

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

**AVALIAÇÃO DO EMPREGO DE LAGOAS DE
ESTABILIZAÇÃO EM ESCALA PILOTO PARA PESQUISA
DE TRATAMENTO DE ESGOTO DOMÉSTICO**

RENATA ALVES PERÍGOLO

ORIENTADOR: RICARDO SILVEIRA BERNARDES

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM TECNOLOGIA AMBIENTAL E
RECURSOS HÍDRICOS**

PUBLICAÇÃO: MTARH. DM – 75/04

BRASÍLIA/DF: DEZEMBRO – 2004

Livros Grátis

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

**AVALIAÇÃO DO EMPREGO DE LAGOAS DE ESTABILIZAÇÃO
EM ESCALA PILOTO PARA PESQUISA DE TRATAMENTO DE
ESGOTO DOMÉSTICO**

RENATA ALVES PERÍGOLO

**DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE
ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL DA FACULDADE DE
TECNOLOGIA DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA COMO PARTE
DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU
DE MESTRE EM TECNOLOGIA AMBIENTAL E RECURSOS
HÍDRICOS.**

APROVADA POR:

Prof. Ricardo Silveira Bernardes, PhD (ENC-UnB)
(Orientador)

Prof. Marco Antonio Almeida de Souza, PhD (ENC-UnB)
(Examinador Interno)

Celina Maria Lopes Ferreira, Doutora (ANA)
(Examinadora Externa)

BRASÍLIA/DF, 08 DE DEZEMBRO DE 2004

FICHA CATALOGRÁFICA

PERÍGOLO, RENATA ALVES

Avaliação do Emprego de Lagoas de Estabilização em Escala Piloto para Pesquisa de Tratamento de Esgoto Doméstico [Distrito Federal] 2004.

xx, 113p., 297 mm (ENC/FT/UnB, Mestre, Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos, 1999). Dissertação de Mestrado – Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia.

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental.

1.Lagoas de estabilização

2.Lagoas piloto

3.Desempenho

4.Comportamento hidrodinâmico

5.Clima

6.K

I. ENC/FT/UnB

II. Título (série)

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

PERÍGOLO, R. A. (2004). Avaliação do Emprego de Lagoas de Estabilização em Escala Piloto para Pesquisa de Tratamento de Esgoto Doméstico. Dissertação de Mestrado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos, Publicação MTARH.DM – 75/04, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 113p.

CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: Renata Alves Perígolo.

TÍTULO: Avaliação do Emprego de Lagoas de Estabilização em Escala Piloto para Pesquisa de Tratamento de Esgoto Doméstico.

GRAU: Mestre

ANO: 2004

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias desta dissertação de mestrado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte dessa dissertação de mestrado pode ser reproduzida sem autorização por escrito do autor.

Renata Alves Perígolo
UnB. Colina. Bloco K. Apto 103. Asa Norte.
CEP 70.910-900. Brasília – DF – Brasil.

A meus pais, irmãos e noivo,
por serem meu “chão”.

“Clama a mim, e responder-te-ei, e anunciar-te-ei cousas grandes e firmes, que não sabes.” Jeremias 33:3. Deus nos dá mais do que aquilo que pedimos ou pensamos.

AGRADECIMENTOS

A Deus, por ter me conduzido até aqui, com muitas bênçãos e imenso amor.

Ao orientador, Prof. Ricardo, pela orientação, conversas agradáveis e exemplo de bom relacionamento com as pessoas.

Aos profs., Cristina e Koide, pela dedicação e carinho que têm com os alunos e à pesquisa e a seriedade com que encaram a universidade pública brasileira.

Ao prof. Marco Antônio, pelas sugestões, brincadeiras e providências fundamentais para o andamento deste trabalho.

Ao coordenador da ETEB norte, Carlos Daidi, pelo grande apoio, disponibilidade e interesse demonstrados, principalmente na fase experimental.

Ao meu cunhado Goes, quem me convenceu a fazer o mestrado em Brasília, à sua presença de irmão por meio conselhos, grande contribuição neste trabalho e ao exemplo que tem sido como pesquisador.

Ao Maurício e Seandro, por terem dado muito mais que um auxílio na etapa experimental.

Aos amigos da PTARH, Adriana, Andréas (Barnez e Narítza), Christinne, Erliene, Itonaga, Jazielle, Mônica, Selma e Vanusa, pelos excelentes momentos que passamos de brincadeiras e troca de experiências.

Aos companheiros de laboratório, André, Boy, Bruno e Chico, pela grande ajuda e amizade.

Aos amigos da ETEB norte, Ana Maria, Antônio Carlos, Bahiano, Costa, Ercília, Odailma, Pedro, Rai, Rita, Rosilene e operadores, sempre atenciosos e interessados nos resultados desta pesquisa.

Ao Marquinho e Pufal, pela amizade e grande auxílio com os dados meteorológicos.

Às pesquisadoras da Embrapa, Solange e Lúcia, pelas informações prontamente concedidas.

Aos amigos da Colina, Ana Cláudia, Bárbara, Érika, Geisa, Lorena, Luzia, Marcelo, Maurício, Montoya, Nélvio, Renata, Raimunda, pela boa convivência.

À minha família distante, em especial à minha querida madrinha Rosália e tia Rosely, pela torcida, dedicação e carinho.

Aos amigos, Adriana e Gilson, Josélia e Roberto, Luana e Evandro, Marly e Manoel, pelos bons e maus momentos de verdadeiras amizades.

Com certeza, a conclusão deste trabalho só foi possível porque tive vocês.

Agradeço, de coração.

RESUMO

AVALIAÇÃO DO EMPREGO DE LAGOAS DE ESTABILIZAÇÃO EM ESCALA PILOTO PARA PESQUISA DE TRATAMENTO DE ESGOTO DOMÉSTICO

As lagoas de estabilização têm sido a técnica de tratamento de esgotos domésticos mais utilizada nos países em desenvolvimento, caracterizando-se por ser um processo de tratamento simples e por apresentar excelente eficiência de remoção de matéria orgânica, nutrientes e patógenos. Dados de 2002 informam que somente no Brasil elas estão presentes em 375 localidades (IBGE, 2002).

O dimensionamento de lagoas tem sido na maioria das vezes executado por métodos empíricos que apresentam resultados divergentes, levando à necessidade de maiores estudos do processo de tratamento. O uso de lagoa em escala real tem apresentado grande dificuldade, pois essas lagoas apresentam características peculiares, refletindo resultados particulares. Com isso, o emprego de lagoas piloto permite um maior controle do tratamento e flexibilidade operacional visando obtenção de parâmetros intervenientes no processo.

Nesse contexto, o presente trabalho avaliou a aplicabilidade do uso de lagoas de estabilização em escala piloto em pesquisas sobre tratamento de esgotos domésticos, utilizando-se duas lagoas que recebem esgoto doméstico após tratamento preliminar.

Foram analisados o comportamento hidrodinâmico, as condições de mistura (com ênfase na questão da estratificação térmica), o desempenho do tratamento, correlações do desempenho com os fatores climáticos (radiação solar, temperatura do ar e do líquido) e alguns modelos explicativos do funcionamento de lagoas.

Os resultados do presente trabalho demonstraram que as lagoas piloto podem ser utilizadas como ferramenta no estudo de lagoas de estabilização, com uma restrição principal quanto ao efeito de vento, ausente nessa escala. As lagoas piloto trabalharam com elevada taxa de aplicação superficial (430 Kg.DBO/ha.d) e tempo de detenção pequeno (em torno de 4 dias), e em comparação com as lagoas em escala real alcançaram eficiência de tratamento similar (remoção de DBO filtrada em torno de 90%), maior concentração de algas e modelo de mistura com características entre mistura completa e fluxo em pistão.

ABSTRACT

ASSESSMENT OF THE EMPLOYMENT OF PILOT SCALE FACULTATIVE PONDS FOR STUDIES OF DOMESTIC WASTEWATER TREATMENT

Stabilization ponds have been the most used wastewater treatment technique in developing countries, mainly because the simple treatment process and the high efficiency in organic matter, nutrients and pathogens removal. Data from a 2002 survey indicate that in Brazil alone these ponds are present in 375 locations (IBGE, 2002).

The design of these ponds has been largely based in empirical methods that often lead to divergences in the resulting pond configuration, which indicate the need for further studies of the behavior in these ponds. The use of a prototype scale ponds is difficult due to the peculiarities in the geometry and configuration of the ponds, which is reflected in the treatment efficiency. The use of smaller scale ponds is thus more appropriate because a better control of the operation parameters is possible, which lead to a better understanding of the intervenient parameters of the treatment process.

In this context, the present investigation promoted an assessment of the applicability of pilot-scale stabilization ponds in investigations on domestic wastewater treatment. The investigation was promoted with two ponds that receive treatment of domestic wastewater after preliminary treatment.

It was analyzed the hydrodynamic behavior, the mixing conditions (with emphasis in the thermal stratification issue), treatment effectiveness and correlations of the treatment effectiveness with selected climatic factors, such as solar radiation, temperature of the air and of the liquid. Some design models were included in the analysis to check their prediction ability of the experimental results.

The results of this investigation indicate that pilot-scale stabilization ponds are a useful tool in studies of treatment process in stabilization ponds, except mainly by the wind effects that are absent in the smaller scale. The ponds used in the investigation had a large surface loading (430 kg DBO/ha.d) and a small detention time (around 4 days). Comparing to real scale ponds, the treatment efficiency was similar, with DBO removal around 90%, but the algae concentration was larger and the flow condition had characteristics between complete mixing reactor and plug flow.

SUMÁRIO

1 - INTRODUÇÃO.....	1
2 - OBJETIVOS.....	3
3 - FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
3.1 - LAGOAS DE ESTABILIZAÇÃO COMO TÉCNICA DE TRATAMENTO DE ESGOTOS.....	4
3.1.1 - Histórico	4
3.1.2 - Características dos sistemas de lagoas.....	5
3.1.3 - Processo de tratamento das lagoas facultativas	8
3.2 - HIDRÁULICA DAS LAGOAS FACULTATIVAS.....	15
3.2.1 - Modelos de mistura	15
3.2.2 - Comportamento hidrodinâmico.....	16
3.3 - MÉTODOS DE DIMENSIONAMENTO DAS LAGOAS FACULTATIVAS	20
3.3.1 - Método de dimensionamento mais usual.....	21
3.3.2 - Modelo de Silva e Mara (1979).....	22
3.3.3 - Modelo de Teixeira Pinto <i>et al.</i> (1995).....	23
4 - METODOLOGIA.....	24
4.1 - DESCRIÇÃO DA INSTALAÇÃO PILOTO.....	24
4.1.1 - Instalações do experimento.....	24
4.1.2 - Processo de tratamento	27
4.1.3 - Critérios para projeto e ajustes no funcionamento do experimento.....	29
4.2 - DESENVOLVIMENTO DO TRABALHO EXPERIMENTAL	31
4.2.1 - Teste do traçador.....	32
4.2.2 - Aclimação	33
4.2.3 - Tratamento dos esgotos.....	34
5- RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	40
5.1 - COMPORTAMENTO HIDRODINÂMICO	40
5.1.1 - Tipos de sal para utilização como traçador	40
5.1.2 - Teste do traçador	41
5.2 - TRATAMENTO DOS ESGOTOS.....	56
5.2.1 - Apresentação dos dados.....	56
5.2.2 - Relações entre os dados obtidos	75
5.2.3 - Determinação de coeficiente de remoção da DBO (K)	87
5.2.4 - Aplicação dos resultados obtidos aos modelos existentes.....	89
5.2.5 - Observações visuais.....	93

6 - CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	97
6.1 - CONCLUSÕES.....	97
6.1.1 - Conclusões gerais	97
6.1.2 - Conclusões específicas	98
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	100
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS EM APUD	104
APÊNDICES	105
APÊNDICE A - TEMPERATURA DO LÍQUIDO E CONDUTIVIDADE AO LONGO DA PROFUNDIDADE DURANTE O ENSAIO DE TRAÇADOR.....	106
APÊNDICE B - PRECIPITAÇÃO, RADIAÇÃO E INSOLAÇÃO	112

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 - Eficiência dos principais sistemas de lagoas para a remoção da DBO.....	7
Tabela 3.2 - Influência dos principais fatores ambientais externos (Jordão e Pessoa, 1995)	11
Tabela 4.1: Parâmetros de projeto adotados no dimensionamento das lagoas piloto.....	29
Tabela 4.2: Parâmetros de projeto calculados das lagoas piloto.....	29
Tabela 4.3: Métodos utilizados para análises e/ou medidas dos parâmetros.....	35
Tabela 4.4: Ponto de coleta ou medida, tipo da amostra e frequência dos parâmetros utilizados.....	36
Tabela 5.1: Tempo de detenção (a) e número de dispersão (b) das lagoas piloto, determinados experimentalmente e por modelos preditivos.....	43
Tabela 5.2: Descrição das siglas utilizadas para nomear as amostras de esgoto analisadas	56
Tabela 5.3: Resultado dos ensaios de frascos claros e escuros.....	66
Tabela 5.4: Oxigênio dissolvido ao longo da profundidade em medidas efetuadas em 4 horários ao longo do dia 05/05/04	67
Tabela 5.5: Concentração de fósforo nas amostras de esgoto bruto e efluentes filtrados da lagoa 1 e 2, e remoção de fósforo na lagoa 1 e 2 utilizando amostra filtrada do efluente ...	68
Tabela 5.6: Coliformes totais e termotolerantes na amostra de esgoto bruto, efluente da lagoa 1 e 2, e remoção de coliformes totais e fecais na lagoa 1 e 2.....	68
Tabela 5.7: Sólidos totais, sólidos totais voláteis, sólidos suspensos, clorofila-a, DBO e DQO no interior das lagoas 1 e 2 em distintos horários de coleta dos dias 07/04 e 05/05/04	69
Tabela 5.8: pH e altura do disco de secchi no interior das lagoas 1 e 2 em distintos horários de coleta dos dias 07/04 e 05/05/04	69
Tabela 5.9: Resultados da análise quantitativa do número de organismos/mL no período de fim de janeiro a início de março	71
Tabela 5.10: Resultados da análise qualitativa da abundância relativa de organismos no período de fim de janeiro a início de março	71
Tabela 5.11: Valores de K_T e K_{20} (d^{-1}) das lagoas piloto para as amostras total e filtrada do efluente e valores de K_{20} (d^{-1}) teóricos	88
Tabela 5.12: Valores de DBO efluente obtidos experimentalmente e pelo método empírico mais utilizado	89
Tabela 5.13: Descrição da representação das figuras referentes às mudanças de aspecto visual.....	96

Tabela A.1: Temperatura do líquido ao longo da profundidade em três pontos das lagoas e temperatura do ar no instante de medição da temperatura do líquido	106
Tabela A.2: Condutividade ao longo da profundidade em três pontos das lagoas	111
Tabela B.1: Precipitação, radiação solar e insolação de 01/01 a 05/05/04	112

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 - Relação de simbiose entre as algas e bactérias (Mara, 1976)	10
Figura 3.2 - Esquema simplificado de uma lagoa facultativa (Von Sperling, 1996a - modificada)	11
Figura 3.3 - Influência da temperatura e da radiação luminosa na velocidade de fotossíntese. Fonte: adaptado de Jordão e Pessoa (1995), <i>apud</i> Von Sperling (1996a)	13
Figura 3.4 - Lagoa com estratificação térmica (Von Sperling, 1996a - modificada)	14
Figura 3.5 - Mistura em uma lagoa (Von Sperling, 1996a - modificada).....	14
Figura 4.1a: Lagoa 1 - planta baixa	24
Figura 4.1b: Lagoa 1 - corte AA da planta baixa.....	25
Figura 4.1c: Lagoa 1 - corte BB da planta baixa	25
Figura 4.2a: Lagoa 2 - planta baixa	25
Figura 4.2b: Lagoa 2 - corte AA da planta baixa.....	26
Figura 4.2c: Lagoa 2 - corte BB da planta baixa	26
Figura 4.3: Experimento montado	26
Figura 4.4a: Lagoa 1	27
Figura 4.4b: Lagoa 2	27
Figura 4.5. Bomba envolta pela tela	28
Figura 4.6. Tela antes da caixa de passagem 1	28
Figura 4.7. Sistema de funcionamento da caixa de passagem 1	28
Figura 4.8a: Caixa de passagem 1.....	28
Figura 4.8b: Saída em queda livre da caixa de passagem 1	28
Figura 4.9a: Caixa de passagem 1 com registro de gaveta na saída para controle de vazão	31
Figura 4.9b: Caixa de passagem 2 sem utilização de registros na entrada para regulação da vazão	31
Figura 4.10a: : Coletor de amostra em profundidade	38
Figura 4.10b: Detalhe do coletor de amostra em profundidade.....	38
Figura 4.11. Aparato utilizado no ensaio de frascos claros e escuros.....	38
Figura 5.1a: Concentração x condutividade para o sal de laboratório	40
Figura 5.1b: Concentração (faixa de 0 a 1,0 g/L) x condutividade para o sal de laboratório	40

Figura 5.3a: Concentração x condutividade para o sal mineral	41
Figura 5.3b: Concentração (faixa de 0 a 1,0 g/L) x condutividade para o sal mineral	41
Figura 5.4: Gráfico (tempo de ensaio x concentração) resultante do 2º ensaio com traçador realizado do dia 24/09 às 13:30 ao dia 27/10/03.....	42
Figura 5.5a: Comportamento característico do modelo de fluxo em pistão para o ensaio de traçador realizado.....	45
Figura 5.5b: Comportamento característico do modelo de mistura completa para o ensaio de traçador realizado	45
Figura 5.6a: Pontos tomados na lagoa para medida da temperatura (P1, P2 e P3).....	46
Figura 5.6b: Corte A-A – pontos ao longo da profundidade (a, b, c e d)	46
Figura 5.7: Temperatura do líquido ao longo da profundidade no ponto 1 da lagoa 1 (durante o ensaio de traçador).....	47
Figura 5.8: Temperatura do líquido ao longo da profundidade no ponto 2 da lagoa 1 (durante o ensaio de traçador).....	48
Figura 5.9: Temperatura do líquido ao longo da profundidade no ponto 3 da lagoa 1 (durante o ensaio de traçador).....	48
Figura 5.10: Temperatura do líquido ao longo da profundidade no ponto 1 da lagoa 2 (durante o ensaio de traçador).....	49
Figura 5.11: Temperatura do líquido ao longo da profundidade no ponto 2 da lagoa 2 (durante o ensaio de traçador).....	50
Figura 5.12: Temperatura do líquido ao longo da profundidade no ponto 3 da lagoa 2 (durante o ensaio de traçador).....	50
Figura 5.13: Temperatura do líquido ao longo da profundidade na lagoa 1 durante o ensaio de traçador, em 25 e 26/09/03.....	52
Figura 5.14: Temperatura do líquido ao longo da profundidade na lagoa 2 durante o ensaio de traçador, em 25 e 26/09/03.....	53
Figura 5.15: Condutividade ao longo da profundidade no ponto 1 da lagoa 1 (três leituras entre o dia 25 e 27/09 durante o ensaio de traçador)	54
Figura 5.16: Condutividade ao longo da profundidade no ponto 2 da lagoa 1 (três leituras entre o dia 25 e 27/09 durante o ensaio de traçador)	54
Figura 5.17: Condutividade ao longo da profundidade no ponto 3 da lagoa 1 (três leituras entre o dia 25 e 27/09 durante o ensaio de traçador)	54
Figura 5.18: Condutividade ao longo da profundidade no ponto 1 da lagoa 2 (três leituras entre o dia 25 e 27/09 durante o ensaio de traçador)	54

Figura 5.19: Condutividade ao longo da profundidade no ponto 2 da lagoa 2 (três leituras entre o dia 25 e 27/09 durante o ensaio de traçador)	55
Figura 5.20: Condutividade ao longo da profundidade no ponto 3 da lagoa 2 (três leituras entre o dia 25 e 27/09 durante o ensaio de traçador)	55
Figura 5.21: Sólidos totais em função do tempo no esgoto bruto e no interior das lagoas 1 e 2.....	59
Figura 5.22: Sólidos totais em função do tempo no esgoto bruto e no efluente das lagoas 1 e 2.....	59
Figura 5.23: Eficiência de remoção de sólidos totais em função do tempo nas lagoas 1 e 2	60
Figura 5.24: Sólidos totais voláteis em função do tempo no esgoto bruto e no interior das lagoas 1 e 2.....	60
Figura 5.25: Sólidos totais voláteis em função do tempo no esgoto bruto e no efluente das lagoas 1 e 2.....	61
Figura 5.26: Sólidos suspensos em função do tempo no esgoto bruto e no interior das lagoas 1 e 2.....	61
Figura 5.27: Sólidos suspensos em função do tempo no esgoto bruto e no efluente das lagoas 1 e 2.....	62
Figura 5.28: Clorofila-a em função do tempo no interior das lagoas 1 e 2.....	62
Figura 5.29: pH no esgoto bruto, no interior e efluente das lagoas 1 e 2 em função do tempo.....	63
Figura 5.30: Eficiência de remoção de DBO total em função do tempo nas lagoas 1 e 2...	64
Figura 5.31: Eficiência de remoção de DBO filtrada em função do tempo nas lagoas 1 e 2	64
Figura 5.32: Eficiência de remoção de DQO total em função do tempo nas lagoas 1 e 2...	65
Figura 5.33: Eficiência de remoção de DQO filtrada em função do tempo nas lagoas 1 e 2	65
Figura 5.34: Temperatura do líquido ao longo da profundidade na lagoa 1, em 13/02/04..	73
Figura 5.35: Temperatura do líquido ao longo da profundidade na lagoa 2, em 13/02/04..	74
Figura 5.36: Comportamento da radiação solar e eficiência de remoção total das lagoas 1 e 2 em função do tempo.....	75
Figura 5.37: Comportamento da radiação solar e eficiência de remoção filtrada das lagoas 1 e 2 em função do tempo.....	76

