Tabela B4 (Apêndice B) que os valores de remoção deste parâmetro aumentaram para um maior tempo de detenção, apresentando maior estabilidade com o decorrer do experimento.

**Erro! Vínculo não válido.**

**Figura 5.25** – Porcentagem de remoção de DQO total nos leitos durante o experimento.

TD = 1d TD = 3d

Na Figura 5.26 observa-se que a maior remoção média para as mesmas condições de entrada foram encontradas nos leitos 1 e 3 (65 e 64% respectivamente). No sistema em série de leitos 1 e 2 houve remoção de 79%, porém o leito 1 apresentou maior remoção (65%) do que o leito 2 (50%), analisando cada um dos leitos isoladamente, o que pode indicar que ocorre maior remoção deste parâmetro diante de maior quantidade do mesmo no afluente, já que o afluente do leito 2 é o efluente do leito 1 e possui DQO total já reduzida. Na semana 4 os leitos apresentaram menores porcentagens de remoção deste parâmetro.

**Erro! Vínculo não válido.**

**Figura 5.26** – Porcentagem de remoção média de DQO total nos leitos durante o experimento.

A relação entre a DQO total do afluente e do efluente dos leitos é apresentada na Figura 5.27. Para um TDH = 3 dias esta relação apresentou valores menores, o que representa maior remoção deste parâmetro. A relação apresentou certa estabilidade com o decorrer do experimento, o que indica que a remoção deste parâmetro tornou-se aproximadamente constante.

**Erro! Vínculo não válido.**

**Figura 5.27** – Relação entre a concentração de DQO total do afluente e do efluente dos leitos durante o experimento.

TD = 1d TD = 3d

5.5.4.2 DQO filtrada

Na Figura 5.28 a seguir e na Tabela B5 (APÊNDICE B) é possível observar que houve redução da DQO filtrada em todos os leitos estudados. O comportamento dos leitos em relação a DQO filtrada foi semelhante ao comportamento apresentado para DQO total. Na semana 3 os leitos também apresentaram comportamento inesperado para DQO filtrada e na semana 4 os leitos 3 e 4 também apresentaram comportamento inesperado, DQO dos efluentes dos leitos maior que a DQO do afluente.

**Erro! Vínculo não válido.**

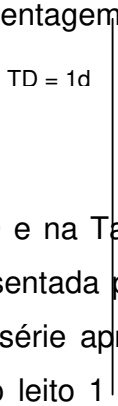
**Figura 5.28** – Variação da concentração de DQO filtrada no afluente e no efluente dos leitos durante o experimento.

TD = 1d TD = 3d

A remoção de DQO filtrada nos leitos variou conforme a Figura 5.29. Observa-se nesta figura e na Tabela B5 (Apêndice B) que os valores de remoção deste parâmetro aumentaram para um maior tempo de detenção, apresentando maior estabilidade com o decorrer do experimento.

**Erro! Vínculo não válido.**

**Figura 5.29** – Porcentagem de remoção de DQO filtrada nos leitos durante o experimento.




Na Figura 5.30 e na Tabela B5 (APÊNDICE B) observa-se que a máxima remoção média apresentada pelos leitos foi de 66% para o leito 3 e um mesmo TDH. O sistema em série apresentou 71% de remoção média de DQO filtrada. Porém, neste caso, o leito 1 (61%) apresentou maior remoção deste parâmetro que o leito 2 (50%).

**Erro! Vínculo não válido.**

**Figura 5.30** – Porcentagem de remoção média de DQO filtrada nos leitos durante o experimento.

A relação entre a DQO filtrada do afluente e do efluente dos leitos é apresentada na Figura 5.31. Para um TDH = 3 dias esta relação apresentou valores menores, o que representa maior remoção deste parâmetro para um maior tempo de detenção. A relação apresentou certa estabilidade com o decorrer do experimento, o que indica que a remoção deste parâmetro tornou-se aproximadamente constante.

**Erro! Vínculo não válido.**

**Figura 5.31** – Relação entre a concentração de DQO filtrada do afluente e do efluente dos leitos durante o experimento.

TD = 1d TD = 3d

### 5.5.5 Fósforo Total

Na Figura 5.32 a seguir e na Tabela B6 (APÊNCICE B) é possível observar que, com exceção da semana 4, houve decréscimo da quantidade de Fósforo na saída dos leitos em relação à entrada, o que pode estar relacionado à remoção deste componente por adsorção, precipitação bem como por assimilação pelas plantas. Nas semanas 4 e 7 houve aumento da quantidade de Fósforo para todos os leitos, exceto para o leito 4 (semana 4) e para o leito 2 (semana 7), o que pode estar relacionado à ocorrência de chuva no dia da coleta de amostra. Na semana 8 o efluente do leito 3 também apresentou maior quantidade de fósforo do que seu afluente, o que pode ter ocorrido por liberação do fósforo adsorvido nas britas.

**Erro! Vínculo não válido.**

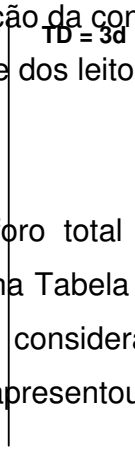



**Figura 5.32** – Variação da concentração de Fósforo total do afluente e do efluente dos leitos durante o experimento.

A remoção de Fósforo total nos leitos variou conforme a Figura 5.33. Observa-se nesta figura e na Tabela B6 (Apêndice B) que os valores de remoção deste parâmetro oscilaram consideravelmente ao longo do experimento, sendo que apenas o leito 2 apresentou maior estabilidade com o decorrer do experimento.

**Erro! Vínculo não válido.**

**Figura 5.33** – Porcentagem de remoção de Fósforo total nos leitos durante o experimento.

TD = 1d TD = 3d

Observa-se na Figura 5.34 e na Tabela B6 (APÊNDICE B) que o leito 4 apresentou a maior remoção média de fósforo (55%). Os leitos 1 e 2 , em série, apresentaram 76% de remoção para este parâmetro, sendo que o leito 1 apresentou 51% de remoção enquanto que o leito 2 apresentou 65% de remoção, quando analisados isoladamente. Sabe-se que o fósforo pode ser removido até 30% por meio de processos biológicos (IMHOFF, 2002). Os valores de remoção obtidos no presente trabalho foram superiores a este valor, o que indica que as plantas, através da assimilação, e o meio suporte, através da precipitação e adsorção, contribuíram positivamente na remoção deste parâmetro.

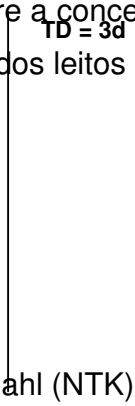
**Erro! Vínculo não válido.**

**Figura 5.34** – Porcentagem de remoção média de Fósforo total nos leitos durante o experimento.

A relação entre a concentração de fósforo total no afluente e no efluente dos leitos é apresentada na Figura 5.35. O leito 2 apresentou maior remoção deste parâmetro, devido ao maior TDH neste leito.

**Erro! Vínculo não válido.**

**Figura 5.35** – Relação entre a concentração de Fósforo total do afluente e do efluente dos leitos durante o experimento.




## 5.5.6 Nitrogênio

### 5.5.6.1 Nitrogênio Total Kjeldahl (NTK)

Na Figura 5.36 a seguir e na Tabela B7 (APÊNDICE B) é possível observar que houve redução na quantidade de nitrogênio total Kjehldahl em todos os leitos, o que pode indicar assimilação deste nutriente pelas plantas ou ocorrência de amonificação nos leitos. Na semana 7 todos os leitos apresentaram comportamento inesperado para este parâmetro, quantidades de NTK nas saídas dos leitos maiores que a quantidade deste parâmetro no afluente. Nas semanas 4 e 5 o leito 3 também apresentou este comportamento.

**Erro! Vínculo não válido.**

**Figura 5.36** – Variação da concentração de NTK no afluente e no efluente dos leitos durante o experimento.




A remoção de NTK nos leitos variou conforme a Figura 5.37. Observa-se nesta figura e na Tabela B7 (Apêndice B) que os valores de remoção deste parâmetro oscilaram consideravelmente ao longo do experimento.

**Erro! Vínculo não válido.**

**Figura 5.37** – Porcentagem de remoção de NTK nos leitos durante o experimento.

**TD = 1d** **TD = 3d**

Na Figura 5.38 e na Tabela B7 (APÊNDICE B) é possível observar que o leito 1 apresentou maiores valores de remoção média para este parâmetro (71%) para um mesmo TDH. O sistema de leitos 1 e 2 também apresentou boa remoção para este parâmetro (77%), sendo que o leito 2 isoladamente apresentou apenas 32% de remoção, indicando a ocorrência de maior remoção deste parâmetro no leito 1.

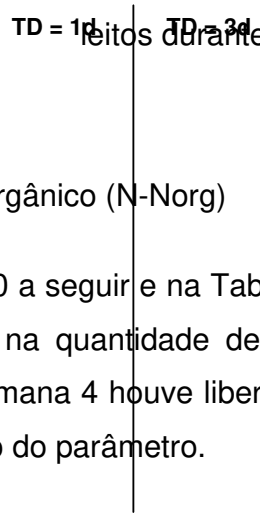
**Erro! Vínculo não válido.**

**Figura 5.38** – Porcentagem de remoção média de NTK nos leitos durante o experimento.

A relação entre a concentração de NTK no afluente e no efluente dos leitos é apresentada na Figura 5.39. Esta relação não apresentou muitas oscilações nos leitos e, de maneira geral, houve decréscimo da mesma, indicando maior remoção de NTK para maior tempo de detenção.

**Erro! Vínculo não válido.**

**Figura 5.39** – Relação entre a concentração de NTK do afluente e do efluente dos leitos durante o experimento.




5.5.6.2 Nitrogênio Orgânico (N-Norg)

Na Figura 5.40 a seguir e na Tabela B8 (APÊNDICE B) é possível observar que houve redução na quantidade de nitrogênio orgânico (Norg) em todos os leitos. Apenas na semana 4 houve liberação de Norg no leito 3, devido a possível erro na determinação do parâmetro.

**Erro! Vínculo não válido.**

**Figura 5.40** – Variação da concentração de N-Norg no afluente e no efluente dos leitos durante o experimento.

TD = 1d TD = 3d

A remoção de N-Norg nos leitos variou conforme a Figura 5.41. Observa-se nesta figura e na Tabela B8 (Apêndice B) que os valores de remoção deste parâmetro oscilaram consideravelmente ao longo do experimento. De maneira geral a remoção de N-Norg aumentou para um maior TDH.

**Erro! Vínculo não válido.**

**Figura 5.41** – Porcentagem de remoção de N-Norg nos leitos durante o experimento.



Na Figura 5.42 e na Tabela B8 (APÊNDICE B) observa-se que a maior remoção média de Norg ocorreu no leito 1 (73%), sendo que no sistema de leitos 1 e 2 houve remoção de 81%. A ocorrência de alguns resultados negativos para este parâmetro pode estar relacionada ao fato de que o mesmo é dado pela diferença entre o nitrogênio total Kjehldahl (NTK) e o amoniacal ($N\text{-}NH_3$), sendo que o método para determinação do NTK pode ter sido influenciado por fatores como: digestão e diluição da amostra, o que pode gerar erro.

**Erro! Vínculo não válido.**

**Figura 5.42** – Porcentagem de remoção média de N-Norg nos leitos durante o experimento.

A relação entre a concentração de N-Norg no afluente e no efluente dos leitos é apresentada na Figura 5.43. Esta relação não apresentou muitas oscilações nos leitos e apresentou valores bem baixos, indicando boa remoção de N-Norg.

**Erro! Vínculo não válido.**

**Figura 5.43** – Relação entre a concentração de N-Norg do afluente e do efluente dos leitos durante o experimento.

### 5.5.6.3 Nitrogênio Amoniacal ($N\text{-}NH_3$)

Na Figura 5.44 a seguir e na Tabela B9 (APÊNCICE B) é possível observar que houve liberação de nitrogênio na forma amoniacal em todos os leitos, indicando a possível ocorrência de amonificação dos compostos nitrogenados acumulados nos leitos, que é a transformação do nitrogênio orgânico, neste caso da matéria protéica, em amônia. Apenas no leito 3 (semana 6) houve decréscimo da quantidade de nitrogênio amoniacal em relação ao afluente, representando remoção de 12%. Observa-se que a liberação de nitrogênio amoniacal nos leitos aumentou a partir da semana 4 e indica um decréscimo a partir da 8ª semana. O leito 3 apresentou maiores valores de $N\text{-}NH_3$ em sua saída ao longo do experimento, o que pode indicar o consumo desta forma de nitrogênio pela *Typha sp* nos outros leitos.

**Erro! Vínculo não válido.**

**Figura 5.44** – Variação da concentração de N-$NH_3$ no afluente e no efluente dos leitos durante o experimento.

**TD = 1d** **TD = 3d**

5.5.6.4 Nitrito e Nitrato ($N\text{-}NO_2^-$ + $N\text{-}NO_3^-$)

Na Figura 5.45 a seguir e na Tabela A8 (APÊNCICE A) é possível observar que houve redução na quantidade de nitrato + nitrito em todos os leitos na 2ª semana de experimento. Já na 3ª semana houve liberação de uma pequena quantidade destes parâmetros em todos os leitos. Nas semanas subseqüentes estes parâmetros não foram encontrados no afluente, ocorrendo liberação destas formas de nitrogênio em alguns leitos. A liberação destes parâmetros nas semanas 3 e 6 pode indicar a ocorrência de nitrificação (GHOSH and BHAT, 1998). Já a redução destes parâmetros nas semanas 2, 4 e 5 pode indicar a assimilação de nitrato pela *Typha sp* nos leitos cultivados e desnitrificação no controle.

**Erro! Vínculo não válido.**

**Figura 5.45** – Variação da concentração de $N\text{-}NO_2$ + $N\text{-}NO_3$ no afluente e no efluente dos leitos durante o experimento.

# 6 CONCLUSÕES E SUGESTÕES

Foi possível obter as seguintes conclusões sobre a aplicação dos leitos cultivados de fluxo subsuperficial cultivados com taboa:

- A água residuária do processamento de doce de banana é extremamente rica em matéria orgânica, sendo esta de fácil biodegradabilidade;
- O sistema de leitos cultivados mostrou-se eficiente na remoção de todos os parâmetros analisados, exceto nitrogênio amoniacal e nitrato + nitrito, já que houve liberação destes parâmetros nos leitos;
- De maneira geral foi possível observar que os níveis de remoção apresentados pelo primeiro leito retangular cultivado com taboa da série de dois leitos foram maiores para quase todos os parâmetros, exceto para Fósforo, comparando-se ao leito 2, o que indica maior remoção dos parâmetros no início do leito cultivado;
- O aumento do comprimento do leito, avaliado neste estudo pela utilização dos leitos 1 e 2 em série, aumentou a porcentagem de remoção de todos os parâmetros, o que se deve ao aumento do tempo de detenção para uma mesma vazão de entrada em leitos maiores;
- Não foi observada diferença significativa entre os níveis de remoção dos leitos cilíndrico e retangular para nenhum dos parâmetros estudados;
- Não houve diferença significativa entre os níveis de remoção apresentados pelos leitos cultivados com taboa e o controle, preenchido apenas com brita. Porém, de maneira geral, este leito apresentou menores valores de remoção para todos os parâmetros exceto para DQO filtrada;
- A interferência da ocorrência de chuvas, pôde ser notada apenas nos resultados encontrados para os sólidos totais nas semanas 3, 4 e 5, quando a precipitação potencial foi intensa nos dias da coleta (semanas 3 e 4) e na véspera da coleta (semana 5);
- Foram observados maiores índices de remoção para um maior tempo de detenção hidráulico (TDH).

Para estudos futuros são dadas as seguintes sugestões:

- Utilizar um outro tipo de controle de vazão para o sistema de leitos, que proporcione menor variação deste parâmetro;
- Utilizar sistemas de leitos de maiores dimensões e tempos de detenção maiores;
- Montar a unidade piloto, caso seja possível, próximo a uma fábrica de doce de banana para que seja utilizada a água residuária real;
- Realizar um tratamento preliminar e primário antes de utilizar os leitos, pois a alta quantidade de sólidos suspensos gerou entupimento na tubulação devido, provavelmente, a formação de um biofilme na tubulação, promovendo variações na vazão afluente dos leitos;
- Estudar o sistema de leitos cultivados por um tempo maior, no mínimo 1 ano, para verificar o comportamento do sistema.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS


APHA; AWWA & WPCF. **Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater**. 20ª edição. Washington D. C./USA: American Public Health Association, 1998.