Figura 5.38: Comportamento da temperatura do líquido e eficiência de remoção total das lagoas 1 e 2 em função do tempo.....	77
Figura 5.39: Comportamento da temperatura do líquido e eficiência de remoção filtrada das lagoas 1 e 2 em função do tempo	77
Figura 5.40: Comportamento da temperatura do ar e eficiência de remoção total das lagoas 1 e 2 em função do tempo	78
Figura 5.41: Comportamento da temperatura do ar e eficiência de remoção filtrada das lagoas 1 e 2 em função do tempo.....	78
Figura 5.42: Comportamento da radiação solar e clorofila-a no interior das lagoas 1 e 2 em função do tempo.....	79
Figura 5.43: Comportamento da radiação solar e clorofila-a no efluente das lagoas 1 e 2 em função do tempo.....	79
Figura 5.44a: Clorofila-a no interior da lagoa 1 x radiação solar	80
Figura 5.44b: Clorofila-a no interior da lagoa 2 x radiação solar	80
Figura 5.45: Comportamento da radiação solar e dos sólidos suspensos no interior da lagoa 1 em função do tempo.....	80
Figura 5.46: Comportamento da radiação solar e dos sólidos suspensos no interior da lagoa 2 em função do tempo.....	81
Figura 5.47: Sólidos suspensos no interior da lagoa 1 x radiação solar	81
Figura 5.48: Comportamento da radiação solar e pH no interior das lagoas 1 e 2 em função do tempo.....	82
Figura 5.49: Comportamento da radiação solar e da altura do disco de secchi nas lagoas 1 e 2 em função do tempo.....	82
Figura 5.50: Comportamento da altura do disco de secchi e do pH na lagoa 1 em função do tempo.....	83
Figura 5.51: Comportamento do pH e da clorofila-a no interior da lagoa 1 em função do tempo.....	83
Figura 5.52: Comportamento do pH e da clorofila-a no interior da lagoa 2 em função do tempo.....	84
Figura 5.53a: Clorofila-a x pH no interior da lagoa 1.....	84
Figura 5.53b: Clorofila-a x pH no interior da lagoa 2	84
Figura 5.54: Comportamento da eficiência de remoção de sólidos suspensos e dos sólidos suspensos no interior da lagoa 2 em função do tempo	85

Figura 5.55: Eficiência de remoção de sólidos suspensos no efluente da lagoa 1 x radiação solar.....	85
Figura 5.56: Relação entre a clorofila-a e sólidos suspensos no interior das lagoas, ponto P2 à profundidade do disco de secchi.....	86
Figura 5.57: Relação entre a clorofila-a e sólidos suspensos do efluente das lagoas	86
Figura 5.58: Taxa de aplicação superficial efluente total (Kg DBO/ha.d) da lagoa 1 e 2 e do modelo de Silva e Mara	90
Figura 5.59: Taxa de aplicação superficial efluente total (Kg DQO/ha.d) da lagoa 1 e 2 e do modelo de Teixeira Pinto	91
Figura 5.60: Taxa de aplicação superficial filtrada efluente (Kg DQO/ha.d) da lagoa 1 e 2 e do modelo de Teixeira Pinto	91
Figura 5.61a: Relação entre a taxa de remoção superficial e a aplicada para efluente total (Kg DBO/ha.d).....	92
Figura 5.61b: Relação entre a taxa de remoção superficial e a aplicada para efluente filtrado (Kg DBO/ha.d).....	92
Figura 5.62a: Relação entre a taxa de remoção superficial e a aplicada para efluente total (Kg DQO/ha.d)	93
Figura 5.62b: Relação entre a taxa de remoção superficial e a aplicada para efluente filtrado (Kg DQO/ha.d).....	93
Figura 5.63: Flutuação de lodo (19/02/04 – 18:03)	94
Figura 5.64: Formação de uma “nata” com aspecto de espuma em baixa concentração (20/02/04 – 10:21).....	94
Figura 5.65: Formação de uma “nata” com aspecto de espuma em alta concentração (25/02/04 – 16:46).....	94
Figura 5.66: Formação de uma “nata” com aspecto de espuma em um lado da lagoa (25/02/04 – 16:46).....	94
Figura 5.67: Flutuação de lodo verde claro de forma dispersa (26/02/04 – 09:23)	95
Figura 5.68: Flutuação de lodo verde claro e “nata” (26/02/04 – 09:24)	95
Figura 5.69: Flutuação de lodo verde claro (29/02/04 – 08:34)	95
Figura 5.70: Formação de uma “nata” com aspecto de espuma em alta concentração e forma diferente (29/02/04 – 18:35).....	95
Figura 5.71: Lodo formando uma fina camada superficial concentrado próximo às bordas laterais (02/03/04 – 07:59)	95

Figura 5.72: Concentração de larvas próximas às bordas laterais (22/03/04 – 13:00)	95
Figura 5.73: Concentração de larvas junto à tubulação de saída do efluente (22/03/04 – 13:04)	96
Figura 5.74: Concentração de larvas próximas às bordas laterais (22/03/04 – 13:55)	96

LISTA DE SÍMBOLOS, NOMENCLATURA E ABREVIACÕES

B	Largura
CAESB	Companhia de Saneamento do Distrito Federal
CETESB	Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental do Estado de São Paulo
CH ₄	Metano
CF	Coliformes fecais ou termotolerantes
CO ₂	Dióxido de carbono
d	Número de dispersão
DBO	Demanda Bioquímica de Oxigênio
DBO _f	Demanda Bioquímica de Oxigênio filtrada
DBO _{eflu}	Demanda Bioquímica de Oxigênio efluente
DBO _t	Demanda Bioquímica de Oxigênio total
DF	Distrito Federal
DQO	Demanda Química de Oxigênio
DQO _f	Demanda Química de Oxigênio filtrada
DQO _t	Demanda Química de Oxigênio total
EB	Esgoto Bruto
ETE	Estação de Tratamento de Esgotos
ETEB norte	Estação de Tratamento de Esgotos Brasília norte
EUA	Estados Unidos da América
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
H	Profundidade da lagoa
ha	Hectare
hab.	Habitante
H ⁺	Cátion de hidrogênio
HCO ₃ ⁻	Íon bicarbonato
H ₂ O	Água
HS ⁻	Íon hidrogenossulfeto
H ₂ S	Sulfeto de hidrogênio
K	Coeficiente de remoção da DBO
K _T	Coeficiente de remoção da DBO em uma temperatura do líquido T qualquer
K ₂₀	Coeficiente de remoção da DBO na temperatura do líquido de 20°C
L	Comprimento
L1	Amostra coletada no interior da lagoa 1: no centro da lagoa à profundidade do disco de secci
L2	Amostra coletada no interior da lagoa 2: no centro da lagoa à profundidade do disco de secci
L1S	Amostra coletada no efluente da lagoa 1
L2S	Amostra coletada no efluente da lagoa 2

L1T	Amostra coletada no interior da lagoa 1: no centro da lagoa à profundidade do disco de secci (amostra <i>in natura</i>). L1T = L1
L1F	Amostra coletada no interior da lagoa 1: no centro da lagoa à profundidade do disco de secci (amostra filtrada)
L2T	Amostra coletada no interior da lagoa 2: no centro da lagoa à profundidade do disco de secci (amostra <i>in natura</i>). L2T = L2
L2F	Amostra coletada no interior da lagoa 2: no centro da lagoa à profundidade do disco de secci (amostra filtrada)
L1ST	Amostra coletada no efluente da lagoa 1 (amostra <i>in natura</i>). L1ST = L1S
L1SF	Amostra coletada no efluente da lagoa 1 (amostra filtrada)
L2ST	Amostra coletada no efluente da lagoa 2 (amostra <i>in natura</i>). L2ST = L2S
L2SF	Amostra coletada no efluente da lagoa 2 (amostra filtrada)
NaCl	Cloreto de sódio
NH ₃	Amônia não ionizada
NH ₄ ⁺	Amônia ionizada
NTK	Nitrogênio Total Kjeldahl
θ	Tempo de detenção hidráulico
σ _θ ²	Variância
O ₂	Oxigênio livre
OD	Oxigênio Dissolvido
OH ⁻	Íon hidroxila
P	Fósforo
pH	Potencial hidrogeniônico
PNSB	Pesquisa Nacional de Saneamento Básico
PO ₄ ⁻³	Fosfato
P	Ponto
PVC	Policloreto de vinila
Q	Vazão
R ²	Coeficiente de determinação
S. A	Sociedade Anônima
SABESP	Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo
SS	Sólidos em Suspensão
SST	Sólidos em Suspensão Totais
ST	Sólidos Totais
SVT	Sólidos Voláteis Totais
UASB	Upflow Anaerobic Sludge Blanket (Reator Anaeróbico de Fluxo Ascendente)
ν	Viscosidade cinemática
x	Versus

1 - INTRODUÇÃO

As lagoas de estabilização têm sido a técnica de tratamento de esgotos domésticos mais utilizada nos países em desenvolvimento (Yáñez, 2000). Em Brasília, das 16 Estações de Tratamento de Esgotos (ETEs) operadas pela Companhia de Saneamento do Distrito Federal – CAESB, 10 delas possuem, em parte ou no todo, o processo de lagoas de estabilização (Queiroz, 2001).

As lagoas são muito utilizadas por ser um processo natural de tratamento de esgotos, apresentar baixo custo de manutenção e instalação (quando o valor do terreno é baixo). Além disso, pode atingir excelentes eficiências de remoção de matéria orgânica, nutrientes e patógenos.

As lagoas de estabilização tem sido largamente utilizadas, somente no Brasil elas estão presentes em 375 localidades (IBGE, 2002). Entretanto, o que se tem verificado é que a forma de dimensionamento e o entendimento do processo ainda têm muito a serem estudados. O primeiro fator, dimensionamento, tem sido na maioria das vezes executado por métodos empíricos. São muitos os métodos propostos, mas quando seus resultados são comparados, grandes variações são encontradas (Metcalf & Eddy, 1991; Kellner e Pires, 1998). Já no que diz respeito ao processo, as dificuldades surgem nas relações entre os fatores, devido à grande quantidade de variáveis interferentes em cada um deles.

Devido às dificuldades encontradas na formulação de relações entre os fatores intervenientes no processo de tratamento e o entendimento desse último como um todo, as lagoas acabam apresentando um projeto que na maioria das vezes possui valores reais (de operação) muito diferentes dos teóricos (previstos). Assim, a eficiência real das lagoas pode ser maior ou menor que a teórica, ocasionando respectivamente gastos financeiros maiores que o necessário ou risco em produzir efluente de qualidade inferior às exigidas previamente.

Diversos fatores influem na eficiência do tratamento, entre eles o clima, características hidráulicas, geometria da lagoa, carga orgânica afluente, estratificação e mistura do volume da lagoa (Polprasert e Bhattarai, 1985; Silva e Mara, 1979). O uso de lagoa real em estudos de pesquisa apresenta grande dificuldade, pois essas lagoas apresentam características

peculiares, além de possuírem fatores incontroláveis, como a vazão afluente. De outra forma, as lagoas piloto fornecem maior controle do tratamento e flexibilidade operacional. Embora vários estudos tenham estudado lagoas em escala piloto, necessitavam-se haver outros mais para produção de dados e enriquecimento das conclusões a cerca do assunto.

O presente trabalho pretende analisar, de forma geral, a aplicabilidade de lagoas de estabilização piloto recebendo esgoto doméstico (após tratamento preliminar) em estudos de pesquisa. Para isso, serão instaladas duas lagoas piloto, que diferem entre si nos sistemas de saída do efluente (um ramificado e outro unitário), na localidade de Brasília – DF. Por motivos operacionais, essas lagoas tiveram período de funcionamento (fluxo de entrada e saída do esgoto) de 12 horas diárias de domingo a sexta e não funcionamento no dia de sábado.

2 - OBJETIVOS

O presente trabalho tem como objetivo geral analisar a aplicabilidade do uso de lagoas de estabilização em escala piloto para pesquisas sobre tratamento de esgotos domésticos. Para isso, serão utilizadas duas lagoas piloto que recebem esgoto doméstico da cidade de Brasília - DF após tratamento preliminar.

Para atender ao exposto nos objetivos gerais, alguns objetivos específicos serão focados:

- 1) Estudo do comportamento hidrodinâmico de lagoas piloto com utilização de traçadores. Nesse item serão abordadas as condições de mistura nas lagoas piloto, com ênfase na questão da estratificação térmica;
- 2) Estudo do desempenho do tratamento, correlacionando-o com fatores climáticos (radiação solar, temperatura do ar e do líquido) e alguns modelos explicativos do funcionamento de lagoas.

3 - FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 - LAGOAS DE ESTABILIZAÇÃO COMO TÉCNICA DE TRATAMENTO DE ESGOTOS

3.1.1 - Histórico

As lagoas de estabilização como forma de tratamento de águas servidas foram descobertas de forma acidental. Ao utilizarem depressões do terreno como meio de contenção dos esgotos, percebeu-se que o efluente apresentava qualidade relativamente boa (Gloyna, 1973). Em 1901, na cidade de Santo Antônio, Texas, foi construída uma lagoa de armazenamento de esgotos de 1,4 m de profundidade e 275 ha, com a finalidade de utilizar a água na irrigação. Depois de um certo tempo, notou-se que o efluente possuía melhor qualidade que o esgoto bruto (Azevedo Netto, 1975; Kellner e Pires, 1998). Como consequência do êxito deste acontecimento, diversas cidades do Texas, Califórnia, Dakota do Norte e outros locais dos Estados Unidos começaram a utilizar lagoas como processo de tratamento de águas residuárias (Caldwell, 1946, *apud* Gloyna, 1973).

Inicialmente, as lagoas de estabilização eram construídas sem algum projeto específico. Foi durante a II Guerra Mundial que surgiram as primeiras instalações projetadas com maior planejamento técnico baseado em experiências adquiridas anteriormente. O ambiente de guerra, com escassez de materiais e equipamentos, e a necessidade de soluções rápidas, adequavam-se perfeitamente à aplicação de lagoas como um sistema de tratamento de águas residuárias (Azevedo Netto, 1975).

Estima-se que a primeira instalação de um sistema de lagoas, especialmente previsto para tratar águas residuárias brutas, foi no estado de Dakota do Norte, nos EUA (Van Heuvelen e Svore, 1954, *apud* Gloyna, 1973). Já no Brasil, a primeira lagoa construída foi na cidade de São José dos Campos, São Paulo, em 1960 (Kellner e Pires, 1998; Jordão e Pessoa, 1995).

A partir de 1960 foram iniciados trabalhos com o objetivo de formulação de critérios de cálculo com base em exigências volumétricas, quantidades adequadas de carga orgânica e período de retenção (Gloyna, 1973). Atualmente esses parâmetros já estão melhor definidos, com diversos estudos presentes na literatura (como os de Gloyna, 1971, *apud*

Jordão e Pessoa, 1995; Arceivala, 1981; Abdel-Razik, 1991, *apud* Von Sperling, 1996a; Yáñez, 1993; Mara, 1996; Von Sperling, 1996a). Tais investigações voltam-se para o estudo dos fatores influentes no processo de tratamento que ainda não foram representados de forma real nos métodos de dimensionamento, como por exemplo as condições climáticas.

Segundo Yáñez (2000), os países em desenvolvimento têm liderado as pesquisas em lagoas de estabilização. A simplicidade e eficiência do processo, o baixo custo de construção e operação, e as condições climáticas extremamente favoráveis, levaram o processo a sua imensa aceitação em nosso país. Por outro lado, os países industrializados têm apresentado um decréscimo em investigações neste assunto, pois estão realizando avanços importantes em outros sistemas de tratamento como lodos ativados, desinfecção entre outros.

3.1.2 - Características dos sistemas de lagoas

As lagoas de estabilização constituem-se na forma mais simples de tratamento de esgotos. Como o nome sugere, o objetivo das lagoas é de estabilizar, ou seja, transformar em produtos mineralizados, o material orgânico presente na água residuária a ser tratada. A construção das lagoas de estabilização consiste em promover escavações no terreno criando taludes nas margens, estabelecendo uma declividade apropriada para o fundo e impermeabilizando-a de forma a garantir sua estanqueidade. São feitas instalações hidráulicas para permitir a entrada e saída do esgoto, e em alguns casos, dependendo do tipo de lagoa, também são instalados dispositivos como aeradores, sistema de coleta de gases, misturadores, entre outros.

As lagoas de estabilização têm sido a técnica de tratamento de esgotos domésticos mais utilizada nos países em desenvolvimento (Yáñez, 2000). No interior do Estado de São Paulo, somente a Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo – SABESP, opera cerca de 195 lagoas de estabilização (Tsutiya, 2001). No Distrito Federal, das 16 Estações de Tratamento de Esgotos (ETEs) operadas pela Companhia de Saneamento do Distrito Federal – CAESB, 10 delas possuem, em parte ou no todo, o processo de lagoas de estabilização (Queiroz, 2001).

Os principais tipos de lagoas de estabilização são as facultativas, anaeróbias, aeradas facultativas e as de maturação. Há também outras variantes, como as lagoas estritamente aeróbias, lagoas com aeração prolongada, aeradas de mistura completa, lagoas de lodo, de peixe, de macrófitas, reservatórios de estabilização. No entanto, essas variantes são menos utilizadas.

São apresentadas a seguir, características dos principais tipos de lagoas:

1. Lagoas facultativas

- A matéria orgânica é degradada pelas bactérias aeróbias, anaeróbias e facultativas (que se adaptam a condições aeróbias e anaeróbias);
- Apresentam elevado tempo de detenção, pois é um processo natural dependente da fotossíntese das algas.

2. Lagoas anaeróbias

- Utilizam grande carga orgânica por unidade de volume para garantir a ausência de oxigênio e preservar o meio das bactérias anaeróbias;
- Por causa da sua baixa eficiência de remoção de DBO, é necessário um tratamento adicional, sendo o mais utilizado as lagoas facultativas.

3. Lagoas aeradas facultativas

- São dotadas de aeradores que injetam a maior parte do oxigênio presente na massa líquida para o consumo pelas bactérias aeróbias;
- Os aeradores são utilizados para diminuir a área ocupada pela lagoa.

4. Lagoas de maturação

- Dependendo dos padrões de despejo do corpo receptor a serem cumpridos, a lagoa de maturação é adicionada a qualquer um dos sistemas como último processo de tratamento com fins de melhoria da eficiência de remoção;
- Funcionam como um processo de polimento de esgotos “pré-tratados”, ou seja, tem o objetivo de remover residuais de DBO, coliformes e nutrientes de processos anteriores, sendo o principal deles a remoção de patogênicos (utiliza a energia solar, pH, escassez de alimento, organismos predadores, compostos tóxicos etc como “agentes desinfetantes”).

Um sistema de lagoas é a combinação dos tipos de lagoas escolhidos para constituírem a técnica de tratamento dos esgotos, como por exemplo o sistema de lagoas facultativas, de lagoa anaeróbia seguida por lagoa facultativa, de lagoa aerada facultativa. Dentro do sistema existe o arranjo das lagoas que pode assumir várias configurações, podendo ser na forma de célula única (uma única lagoa), lagoas em série, em paralelo ou combinações destas variações.

A eficiência dos principais sistemas de lagoas para a remoção da DBO é apresentada na tabela a seguir.

Tabela 3.1 - Eficiência dos principais sistemas de lagoas para a remoção da DBO
(Von Sperling, 1996a - modificada)

Critério de projeto	Sistema de lagoas				
	anaeróbia	facultativa	anaeróbia + facultativa	aerada facultativa	aerada de mistura completa - decantação
DBO (%)	50 - 60	70 - 85	70 - 90	70 - 90	70 - 90
Nitrogênio (%)	-	30 - 50	30 - 50	30 - 50	30 - 50
Fósforo (%)	-	20 - 60	20 - 60	20 - 60	20 - 60
Coliformes (%)	-	60 - 99	60 - 99,9	60 - 96	60 - 99

A variante mais simples, e também a mais utilizada, dos sistemas de lagoas de estabilização são as facultativas (Mara, 1976). No Brasil, elas estão presentes em 375 localidades (IBGE, 2002). A área ocupada por esse tipo é maior comparada às outras lagoas como as anaeróbias, aeradas, de maturação e geralmente são adotadas em regiões de pequenas comunidades.

O Distrito Federal possui um clima quente e seco, com sol durante a maior parte do ano, favorecendo a implantação de lagoa facultativa. De fato, o Distrito Federal possui algumas ETEs utilizando lagoa facultativa, que podem ter sido executadas adotando parâmetros usuais, e não parâmetros peculiares desta região. Requeria-se um estudo anterior das influências climáticas que afetam a eficiência do tratamento das lagoas facultativas no DF. O presente trabalho faz uma análise comparativa entre os resultados de eficiência obtidos utilizando esses métodos de dimensionamento e os reais, em lagoas facultativas na região do DF. Assim, será dado um enfoque nesse tipo de lagoa ao longo do trabalho.

A popularidade das lagoas facultativas como técnica de tratamento de esgotos pode ser explicada pelos seguintes fatores:

- É um processo natural. A degradação dos esgotos é feita por microrganismos e algas;
- Apresenta baixo custo de operação (baixa utilização de equipamentos) e instalação (quando o valor do terreno é baixo, pois a área utilizada para o emprego desta técnica de tratamento é geralmente da ordem de hectares);
- Pode atingir excelentes eficiências de remoção de matéria orgânica, nutrientes e patógenos. Os valores médios de eficiência são apresentados na Tabela 3.1;
- Possui satisfatória resistência a variações de carga.

As desvantagens das lagoas facultativas estão relacionadas com:

- Os efeitos das condições climáticas na eficiência do tratamento (climas quentes favorecem a eficiência, em detrimento dos frios);
- Necessidade de grandes áreas de ocupação (fator importante quando o custo da terra é alto e/ou a disponibilidade de espaço para construção é limitado);
- Valor geralmente elevado dos Sólidos Suspensos (SS) no efluente.

Queiroz (2001), avaliando mais detalhadamente as características dos efluentes das lagoas de estabilização, afirma que de forma geral os efluentes apresentam altas concentrações de SS, Demanda Química de Oxigênio - DQO, NTK e Pt. Em caso de restrição quanto ao lançamento do efluente num corpo receptor, o autor sugere sua aplicação para o reúso. Na irrigação, por exemplo, as algas poderiam fornecer nutrientes ao solo, tendo o cuidado para evitar-se concentrações excessivas, que podem colmatá-lo (Arceivala, 1981).

3.1.3 - Processo de tratamento das lagoas facultativas

A aplicação de lagoas facultativas tem crescido como tratamento de esgoto efluente de processos anaeróbios. Mas, atualmente, ainda se conservam e instalam lagoas que tratam esgoto bruto (com ou sem tratamento preliminar) (Mara, 1976). Conforme mencionado, o termo facultativo refere-se a uma mistura de condições aeróbias e anaeróbias. Na camada de cima do volume interno da lagoa, está o meio aeróbico, e na camada de baixo, o anaeróbio.