APHA; AWWA & WPCF. **Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater**. 19ª edição. Washington D. C./USA: American Public Health Association, 1995.

APHA; AWWA & WPCF. **Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater**. 18ª edição. Washington D. C./USA: American Public Health Association, 1992.

AYAZ, S. Ç. and AKCA, I. *Treatment of wastewater by constructed wetland in small settlements*. In: **Water Science and Technology**. Vol. 41, Nº 1. Istanbul: IWA Publishing, 2000. p 69-72.

BARNES, D.; FORSTER, C. F. and HRUDEY, S. E. **Surveys in Industrial Wastewater Treatment: Food and Allied Industries**. Vol. 1. 1 ed. London: Pitman, 1984. 376 p.

BAVOR, H. J.; ROSER, D. J. & ADCOCK, P. W. *Challenges for the development of advanced constructed wetlands technology*. In: **Water Science and Technology**. Vol. 32, Nº 3. Great Britain: IAWQ, 1995. p. 13-20.

BRAILE, Pedro Marcio & CAVALCANTI, José Eduardo W. A.. **Manual de tratamento de águas residuárias industriais**. 1 ed. São Paulo: CETESB, 1993. 764 p.

BRIX, Hans. *Functions of macrophytes in constructed wetlands.* In: **Water Science and Technology**. Vol. 29, Nº 4. Great Britain: IAWQ, 1994. p. 71-78.

BURGOON, Peter S.; KADLEC, Robert H.; HENDERSON, Mike. *Treatment of potato processing wastewater with engineered natural systems*. In: **Water Science and Technology**. Vol. 40, Nº 3. Great Britain: IWA Publishing, 1999. p 211-215.

CAMPOS, José Roberto. **Alternativas para Tratamento de Esgotos – Pré-tratamento para águas de abastecimento**. Americana: Consórcio Intermunicipal das Bacias do Rio Piracicaba e Capivari, 1994. 112 p.

CEPAGRI (Centro de Ensino e Pesquisa em Agricultura da UNICAMP). Dados meteorológicos – Campinas (UNICAMP). Disponível em: http://www.agritempo.gov.br/agroclima/pesquisaWeb. Acesso em janeiro de 2004.

CHERNICHARO, Carlos Augusto de Lemos (coordenador). **Pós-tratamento de efluentes de reatores anaeróbios**. 1 ed. Belo Horizonte: Projeto PROSAB, 2001. 544 p.

GEARY, P. M. and MOORE, J. A. *Suitability of a treatment wetland for dairy wastewaters*. In: **Water Science and Technology**. Vol. 40, Nº 3. Great Britain: IWA Publishing, 1999. p. 179-185.

GHOSH, B. C. and BHAT, Ravi. *Environmental hazards of nitrogen loading in wetland rice fields*. In: **Environmental Pollution**. Vol. 102, S1. Elsevier, 1998. p. 123-126.

GUIMARÃES, José Jorge. **As indústrias de frutas cítricas da região de Matão e a influência das descargas de seus despejos líquidos na qualidade da água do Rio São Lourenço (Bacia do Tietê Médio Inferior)**. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos (SP), 1998. 203 p.

HABERL, Raimund *et al.* Review Article with Case Studies: *Constructed wetlands for the treatment of organic pollutants.* In: **J Soils & Sediments**. Vol. 3, Nº 2. Ecomed publishers, 2003. p. 109-124.

HABERL *et al. Constructed wetlands in Europe.* In: **Water Science and Technology**. Vol. 32, nº 3. Great Britain: IAWQ, 1995. p. 305-315.

IMHOFF, Klaus R. & Klauss. **Manual de Tratamento de Águas Residuárias**. Tradução a 26ª ed alemã por Max Lothar Hess. São Paulo: Edgard Blücher Ltda, 2002 (3ª reimpressão). 301 p.

KADLEC, Robert H.; BURGOON, Peter S. and HENDERSON, Michael E. *Integrated natural systems for treating potato processing wastewater.* In: **Water**

**Science and Technology**. Vol. 35, Nº 5. Great Britain: IWA Publishing, 1997. p. 263-270.

KARPISCAK, Martin M.; FREITAS, Robert J.; GERBA, Charles P.; SANCHEZ, Luis R. and SHAMIR, Eylon. *Management of dairy waste in the Sonoran Desert using constructed wetland technology*. In: **Water Science and Technology**. Vol. 40, Nº 3. Great Britain: IWA Publishing, 1999. p. 57-65.

LÉON, S. G. & CAVALLINI, J. Moscoso. Tradução de Gheyi, H. R. A. König; Ceballos, B. S. O.; Damasceno, F. A. V. **Tratamento e uso de águas residuárias**. Campina Grande, UFPB, 1999.

LORENZI, H. **Plantas daninhas do Brasil: terrestres, aquáticas, parasitas e tóxicas.** 3ª ed. Nova Odessa, SP: Instituto Plantarum, 2000. 608 p.

MANSOR, Maria T. C. **Uso de leito de macrófitas no tratamento de águas residuárias.** Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas (SP), 1998. 106 p.

MANCY, K. H. and WEBER, W. J. Jr. **Analysis of Industrial Wastewaters**. Vol 2, Parte III, Seção B. 1 ed. John Wiley & Sons, Inc., 1971.

METCALF & EDDY. **Wastewater Engineering: Treatment, Disposal and Reuse**. 3 ed. New York: McGraw-Hill, 1991. 1334 p.

MUTTAMARA, Samorn. *Wastewater characteristics.* In: **Resources, conservation and recycling.** Vol. 16, p.145-159, 1996.

NOUR, Edson A. Abdoul. **Tratamento de efluentes de uma indústria cítrica pelo processo de escoamento superficial no solo**. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Campinas, Campinas (SP), 1990. 159 p.

FARIA, Lourival Cardoso de. **Determinação condutimétrica de nitrato, nitrito amônio e uréia em análise por injeção em fluxo e construção de um analisador automático**. Dissertação (Doutorado) – Instituto de Química, Universidade Estadual de Campinas, Campinas (SP), 1992. 91 p.

PRICE, Trevor & PROBERT, Douglas. *Role of Constructed Wetlands in Environmentally-sustainable Developments.* In: **Applied Energy.** Vol. 57, Great Britain: IWA Publishing ,1997. p.129-174.

RAMALHO, R. S. **Introduction to Wastewater Treatment Processes**. 2 ed. New York: Academic Press, 1983. 580 p.

REED, Sherwood C.; CRITES, Ronald W.; e MIDDLEBROOKS E. J. **Natural Systems for Waste Management and Treatment**. 2 ed. New York: McGraw-Hill, 1995. 433 p.

ROSTON, D. M. *Uso de várzeas artificiais para tratamento de efluente de tanque séptico*. Anais: **XXIII Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola.** Nº 94-7-210. Campinas, julho/1994.

SCHIAVOLIN, Magno. **Processos de Tratamento de Efluentes Aquosos: da Compilação de Técnicas Existentes a Estudos de Casos**. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia de Química, Universidade Estadual de Campinas, Campinas (SP), 2001. 130 p.

SOUZA, L. E. L. & BERNARDES, R. S. *Avaliação do desempenho de um RAFA no tratamento de esgotos domésticos, com pós-tratamentos através de leitos cultivados.* Anais: **Simpósio Ítalo-Brasiliano de Ingeniería sanitária-Ambientale.** Vol. 1, nº 9. Gramado, junho 1996.

TOMAR, Mamta. **Quality assessment of water and wastewater**. USA: CRC Press, 1999. 260 p.

U.S.E.P.A. **Design manual on constructed wetlands and aquatics systems for municipal wastewater treatment**. EPA/625/1-88/022. USA. 1988. 83 p.

VALENTIM, Marcelus A. A. **Uso de leitos cultivados no tratamento de efluente de tanque séptico modificado**. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas (SP), 1999. 118 p.

VYMAZAL, J. *Types of Constructed Wetlands for Wastewater Treatment*. Proceeding: **6th International Conference on Wetland Systems for Water Pollution Control**, Águas de São Pedro/SP, out/1998.