A maior parte do oxigênio requerido para manter a camada superior em condições aeróbias é originado da atividade fotossintética das algas. A outra parte, considerada desprezível, procede da reaeração resultante do contato com o ar e vento na superfície da lagoa (Von Sperling, 1996a). O crescimento de algas nas lagoas é favorecido pelo ambiente rico em nutrientes e pela exposição à luz solar, principais fatores de seu metabolismo. De fato, em virtude da grande concentração de algas, as lagoas facultativas apresentam cor esverdeada.

Os principais tipos de algas encontradas nas lagoas de estabilização são (Jordão e Pessoa, 1995; Von Sperling, 1996a):

- Algas verdes ou clorofíceas: gêneros *Chlamydomonas* (1), *Euglena* (2) e *Chlorella* (3). Os gêneros (1) e (2) são normalmente os primeiros a aparecer no meio líquido da lagoa, geralmente sendo predominantes nos períodos frios, sendo que *Euglena* (2) também adaptam-se a outras condições climáticas;
- Algas azuis ou cianofíceas: gêneros *Oscillatoria*, *Phormidium*, *Anacystis* e *Anabaena*. Tais algas são típicas de situação com baixos valores de pH.

Na zona aeróbia, microorganismos utilizam o oxigênio produzido pelas algas através da fotossíntese, e as algas por sua vez utilizam o CO₂, resultante da respiração desses microorganismos, para realizarem fotossíntese. Isso caracteriza uma associação benéfica mútua (simbiose) entre as algas e as bactérias (Figura 3.1). O material orgânico a ser degradado é basicamente formado por partículas de menor tamanho, que tendem a não sedimentar. As algas também utilizam outros produtos resultantes do metabolismo dos microorganismos, como o NH₄⁺ e o PO₄⁻³ para realização da fotossíntese. Há também uma troca gasosa entre o O₂ e o CO₂ presente na lagoa com o da atmosfera.

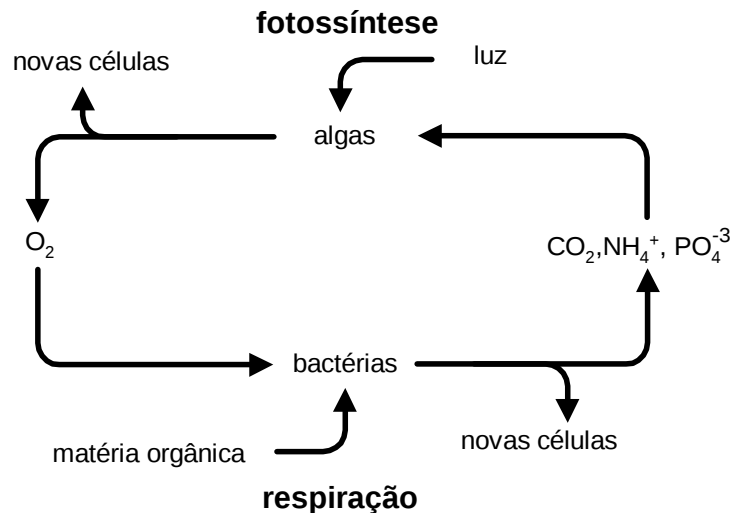


Figura 3.1 - Relação de simbiose entre as algas e bactérias (Mara, 1976)

A posição de transição da camada aeróbia para a anaeróbia (oxipausa) oscila de acordo com a produção/consumo de oxigênio, que varia entre noite e dia, manhã e tarde, tempo nublado e sol radiante. A região caracterizada pela intermitência na presença de oxigênio é denominada zona facultativa, onde sobrevivem microorganismos denominados facultativos, por se adaptarem tanto à presença quanto ausência de oxigênio. Para a degradação da matéria orgânica, esses organismos utilizam o oxigênio ou nitratos (quando em condições anaeróbias) como aceptores de elétrons (Von Sperling, 1996b).

Por fim, na zona anaeróbia, os microorganismos são adaptados para sobreviverem na ausência de oxigênio. Para a degradação da matéria orgânica, utilizam os sulfatos e CO_2 como aceptores de elétrons (Von Sperling, 1996b). Esta zona é composta principalmente pelo lodo de fundo, que é formado pela sedimentação de material particulado. O material que forma o lodo de fundo, degradado anaerobicamente, converte-se lentamente em gás carbônico (CO_2), gás sulfídrico (H_2S), água (H_2O), gás metano (CH_4) e outros. Com isso, resta no fundo apenas o material inerte mineralizado (não biodegradável). Os gases resultantes das reações de degradação tendem a subir, podendo ser absorvidos na massa líquida ou desprender para a atmosfera. Em particular, o gás H_2S que apresenta odor desagradável, ao passar pela camada aeróbia superior, é oxidado por processos químicos e bioquímicos, e por isso não causa problemas de mau cheiro.

Sumarizando, a lagoa facultativa degrada os esgotos em três zonas: aeróbia, facultativa e anaeróbia. A matéria orgânica dissolvida (solúvel) e a em suspensão de pequenas

dimensões (finamente particulada) fica dispersa no esgoto, sendo oxidada aerobicamente na camada mais superficial e por organismos facultativos na camada intermediária. Já a matéria orgânica particulada tende a sedimentar, formando o lodo de fundo, que degrada anaerobicamente. O processo de tratamento das lagoas facultativas pode ser visualizado na Figura 3.2.

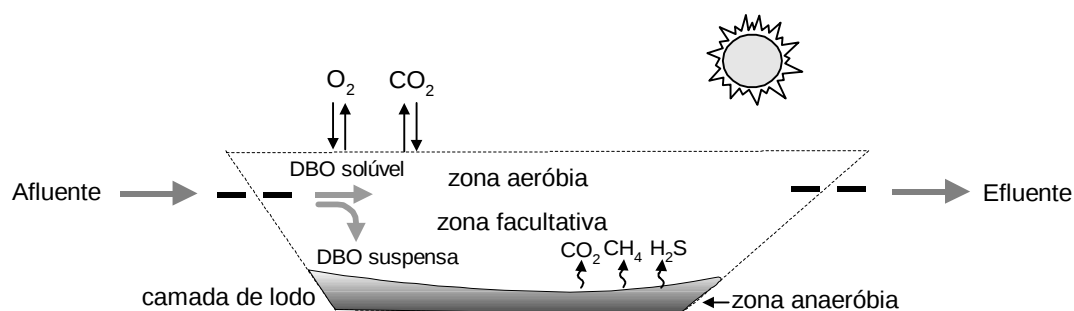


Figura 3.2 - Esquema simplificado de uma lagoa facultativa (Von Sperling, 1996a - modificada)

Os fatores que interferem no processo de tratamento das lagoas facultativas podem ser divididos em externos e internos. Os fatores externos e sua influência no tratamento são apresentados na tabela (3.2) a seguir.

Tabela 3.2 - Influência dos principais fatores ambientais externos (Jordão e Pessoa, 1995)

Fator	Influência
Radiação solar	- Velocidade de fotossíntese
Temperatura	- Velocidade de fotossíntese - Taxa de decomposição bacteriana - Solubilidade e transferência de gases - Condições de mistura
Vento	- Condições de mistura - Reaeração atmosférica (*)

(*) mecanismo de menor importância no balanço de OD

Para ilustrar a importância desses fatores, a China tem desenvolvido estudos com lagoas em estufas de plástico no período do inverno, com o objetivo de aumentar o desempenho do tratamento nesses períodos críticos do ano (Hosetti *et al.*, 1998).

Os fatores internos interferentes no processo de tratamento de esgotos domésticos por lagoas facultativas são as algas (fotossíntese) e a carga orgânica aplicada. Admitindo-se que a carga orgânica aplicada à lagoa seja apropriada, teríamos apenas as algas como fator

interno de influência no tratamento. Visto que os fatores externos e internos interferem na eficiência do tratamento, eles devem ser analisados em conjunto.

Como já mencionado, as algas produzem oxigênio durante o dia por meio de seu processo fotossintético, que é em parte consumido à noite quando elas realizam a respiração. Porém, a produção de oxigênio é cerca de 15 vezes maior que o consumo (Abdel-Razik, 1991, *apud* Von Sperling, 1996a), o que enfatiza o papel fundamental das algas no fornecimento de oxigênio para o meio líquido. A otimização do metabolismo das algas favorece a produção de oxigênio, e conseqüentemente, reflete na maior disponibilidade de oxigênio no meio líquido para ser utilizado pelas bactérias, que assim, degradam maior quantidade de matéria orgânica (caso o fator limitante não seja o nutriente), resultando em maior eficiência do processo de tratamento.

Dentre os fatores que afetam o processo de fotossíntese das algas, estão o teor de clorofila, a radiação solar, a concentração de CO_2 e a temperatura. Os fatores que afetam a respiração das algas incluem a quantidade de oxigênio disponível (Sampaio, 1998). Como a fotossíntese possui atividade dependente da luz solar, há uma variação diurna na quantidade de oxigênio dissolvido e do pH presentes na lagoa. Ambos crescem com o aumento da atividade fotossintética. No caso do pH, seu valor se eleva quando a remoção de CO_2 dissolvido pelas algas ocorre mais rapidamente que é repostado pela respiração das bactérias. As condições de elevado pH contribuem para a remoção de nutrientes, pois converte a amônia ionizada (NH_4^+) a amônia livre (NH_3), que se libera para a atmosfera, precipita os fosfatos e converte o H_2S (que provoca mal cheiro) a HS^- (inodoro) (Von Sperling, 1996a).

Fatores climáticos (externos) influenciam sobremaneira no processo de tratamento uma vez que afetam o processo de fotossíntese (internos). Para se correlacionar a fotossíntese com o clima, deve-se incluir todos os fatores pertinentes. De uma forma geral, o aumento da temperatura correlaciona-se positivamente com o aumento da produção fotossintética, e por conseguinte com o aumento do teor de oxigênio. Contudo, o estudo de Esteves (1998) mostra que quando a temperatura está alta com incidência de radiação solar excessiva, pode haver a inibição da capacidade de fotossíntese das algas uma vez que tal incidência de radiação é prejudicial. Nesses casos, o aumento da temperatura pode não resultar em maiores concentrações de oxigênio.

As algas distribuem-se ao longo da profundidade de acordo com a intensidade luminosa, sendo portanto em maior número na camada superficial, e diminuindo com a profundidade da lagoa. A radiação solar excessiva pode desencadear a migração das algas (unicelulares) na massa líquida e assim influenciar a qualidade do efluente (Hartley e Weiss, 1970; König, 1984, *apud* König *et al.*, 1999). Outros fatores podem também alterar a qualidade dos efluentes, entre eles a localização, temperatura, carga aplicada (Oliveira, 1996, *apud* Queiroz, 2001) e às variações diárias de tempo (manhã, tarde e noite) (Ceballos *et al.*, 1997). Por seu papel fundamental no processo de degradação da matéria orgânica nas lagoas, pode-se dizer que a qualidade do efluente está atribuída às algas (König *et al.*, 1999). Uma tendência atual é relacionar os fatores climáticos à produtividade de algas, na tentativa de expressar a eficiência do tratamento através da biomassa algal. A influência da temperatura e da radiação luminosa na velocidade de fotossíntese é demonstrada na figura seguinte.

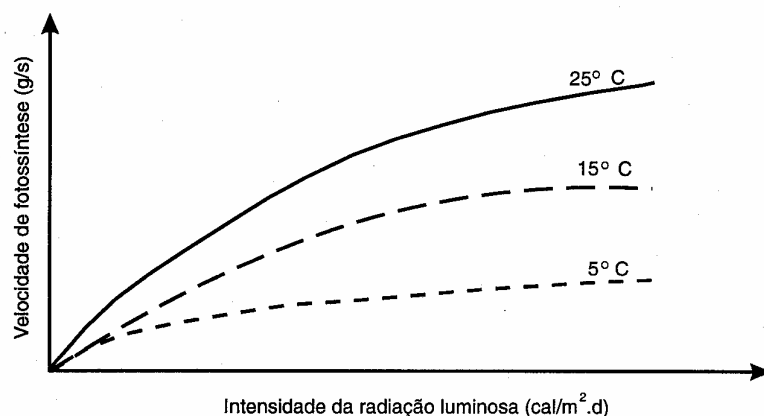


Figura 3.3 - Influência da temperatura e da radiação luminosa na velocidade de fotossíntese. Fonte: adaptado de Jordão e Pessoa (1995), *apud* Von Sperling (1996a)

Cabe citar mais um fator que influencia no processo de tratamento, que é relacionado à ocorrência ou não de estratificação térmica das lagoas. Segundo Ceballos *et al.* (1997), as variações provocadas pela estratificação térmica na qualidade do efluente são tão evidentes, que podem ser observadas simplesmente pela cor do efluente durante o ciclo, que vai desde o quase transparente ao verde escuro.

A lagoa sofre estratificação térmica quando a camada superior se encontra mais quente que a inferior, ou seja, menos densa. Este aquecimento em camadas se dá pelo sol, que esquenta inicialmente a camada mais superficial, por estar exposta diretamente a ele. A camada inferior, por outro lado, aquece a velocidades bem menores, por seguir as

variações de temperatura do terreno. Assim, formam-se os gradientes de temperatura em camadas que não se misturam, a superior mais quente e a inferior mais fria. Entre essas camadas, está localizada a termoclina, região que apresenta, ao longo da profundidade, grande decréscimo na temperatura, acompanhado por um elevado acréscimo de densidade (Figura 3.4) (Von Sperling, 1996a).

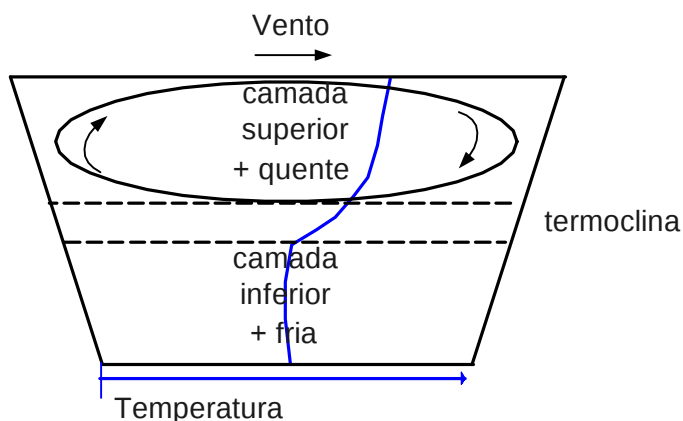


Figura 3.4 - Lagoa com estratificação térmica (Von Sperling, 1996a - modificada)

A estratificação é quebrada geralmente uma vez por dia, ou em mudanças bruscas de clima (exemplo: entrada do período frio) em regiões onde a temperatura varia pouco durante o dia. Essa quebra da estratificação ocorre quando a camada mais quente se resfria (ao anoitecer ou na mudança de clima), ficando com uma temperatura inferior à da camada de baixo. Assim, a camada superior se torna mais densa e tende a descer, ocorrendo a inversão de camadas (ou inversão térmica) com a ajuda do vento, que em contato com a camada superficial, aumenta a capacidade de reaeração (Von Sperling, 1996a; Jordão e Pessoa, 1995). Esse fenômeno, conhecido como mistura da lagoa, torna a qualidade dos esgotos e a temperatura uniformes no sentido vertical da lagoa (Figura 3.5).

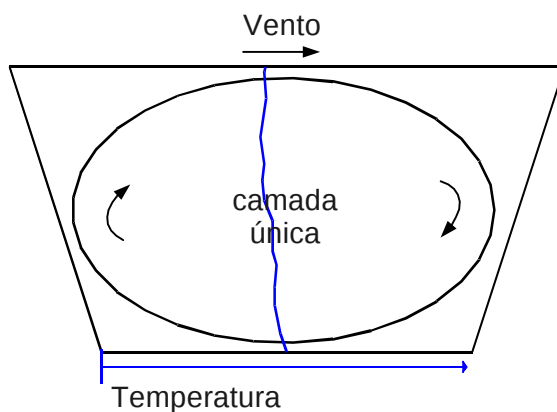


Figura 3.5 - Mistura em uma lagoa (Von Sperling, 1996a - modificada)

A alternância das condições de estratificação da lagoa e mistura, alteram a qualidade do efluente. Segundo Silva e Mara (1979), a mistura é importante no desempenho da lagoa porque minimiza a ocorrência de curto-circuito hidráulico e zonas mortas, possibilita o transporte do oxigênio para as camadas mais profundas e o transporte das algas não motoras (que tendem a sedimentar) para a camada superficial.

Observa-se que a mistura da lagoa ocorre devido às mudanças do clima e é independente das algas presentes na lagoa e da carga orgânica. As algas também são influenciadas pelas condições do clima. Daí, percebe-se a importância primária das condições climáticas no tratamento das lagoas facultativas, visto que a partir delas é que se desencadeiam outros fatores.

3.2 - HIDRÁULICA DAS LAGOAS FACULTATIVAS

3.2.1 - Modelos de mistura

Para lagoas de estabilização de uma célula, há três modelos hidráulicos de mistura, que são o fluxo em pistão, o de mistura completa e o de dispersão. Estes modelos representam o grau de mistura do meio líquido no interior da lagoa, assumindo fluxos contínuos de entrada e saída dos esgotos. Para cada um, há uma equação preditiva da DBO, coliformes e nutrientes do efluente, dado que são conhecidas as características da lagoa e do afluente.

Na dificuldade de se formular modelos que reproduzam as condições hidráulicas reais, foram criados dois modelos ideais denominados fluxo em pistão e mistura completa. Esses modelos são considerados como dois extremos do mecanismo de mistura que realmente ocorre na prática. O modelo de fluxo disperso se encontra entre estes dois extremos e é o mais utilizado para descrever as condições de fluxo na maioria das lagoas facultativas (Von Sperling, 1996b). Uma breve explicação de cada modelo está descrita a seguir, segundo Von Sperling (1996b).

▪ Fluxo em pistão

As partículas de fluído entram continuamente em uma extremidade da lagoa, atravessam a extensão longitudinal da lagoa e são descarregadas na outra extremidade, na mesma sequência em que entraram. O fluxo se processa como um êmbolo, sem misturas longitudinais. As partículas mantêm a sua identidade e permanecem na lagoa por um

período igual ao tempo de detenção hidráulica (ou tempo de permanência). Este tipo de fluxo é reproduzido em lagoas com uma elevada relação comprimento:largura, na qual a dispersão longitudinal é mínima.

- **Mistura completa**

As partículas que entram na lagoa são imediatamente dispersas em todo o corpo da lagoa. A qualidade do esgoto no interior da lagoa é idêntica à do efluente. Assim, o esgoto antes de entrar, possui um valor de DBO (por exemplo), e em qualquer ponto do interior da lagoa assume a mesma DBO do efluente. A mistura completa pode ser obtida em lagoas quadradas, se o conteúdo da lagoa for contínuo e uniformemente distribuído. Os modelos de fluxo em pistão e mistura completa ocorrem com ausência de curtos-circuitos e zonas mortas.

- **Fluxo disperso**

Devido ao fato deste modelo possuir maior dificuldade na sua modelagem, são feitas aproximações para um dos modelos hidráulicos ideais. As condições de mistura no fluxo disperso são caracterizadas por um número de dispersão (d). Para o fluxo em pistão, este número é 0, e para o modelo de mistura completa é igual a ∞ , com as lagoas de fluxo disperso possuindo um valor de d entre esses limites. Arceivala (1981) montou uma classificação do tipo de fluxo de acordo com o número de dispersão de diferentes unidades de tratamento de esgotos. O valor real de d pode ser experimentalmente obtido por meio de ensaio de traçadores, que consiste em adicionar um traçador na entrada da lagoa, e medir a concentração de um composto que esteja diretamente relacionado à quantidade de traçador adicionada. Assim, de acordo com a curva de tempo x concentração, pode-se analisar o grau de mistura, e também o tempo real de detenção e a presença de curto-circuito e zonas mortas. O método mais usado para isso é o proposto por Marecos do Monte & Mara (1987), denominado *Levenspiel modificado* (originado de Levenspiel, 1962, *apud* Marecos do Monte & Mara, 1987), e um outro método de fácil aplicação para determinação do tempo de detenção é o de van Haandel e Lettinga (1994).

3.2.2 - Comportamento hidrodinâmico

O comportamento hidrodinâmico é um dos fenômenos mais complexos na lagoa. Quando em escala real, ele é influenciado pela geometria e profundidade da lagoa, pela forma de

entrada e saída dos esgotos, pelo clima e local de instalação (Torres *et al.*, 1999; Yáñez, 2000). A diversidade desses fatores é que dificulta a correlação completa para representar as características hidráulicas.

O comportamento hidrodinâmico é também um dos importantes fatores para a efetividade do tratamento de esgotos, pois ele controla o tempo de detenção e a dispersão do escoamento. Muitos estudos têm identificado os problemas hidrodinâmicos como a principal causa de baixas performances do tratamento (Wood *et al.*, 1998). O conhecimento com detalhes do fluxo hidráulico e da performance do processo torna necessário pelo menos um dos procedimentos: (a) experimentos com traçadores, (b) análises computacionais, (c) modelagem em laboratório, e (d) uso de flutuador (Shilton e Harrison, 2002). A sequência de procedimentos citados, se encontra em ordem decrescente de utilização na prática, por exemplo: método (a) mais usado que (b), e assim sucessivamente. O experimento com traçador e o uso de flutuador são técnicas que avaliam as condições hidráulicas reais da lagoa, enquanto os demais procedimentos são métodos preditivos, geralmente utilizados antes da construção da lagoa.

Para análise dos resultados do ensaio com traçador, as equações dos métodos mais usuais são apresentadas a seguir:

- Levenspiel modificado (1987):

$$\theta = \frac{\sum_{i=2}^n \frac{t_i + t_{i-1}}{2} \cdot \frac{C_i + C_{i-1}}{2} \cdot (t_i - t_{i-1})}{\sum_{i=2}^n \frac{C_i + C_{i-1}}{2} \cdot (t_i - t_{i-1})} \quad (3.1)$$

$$\sigma_{\theta}^2 = \frac{\sum_{i=2}^n \left(\frac{t_i + t_{i-1}}{2}\right)^2 \cdot \left(\frac{C_i + C_{i-1}}{2}\right)^2 \cdot (t_i - t_{i-1})^2}{\left[\sum_{i=2}^n \frac{t_i + t_{i-1}}{2} \cdot \frac{C_i + C_{i-1}}{2} \cdot (t_i - t_{i-1})\right]^2} \quad (3.2)$$

$$\Rightarrow \sigma_{\theta}^2 = 2 \cdot d - 2 \cdot d^2 \cdot \left(1 - e^{-\frac{1}{d}}\right) \quad (3.3)$$

onde:

θ = tempo de detenção hidráulico;

C_i = concentração do traçador no tempo i ;

t_i = tempo de ensaio i ;

d = número de dispersão.

- van Haandel e Lettinga (1994):

$$\int_{t=0}^{t=\theta} C_t dt = \int_{t=\theta}^{t=\infty} C_t dt = 0,5.M_t \quad (3.4)$$

onde:

C_t = concentração do traçador em função do tempo;

M_t = massa do traçador adicionada.

O método de van Haandel e Lettinga (1994) assume que o reator é mistura completa, e para aplicação de seus critérios, basta calcular em qual tempo de ensaio, 50% da massa adicionada inicialmente de traçador foi recuperada no efluente, e igualar esse tempo ao tempo de detenção. O método *Levenspiel modificado (1987)* fornece o tempo de detenção e o número de dispersão, e suas fórmulas foram elaboradas com base no modo de aplicação do traçador (contínuo ou instantâneo), enquanto o método de van Haandel e Lettinga (1994) independe dessa forma de aplicação do traçador. A preocupação com a forma de aplicação do traçador é importante porque, em caso de lagoas, a utilização do sal como traçador é de difícil aplicação, pois a altas concentrações com baixa vazão (lagoa piloto), ele não iria se dissolver totalmente e sedimentaria. Por outro lado, traçadores fluorescentes como a rodamina, não possuem facilidade de acesso, uma vez que é necessário o equipamento que detecta a concentração efluente. A conclusão sobre a presença e concentração de curto circuito e zonas mortas é feita com base no formato da curva obtida quando é feita a aplicação de forma instantânea.

Os métodos preditivos fornecem o número de dispersão utilizando relações empíricas como as apresentadas a seguir:

- Polprasert e Bhattarai (1985):

$$d = \frac{0,184.t.v.(B + 2H)^{0,489}.B^{1,511}}{(L.H)^{1,489}} \quad (3.5)$$

- Agunwamba *et al.* (1992):

$$d = 0,102 \cdot \left(\frac{3 \cdot (B + 2 \cdot H) \cdot t \cdot v}{4 \cdot L \cdot B \cdot H} \right)^{-0,410} \cdot \left(\frac{H}{L} \right) \cdot \left(\frac{H}{B} \right)^{-(0,981 + 1,385 \cdot H/B)} \quad (3.6)$$

- Yáñez (1993):

$$d = \frac{(L/B)}{-0,261 + 0,254 \cdot (L/B) + 1,014 \cdot (L/B)^2} \quad (3.7)$$

onde:

L = comprimento da lagoa (m);

B = largura da lagoa (m);

H = profundidade da lagoa (m);

t = tempo de detenção (d);

v = viscosidade cinemática da água (m²/d), função da temperatura.

Com o valor do número de dispersão preliminar, pode-se verificar se a lagoa analisada possui fluxo hidráulico próximo ao de mistura completa ou fluxo em pistão, mas nada se pode concluir a respeito da presença de curto-circuito e zonas mortas. Também é comum o cálculo do tempo de detenção teórico (volume/vazão) como uma aproximação do tempo de detenção real para ser usado em equações que prevêm a qualidade do efluente. Contudo, esses métodos são geralmente inadequados para retratar o fenômeno, uma vez que algumas vezes fornecem resultados similares ao real e em outras já totalmente diferentes. Infelizmente, pelo fato dos ensaios experimentais serem muito longos e caros, há poucos estudos reportados na literatura sobre o assunto, principalmente em lagoas de escala real (Naméche e Vassel, 1998).

As lagoas piloto apresentam fluxo hidráulico mais heterogêneo que as em escala real. Segundo Naméche e Vassel (1996), algumas dessas lagoas, projetadas para funcionarem como mistura completa, quando em operação, apresentam comportamento hidrodinâmico muito próximo do fluxo em pistão. Também, segundo os mesmos autores, a grande maioria delas possui curto-circuitos, o qual definitivamente limita sua eficiência.

Pelas experiências demonstradas na literatura, nota-se que as lagoas piloto apresentam características peculiares e diferem das em escala real em relação a alguns aspectos. De acordo com Pearson *et al.* (1995), um aumento na profundidade de lagoas facultativas

piloto na faixa de 1 para 2 m com associado aumento do tempo de detenção, não altera significativamente a performance de uma lagoa individual em termos de DBO, SS e qualidade microbiológica. Ainda segundo os mesmos autores, comparações de desempenho de duas lagoas piloto (uma com relação comprimento:largura de 1:1 e outra com relação 1:6) mostraram pequenas diferenças na performance e qualidade do efluente. Tal observação contradiz o que tem sido freqüentemente proposto para lagoas em escala real. De forma geral é assumido que a performance de uma lagoa aumentaria com o aumento da relação comprimento:largura, uma vez que isso favoreceria o fluxo em pistão. Ainda de acordo com os autores, o fator que pode ter maior impacto que a geometria de lagoas piloto na eficiência do tratamento, é a posição e profundidade da entrada e saída do esgoto.

Assim, pode-se observar uma grande diferença do comportamento hidrodinâmico em lagoas piloto e reais. Necessitam-se de mais estudos para verificar se realmente a relação comprimento:largura, profundidade e até mesmo o tempo de detenção adotados em lagoas piloto não provocam significativas diferenças na performance e eficiência do tratamento. Outro fator de interesse é uma avaliação do efeito de diferentes formas de entrada e saída de esgotos em lagoas e sua influência no tratamento dos esgotos.

3.3 - MÉTODOS DE DIMENSIONAMENTO DAS LAGOAS FACULTATIVAS

Apesar da grande utilização das lagoas no Brasil e exterior, os fatores interferentes no processo de tratamento ainda não foram correlacionados entre si de maneira segura, e isso refletiu nas formas de dimensionamento mais usuais atualmente, que se fundamentam em métodos empíricos. Isso acontece devido à complexidade da análise de variados fatores que afetam a performance do processo de tratamento, como a temperatura, pH, vento, radiação solar, geometria da lagoa, carga orgânica e características hidráulicas, (Polprasert e Bhattarai,1985), além da estratificação e mistura do volume da lagoa (Silva e Mara, 1979) comentada anteriormente. Segundo Pearson *et al.* (1995), critérios de dimensionamento para as lagoas de estabilização tem sido objeto de pesquisas e publicações consideráveis por mais de 30 anos.

Os métodos empíricos, em sua maioria, são baseados nas cargas orgânicas afluentes e efluentes históricas (Middlebrooks, 1987), e portanto, derivados de experiências

operacionais e por isso apresentam grande variabilidade de resultados a cada procedimento de cálculo adotado (Metcalf & Eddy, 1991; Kellner e Pires, 1998). Os principais parâmetros de projeto são a taxa de aplicação superficial (carga de DBO que pode ser tratada por unidade de área) e o tempo de detenção. O primeiro depende do local de instalação das lagoas (clima), variando de 100 a 350 Kg DBO/ha.d. O tempo de detenção recomendado fica em torno de 15 a 45 dias (Von Sperling, 1996a). No Brasil, a taxa comum de projeto é de 200 a 250 Kg DBO/ha.dia. Entretanto, Silva e Mara (1979) conseguiram resultados satisfatórios usando taxas acima de 400 Kg DBO/ha.dia no nordeste do Brasil, e também Oliveira (1999) obteve razoável eficiência de tratamento utilizando um tempo de detenção de 2,1 dias. Esses estudos demonstram que as faixas recomendadas são empíricas e que, se bem controladas, podem ser ultrapassadas.

A seguir, é apresentado o método de dimensionamento mais usual (de aplicação geral) e outros dois métodos preditivos da taxa de remoção superficial da carga orgânica (formulados em regiões de características similares a do experimento).

3.3.1 - Método de dimensionamento mais usual

O método de dimensionamento mais usual (Von Sperling, 1996a), segue os seguintes passos:

- Adoção da taxa de aplicação superficial
- Determinação da área
- Adoção da profundidade
- Determinação do volume
- Determinação do tempo de detenção
- Estimativa da concentração efluente de DBO de acordo com o modelo de mistura pelas seguintes equações:

- Mistura completa:

$$S = \frac{S_o}{1 + K.t} \quad (3.8)$$

- Fluxo em pistão:

$$S = S_o.e^{-K.t} \quad (3.9)$$

- Fluxo disperso:

$$S = S_o \cdot \frac{4ae^{1/2d}}{(1+a)^2 e^{a/2d} - (1-a)^2 e^{-a/2d}}, a = \sqrt{1+4Ktd} \quad (3.10)$$

onde:

S_o = DBO afluente (mg/L)

S = DBO efluente filtrada (mg/L)

K = coeficiente de remoção de DBO (d^{-1})

t = tempo de detenção (d)

d = número de dispersão (adimensional)

O valor de K pode ser determinado por várias equações, dentre elas:

$$K = 0,132 \cdot \log L_s - 0,146 \quad (\text{Arceivala, 1981}) \quad (3.11)$$

$$K = 0,091 + 2,05 \cdot 10^{-4} \cdot L_s \quad (\text{Vidal, 1983}) \quad (3.12)$$

O valor de K é variável pela temperatura, sendo portanto usual utilizar o K_{20} como padrão.

$$K_T = K_{20} \cdot \theta^{T-20} \quad (3.13)$$

onde:

K_T = coeficiente de remoção da DBO em uma temperatura do líquido T qualquer (d^{-1})

K_{20} = coeficiente de remoção da DBO na temperatura do líquido de 20°C (d^{-1})

θ = coeficiente de temperatura (-)

3.3.2 - Modelo de Silva e Mara (1979)

As características do trabalho de Silva e Mara (1979) e da parte experimental desta dissertação são muito similares: ambos foram executados em região de clima quente, utilizando lagoas piloto alimentadas com esgoto bruto. No caso de Silva e Mara (1979), o local de estudo foi Campina Grande – PB, a temperatura média diária do líquido na lagoa variou de 25 a 27°C nos anos de 1977 e 78.

Foi apresentada uma função de correlação entre as cargas orgânicas removidas com as aplicadas, ilustrada a seguir:

$$\lambda_r = 2 + 0,79 \lambda_s \quad (3.14)$$

onde:

λ_r = taxa de remoção superficial da carga orgânica (Kg DBO/ha.d)

λ_s = taxa de aplicação superficial da carga orgânica (Kg DBO/ha.d)

3.3.3 - Modelo de Teixeira Pinto *et al.* (1995)

A análise da aplicabilidade desse método é interessante porque o local de pesquisa do trabalho de Teixeira Pinto *et al.* (1995) é em Brazlândia - cidade satélite de Brasília, próximo da área onde foi instalado o experimento desta dissertação. Entretanto, os estudos da dissertação e de Teixeira Pinto *et al.* (1995) diferem no tipo de afluente e na escala das lagoas (piloto e real).

O sistema de lagoas estudado por Teixeira Pinto *et al.* (1995), consiste de duas séries, funcionando em paralelo, de uma lagoa anaeróbia seguida de lagoas facultativas. Em todas as lagoas, a temperatura média anual variou entre 19 e 24°C. Cada lagoa facultativa tem uma área de 2,96 ha e 1,6 m de profundidade. Foi coletada amostra simples do afluente e efluente da lagoa facultativa uma vez ao mês, sempre no horário entre 10 e 11h, totalizando dados de 9 anos de operação das lagoas.

Os autores apresentaram as seguintes correlações:

- DQO do efluente total:

$$\lambda_{rem} = 0,698 \lambda_{aplic} - 79,575 (r^2 = 0,76) \quad (3.15)$$

- DQO do efluente filtrada:

$$\lambda_{rem} = 0,834 \lambda_{aplic} - 34,168 (r^2 = 0,92) \quad (3.16)$$

onde:

λ_{rem} = taxa de remoção superficial (Kg DQO/ha.d)

λ_{aplic} = taxa de aplicação superficial (Kg DQO/ha.d)

4 - METODOLOGIA

4.1 - DESCRIÇÃO DA INSTALAÇÃO PILOTO

A fase experimental dessa pesquisa objetivou o estudo do comportamento hidráulico e da eficiência do tratamento de esgotos em lagoas piloto, localizadas na Estação de Tratamento de Esgotos Brasília norte – ETEB norte da CAESB em Brasília, Distrito Federal. O afluente às lagoas é o esgoto bruto após ter passado por um processo de remoção de sólidos grosseiros e areia (tratamento preliminar) da ETEB norte.

4.1.1 - Instalações do experimento

O experimento consiste basicamente de captação por bombeamento, duas lagoas piloto, caixas de passagem (do afluente e efluente das lagoas) e um medidor de radiação solar (piranômetro), ilustrados nas Figuras 4.1 e 4.2 (características geométricas das lagoas) e Figuras 4.3 e 4.4 (fotos ilustrativas). Como se pode observar nas Figuras 4.1, 4.2 e 4.4, a única diferença entre as lagoas é a instalação hidráulica de saída do efluente, uma possui tubulação única e outra ramificada. Também percebe-se nas Figuras 4.1 a 4.4 que as instalações do experimento foram feitas todas sobre o terreno, inclusive as lagoas, caso diferente da prática construtiva usual, mas ocorrido devido a restrições de escavação da área. A fim de minimizar os efeitos de temperatura causados pelo fato das paredes das lagoas estarem acima da superfície do solo, foi feito um talude de terra da base das lagoas até aproximadamente 40 cm de altura (Figura 4.3).

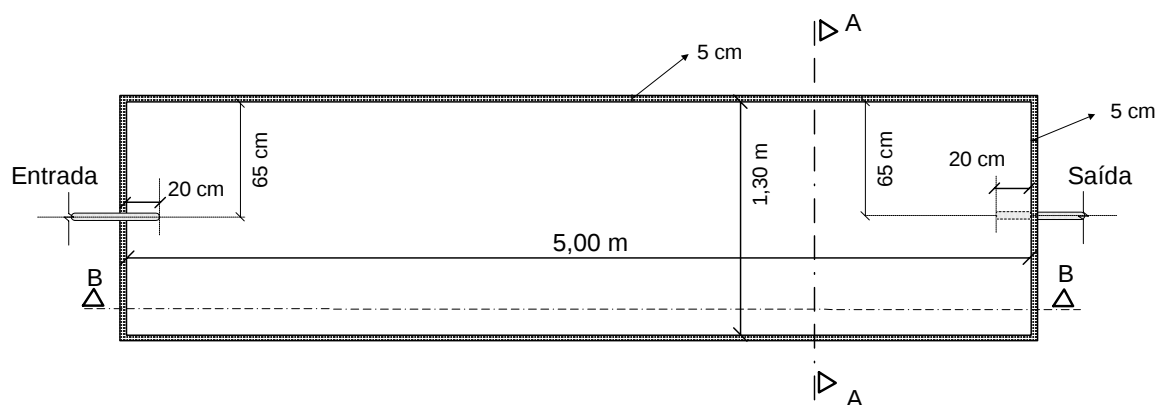


Figura 4.1a: Lagoa 1 - planta baixa

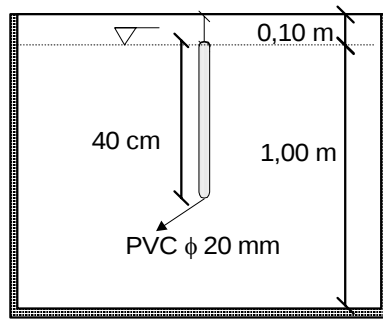


Figura 4.1b: Lagoa 1 - corte AA da planta baixa

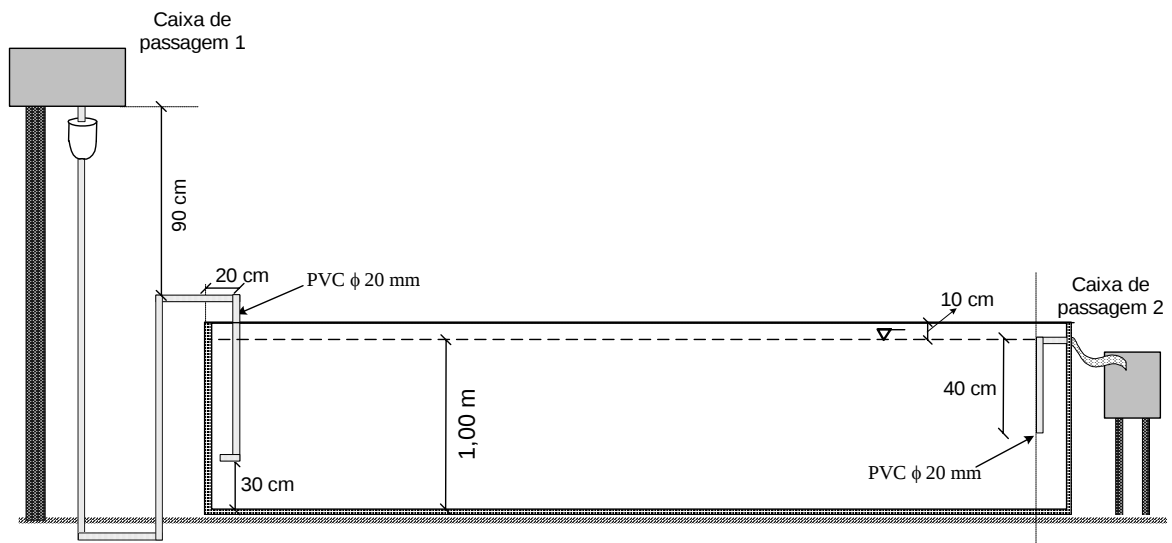


Figura 4.1c: Lagoa 1 - corte BB da planta baixa

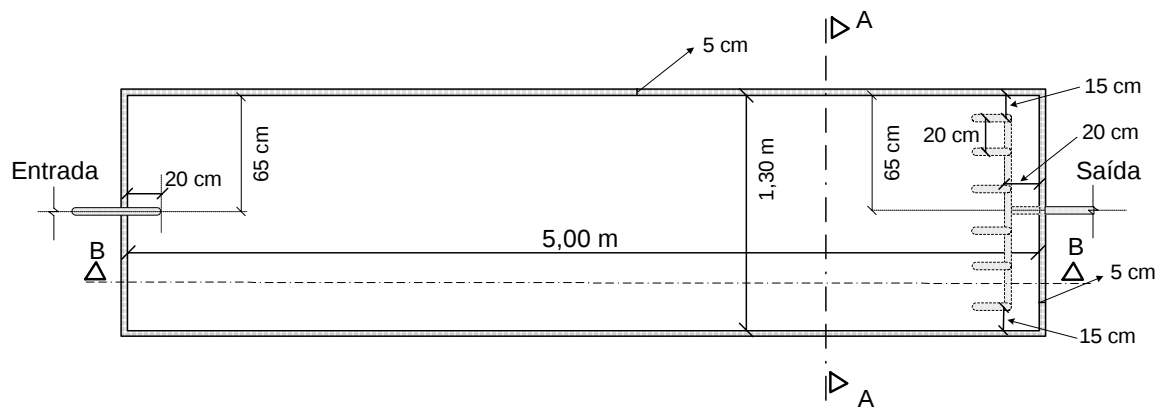


Figura 4.2a: Lagoa 2 - planta baixa

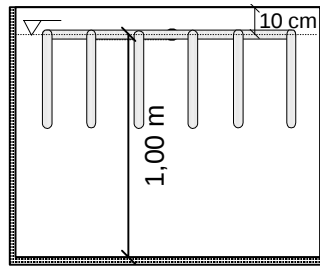


Figura 4.2b: Lagoa 2 - corte AA da planta baixa

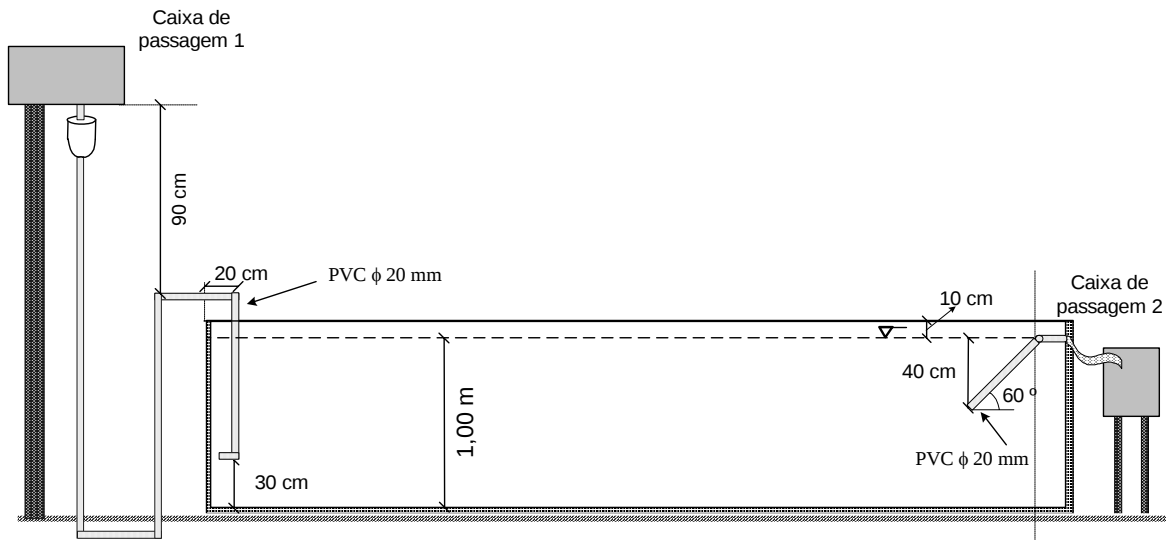


Figura 4.2c: Lagoa 2 - corte BB da planta baixa

Na estrutura das lagoas, utilizaram-se tábuas, vigotas de madeira e chapas de madeirite. A impermeabilização da madeira foi feita com tinta asfáltica (frioasfalto) e revestimento interno com lona do tipo da utilizada em transporte de carga de caminhão (Figuras 4.3 e 4.4).