VON SPERLING, M.(a). **Princípios do tratamento biológico de águas residuárias: Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de**

**esgotos**. 2 ed., vol 1. Belo Horizonte: Depto. de Engenharia Sanitária e Ambiental/UFMG, 1996. 243 p.

VON SPERLING, M.(b). **Princípios do tratamento biológico de águas residuárias: Princípios básicos do tratamento de esgotos**. 2 ed., vol 2. Belo Horizonte: Depto. de Engenharia Sanitária e Ambiental/UFMG, 1996. 211 p.

VRHOVSEK, Dani, KUKANJA, Vlasta and BULC, Tjasa. *Constructed wetland (CW) for industrial wastewater treatment*. In: **Water Research.** Vol. 30, nº 10. Great Britain: Elsevier Science, 1996. p. 2287-2292

WOOD, A. *Constructed wetlands in water pollution control: Fundamentals to their understanding.* In: **Water Science and Technology.** Vol. 32, nº 3. Great Britain: IAWQ, 1995. p. 21-29

WOOD, R. B. & McATAMNEY, C. F. *Constructed wetlands for wastewater treatment: The use of laterite in the bed medium in phosphorus and heavymetal removal.* In: **Hidrobiologia.** Vol. 340, 1996. p. 323-331

YANG, Byung S. *Industrial Processes and waste characterization*. In: **Resources, conservation and recycling.** Vol. 16, 1996. p. 93-112

# ANEXO

## Dados meteorológicos fornecidos pelo Centro de Ensino e Pesquisa em Agricultura da UNICAMP (CEPAGRI)

**Quadro A** – Dados meteorológicos referentes ao mês de novembro. **Erro! Vínculo não válido.Quadro B** – Dados meteorológicos referentes ao mês de dezembro.

| Data | TMax (o C) | TMin (o C) | Prec. (mm) | DAAS (mm) | ETP (mm) |
|---|---|---|---|---|---|
| 01/12/03 | 27,3 | 18,2 | 78,5 | 75 | 3,9 |
| 02/12/03 | 32,2 | 19,1 | 14 | 75 | 4,4 |
| 03/12/03 | 32,4 | 20 | 2 | 72,6 | 4,5 |
| 04/12/03 | 28,6 | 20,3 | 5,6 | 74 | 4,2 |
| 05/12/03 | 29,3 | 20,3 | 2 | 71,8 | 4,2 |
| 06/12/03 | 30,6 | 18,9 | 6,1 | 73,7 | 4,2 |
| 07/12/03 | 29,3 | 18,8 | 11,7 | 75 | 4,1 |
| 08/12/03 | 30,4 | 19,8 | 1,8 | 72,5 | 4,3 |
| 09/12/03 | 23,2 | 18,1 | 9,6 | 75 | 3,5 |
| 10/12/03 | 30,6 | 15,8 | 7,6 | 75 | 3,9 |
| 11/12/03 | 33,2 | 18,5 | 0,3 | - | 4,4 |
| 12/12/03 | 27,5 | 18,4 | 14,2 | - | 3,9 |
| 13/12/03 | 32 | 18 | 0,8 | - | 4,2 |
| 14/12/03 | 33,7 | 19,6 | 0 | - | 4,5 |
| 15/12/03 | 35,6 | 20 | 17,8 | 75 | 4,7 |
| 16/12/03 | 35,3 | 20 | 17,8 | 75 | 4,7 |
| 17/12/03 | 26 | 19,9 | 12,2 | 75 | 3,9 |
| 18/12/03 | 28,1 | 18 | 0 | 71,1 | 3,9 |
| 19/12/03 | 32 | 18 | 0 | 66,8 | 4,2 |
| 20/12/03 | 33,2 | 19,4 | 0 | 62,4 | 4,5 |
| 21/12/03 | 32,4 | 19,3 | 0,8 | 58,7 | 4,4 |
| 22/12/03 | 28,9 | 19,1 | 10,2 | 64,8 | 4,1 |
| 23/12/03 | 28,9 | 17,6 | 32,3 | 75 | 4 |
| 24/12/03 | 26,4 | 18,3 | 0,3 | 71,5 | 3,8 |
| 25/12/03 | 28,8 | 17,1 | 0 | 67,6 | 3,9 |
| 26/12/03 | 29,6 | 17,6 | 0 | 63,5 | 4 |
| 27/12/03 | 31,1 | 18,3 | 0 | 59,3 | 4,2 |
| 28/12/03 | 31,8 | 16,7 | 10,2 | 65,4 | 4,1 |
| 29/12/03 | 31,5 | 16,8 | 0,3 | 61,5 | 4,1 |
| 30/12/03 | 32,5 | 19 | 1,3 | 58,4 | 4,4 |

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| 31/12/03 | 29,8 | 21,1 | 0,3 | 54,4 | 4,3 |

**Quadro C** – Dados meteorológicos referentes ao mês de janeiro.

| Data | TMax (o C) | TMin (o C) | Prec. (mm) | DAAS (mm) | ETP (mm) |
|---|---|---|---|---|---|
| 31/12/03 | 31,7 | 19 | 0 | - | |
| 02/01/04 | 31,8 | 18,6 | 2 | 64,2 | 4,3 |
| 03/01/04 | 32,4 | 19,8 | 0 | 66,4 | 4,4 |
| 04/01/04 | 32,6 | 17,1 | 0 | 70,8 | 4,2 |
| 05/01/04 | 29,5 | 17,8 | 53,6 | 75 | 4 |
| 06/01/04 | 25,7 | 18,6 | 26,4 | 75 | 3,7 |
| 07/01/04 | 26,8 | 17,7 | 3,3 | 74,3 | 3,8 |
| 08/01/04 | 23,7 | 17,6 | 30,2 | 74,7 | 3,5 |
| 09/01/04 | 31,7 | 18,9 | 0 | 48 | 4,3 |
| 10/01/04 | 31,8 | 17,7 | 0 | 52,3 | 4,2 |
| 11/01/04 | 29,6 | 16,8 | 0 | 56,4 | 3,9 |
| 12/01/04 | 27,1 | 16,1 | 0,5 | 60,4 | 3,7 |
| 13/01/04 | 21,5 | 17,1 | 3,3 | 63,5 | 3,3 |
| 14/01/04 | 29,8 | 21,1 | 0,3 | 54,4 | 4,3 |
| 15/01/04 | 30,9 | 18,9 | 0 | 51,3 | 4,2 |
| 16/01/04 | 31,4 | 19,8 | 0 | 55,6 | 4,3 |
| 17/01/04 | 31,7 | 19 | 0 | 59,9 | 4,3 |
| 18/01/04 | 31,8 | 18,6 | 2 | 64,2 | 4,3 |
| 19/01/04 | 32,4 | 19,8 | 0 | 66,4 | 4,4 |
| 20/01/04 | 32,6 | 17,1 | 0 | 70,8 | 4,2 |
| 21/01/04 | 29,5 | 17,8 | 53,6 | 75 | 4 |

**Quadro D** – Dados meteorológicos referentes ao mês de fevereiro.

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| 02/02/04 | 32,2 | 18,3 | 0,3 | 67,8 | 4 |
| 03/02/04 | 31,9 | 19,4 | 19,6 | 75 | 4,1 |
| 04/02/04 | 32,6 | 20,2 | 32,8 | 75 | 4,2 |
| 05/02/04 | 31 | 21,1 | 2,8 | 73,6 | 4,2 |
| 06/02/04 | 28,9 | 20,3 | 5,3 | 75 | 3,9 |
| 07/02/04 | 25 | 17,4 | 5,3 | 75 | 3,4 |
| 08/02/04 | 27,7 | 15,9 | 0 | 71,5 | 3,5 |
| 09/02/04 | 27,6 | 15,4 | 0 | 68,1 | 3,4 |
| 10/02/04 | 29,4 | 15,8 | 0 | 64,5 | 3,6 |
| 11/02/04 | 29,6 | 17,5 | 0 | 60,7 | 3,8 |
| 12/02/04 | 34,3 | 17,4 | 0 | 56,6 | 4,1 |
| 13/02/04 | 31,8 | 17,5 | 6,6 | 59,2 | 3,9 |
| 14/02/04 | 24,6 | 17,4 | 0,3 | 56,1 | 3,4 |
| 15/02/04 | 30,2 | 18,6 | 33 | 75 | 3,9 |
| 16/02/04 | 30,5 | 18,7 | 0,8 | - | - |
| 17/02/04 | 32,3 | 17,4 | 0 | 67,9 | 4 |