Figura 4.3: Experimento montado



Figura 4.4a: Lagoa 1



Figura 4.4b: Lagoa 2

4.1.2 - Processo de tratamento

O processo de tratamento de esgoto na instalação piloto ocorre na seguinte sequência:

- Bombeamento do esgoto após ter passado pelo tratamento preliminar na ETEB norte por meio de bomba submersa envolta por tela - para reter materiais que porventura passaram pelo processo de gradeamento e desarenação da ETEB norte, tais como cabelo, papel higiênico, preservativos, absorventes e outros – instalada no canal da ETEB norte (Figura 4.5);
- Antes da chegada à caixa de passagem 1, o esgoto passa novamente por uma tela (Figura 4.6), com o objetivo de impedir o entupimento dos orifícios de entrada para as instalações hidráulicas de entrada nas lagoas. Em seguida, há a entrada do esgoto pela caixa de passagem 1 (Figuras 4.7 e 4.8a), a qual distribui iguais vazões para a lagoa 1 e 2 e retorna o excedente para a ETEB norte pelo ladrão. Para permitir a conferência e ajuste das vazões afluentes às lagoas (método volumétrico), foi feito um trecho de saída da caixa de passagem 1 em queda livre, como ilustrado com detalhe na Figura 4.8b;



Figura 4.5. Bomba envolta pela tela



Figura 4.6. Tela antes da caixa de passagem 1

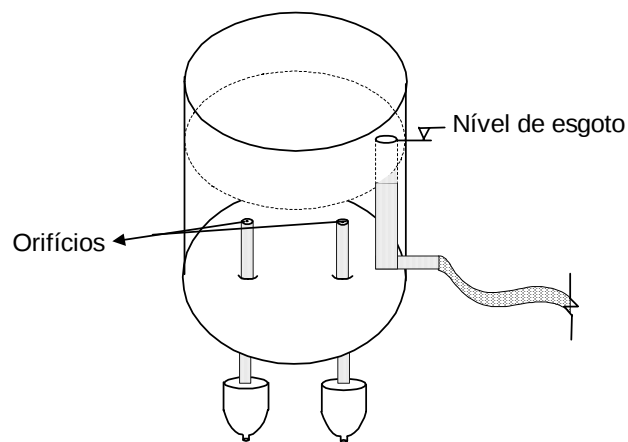


Figura 4.7. Sistema de funcionamento da caixa de passagem 1



Figura 4.8a: Caixa de passagem 1



Figura 4.8b: Saída em queda livre da caixa de passagem 1

- Entrada e saída do esgoto nas lagoas conforme instalações hidráulicas ilustradas nas Figuras 4.1, 4.2 e 4.4;

- Passagem do efluente das lagoas pela caixa de passagem 2 (Figura 4.3), onde é feita a coleta de amostras do efluente e controlada a vazão de saída (igual a de entrada, com manutenção do nível de esgoto na lagoa) por meio de um registro instalado imediatamente antes da entrada da caixa;
- Retorno do esgoto tratado pelas lagoas piloto para a ETEB norte.

4.1.3 - Critérios para projeto e ajustes no funcionamento do experimento

Os parâmetros de projeto das lagoas adotados foram baseados nos critérios de Von Sperling (1996a) e são apresentados na tabela a seguir.

Tabela 4.1: Parâmetros de projeto adotados no dimensionamento das lagoas piloto

Parâmetros de projeto adotados	Valor
Tempo de funcionamento diário (h)	9,5
DBO EB (mg/L)	350,0
Q (L/h)	80,0
Comprimento/largura (L/B)	3,8
K (d ⁻¹) - fluxo em pistão e mistura completa	0,30
K (d ⁻¹) - fluxo disperso	0,25
d (Yanez, 1993)	0,24

A partir dos parâmetros adotados (Tabela 4.1), foram calculados os restantes com base nos critérios de Von Sperling (1996a) e são apresentados na tabela a seguir.

Tabela 4.2: Parâmetros de projeto calculados das lagoas piloto

Parâmetros de projeto calculados	Valor
L - carga de DBO total afl (Kg.DBO/d)	0,3
Ls - taxa de aplicação superficial (Kg.DBO/ha.d)	429,7
θ - tempo de detenção (d)	8,1
DBO eflu (mg/L) - fluxo em pistão	30,4
DBO eflu (mg/L) - mistura completa	101,6
DBO eflu (mg/L) - fluxo disperso	94,2

Alguns ajustes no funcionamento do experimento foram feitos, parcialmente antes do funcionamento e parte no início desse (mais precisamente nas primeiras semanas), com o objetivo de tornar a operação do sistema mais factível. Os comentários e justificativas desses ajustes são feitos a seguir:

- A idéia inicial do presente trabalho de dissertação seria trabalhar com efluente de reator anaeróbio (UASB), o que significa que o esgoto afluente à lagoa teria em torno de 60% da DBO do esgoto bruto. Foi nessa condição que se calculou o projeto das lagoas piloto. Após construídas, verificou-se a impossibilidade do tratamento anaeróbio. A vazão não poderia ser diminuída, pois, assim sendo, seria difícil controlá-la na prática por se tornar pequena em demasia. Com isso, foi decidido dar continuidade o trabalho utilizando esgoto bruto e os mesmos parâmetros adotados previamente. Tal fato levou a uma taxa de aplicação superficial e a um tempo de detenção fora da faixa recomendada por Von Sperling (1996a). De qualquer forma, isto nos esclarece como seria o tratamento para esse caso específico;
- Um detalhe importante dos esgotos captados é a apresentação de elevada quantidade de partículas (como papel higiênico, absorventes, estofas, cabelo, entre outros), apesar dos esgotos já terem passado pelo tratamento preliminar. Para que as instalações hidráulicas em escala piloto não ficassem permanentemente entupidas, foi colocada uma tela envolvendo a bomba e novamente outra na chegada da caixa de passagem 1 (Figuras 4.5 e 4.6);
- Antes de chegar ao modelo da caixa de passagem 1 mostrado anteriormente (Figuras 4.7 e 4.8), foi utilizada outra configuração (com registros ao invés de orifícios), mas esta opção resultou em problemas operacionais. A saída dessa caixa de passagem possuía um registro de gaveta (Figura 4.9a) e esperava-se que, com ele, a vazão fosse regulada com facilidade, mantendo o nível da caixa constante. De tempos em tempos, entretanto, a vazão desregulava, ou seja, saía do valor de vazão desejada. O registro de saída da caixa de passagem 1 inicialmente utilizado foi o de gaveta, depois foi trocado para o de pressão, o qual apresentou melhor desempenho com fins de medição de vazão. Apesar disso, com o tempo, a grande quantidade de partículas no esgoto, mesmo depois de ter passado pelas peneiras, levou à

interrupção do fluxo. Assim, optou-se por trocar o registro por um sistema de orifícios, que apesar de apresentarem furos pequenos, são de maior facilidade de limpeza (Figura 4.7).



Figura 4.9a: Caixa de passagem 1 com registro de gaveta na saída para controle de vazão



Figura 4.9b: Caixa de passagem 2 sem utilização de registros na entrada para regulação da vazão

- Assim como a caixa de passagem 1, a 2 também apresentou problemas operacionais em sua execução inicial. Inicialmente, a configuração utilizada foi a seguinte: sem os registros antes da entrada da caixa e com o nível de entrada do esgoto na caixa de passagem 2 igual ao nível de esgoto nas lagoas (situação ilustrada na Figura 4.9b). Nessa configuração, esperava-se que a vazão de saída fosse constante se a vazão de entrada das lagoas também o fosse. Entretanto, notou-se que para manter a vazão desejada, era necessário variar a altura da posição de entrada na caixa de passagem, tornando o experimento bastante laborioso, pois era preciso fazer isso com bastante frequência. Assim, optou-se por instalar o registro de pressão na mangueira imediatamente antes da entrada do esgoto na caixa de passagem 2, e dessa forma o problema foi resolvido.

4.2 - DESENVOLVIMENTO DO TRABALHO EXPERIMENTAL

As etapas do desenvolvimento experimental e seus objetivos são descritos a seguir:

- Teste do traçador

Conhecimento do comportamento hidráulico das lagoas através da determinação das condições de fluxo (mistura completa, pistão, dispersão) e do tempo de detenção;

- Aclimação das lagoas

Desenvolvimento de todo o ecossistema das lagoas (fitoplâncton, microorganismos, entre outros) até atingir o equilíbrio. Assim, sendo constantes tais condições experimentais, outros fatores de interesse poderão ser analisados no presente trabalho;

- Tratamento dos esgotos

Armazenar dados de qualidade dos esgotos e do clima para posterior análise e estudo

A seguir, as etapas do trabalho experimental são apresentadas com maior detalhe.

4.2.1 - Teste do traçador

a) Escolha do traçador

O traçador adotado foi o cloreto de sódio (NaCl) - sal. O ensaio da escolha do traçador foi feito com água potável, mesmo líquido utilizado no ensaio de traçador, para que a detecção da condutividade fosse somente devida ao sal, evitando interferências dessa medida pelo esgoto, que naturalmente apresenta um pouco de condutividade. Os tipos e a quantidade de sal utilizados foram inicialmente estudados em laboratório. Com três tipos de sal (sal de cozinha, sal mineral e sal de laboratório), foram feitas misturas com água em várias concentrações e em seguida medida a condutividade. Com os dados obtidos, construiu-se gráficos de concentração x condutividade para cada tipo de sal, e foram determinadas a função entre estes dois fatores, e em seguida escolhido o sal para uso no ensaio.

b) Ensaio experimentais

As características físicas e hidráulicas do experimento não permitiram adicionar o sal instantaneamente na entrada da lagoa, como ocorre nos testes usuais. Por isso, optou-se por lançar o traçador diretamente ao volume de água potável presente na lagoa (o de projeto), com o fluxo de entrada e saída fechado. A quantidade de sal adicionada em cada lagoa é de 50 Kg, que em função das relações obtidas em laboratório, resultaria numa condutividade de 114 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Em seguida, o volume foi homogeneizado utilizando uma pá de madeira, até que o sal estivesse dissolvido, ficando depositado no fundo somente suas impurezas. Após atingir a homogeneidade da mistura, foi medida a condutividade diretamente no interior da lagoa em vários pontos. Confirmando que esta era satisfatória para o início do ensaio, liberou-se o fluxo de água, mantendo a vazão de projeto (84 L/h) num período de funcionamento de 24 horas.

Foram feitos dois ensaios de traçador, pois o primeiro ensaio correspondeu à primeira vez em que o sistema entrou em operação, sendo nele detectado vários problemas operacionais não previstos no projeto. Assim esse ensaio foi usado para teste de funcionamento e ajustes operacionais e somente o segundo que foi válido como ensaio de traçador, pois esse não apresentava problemas relevantes de funcionamento.

No segundo ensaio de traçador, foi aproveitado o volume de água com traçador do ensaio anterior, e adicionado cerca de 50 Kg de sal na lagoa 2 e somente homogeneizado o já existente na lagoa 1. Em seguida, foi liberada a circulação de água (entrada e saída). A partir daí, foram feitas medidas em intervalos de tempo aleatórios (**irregulares**) de condutividade do efluente e da temperatura ao longo da profundidade no interior da lagoa. Esse ensaio iniciou em 24/09 e findou em 07/10/03. Com as observações e experiências obtidas, verificou-se que o ensaio de traçadores também deu condições para testar a operacionalidade do aparato experimental proposto.

4.2.2 - Aclimação

Antes de iniciar o tratamento contínuo dos esgotos, as lagoas passaram pela etapa de aclimação, que processou-se da seguinte forma:

- No dia 10/12/03, as lagoas foram enchidas com 20% de esgoto bruto e 80% de tratado (resultante do processo de tratamento da ETEB norte);
- No dia seguinte, 11/12/03, foi aberta a entrada e saída da lagoa, permitindo o acréscimo de esgoto bruto correspondente a 10% do volume da lagoa e a retirada da mesma porção da mistura presente;
- Nos dias posteriores até 12/01/04, as lagoas operaram com esgoto bruto por aproximadamente 7 horas por dia. Nessa fase, a entrada e saída estiveram abertas, possibilitando assim o fluxo de esgotos e utilizando uma vazão de 84 L/h (de projeto).

A partir daí, assumiu-se que as lagoas já estavam aclimatadas. Sendo assim, dia 13/01/04, iniciou-se a fase do experimento relativa ao tratamento de esgotos.

4.2.3 - Tratamento dos esgotos

a) Características operacionais

O fluxo de esgotos nas lagoas ocorria, em média, das 8 às 18 horas com vazão de 84 L/h nos dias de semana e domingos. Nos outros horários destes dias e nos sábados, a entrada e saída de esgotos na lagoa cessavam, ficando a mesma em condição estacionária. Esse tempo de repouso tornou o experimento mais factível, pois a rotina operacional foi dispendiosa, visto que para a operação do sistema era necessário efetuar:

- A limpeza das telas, com periodicidade de 15 dias para a primeira – grossa (Figura 4.5a), e meia hora para a segunda – fina (Figura 4.6); e
- A verificação e ajuste das vazões de entrada (a tubulação entupia com frequência, devido aos furos dos orifícios e o diâmetro da tubulação serem pequenos) e saída (o nível de esgoto na lagoa não conseguia permanecer constante).

No projeto das instalações hidráulicas do experimento tem-se que levar em conta a velocidade e a vazão dos esgotos. Tal medida, resulta em diâmetro pequeno em instalações piloto, dificultando a prática operacional do sistema, já que os esgotos contêm muitas partículas que entopem as diminutas passagens. Tais fatores aumentam a dificuldade em experimentos com instalações piloto de tratamento de esgotos.

b) Coleta de dados

A escolha dos parâmetros, métodos e frequência de amostragem foi feita com base nas possibilidades particulares de execução da presente pesquisa.

As características físicas dos esgotos foram analisadas por meio da medida de temperatura, sólidos totais, voláteis e em suspensão. As características químicas por meio do pH, condutividade e oxigênio dissolvido (OD). E as biológicas, por meio da análise de fitoplâncton, clorofila-a, coliformes totais e termotolerantes. O nutriente avaliado foi o fósforo. E a matéria orgânica foi quantificada pelas medidas de DQO e DBO. Também foram registrados os principais parâmetros referentes ao clima, que são a temperatura do ar e a radiação solar.

A metodologia utilizada para análise de cada parâmetro, de acordo com a *Campbell Scientific* para a radiação solar e com o *Standard Methods* (APHA, AWWA e WPCF, 1985) para os demais parâmetros, foi a seguinte:

Tabela 4.3: Métodos utilizados para análises e/ou medidas dos parâmetros

Parâmetro	Método
Temperatura	Termômetro
Transparência	Disco de secchi
ST, SVT e SS	Gravimétrico
pH	Potenciométrico
Condutividade	Condutivímetro
Oxigênio dissolvido	Frascos claros e escuros
Clorofila-a	Clorofórmio e methanol
Fitoplâncton	Câmara de Sedgwick-Rafter
Coliformes	Colilert
Fósforo	Ácido ascórbico
DBO	Respirométrico
DQO	Colorimétrico de refluxo fechado
Radiação solar	Potenciométrico

Os parâmetros de medidas diretas como a temperatura, pH, condutividade e radiação solar, foram tomados no próprio local do experimento, através de aparelhos portáteis. A análise de fitoplâncton foi feita no Laboratório de Microbiologia da CAESB, localizado na ETEB norte. As demais análises laboratoriais foram feitas no Laboratório de Análise de Águas do Departamento de Engenharia Civil e Ambiental da Faculdade de Tecnologia da Universidade de Brasília

A coleta de dados ocorreu de 13 de janeiro a 5 de maio de 2004, totalizando 114 dias de ensaio. Os dados eram coletados de segunda a sexta-feira, com exceção da temperatura e radiação solar, que também eram registradas aos domingos. Os pontos de coleta, tipo de amostra e frequência das análises laboratoriais, assim como os pontos de medidas e frequência das leituras diretas, são demonstrados a seguir (Tabela 4.4) para cada parâmetro.

Tabela 4.4: Ponto de coleta ou medida, tipo da amostra e frequência dos parâmetros utilizados

Parâmetro	Ponto de coleta ou medida	Tipo da amostra	Frequência de coleta (ou análise)
Temperatura	A temperatura do esgoto foi medida em quatro alturas ao longo da profundidade. Os pontos foram a 0,0 cm (fundo da lagoa), 33,3 cm, 66,6 cm e 100 cm (superfície). A 1ª etapa (22/01 a 20/02) de medição foi em três pontos localizados na porção central das lagoas: a 20 cm da parede de entrada do esgoto, no centro e a 20 cm da parede de saída. Em seguida, na 2ª etapa (23/02 a 05/05), a medição foi feita somente no ponto central a 50 cm de profundidade. Já a temperatura do ar foi medida a altura do nível (100 cm)	Leitura instantânea	Ambas foram coletadas, de 22/01 a 20/02 (1ª etapa), de 2 em 2 horas durante o tempo de funcionamento das lagoas. E de 23/02 a 05/05 (2ª etapa), eram coletadas no início e fim do funcionamento, as temperaturas máxima e mínima registradas.
ST, SVT, SS e pH	Afluentes, efluente e outra amostra à profundidade do disco de secchi no centro das lagoas	Afluentes e efluentes é a composta, e à profundidade do disco de secchi é a simples	Afluentes e efluente são três dias na semana, e à profundidade do disco de secchi aos 5 dias da semana
Oxigênio dissolvido	Em quatro pontos ao longo profundidade (a 0,0 cm, 33,3 cm, 66,6 cm e 100 cm) no centro das lagoas	Instantânea (inicial) e as amostras após o tempo de ensaio (final)	Dias aleatórios sempre próximo do meio-dia e em dois dias, também foi feita pela manhã e à tarde
Clorofila-a	Amostra à profundidade do disco de secchi no centro das lagoas e em raras vezes nos efluentes	Efluentes é a composta, e à profundidade do disco de secchi é a simples	Nos efluentes é aleatória e à profundidade do disco de secchi aos 5 dias da semana

continua...

Tabela 4.4: Ponto de coleta ou medida, tipo da amostra e frequência dos parâmetros utilizados (continuação)

Parâmetro	Ponto de coleta ou medida	Tipo da amostra	Frequência
Fitoplâncton	4 pontos localizados na porção central da lagoa e distribuídos ao longo do comprimento de 1 em 1 metro. O primeiro ponto fica a 1 metro da parede de entrada e o último a 1 metro da saída. Os três primeiros à profundidade de secchi e o último a 30 cm do fundo	Junção de amostras simples	Uma em janeiro, três em fevereiro e uma em março. Todas às sextas-feiras
Coliformes	Afluente e efluentes	Simples	Uma coleta em fevereiro e uma em março
Fósforo	Afluente e efluentes	Composta. Filtrada e total	Uma coleta em fevereiro
DBO	Afluente, efluentes e, em raras vezes à profundidade do disco de secchi no centro das lagoas	Afluente e efluentes é a composta, e à profundidade do disco de secchi é a simples. Filtrada e total	A cada 15 dias para afluente e efluentes e na amostra à profundidade do disco de secchi aleatoriamente
DQO	Afluente, efluentes e, em raras vezes à profundidade do disco de secchi no centro das lagoas	Afluente e efluentes é a composta, e à profundidade do disco de secchi é a simples. Filtrada e total	3 vezes por semana para afluente e efluentes e na amostra à profundidade do disco de secchi aleatoriamente
Radiação solar	À altura da superfície do nível de esgoto na lagoa (no caso dos dados de origem no local de experimento)	-	Constante leitura

* os dados de radiação solar medidos no local do experimento só foram os do período de 02/03 a 27/04/04. Com o objetivo de conseguir o restante dos dados para completar a série total do experimento, foram feitas cor(cidade satélite, localizada no entorno de Brasília). Os dados de radiação se referem a radiação total

O coletor de amostras à profundidade foi produzido com base nos princípios de funcionamento do batiscafo (cilindro de Kemmerer) de forma que possibilitasse uma coleta com menor turbulência causada pelos vórtices em comparação ao amostrador de Kemmerer, agitando menos o líquido. A Figura 4.10 ilustra o coletor utilizado.



Figura 4.10a: : Coletor de amostra em profundidade



Figura 4.10b: Detalhe do coletor de amostra em profundidade

Para efetuar a coleta, tapa-se o tubo de comprimento maior com o dedo até atingir a profundidade desejada. Chegando a este ponto, retira-se o dedo e a coleta se inicia até que o tubo mais comprido fique com esgoto até ao nível da lagoa, podendo nesse momento retirar a amostra.

O ensaio dos frascos claros e escuros foi feito com o aparato mostrado na Figura 4.11. Sua montagem e procedimentos de ensaio foram tomados levando em conta as proposições de Branco (1971) e Wetzel e Lukens (1991).



Figura 4.11. Aparato utilizado no ensaio de frascos claros e escuros

As coletas das variadas profundidades foram feitas com o uso do coletor (Figura 4.10), e em seguida seu volume transferido para os frascos claros e escuros e também para outro frasco à parte chamado de concentração inicial, todos correspondentes à profundidade de coleta. O tempo de coleta deve ser o mínimo possível, devido às reações das bactérias com o ambiente externo (diferente do interior da lagoa). Os frascos dependurados no aparato com as amostras são mergulhados por um tempo de reação e então retirados, obtendo a concentração final de oxigênio dissolvido.

Algumas observações visuais também foram coletadas no decorrer do experimento. Elas se referem a fatos considerados diferentes e que causaram mudança na rotina de operação. Entre esses fatos, podemos citar a presença de larvas, lodo flutuando, espuma na superfície da lagoa e outros, a serem mostrados e discutidos no capítulo a seguir, onde também serão apresentados os dados, análise e discussões.