# APÊNDICE A

## Vazão e tempo de detenção nos leitos durante o experimento

**Tabela A1** – Variação da vazão afluente (L/dia) dos leitos durante o mês de novembro de 2003.

| Leitos | 07/11/03 | 08/11/03 | 10/11/03 | 11/11/03 | 12/11/03 | 13/11/03 | 14/11/03 | 15/11/03 | 17/11/03 | 18/11/03 | 19/11/03 | 20/11/03 | 21/11/03 | 24/11/03 | 25/11/03 | 26/11/03 | 27/11/03 | 28/11/03 | 29/11/03 | 30/11/03 | Média |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| L1 | 179 | 132 | 173 | 173 | 168 | 170 | 166 | 157 | 164 | 144 | 72 | 135 | 141 | 140 | 82 | 85 | 78 | 143 | 65 | 115 | 134 |
| L2 | 179 | 113 | 138 | 173 | 174 | 132 | 171 | 158 | 158 | 142 | 72 | 129 | 141 | 131 | 88 | 71 | 118 | 134 | 51 | 107 | 129 |
| L3 | 167 | 145 | 132 | 158 | 170 | 158 | 171 | 134 | 102 | 118 | 101 | 69 | 44 | 53 | 93 | 73 | 63 | 141 | 118 | 168 | 119 |
| L4 | 175 | 177 | 144 | 132 | 137 | 138 | 135 | 134 | 134 | 143 | 107 | 162 | 141 | 137 | 154 | 51 | 116 | 127 | 65 | 127 | 132 |

**Tabela A2** – Variação da vazão afluente (L/dia) dos leitos durante o mês de dezembro de 2003.

| Leitos | 01/12/03 | 02/12/03 | 03/12/03 | 05/12/03 | 07/12/03 | 08/12/03 | 09/12/03 | 10/12/03 | 11/12/03 | 12/12/03 | 14/12/03 | 15/12/03 | 16/12/03 | 17/12/03 | 18/12/03 | 19/12/03 | Média |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| L1 | 118,08 | 114,48 | 37,44 | 25,92 | 39,24 | 54,72 | 46,08 | 48,96 | 48,96 | 48,24 | 45,36 | 44,16 | 40,32 | 38,88 | 48,96 | 44,64 | 52,78 |
| L2 | 97,20 | 97,20 | 37,44 | 40,32 | 39,24 | 44,64 | 80,64 | 48,96 | 40,32 | 53,28 | 45,36 | 44,16 | 47,52 | 37,44 | 50,4 | 43,20 | 52,96 |
| L3 | 162,72 | 167,04 | 40,32 | 41,76 | 54,72 | 36,48 | 30,96 | 38,88 | 50,4 | 45,36 | 40,32 | 46,8 | 37,44 | 42,84 | 34,56 | 18,72 | 55,58 |
| L4 | 156,96 | 125,28 | 57,60 | 57,60 | 55,08 | 44,64 | 20,16 | 34,56 | 43,2 | 44,40 | 29,52 | 39,84 | 17,28 | 33,12 | 30,96 | 10,08 | 50,02 |

**Tabela A3** – Variação da vazão afluente (L/dia) dos leitos durante o mês de janeiro de 2004.

| Leitos | 2/1/2004 | 3/1/2004 | 4/1/2004 | 5/1/2004 | 6/1/2004 | 7/1/2004 | 9/1/2004 | 10/1/2004 | 12/1/2004 | 13/1/2004 | 14/1/2004 | 15/1/2004 | 16/1/2004 | 17/1/2004 | 18/1/2004 | 19/1/2004 | 20/1/2004 | 21/1/2004 | 22/1/2004 | 23/1/2004 | 24/1/2004 | 27/1/2004 | 28/1/2004 | 29/1/2004 | 31/1/2004 | Média |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| L1 | 30,60 | 28,80 | 27,36 | 46,44 | 28,52 | 54,72 | 49,68 | 60,72 | 49,44 | 41,40 | 28,66 | 54,72 | 87,36 | 65,52 | 72,00 | 59,76 | 34,92 | 51,12 | 33,12 | 63,36 | 30,24 | 30,96 | 39,96 | 63,00 | 60,48 | 47,71 |
| L2 | 30,24 | 28,80 | 27,36 | 44,46 | 26,51 | 54,72 | 38,16 | 43,56 | 49,44 | 39,36 | 28,66 | 54,72 | 87,36 | 65,52 | 72,00 | 59,76 | 34,92 | 51,12 | 33,12 | 63,36 | 30,24 | 30,96 | 39,96 | 63,00 | 60,48 | 46,31 |
| L3 | 30,96 | 33,84 | 47,16 | 42,66 | 20,82 | 100,80 | 72,00 | 48,48 | 60,00 | 48,00 | 35,86 | 51,12 | 60,48 | 34,20 | 41,76 | 33,12 | 20,52 | 45,36 | 54,00 | 48,24 | 56,16 | 43,20 | 37,44 | 103,68 | 50,40 | 48,81 |
| L4 | 25,56 | 25,56 | 21,96 | 41,94 | 18,10 | 86,40 | 65,52 | 79,20 | 51,36 | 27,84 | 26,33 | 36,72 | 41,76 | 44,64 | 54,72 | 54,72 | 29,88 | 46,80 | 30,96 | 61,56 | 47,52 | 0,00 | 38,16 | 52,20 | 34,56 | 41,76 |

**Tabela A4** – Variação da vazão afluente (L/dia) dos leitos durante o mês de fevereiro de 2004.

| Leitos | 2/2/2004 | 3/2/2004 | 4/2/2004 | 5/2/2004 | 6/2/2004 | 7/2/2004 | 8/2/2004 | 9/2/2004 | 10/2/2004 | 11/2/2004 | 12/2/2004 | 13/2/2004 | 15/2/2004 | 16/2/2004 | 17/2/2004 | Média |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| L1 | 30,60 | 57,60 | 43,92 | 41,76 | 41,04 | 30,96 | 64,80 | 56,16 | 38,88 | 41,76 | 55,08 | 34,56 | 38,88 | 40,32 | 51,84 | 44,54 |
| L2 | 30,24 | 57,60 | 43,92 | 41,76 | 40,32 | 30,96 | 64,80 | 56,16 | 38,88 | 41,76 | 55,08 | 34,56 | 38,88 | 40,32 | 51,84 | 44,47 |
| L3 | 30,96 | 34,56 | 55,80 | 64,80 | 33,12 | 35,28 | 42,48 | 50,40 | 49,68 | 53,28 | 51,12 | 36,00 | 33,84 | 33,84 | 40,32 | 43,03 |
| L4 | 25,56 | 38,88 | 40,32 | 38,88 | 56,88 | 60,12 | 55,44 | 51,84 | 31,32 | 44,64 | 51,84 | 47,52 | 30,96 | 38,88 | 41,76 | 43,66 |

**Tabela A5** – Variação do tempo de detenção hidráuilico (TDH), em dias, nos leitos durante o mês de novembro de 2003.

| Leitos | 07/11/03 | 08/11/03 | 10/11/03 | 11/11/03 | 12/11/03 | 13/11/03 | 14/11/03 | 15/11/03 | 17/11/03 | 18/11/03 | 19/11/03 | 20/11/03 | 21/11/03 | 24/11/03 | 25/11/03 | 26/11/03 | 27/11/03 | 28/11/03 | 29/11/03 | 30/11/03 | Média |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| L1 | 0,86 | 1,16 | 0,89 | 0,89 | 0,91 | 0,91 | 0,93 | 0,98 | 0,94 | 1,07 | 2,14 | 1,22 | 1,09 | 1,10 | 0,47 | 0,90 | 9,43 | 1,08 | 0,59 | 1,34 | 1,44 |
| L2 | 0,86 | 1,34 | 1,11 | 0,89 | 0,88 | 1,16 | 0,90 | 0,98 | 0,97 | 1,09 | 2,14 | 1,30 | 1,09 | 1,18 | 0,44 | 1,01 | 1,39 | 1,15 | 0,75 | 1,44 | 1,10 |
| L3 | 0,92 | 1,06 | 1,16 | 0,97 | 0,91 | 0,97 | 0,90 | 1,15 | 1,62 | 3,16 | 1,53 | 0,56 | 1,49 | 0,73 | 1,65 | 1,35 | 14,00 | 1,12 | 1,30 | 0,91 | 1,87 |
| L4 | 0,88 | 0,87 | 1,07 | 1,16 | 1,13 | 1,11 | 1,14 | 1,15 | 1,15 | 1,10 | 1,44 | 0,95 | 1,09 | 1,12 | 1,00 | 0,34 | 1,42 | 1,21 | 0,59 | 1,28 | 1,06 |