5 - RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 - COMPORTAMENTO HIDRODINÂMICO

5.1.1 - Tipos de sal para utilização como traçador

A relação concentração x condutividade de três tipos de sal foi analisada em laboratório com o propósito de escolher qual a melhor relação para ser utilizada no ensaio de traçador. Os tipos de sal avaliados foram o reagente NaCl puro, comum de cozinha e o mineral. A relação concentração x condutividade, para cada tipo de sal, foi analisada numa faixa de concentração geral (0 a 50 g/L) e em seguida numa faixa menor (0 a 1,0 g/L), a fim de verificar se as relações diferem muito entre si. Os resultados obtidos são apresentados nas Figuras 5.1 a 5.3 a seguir:

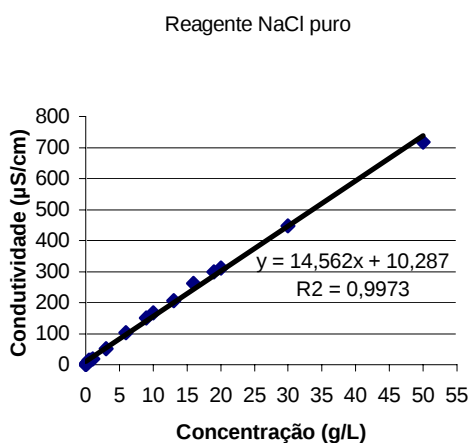


Figura 5.1a: Concentração x condutividade para o sal de laboratório

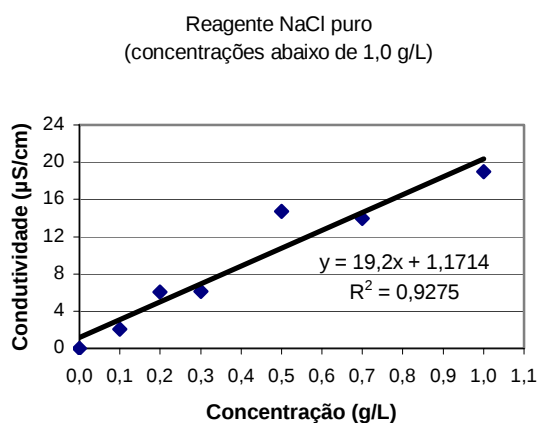


Figura 5.1b: Concentração (faixa de 0 a 1,0 g/L) x condutividade para o sal de laboratório

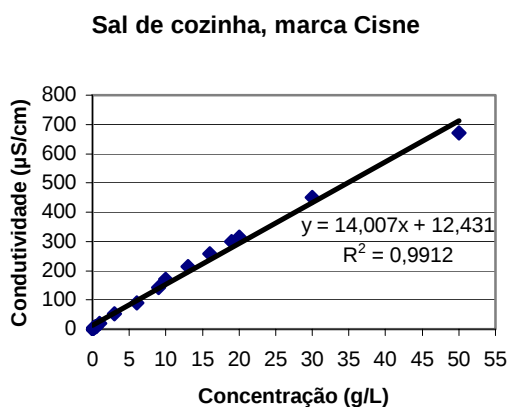


Figura 5.2a: Concentração x condutividade para o sal de cozinha comum

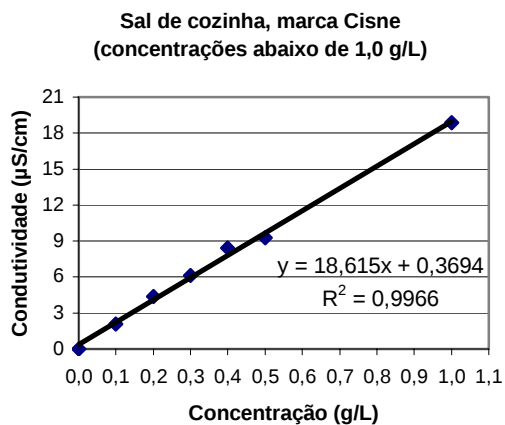


Figura 5.2b: Concentração (faixa de 0 a 1,0 g/L) x condutividade para o sal de cozinha comum

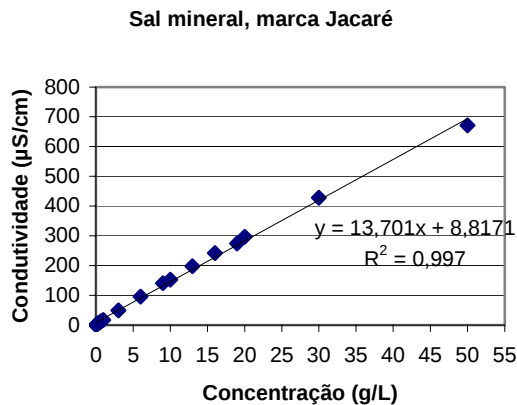


Figura 5.3a: Concentração x condutividade para o sal mineral

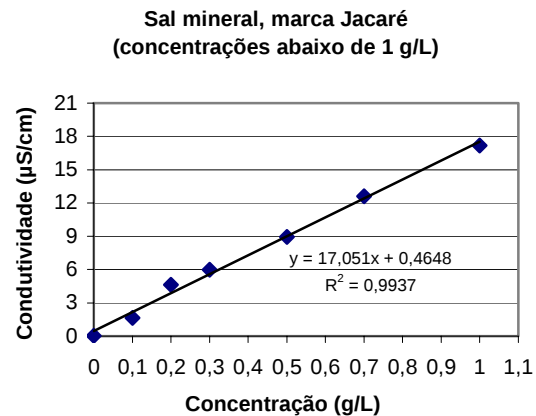


Figura 5.3b: Concentração (faixa de 0 a 1,0 g/L) x condutividade para o sal mineral

Como ilustrado nas figuras acima, as relações de concentração x condutividade obtidas para as faixas 0 a 50 e 0 a 1 g/L diferem um pouco, sendo necessário fazer uso da faixa mais abrangente para as concentrações de 1 a 50 g/L e da faixa de menor intervalo para as concentrações de 0 a 1 g/L para melhor precisão.

Pode-se concluir também que os tipos de sal apresentam relações da concentração x condutividade muito semelhantes, todas a um r^2 acima de 0,9. Sendo assim, o sal a ser utilizado como traçador pode ser qualquer um dos três, e o escolhido para o ensaio deste trabalho foi o sal mineral, por apresentar custo inferior aos demais. As características do sal utilizado são: Sal de Mossoró e Macau moído iodado Jacaré, Ribeiro de Abreu Comércio e indústria S. A, composto por cloreto de sódio, iodato de potássio, anti-umectante.

5.1.2 - Teste do traçador

Como comentado no capítulo anterior, foram feitos dois ensaios de traçador. Os resultados do primeiro, porém, não puderam ser analisados, pois nele foi a primeira vez que as lagoas funcionaram, sendo detectados vários problemas operacionais. Já no segundo ensaio, conseguiu-se reproduzir as condições reais do sistema. Os dados obtidos em seu acompanhamento experimental são mostrados no gráfico da Figura 5.4 (concentração do traçador no efluente x tempo de ensaio), e também nos gráficos das Figuras 5.7a 5.12 (temperatura do líquido ao longo da profundidade em 3 pontos no interior da lagoa). A Figura 5.4 é apresentada a seguir:

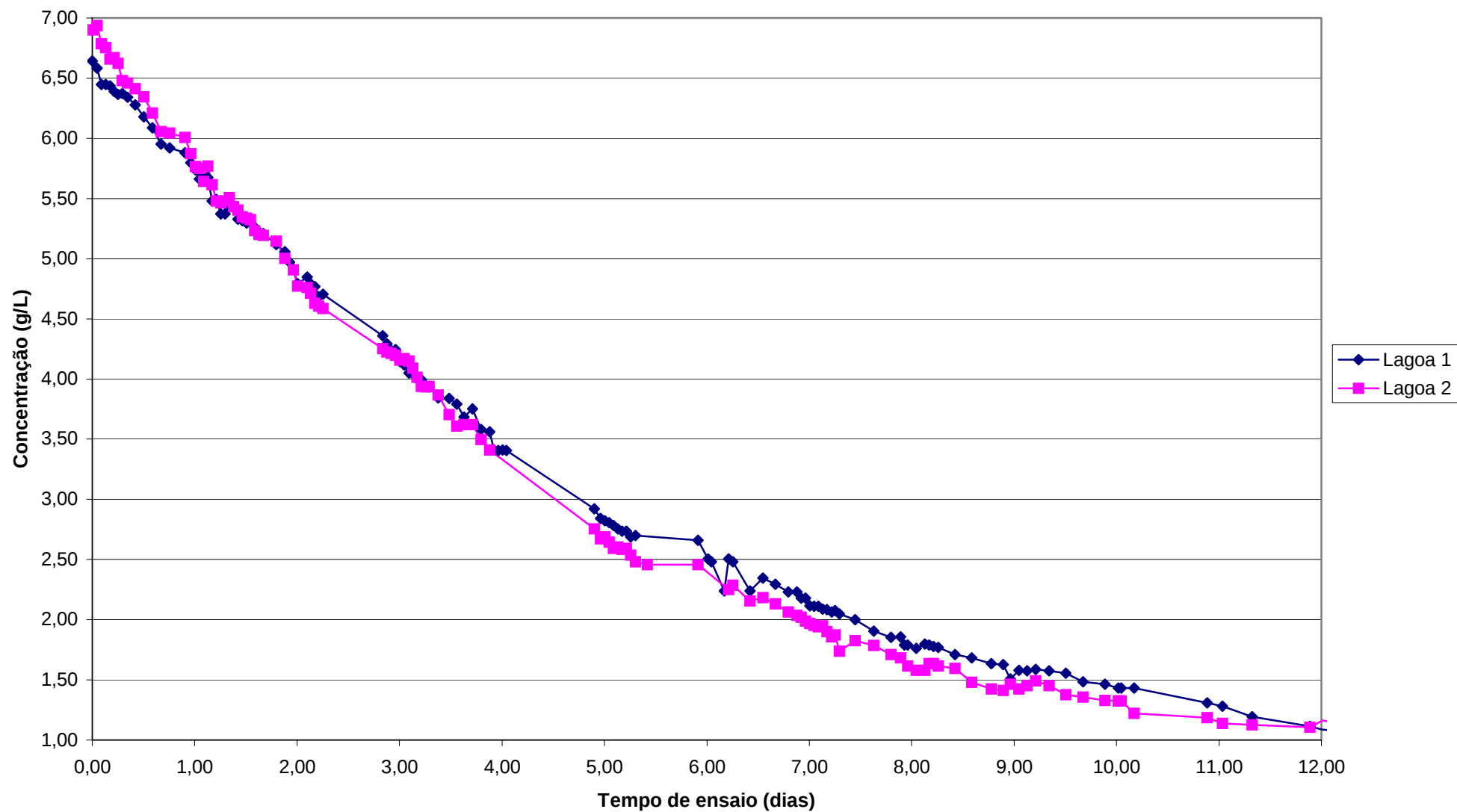


Figura 5.4: Gráfico (tempo de ensaio x concentração) resultante do 2º ensaio com traçador realizado do dia 24/09 às 13:30 ao dia 27/10/03

A partir dos dados do gráfico, tempo de ensaio x concentração, foi calculado o tempo de detenção (θ) e o número de dispersão (d) pelo método *Levenspiel modificado* (1987). Também por meio do ensaio de traçador, foi calculado o θ utilizando o método de van Haandel e Lettinga (1994). A fim de comparar os valores de θ e d obtidos experimentalmente, foi também determinado esses mesmos parâmetros utilizando os métodos preditivos mais usuais: Polprasert e Bhattarai (1985), Agunwamba *et al.* (1992) e Yáñez (1993). Os resultados são descritos na Tabela 5.1.

Tabela 5.1: Tempo de detenção (a) e número de dispersão (b) das lagoas piloto, determinados experimentalmente e por modelos preditivos

Tempo de detenção (dias) - θ		
	L1	L2
Teórico	8,1	8,1
<i>Levenspiel modificado</i> (1987)	4,4	4,3
Van Haandel e Lettinga (1994)	4,0	3,8

(a)

Número de dispersão - d		
	L1	L2
<i>Levenspiel modificado</i> (1987)	0,0125	0,0140
Polprasert e Bhattarai (1985)*		
- utilizando θ teórico	0,0315	0,0315
- utilizando θ <i>Levenspiel modificado</i> (1987)	0,0170	0,0169
Agunwamba <i>et al.</i> (1992)*		
- utilizando θ teórico	0,0598	0,0598
- utilizando θ <i>Levenspiel modificado</i> (1987)	0,0771	0,0772
Yáñez (1993)	0,2447	0,2447

(b)

* o valor da viscosidade cinemática (ν) da água adotado foi de $0,087 \text{ m}^2/\text{dia}$, função da temperatura de 20°C .

A forma de aplicação do traçador (dissolução completa em todo volume da lagoa) e a concentração adotada (elevada) são diferentes das adotadas nos testes descritos na literatura. O tempo de ensaio (12 dias) com traçador do presente trabalho foi menor que o recomendável por Moreno (1990), que é de duas vezes o tempo teórico (16,2 dias). Em função disso, os tempos de detenção e conseqüentes números de dispersão obtidos experimentalmente, podem não ser representativos.

Comparando-se os valores do tempo de detenção obtidos por *Levenspiel modificado* (1987) com o de van Haandel e Lettinga (1994), nota-se que são muito próximos, e quase metade do valor teórico. A definição do tempo de detenção do método de van Haandel e Lettinga (1994) independe da forma de aplicação do traçador e do tempo de ensaio, o que favorece os procedimentos do experimento executado. Esse método assume previamente que o reator é de mistura completa, oferecendo condições de comparação entre outros resultados. Já o método de *Levenspiel modificado* (1987), possui as fórmulas de cálculo de θ e d baseadas no tipo de aplicação do traçador padrão (instantânea ou contínua) e num tempo de ensaio mínimo de duas vezes o tempo de detenção teórico (Moreno, 1990). De qualquer forma, como os valores do tempo de detenção (θ) obtidos pelos dois métodos são similares (Tabela 5.1a), conclui-se que o modelo de mistura das lagoas piloto está mais voltado ao de mistura completa.

O tempo de detenção real das lagoas, em torno de 4 dias, é considerado baixo em vista da faixa recomendada por Von Sperling (1996a), que é de 15 a 45 dias. Por outro lado, em um estudo feito por Athayde Junior (2001), um aumento no tempo de detenção de 10,5 para 15,8 dias, resulta em um acréscimo de 50,2 para 52,5% na eficiência de remoção da DBO. Com isso, observa-se que aumentos no tempo de detenção podem não refletir de forma tão significativa na eficiência de remoção de DBO e o baixo valor do tempo de detenção real também não pode ser um fator limitante para o alcance de boas eficiências de remoção da matéria orgânica.

Os números de dispersão se encontram na faixa de 0,01 a 0,08 para os métodos *Levenspiel modificado* (1987) – experimental, Polprasert e Bhattarai (1985) e Agunwamba *et al.* (1992), com esses dois últimos utilizando em sua fórmula de determinação de d , o tempo de detenção obtido pelo método de *Levenspiel modificado* (1987) e também o tempo de detenção teórico. Para o método preditivo de Yáñez (1993), o d está em torno de 0,25. Segundo classificações de Arceivala (1981), o valor de d menor que 0,5 indica que as lagoas piloto estudadas são longas e retangulares. O baixo valor de d , próximo de zero, sugere que o modelo de mistura da lagoa se encontra muito próximo do fluxo em pistão. Tal fato confirma a afirmação de Naméche e Vassel (1996), relatando que as lagoas piloto possuem modelo de mistura mais próximo do fluxo em pistão que o esperado. Se assim o for, pode-se dizer que o método preditivo de Yáñez (1993) é o menos recomendável para

representar as características hidráulicas das lagoas deste trabalho, e talvez essa conclusão também possa ser estendida para todas as lagoas piloto.

Embora o número de dispersão (d) tenha resultado em valores relativos ao fluxo em pistão, o tempo de detenção real se mostrou distante do teórico, contradizendo o modelo de mistura classificado pelo valor de d . O formato da curva tempo de ensaio x concentração da Figura 5.4 é diferente da curva característica do modelo ideal de fluxo em pistão (Figura 5.5a) e, é parecido com a curva característica do modelo ideal de mistura completa (Figuras 5.5b). Essa informação, juntamente com a análise feita anteriormente do valor do tempo de detenção obtido, demonstra que o modelo de mistura das lagoas piloto se encontra próximo ao mistura completa e já na análise do valor de d , o modelo de mistura é quase fluxo em pistão, o quer dizer que um desses fatores (d ou θ), não representa as condições hidráulicas reais. Os dados relativos à existência e concentração de curto-circuito e zonas mortas poderiam assegurar essa afirmação, mas infelizmente, para o método de aplicação do traçador adotado no ensaio, não foi possível analisar tais características hidráulicas, pois para isso seria preciso que o sal fosse adicionado instantaneamente no fluxo de entrada da lagoa. Deve-se ressaltar que o modelo hidráulico é muito influenciado pela mistura de camadas, presente em maior frequência nas lagoas em escala piloto, já que nessa dimensão a área de contato com o meio ambiente é maior que as lagoas de escala real, e por isso as camadas superficiais resfriam, aquecem e trocam calor com camadas vizinhas mais rapidamente.

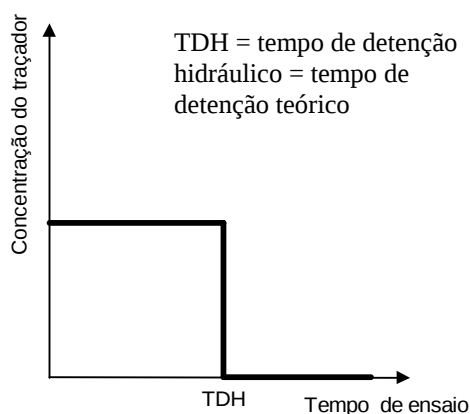


Figura 5.5a: Comportamento característico do modelo de fluxo em pistão para o ensaio de traçador realizado

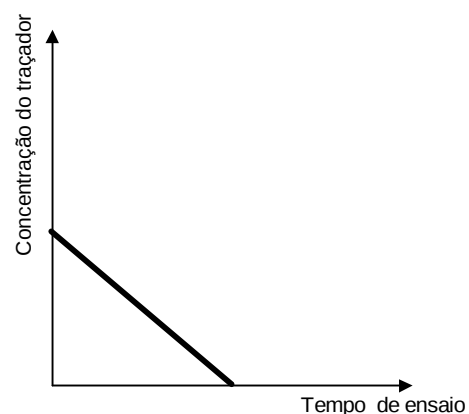


Figura 5.5b: Comportamento característico do modelo de mistura completa para o ensaio de traçador realizado

- **Estratificação térmica nas lagoas**

Segundo Gu e Stefan (1995), a estratificação pode ser observada por meio de medições da temperatura em alturas verticais das lagoas, do oxigênio dissolvido, pH e outros parâmetros de qualidade da água. Com esse objetivo, a temperatura do líquido e a condutividade ao longo da profundidade, foram medidas em 3 pontos no interior das lagoas durante o experimento com traçador (Figura 5.6a). Os pontos tomados ao longo da profundidade para medição da condutividade foram: fundo, meio e superfície; e para a medição de temperatura, os pontos são ilustrados na Figura 5.6b. Para separar os resultados da temperatura do líquido e condutividade eles serão divididos em subitens a e b.

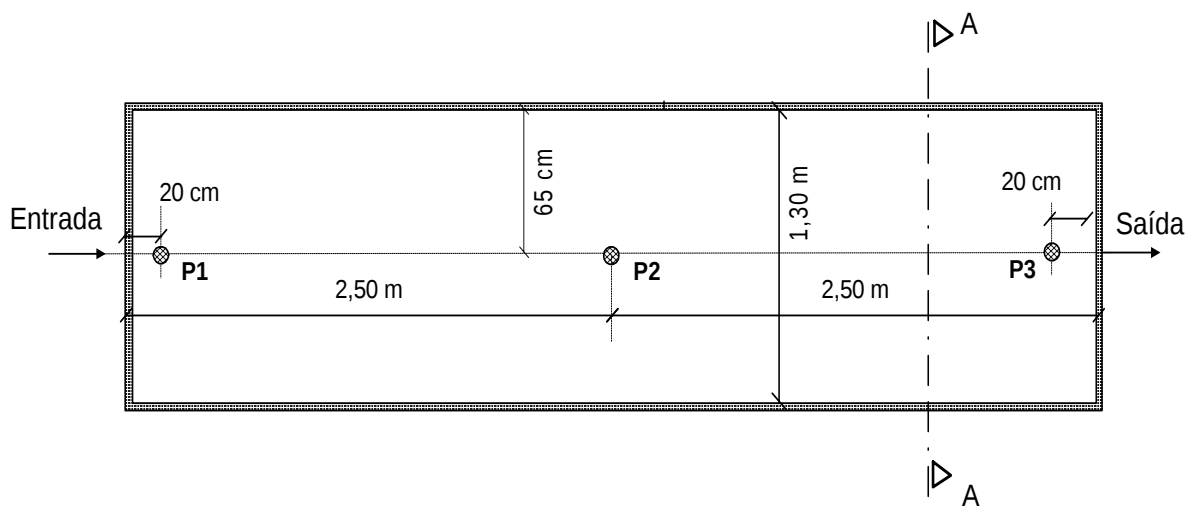


Figura 5.6a: Pontos tomados na lagoa para medida da temperatura (P1, P2 e P3)

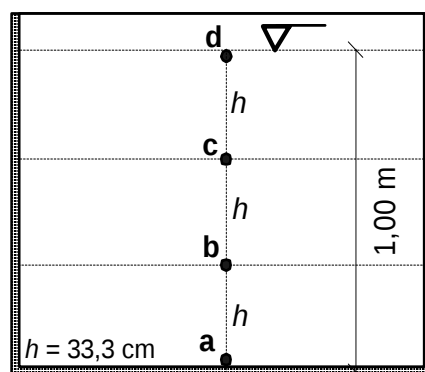


Figura 5.6b: Corte A-A – pontos ao longo da profundidade (a, b, c e d)

a) Temperatura do líquido

A coleta dos valores da temperatura do líquido se deu, na maioria das vezes, em 3 horários do dia (início da manhã, próximo do meio-dia e início da tarde), entretanto, no dia 26/09/03 foi feita uma medida adicional às 00:30 horas para verificar se as leituras efetuadas durante o dia apresentavam boa representatividade das 24 horas. Todas as leituras efetuadas da temperatura do líquido são mostradas por meio dos gráficos e tabelas constantes nas Figuras 5.7 a 5.12 e no apêndice A do anexo respectivamente.

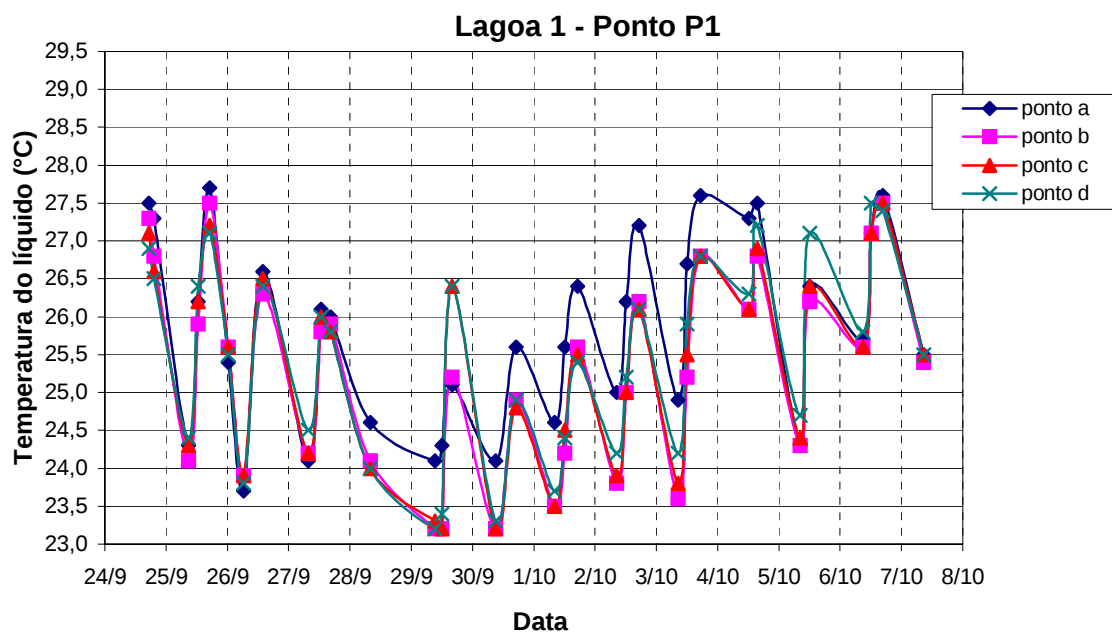


Figura 5.7: Temperatura do líquido ao longo da profundidade no ponto 1 da lagoa 1 (durante o ensaio de traçador)

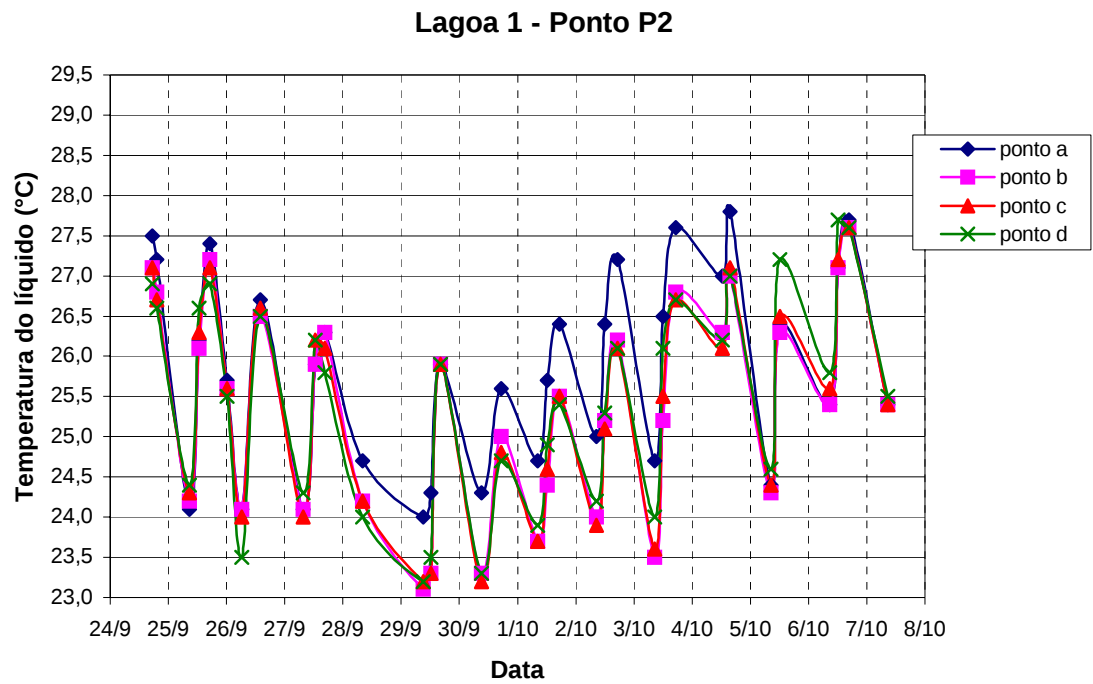


Figura 5.8: Temperatura do líquido ao longo da profundidade no ponto 2 da lagoa 1 (durante o ensaio de traçador)

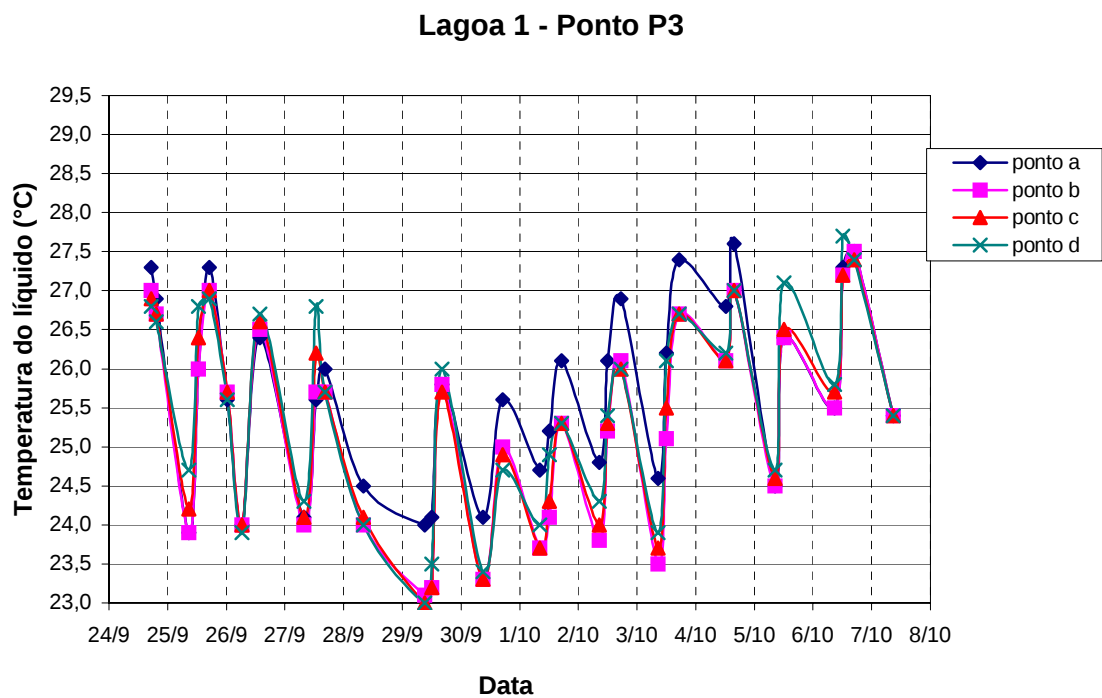


Figura 5.9: Temperatura do líquido ao longo da profundidade no ponto 3 da lagoa 1 (durante o ensaio de traçador)

Na lagoa 1, a temperatura do líquido nos pontos P1, P2 e P3 ficou na faixa de 23 a 27,5°C. Ao longo da profundidade, a temperatura variou no máximo de 1°C comparando-se leituras efetuadas no mesmo dia e horário, sendo que, esse máximo ocorreu no período de 28/09 a 05/10, onde o ponto a (fundo da lagoa) se destacou dos demais, apresentando maiores valores de temperatura. Isso ocorreu sem nenhuma evidência da mudança de algum fator climático, pois a radiação solar não variou muito durante todo o experimento com traçador, assim como também a chuva, que só teve um evento de 3,5 mm no dia 27/09. A elevação da temperatura do fundo da lagoa pode estar relacionada com o fato da lagoa estar apoiada no chão, estando as laterais em contato direto com o ar.

A leitura da temperatura durante a noite (00:30 h), chamada ponto P_N, esteve dentro da curva formada entre o ponto imediatamente anterior e o posterior ao P_N, mostrando que as leituras diárias são representativas das 24 horas do dia.

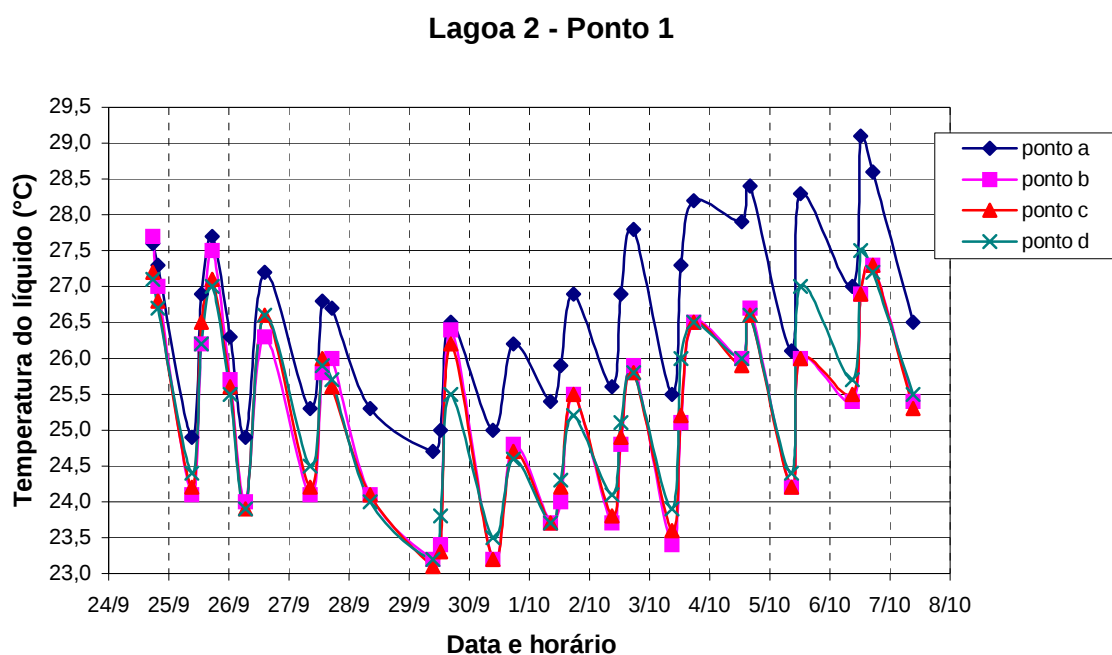


Figura 5.10: Temperatura do líquido ao longo da profundidade no ponto 1 da lagoa 2 (durante o ensaio de traçador)

Lagoa 2 - Ponto P2

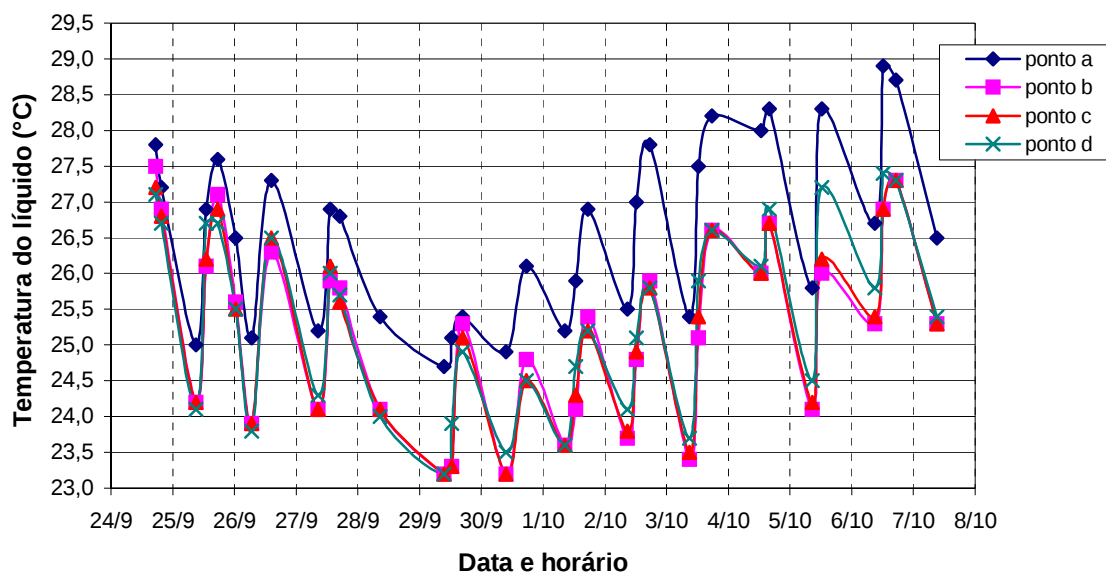


Figura 5.11: Temperatura do líquido ao longo da profundidade no ponto 2 da lagoa 2 (durante o ensaio de traçador)

Lagoa 2 - Ponto P3

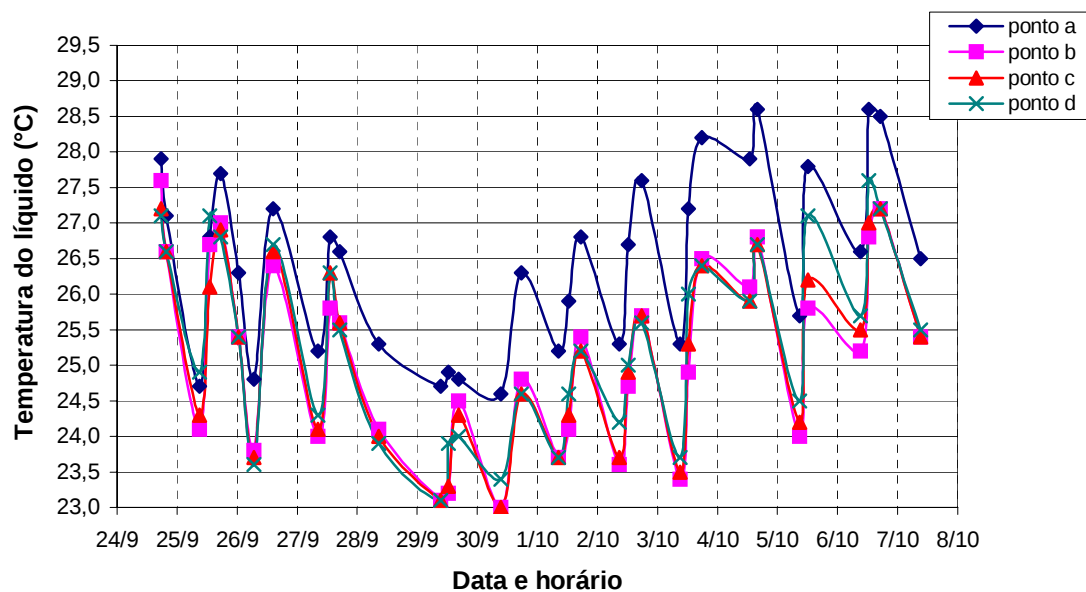


Figura 5.12: Temperatura do líquido ao longo da profundidade no ponto 3 da lagoa 2 (durante o ensaio de traçador)

Na lagoa 2, a temperatura do líquido nos pontos P1, P2 e P3 ficou na faixa de 23 a 29°C. Ao longo da profundidade, a temperatura variou no máximo de 2°C comparando-se leituras efetuadas no mesmo dia e horário, sendo que, a partir de 25/09 (segundo dia do

experimento), o ponto a se destacou dos demais, apresentando maiores valores de temperatura em maior intensidade que na lagoa 1. A lagoa 2 indicou temperatura do líquido maior que a 1, em média de 1°C , e também apresentou maior intervalo com a temperatura do ponto a (fundo) distante dos demais, fato difícil de ser explicado visto que as lagoas se localizam lado a lado.

Com a medida da temperatura nos pontos P1, P2 e P3 para as duas lagoas, observou-se que os valores de leitura dos três pontos não diferem de forma significativa entre si. Quando na coleta de dados da temperatura em lagoas desse porte, pode-se apenas fazer a medição no meio da lagoa (P2). Ao longo da profundidade, a temperatura varia muito pouco, podendo-se dizer que não há estratificação e relatando a dificuldade de estudar esse fenômeno em lagoas piloto.

O perfil da temperatura ao longo da profundidade em dois dias escolhidos aleatoriamente é apresentado nas Figuras 5.13 (para a lagoa 1) e 5.14 (para a lagoa 2).

Pelas Figuras 5.13 e 5.14, pode-se notar que o comportamento da temperatura ao longo da profundidade foi um pouco diferente nas duas lagoas, como também visto nas Figuras 5.7 a 5.12. O perfil de temperatura foi praticamente uniforme durante a noite (00:20 h) para a lagoa 1 (Figura 5.13), e apresentou o fundo com temperatura elevada para a lagoa 2 (Figura 5.14). No decorrer do dia, a temperatura varia cerca de 3°C nas duas lagoas, e ao longo da profundidade, estabelece uma uniformidade na lagoa 1 (Figura 5.13) e apresenta maior variabilidade na lagoa 2 (Figura 5.14). A estratificação ocorreu mais acentuadamente durante o dia, diminuindo sua magnitude à noite, período em que provavelmente ocorre o processo de mistura, mais facilmente observável na lagoa 1.

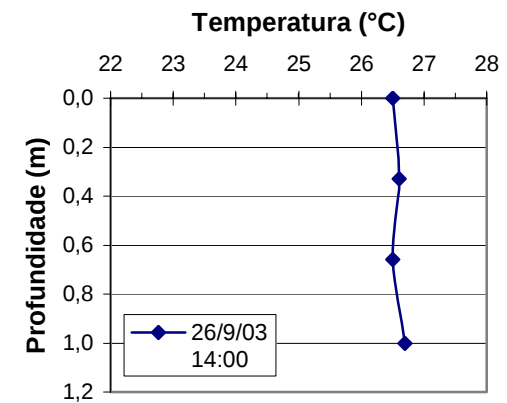
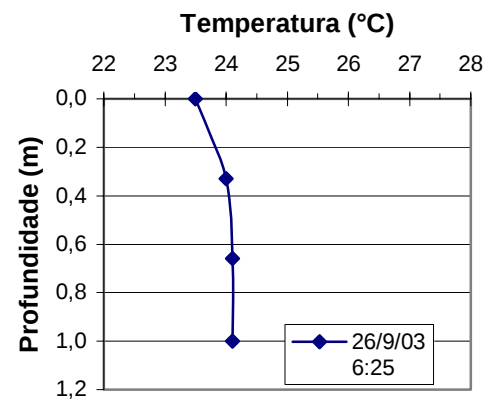
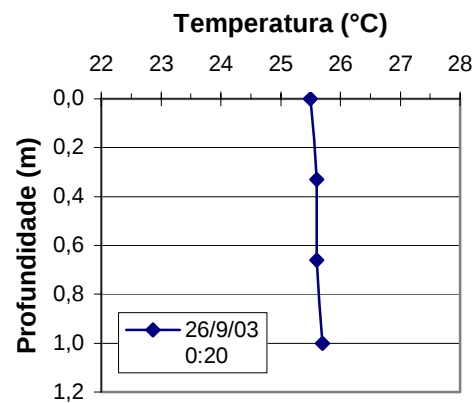
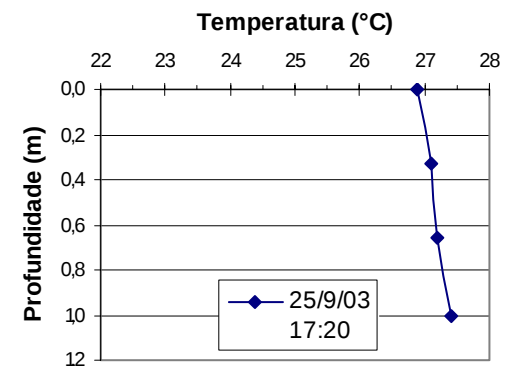
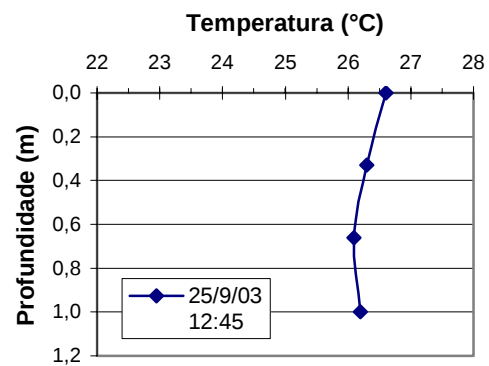
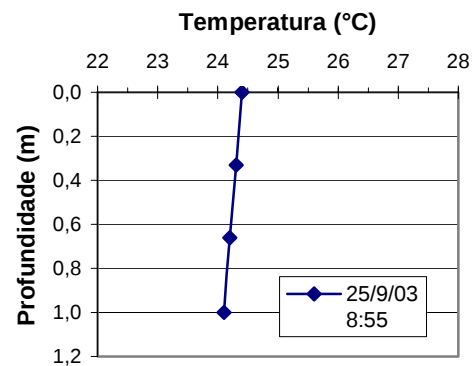


Figura 5.13: Temperatura do líquido ao longo da profundidade na lagoa 1 durante o ensaio de traçador, em 25 e 26/09/03

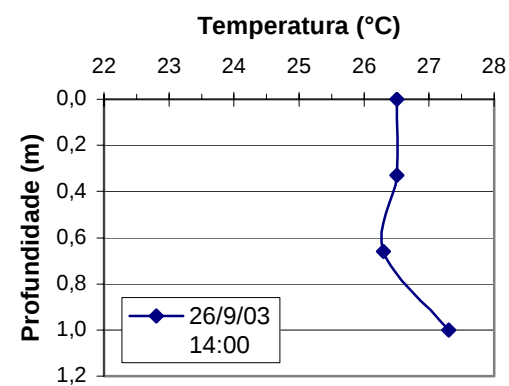
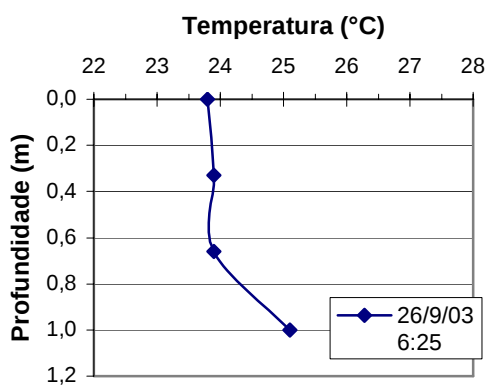
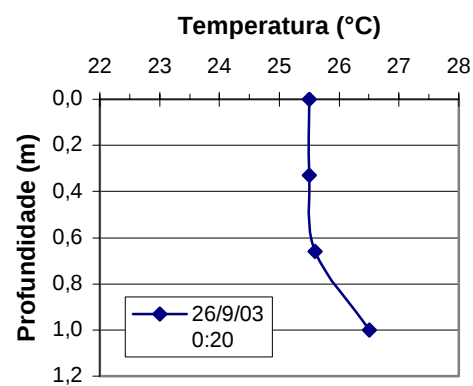
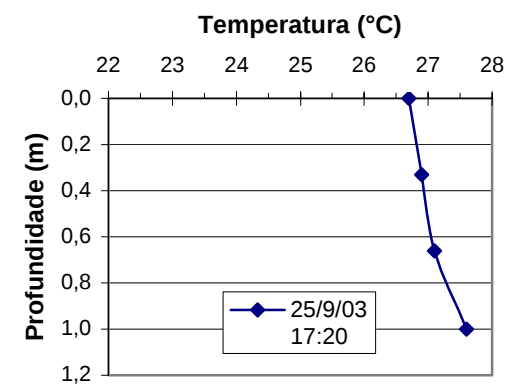
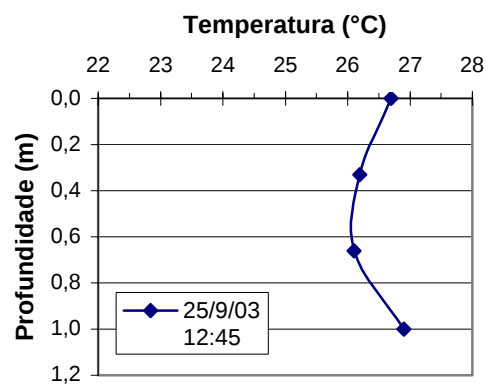
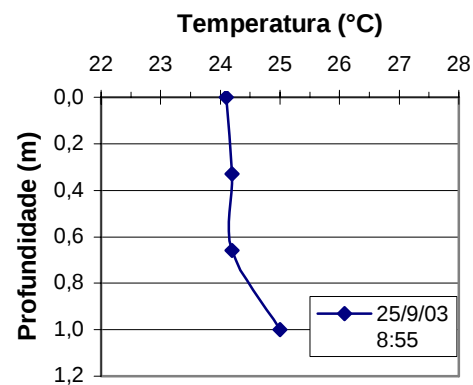


Figura 5.14: Temperatura do líquido ao longo da profundidade na lagoa 2 durante o ensaio de traçador, em 25 e 26/09/03

b) Condutividade

A leitura de condutividade ao longo da profundidade (fundo, meio e superfície da lagoa) foi feita em frequência aleatória, com o mesmo objetivo de avaliar o provável efeito de estratificação da concentração de sal. Os dados estão ilustrados nos gráficos constantes nas Figuras 5.15 a 5.20, e também no apêndice A do anexo, em forma de tabela.