**Tabela A6** – Variação do tempo de detenção hidráuilico (TDH), em dias, nos leitos durante o mês de dezembro de 2003.

| Leitos | 01/12/03 | 02/12/03 | 03/12/03 | 05/12/03 | 07/12/03 | 08/12/03 | 09/12/03 | 10/12/03 | 11/12/03 | 12/12/03 | 14/12/03 | 15/12/03 | 16/12/03 | 17/12/03 | 18/12/03 | 19/12/03 | Média |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| L1 | 1,34 | 1,35 | 4,21 | 7,40 | 3,96 | 2,82 | 3,34 | 3,14 | 3,14 | 3,19 | 3,60 | 3,58 | 3,82 | 5,73 | 3,14 | 3,45 | 3,58 |
| L2 | 1,58 | 1,59 | 4,21 | 4,16 | 3,96 | 3,63 | 1,91 | 3,14 | 3,82 | 2,91 | 3,60 | 3,58 | 3,24 | 5,79 | 3,05 | 3,56 | 3,36 |
| L3 | 0,95 | 0,92 | 3,84 | 3,91 | 2,84 | 5,20 | 4,97 | 4,34 | 3,05 | 3,39 | 3,90 | 3,29 | 4,11 | 3,89 | 5,18 | 8,22 | 3,88 |
| L4 | 0,98 | 0,84 | 2,67 | 2,67 | 2,79 | 3,46 | 7,63 | 5,39 | 3,56 | 3,64 | 6,64 | 4,33 | 8,91 | 5,73 | 5,89 | 15,27 | 5,03 |

**Tabela A7** – Variação do tempo de detenção hidráuilico (TDH), em dias, nos leitos durante o mês de janeiro de 2004.

| Leitos | 2/1/2004 | 3/1/2004 | 4/1/2004 | 5/1/2004 | 6/1/2004 | 7/1/2004 | 9/1/2004 | 10/1/2004 | 12/1/2004 | 13/1/2004 | 14/1/2004 | 15/1/2004 | 16/1/2004 | 17/1/2004 | 18/1/2004 | 19/1/2004 | 20/1/2004 | 21/1/2004 | 22/1/2004 | 23/1/2004 | 24/1/2004 | 27/1/2004 | 28/1/2004 | 29/1/2004 | 31/1/2004 | Média |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| L1 | 1,26 | 3,34 | 1,41 | 4,02 | 17,54 | 2,81 | 5,06 | 4,50 | 19,28 | 10,57 | 20,25 | 27,44 | 0,78 | 7,78 | 5,94 | 4,87 | 14,60 | 11,50 | 1,16 | 2,57 | 28,05 | 1,24 | 8,03 | 3,88 | 0,64 | 8,34 |
| L2 | 1,27 | 3,34 | 1,41 | 4,40 | 9,02 | 2,81 | 5,45 | 5,94 | 19,28 | 13,38 | 20,25 | 27,44 | 0,78 | 7,78 | 5,94 | 4,87 | 14,60 | 11,50 | 1,16 | 2,57 | 28,05 | 1,24 | 8,03 | 3,88 | 0,64 | 8,20 |
| L3 | 1,24 | 7,03 | 3,99 | 4,83 | 15,96 | 1,53 | 2,14 | 5,99 | 4,25 | 2,55 | 2,42 | 3,24 | 2,60 | 5,99 | 3,69 | 1,16 | 15,00 | 5,18 | 3,53 | 6,81 | 9,65 | 0,89 | 10,12 | 14,33 | 4,33 | 5,54 |
| L4 | 1,51 | 14,82 | 1,75 | 4,27 | 22,15 | 1,78 | 3,87 | 2,15 | 3,34 | 8,02 | 37,69 | 54,51 | 10,86 | 29,04 | 4,23 | 4,23 | 8,46 | 5,14 | 1,24 | 5,29 | 4,84 | 0,00 | 3,58 | 11,30 | 19,00 | 10,52 |

**Tabela A8** – Variação do tempo de detenção hidráuilico (TDH), em dias, nos leitos durante o mês de fevereiro de 2004.

| Leitos | 2/2/2004 | 3/2/2004 | 4/2/2004 | 5/2/2004 | 6/2/2004 | 7/2/2004 | 8/2/2004 | 9/2/2004 | 10/2/2004 | 11/2/2004 | 12/2/2004 | 13/2/2004 | 15/2/2004 | 16/2/2004 | 17/2/2004 | Média |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| L1 | 1,26 | 9,63 | 14,45 | 14,35 | 27,69 | 28,02 | 0,59 | 5,31 | 17,44 | 27,67 | 16,34 | 1,11 | 0,99 | 0,95 | 27,48 | 12,89 |
| L2 | 1,27 | 9,63 | 14,45 | 14,35 | 27,71 | 28,02 | 0,59 | 5,31 | 17,44 | 27,67 | 16,34 | 1,11 | 0,99 | 0,95 | 27,48 | 12,89 |
| L3 | 1,24 | 4,45 | 7,55 | 13,98 | 10,24 | 5,59 | 18,77 | 6,51 | 5,43 | 3,66 | 5,66 | 6,68 | 1,14 | 14,60 | 8,72 | 7,62 |
| L4 | 1,51 | 27,75 | 1,11 | 27,75 | 27,41 | 2,90 | 0,69 | 18,61 | 14,62 | 27,61 | 14,13 | 0,81 | 1,24 | 0,99 | 0,92 | 11,20 |

# APÊNDICE B

## Desempenho dos leitos cultivados

**Saída L2' -** % de remoção em relação a entrada de L1 (sistema em série).

**Tabela B1** – Resultados de pH do afluente e do efluente dos leitos ao longo do experimento.

| Semana | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Afluente** | 5,35 | 4,94 | 4,19 | 4,51 | 4,6 | 4,65 | 7,4 | 4,86 | 5,03 | 4,87 | 5,58 | 4,72 | 4,58 |
| **Saída L1** | 6,01 | 5,3 | 4,93 | 4,85 | 5,55 | 6,89 | 7,98 | 7,44 | 7,45 | 7,77 | 7,83 | 8,28 | 7,47 |
| **Saida L2** | 6,46 | 5,71 | 5,28 | 5,55 | 7,14 | 7,53 | 8,45 | 7,88 | 7,62 | 7,93 | 7,74 | 8,56 | 7,5 |
| **Saída L3** | 6,24 | 5,79 | 5,82 | 4,81 | 6,92 | 7,14 | 7,6 | 7,13 | 7,56 | 7,61 | 7,38 | 8,11 | 7,7 |
| **Saída L4** | 6,24 | 5,53 | 5,06 | 4,88 | 6,78 | 7,04 | 7,24 | 7,06 | 7,52 | 7,5 | 7,36 | 8 | |
| **Coleta** | 11/11/03 | 18/11/03 | 25/11/03 | 2/12/03 | 9/12/03 | 16/12/03 | 6/1/04 | 13/1/04 | 20/1/04 | 28/1/04 | 3/2/04 | 10/2/04 | 17/2/04 |

**Tabela B2** – Resultados de ST (mg/L) do afluente e do efluente dos leitos durante o experimento.

| Semana | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Afluente** | 2623 | 3041 | 934 | 639 | 576 | 516 | 669 | 723 | 914 | 541 | 397 | 503 | 636 | |
| **Saída L1** | 2032 | 1225 | 1001 | 681 | 694 | 510 | 327 | 638 | 468 | 382 | 304 | 333 | 349 | |
| **Saida L2** | 1663 | 952 | 1598 | 656 | 597 | 371 | 335 | 374 | 398 | 335 | 318 | 284 | 328 | |
| **Saída L3** | 2232 | 1322 | 2380 | 794 | 649 | 501 | 350 | 500 | 640 | 401 | 343 | 284 | 330 | |
| **Saída L4** | 2318 | 1953 | 667 | 752 | 646 | 554 | 348 | 718 | 580 | 427 | 337 | 321 | | |
| **Coleta** | 11/11/04 | 18/11/03 | 25/11/03 | 2/12/03 | 9/12/03 | 16/12/03 | 6/1/04 | 13/1/04 | 20/1/04 | 28/1/04 | 3/2/04 | 10/2/04 | 17/2/04 | |
| **Remoção (%)** | | | | | | | | | | | | | | **Média** |
| **Saída L1** | 23 | 60 | -7 | -7 | -20 | 1 | 51 | 12 | 49 | 29 | 23 | 34 | 45 | 33 |
| **Saida L2** | 18 | 22 | -60 | 4 | 14 | 27 | -2 | 41 | 15 | 12 | -5 | 15 | 6 | 17 |
| **Saida L2'** | 37 | 69 | -71 | -3 | -4 | 28 | 50 | 48 | 57 | 38 | 20 | 44 | 48 | 44 |
| **Saída L3** | 15 | 57 | -155 | -24 | -13 | 3 | 48 | 31 | 30 | 26 | 14 | 43 | 48 | 31 |
| **Saída L4** | 12 | 36 | 29 | -18 | -12 | -7 | 48 | 1 | 37 | 21 | 15 | 36 | | 26 |

**Tabela B3** – Resultados de SST (mg/L) do afluente e do efluente dos leitos durante o experimento.

| Semana | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Afluente** | 140 | 400 | 118 | 49 | 79 | 47 | 42 | 51 | 101 | 87 | 64 | 47 | 138 | |
| **Saída L1** | 60 | 171 | 53 | 37 | 272 | 27 | 11 | 30 | 12 | 11 | -4 | -5 | 8 | |
| **Saida L2** | 60 | 69 | 40 | 20 | 457 | 22 | 15 | 5 | 10 | 3 | -4 | -6 | 9 | |
| **Saída L3** | 55 | 65 | 61 | 39 | 4 | 47 | 24 | 18 | 18 | 10 | 2 | -8 | 6 | |
| **Saída L4** | 56 | 55 | 61 | 27 | 19 | 26 | 12 | 15 | 19 | 7 | 8 | 8 | | |
| **Coleta** | 11/11/03 | 18/11/03 | 25/11/03 | 2/12/03 | 9/12/03 | 16/12/03 | 6/1/04 | 13/1/04 | 20/1/04 | 28/1/04 | 3/2/04 | 10/2/04 | 17/2/04 | |
| **Remoção (%)** | | | | | | | | | | | | | | **Média** |
| **Saída L1** | 57 | 57 | 55 | 25 | -246 | 43 | 74 | 40 | 88 | 87 | 107 | 111 | 94 | 62 |
| **Saida L2** | 0 | 60 | 25 | 46 | -68 | 17 | -41 | 84 | 18 | 71 | 16 | -19 | -6 | 40 |
| **Saida L2'** | 57 | 83 | 66 | 59 | -480 | 53 | 64 | 91 | 90 | 96 | 106 | 113 | 94 | 75 |
| **Saída L3** | 61 | 84 | 48 | 22 | 95 | -2 | 44 | 65 | 83 | 88 | 97 | 116 | 96 | 71 |
| **Saída L4** | 60 | 86 | 48 | 46 | 76 | 44 | 71 | 70 | 81 | 92 | 87 | 83 | | 70 |

**Tabela B4** – Resultados de DQO total (mg/L) do afluente e do efluente dos leitos durante o experimento.

| Semana | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Afluente** | 2946 | 3421 | 1923 | 1523 | 1149 | 700 | 437 | 784 | 899 | 801 | 569 | 737 | 864 | |
| **Saída L1** | 2397 | 2272 | 1935 | 1174 | 762 | 312 | 12 | 403 | 109 | 20 | 20 | 47 | 6 | |
| **Saida L2** | 1198 | 1810 | 2122 | 886 | 499 | 95 | 0 | 49 | 14 | 25 | 25 | 22 | 5 | |
| **Saída L3** | 2247 | 2085 | 2272 | 1511 | 762 | 257 | 29 | 190 | 297 | 37 | 92 | 27 | 7 | |
| **Saída L4** | 2372 | 1910 | 1898 | 1236 | 712 | 302 | 6 | 307 | 241 | 55 | 40 | 37 | | |
| **Coleta** | 11/11/03 | 18/11/03 | 25/11/03 | 2/12/03 | 9/12/03 | 16/12/03 | 6/1/04 | 13/1/04 | 20/1/04 | 28/1/04 | 3/2/04 | 10/2/04 | 17/2/04 | |
| **Remoção (%)** | | | | | | | | | | | | | | **Média** |
| **Saída L1** | 19 | 34 | -1 | 23 | 34 | 55 | 97 | 49 | 88 | 98 | 97 | 94 | 99 | 65 |
| **Saida L2** | 50 | 20 | -10 | 25 | 34 | 70 | 100 | 88 | 87 | -25 | -26 | 53 | 22 | 50 |
| **Saida L2'** | 59 | 47 | -10 | 42 | 57 | 86 | 100 | 94 | 98 | 97 | 96 | 97 | 99 | 79 |
| **Saída L3** | 24 | 39 | -18 | 1 | 34 | 63 | 93 | 76 | 67 | 95 | 84 | 96 | 99 | 64 |
| **Saída L4** | 19 | 44 | 1 | 19 | 38 | 57 | 99 | 61 | 73 | 93 | 93 | 95 | | 58 |

**Tabela B5** – Resultados de DQO filtrada (mg/L) do afluente e do efluente dos leitos durante o experimento.

| Semana | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Afluente** | 2771 | 2597 | 1823 | 1124 | 699 | 649 | 376 | 732 | 829 | 689 | 452 | 694 | 662 | |
| **Saída L1** | 1873 | 2122 | 2072 | 924 | 574 | 250 | 0 | 404 | 109 | 7 | 16 | 31 | 6 | |
| **Saida L2** | 1149 | 1735 | 2110 | 749 | 449 | 25 | 0 | 55 | 14 | -7 | 10 | 17 | -3 | |
| **Saída L3** | 2222 | 1935 | 2247 | 1448 | 587 | 212 | 9 | 182 | 297 | 47 | 102 | 26 | 65 | |
| **Saída L4** | 2322 | 1910 | 1873 | 1161 | 562 | 225 | 9 | 308 | 241 | 51 | 20 | 22 | | |
| **Coleta** | 11/11/03 | 18/11/03 | 25/11/03 | 2/12/03 | 9/12/03 | 16/12/03 | 6/1/04 | 13/1/04 | 20/1/04 | 28/1/04 | 3/2/04 | 10/2/04 | 17/2/04 | |
| **Remoção (%)** | | | | | | | | | | | | | | **Média** |
| **Saída L1** | 32 | 18 | -14 | 18 | 18 | 62 | 100 | 45 | 87 | 99 | 97 | 96 | 99 | 61 |
| **Saida L2** | 39 | 18 | -2 | 19 | 22 | 90 | 0 | 86 | 87 | 200 | 40 | 45 | 152 | 50 |
| **Saida L2'** | 59 | 33 | -16 | 33 | 36 | 96 | 100 | 92 | 98 | 101 | 98 | 98 | 100 | 71 |
| **Saída L3** | 20 | 25 | -23 | -29 | 16 | 67 | 98 | 75 | 64 | 93 | 77 | 96 | 90 | 66 |
| **Saída L4** | 16 | 26 | -3 | -3 | 20 | 65 | 98 | 58 | 71 | 93 | 96 | 97 | | 64 |

**Tabela B6** – Resultados de Fósforo Total (mg/L) do afluente e do efluente dos leitos durante o experimento.

| Semana | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Afluente** | 3,766 | 8,480 | 2,640 | 1,390 | 1,797 | 1,821 | 0,913 | 0,897 | 0,435 | 0,642 | 1,239 | 0,777 | 2,211 | |
| **Saída L1** | 0,301 | 1,490 | 1,490 | 1,670 | 0,865 | 1,406 | 2,553 | 0,705 | 0,084 | 0,570 | | -0,011 | -0,011 | |
| **Saida L2** | 3,209 | 1,410 | 0,800 | 2,510 | 0,427 | 0,315 | 0,108 | 0,140 | | 0,020 | 0,172 | -0,179 | -0,075 | |
| **Saída L3** | 1,018 | 1,560 | 1,060 | 1,730 | 1,112 | 1,343 | 1,868 | 1,032 | -0,035 | 0,602 | 0,889 | 0,419 | 0,594 | |
| **Saída L4** | 0,540 | 1,460 | 1,800 | 1,210 | 0,713 | 1,104 | 2,514 | 0,490 | 0,044 | 0,538 | 0,156 | -0,131 | | |
| **Coleta** | 11/11/03 | 18/11/03 | 25/11/03 | 2/12/03 | 9/12/03 | 16/12/03 | 6/1/04 | 13/1/04 | 20/1/04 | 28/1/04 | 3/2/04 | 10/2/04 | 17/2/04 | |
| **Remoção (%)** | | | | | | | | | | | | | | **Média** |
| **Saída L1** | 92 | 82 | 44 | -20 | 52 | 23 | -180 | 21 | 81 | 11 | 100 | 101 | 101 | 51 |
| **Saida L2** | -966 | 5 | 46 | -50 | 51 | 78 | 96 | 80 | 100 | 96 | | -1458 | -556 | 65 |
| **Saida L2'** | 15 | 83 | 70 | -81 | 76 | 83 | 88 | 84 | 100 | 97 | 86 | 123 | 103 | 76 |
| **Saída L3** | 73 | 82 | 60 | -24 | 38 | 26 | -105 | -15 | 108 | 6 | 28 | 46 | 73 | 48 |
| **Saída L4** | 86 | 83 | 32 | 13 | 60 | 39 | -175 | 45 | 90 | 16 | 87 | 117 | | 55 |

**Tabela B7** – Resultados de NTK (mg/L) do afluente e do efluente dos leitos durante o experimento.

| Semana | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Afluente** | 11,456 | 7,909 | 2,546 | 5,451 | 3,590 | 0,087 | 5,169 | 3,654 | 3,393 | 2,530 | 2,689 | 5,816 | |
| **Saída L1** | 3,509 | 3,509 | 1,474 | 2,835 | 1,325 | 1,090 | 0,883 | 0,670 | 0,602 | 0,500 | 0,434 | 0,532 | |
| **Saida L2** | 3,011 | 2,627 | 0,545 | 1,286 | 1,198 | 1,220 | 0,788 | 1,279 | 1,120 | 0,426 | 0,190 | 0,322 | |
| **Saída L3** | 3,011 | 5,627 | 4,182 | 5,658 | 2,522 | 2,440 | 2,652 | 0,821 | 0,718 | 0,724 | 0,971 | 1,270 | |
| **Saída L4** | 4,234 | 1,695 | 1,682 | 3,101 | 2,078 | 1,025 | 2,776 | 0,896 | 0,779 | 0,500 | 0,354 | | |
| **Coleta** | 18/11/03 | 25/11/03 | 2/12/03 | 9/12/03 | 16/12/03 | 6/1/04 | 13/1/04 | 20/1/04 | 28/1/04 | 3/2/04 | 10/2/04 | 17/2/04 | |
| **Remoção (%)** | | | | | | | | | | | | | **Média** |
| **Saída L1** | 69 | 56 | 42 | 48 | 63 | -1159 | 83 | 82 | 82 | 80 | 84 | 91 | 71 |
| **Saida L2** | 14 | 25 | 63 | 55 | 10 | -12 | 11 | -91 | -86 | 15 | 56 | 40 | 32 |
| **Saida L2'** | 74 | 67 | 79 | 76 | 67 | -1309 | 85 | 65 | 67 | 83 | 93 | 94 | 77 |
| **Saída L3** | 74 | 29 | -64 | -4 | 30 | -2717 | 49 | 78 | 79 | 71 | 64 | 78 | 61 |
| **Saída L4** | 63 | 79 | 34 | 43 | 42 | -1084 | 46 | 75 | 77 | 80 | 87 | | 63 |

**Tabela B8** – Resultados de N-Norg (mg/L) do afluente e do efluente dos leitos durante o experimento.

| Semana | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Afluente** | 11,456 | 7,909 | 2,546 | 5,451 | 3,069 | 0,087 | 5,169 | 3,654 | 3,393 | 2,530 | 2,689 | 5,816 | |
| **Saída L1** | 3,410 | 3,509 | 1,314 | 2,002 | 0,296 | 0,066 | 0,381 | 0,670 | 0,239 | 0,500 | 0,434 | 0,532 | |
| **Saida L2** | 2,911 | 2,435 | 0,322 | 0,831 | 0,426 | 1,054 | 0,788 | 1,279 | 1,057 | 0,426 | 0,190 | 0,322 | |
| **Saída L3** | 3,011 | 3,875 | 4,080 | 4,174 | 2,063 | 1,270 | 1,066 | 0,511 | 0,153 | 0,433 | 0,474 | 0,505 | |
| **Saída L4** | 4,180 | 1,641 | 1,634 | 2,075 | -0,030 | -1,476 | 2,072 | 0,896 | 0,716 | 0,500 | 0,354 | | |
| **Coleta** | 18/11/03 | 25/11/03 | 2/12/03 | 9/12/03 | 16/12/03 | 6/1/04 | 13/1/04 | 20/1/04 | 28/1/04 | 3/2/04 | 10/2/04 | 17/2/04 | |
| **Remoção (%)** | | | | | | | | | | | | | **Média** |
| **Saída L1** | 70 | 56 | 48 | 63 | 90 | 24 | 93 | 82 | 93 | 80 | 84 | 91 | 73 |
| **Saida L2** | 15 | 31 | 75 | 59 | -44 | -1505 | -107 | -91 | -342 | 15 | 56 | 40 | 41 |
| **Saida L2'** | 75 | 69 | 87 | 85 | 86 | -1117 | 85 | 65 | 69 | 83 | 93 | 94 | 81 |
| **Saída L3** | 74 | 51 | -60 | 23 | 33 | -1367 | 79 | 86 | 95 | 83 | 82 | 91 | 70 |
| **Saída L4** | 64 | 79 | 36 | 62 | 101 | 1805 | 60 | 75 | 79 | 80 | 87 | | 69 |

**Tabela B9** – Resultados de N-$NH_3$ (mg/L) do afluente e do efluente dos leitos durante o experimento.

| Semana | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Afluente** | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,5207 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 |
| **Saída L1** | 0,0991 | 0,0000 | 0,1597 | 0,8329 | 1,0293 | 1,0244 | 0,5021 | 0,0000 | 0,3630 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 |
| **Saida L2** | 0,0991 | 0,1917 | 0,2227 | 0,4550 | 0,7723 | 0,1664 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0627 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 |
| **Saída L3** | 0,0000 | 1,7515 | 0,1014 | 1,4839 | 0,4588 | 1,1694 | 1,5864 | 0,3097 | 0,5643 | 0,2907 | 0,4977 | 0,7648 |
| **Saída L4** | 0,0540 | 0,0540 | 0,0478 | 1,0254 | 2,1082 | 2,5013 | 0,7037 | 0,0000 | 0,0627 | 0,0000 | 0,0000 | |
| **Coleta** | 18/11/03 | 25/11/03 | 2/12/03 | 9/12/03 | 16/12/03 | 6/1/04 | 13/1/04 | 20/1/04 | 28/1/04 | 3/2/04 | 10/2/04 | 17/2/04 |

**Tabela B10** – Resultados de $N\text{-}NO_2^-$ + $N\text{-}NO_3^-$ (mg/L) do afluente e do efluente dos leitos durante o experimento.

| Semana | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Afluente** | 0,3601 | 0,0754 | 0,0415 | 0,0875 | -0,0387 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 |
| **Saída L1** | 0,2610 | 0,0754 | -0,1493 | -0,0585 | -0,0549 | -0,2656 | -0,3486 | 0,0000 | -0,0104 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 |
| **Saida L2** | 0,2610 | 0,2608 | -0,2122 | 0,0755 | 0,0345 | -0,0461 | 0,0383 | 0,0000 | 0,0624 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 |
| **Saída L3** | 0,2665 | 0,7409 | -0,0909 | -0,0883 | 0,0233 | -0,4106 | -0,1318 | -0,1151 | 0,1282 | 0,0606 | 0,0400 | -0,2029 |
| **Saída L4** | 0,2125 | 0,2125 | -0,0241 | 0,0067 | 0,0370 | -0,8306 | 0,0333 | 0,0000 | 0,0624 | 0,4803 | 0,5377 | |
| **Coleta** | 18/11/03 | 25/11/03 | 2/12/03 | 9/12/03 | 16/12/03 | 6/1/04 | 13/1/04 | 20/1/04 | 28/1/04 | 3/2/04 | 10/2/04 | 17/2/04 |