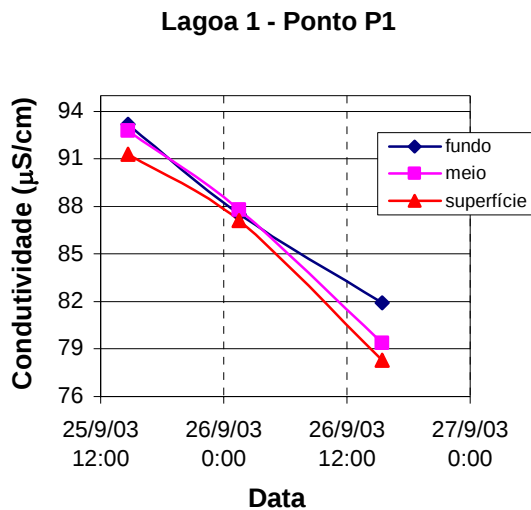


Figura 5.15: Condutividade ao longo da profundidade no ponto 1 da lagoa 1 (três leituras entre o dia 25 e 27/09 durante o ensaio de traçador)

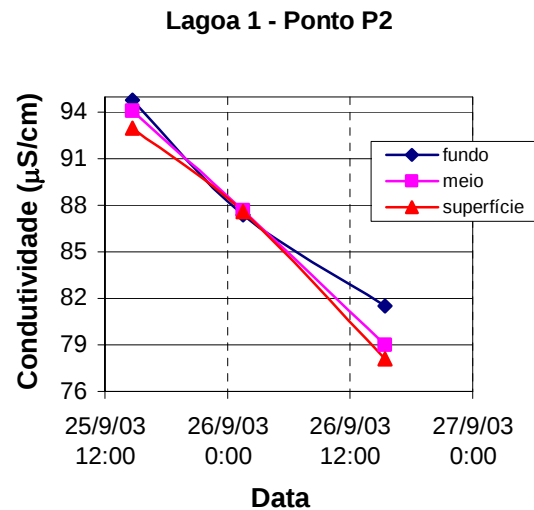


Figura 5.16: Condutividade ao longo da profundidade no ponto 2 da lagoa 1 (três leituras entre o dia 25 e 27/09 durante o ensaio de traçador)

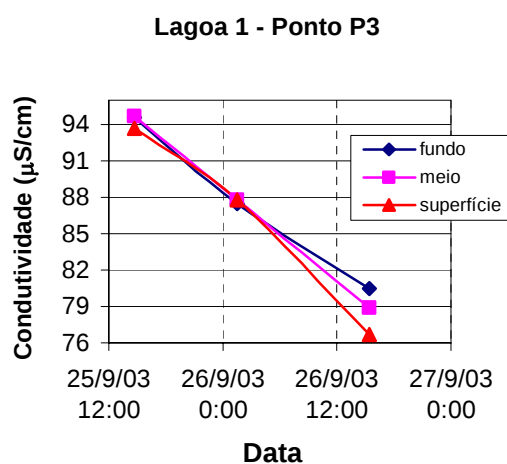


Figura 5.17: Condutividade ao longo da profundidade no ponto 3 da lagoa 1 (três leituras entre o dia 25 e 27/09 durante o ensaio de traçador)

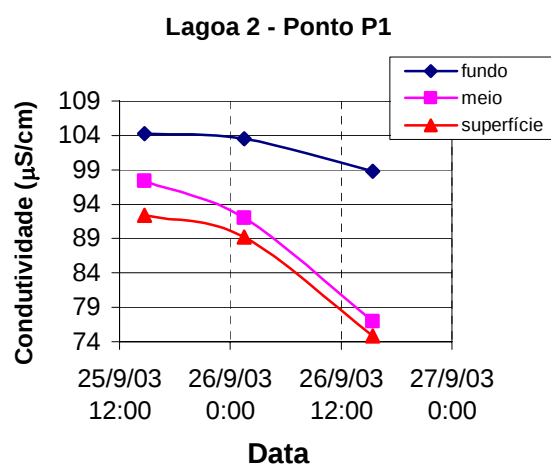


Figura 5.18: Condutividade ao longo da profundidade no ponto 1 da lagoa 2 (três leituras entre o dia 25 e 27/09 durante o ensaio de traçador)

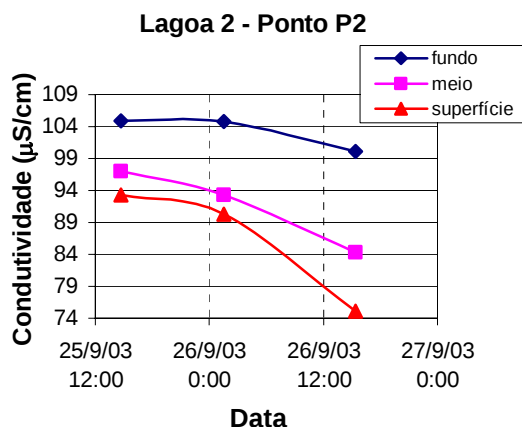


Figura 5.19: Condutividade ao longo da profundidade no ponto 2 da lagoa 2 (três leituras entre o dia 25 e 27/09 durante o ensaio de traçador)

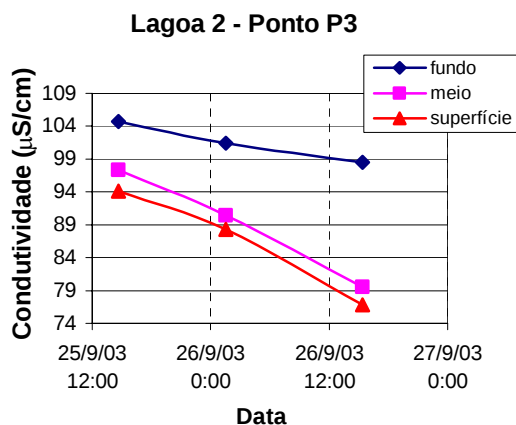


Figura 5.20: Condutividade ao longo da profundidade no ponto 3 da lagoa 2 (três leituras entre o dia 25 e 27/09 durante o ensaio de traçador)

Das Figuras 5.15 a 5.20, pode-se concluir:

- a condutividade foi maior no fundo para as duas lagoas, sendo que na lagoa 2 essa situação ficou mais evidente, pois a concentração de sal foi maior que na lagoa 1;
- a condutividade apresentou valores muito próximos ao longo da profundidade para a lagoa 1, e valores um pouco diferentes para a lagoa 2, comportamento semelhante ao detectado anteriormente na análise da temperatura do líquido.

Mas, nada se pode concluir a cerca da estratificação pelo dado de condutividade devido à:

- justificativa da disparidade encontrada entre os gráficos das lagoas 1 e 2 (Figuras 5.15 a 5.20) não ter sido encontrada. Os gráficos da lagoa 1 (Figuras 5.15 a 5.17) possuem linhas (condutividade do líquido em cada ponto ao longo da profundidade) quase sobrepostas, enquanto nos gráficos da lagoa 2 (Figuras 5.18 a 5.20) essas linhas são mais separadas. Mesmo sabendo que, em média, a concentração de sal foi maior na lagoa 2 que na 1, o nível da disparidade encontrada não se justifica somente por isso;
- o fundo da lagoa pode ter tido valores de condutividade maiores em função de uma provável deposição de parte do sal no fundo, podendo não haver sido dissolvido totalmente.

5.2 - TRATAMENTO DOS ESGOTOS

5.2.1 - Apresentação dos dados

Em busca de maior simplificação na exposição dos dados, cada amostra analisada foi atribuída a uma sigla de identificação, a qual tem sua descrição apresentada na tabela a seguir:

Tabela 5.2: Descrição das siglas utilizadas para nomear as amostras de esgoto analisadas

Amostra	Descrição
EB	Esgoto bruto
L1	Interior da lagoa 1: no centro da lagoa à profundidade do disco de secchi
L2	Interior da lagoa 2: no centro da lagoa à profundidade do disco de secchi
L1S	Efluente da lagoa 1
L2S	Efluente da lagoa 2
L1T	Interior da lagoa 1: no centro da lagoa à profundidade do disco de secchi (amostra <i>in natura</i>). L1T = L1
L1F	Interior da lagoa 1: no centro da lagoa à profundidade do disco de secchi (amostra filtrada)
L2T	Interior da lagoa 2: no centro da lagoa à profundidade do disco de secchi (amostra <i>in natura</i>). L2T = L2
L2F	Interior da lagoa 2: no centro da lagoa à profundidade do disco de secchi (amostra filtrada)
L1ST	Efluente da lagoa 1 (amostra <i>in natura</i>). L1ST = L1S
L1SF	Efluente da lagoa 1 (amostra filtrada)
L2ST	Efluente da lagoa 2 (amostra <i>in natura</i>). L2ST = L2S
L2SF	Efluente da lagoa 2 (amostra filtrada)

A apresentação dos dados tem como objetivo mostrar sua variação ao longo da fase experimental de tratamento de esgotos e expor eventuais problemas encontrados em sua coleta.

▪ Temperatura do esgoto e do ar

Na análise dos dados de temperatura do esgoto e do ar obtidas no experimento, percebeu-se que de acordo com outros estudos, seria necessário o valor da temperatura média do dia correspondente ao período de 0 às 24 h. Entretanto, a coleta desses fatores foi feita de duas em duas horas durante o horário de 08 às 18 h e também feito um registro da temperatura máxima e mínima ocorrida nesse mesmo período, sendo portanto impossível a obtenção do

valor da temperatura média do dia. Com os dados obtidos pode-se verificar somente a questão da estratificação térmica, a ser tratada no final desse item. Se o registro da temperatura máxima e mínima tivesse ocorrido no período de 0 às 24 h, poder-se-ia calcular a temperatura média por meio da equação proposta por Hamakawa (1999):

$$T. \text{ média} = \frac{T_{\max} + T_{\min}}{2} \quad (5.1)$$

O mesmo autor sugere outra forma de determinação da temperatura média, propondo que a temperatura mínima do ar ocorre alguns poucos minutos depois do nascimento do sol e a temperatura máxima, por volta das 14 h em medidas realizadas a 1,50 m de altura. No caso do experimento, não houve medidas efetuadas ao nascer do sol, e assim conclui-se que nenhuma das teorias de determinação da temperatura média é aplicável, e por isso, decidiu-se utilizar dados de temperatura do ar da Embrapa, localizada em Planaltina, aproximadamente a 40 Km do local do experimento. A temperatura do líquido foi obtida pela temperatura do ar de Planaltina, utilizando a equação apresentada por Yánez (1993), formulada em Campina Grande, Paraíba, e apresentada na equação (5.2) a seguir:

$$\text{Temp. líquido} = 10,966 + 0,611.(\text{temp. ar}) \quad (5.2)$$

▪ **Radiação solar**

Devido a um problema ocorrido, os dados de radiação solar no local do experimento foram armazenados somente nos meses de março e abril. Optou-se então por fazer uma correlação entre os dados obtidos no experimento e os de Planaltina no período em que havia dados dos dois locais, e em seguida, pela correlação, obter os dados de radiação solar para o local do experimento usando o de Planaltina, no período de janeiro, fevereiro e maio. A correlação (equação 5.3) entre a radiação solar no local do experimento e em Planaltina é a seguinte:

$$y = 0,8796.x + 23,302 \quad (R^2 = 0,70) \quad (5.3)$$

onde:

y = radiação solar no local do experimento (cal/cm²/d)

s = radiação solar em Planaltina (cal/cm²/d)

O valor do R^2 na equação acima é considerado regular, pois o fator radiação solar é de suma importância no processo de tratamento, e particularmente no presente trabalho, ele será muito utilizado em relações com os fatores de qualidade do esgoto, tendo que ser portanto um dado preciso. O fato do valor de R^2 não ter sido próximo de 1, como desejado, está relacionado às observações feitas por Larcher (2000), que diz que a topografia do local e as condições climáticas determinam a disponibilidade de radiação e são compostas, respectivamente, pelo desenho do terreno, o ângulo de incidência da radiação e pelo estado atmosférico (presença de nuvens ou neblina). Assim, mesmo que as duas regiões apresentem condições climáticas similares, dificilmente a topografia também será semelhante, e somente a proximidade de regiões não garante a correlação satisfatória entre os dados de radiação. É importante ressaltar a necessidade de um piranômetro no local de estudo desse parâmetro em lagoas.

- **Profundidade do disco de secchi**

A profundidade do disco de secchi medida nas lagoas ao longo do período experimental é apresentada no item a seguir (5.2.2).

- **Sólidos**

A variação dos sólidos totais, totais voláteis e suspensos durante a fase experimental é ilustrada nos gráficos a seguir para as amostras de EB, L1, L2, L1S e L2S. Também serão apresentadas as eficiências de remoção dos sólidos totais e suspensos. Nos gráficos com grande quantidade de pontos, foi traçada a linha de tendência polinomial para melhor visualização e análise dos dados ilustrados.

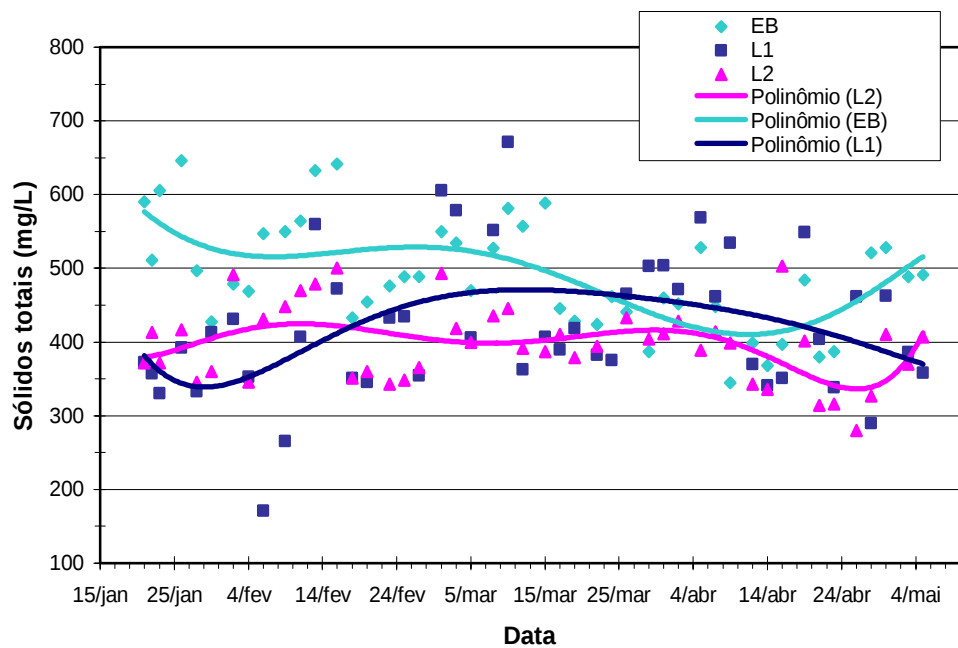


Figura 5.21: Sólidos totais em função do tempo no esgoto bruto e no interior das lagoas 1 e 2

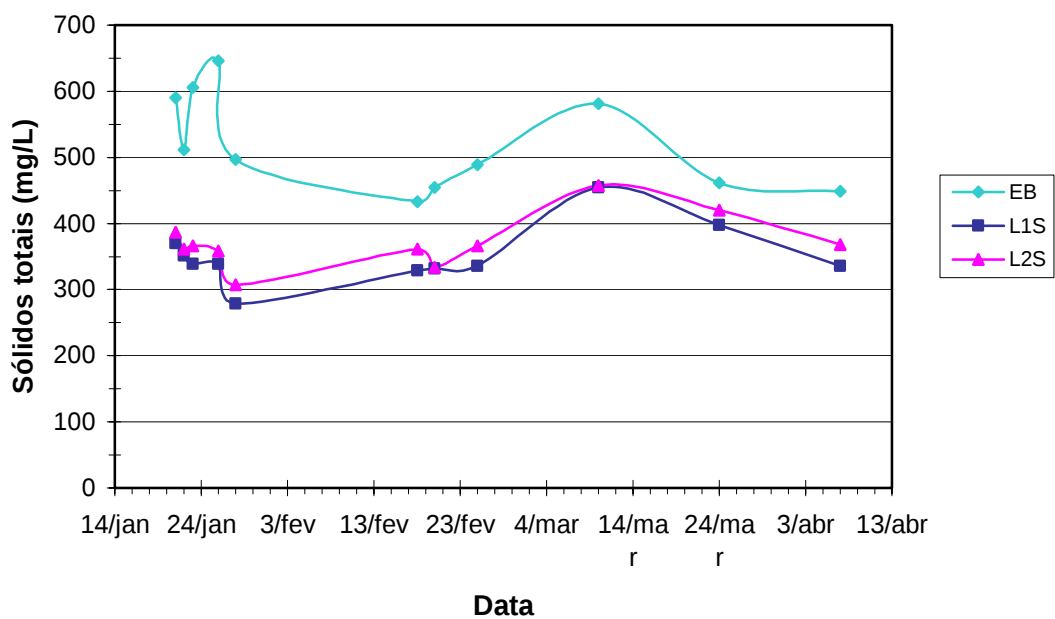


Figura 5.22: Sólidos totais em função do tempo no esgoto bruto e no efluente das lagoas 1 e 2

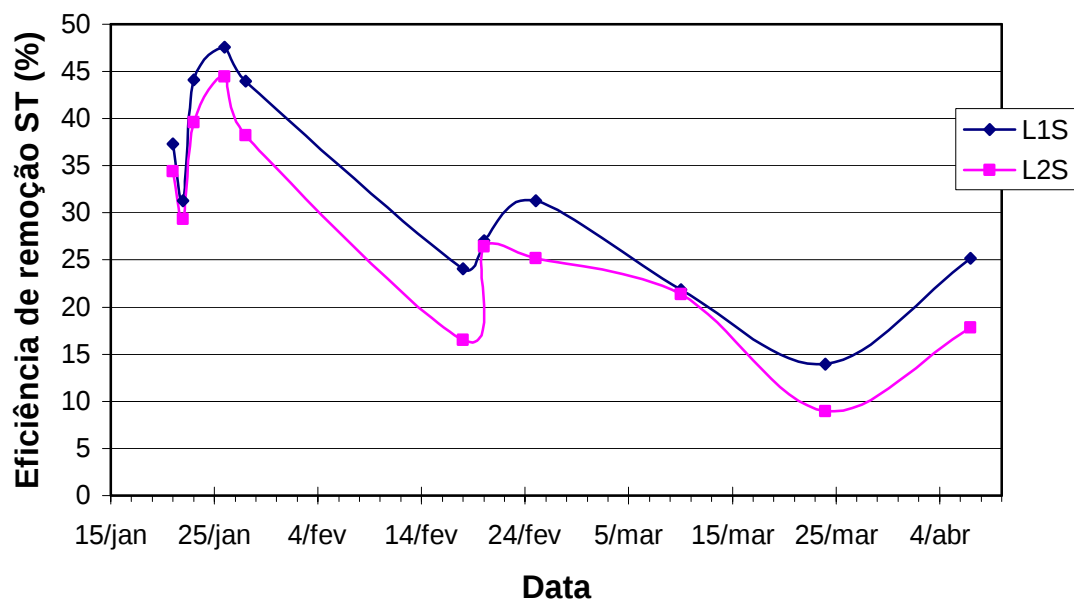


Figura 5.23: Eficiência de remoção de sólidos totais em função do tempo nas lagoas 1 e 2

Nota-se que a variação dos sólidos totais é em forma variável (subindo e descendo) durante toda a fase experimental. A eficiência de remoção de sólidos totais decresceu com o tempo, provavelmente devido ao aumento da concentração de algas.

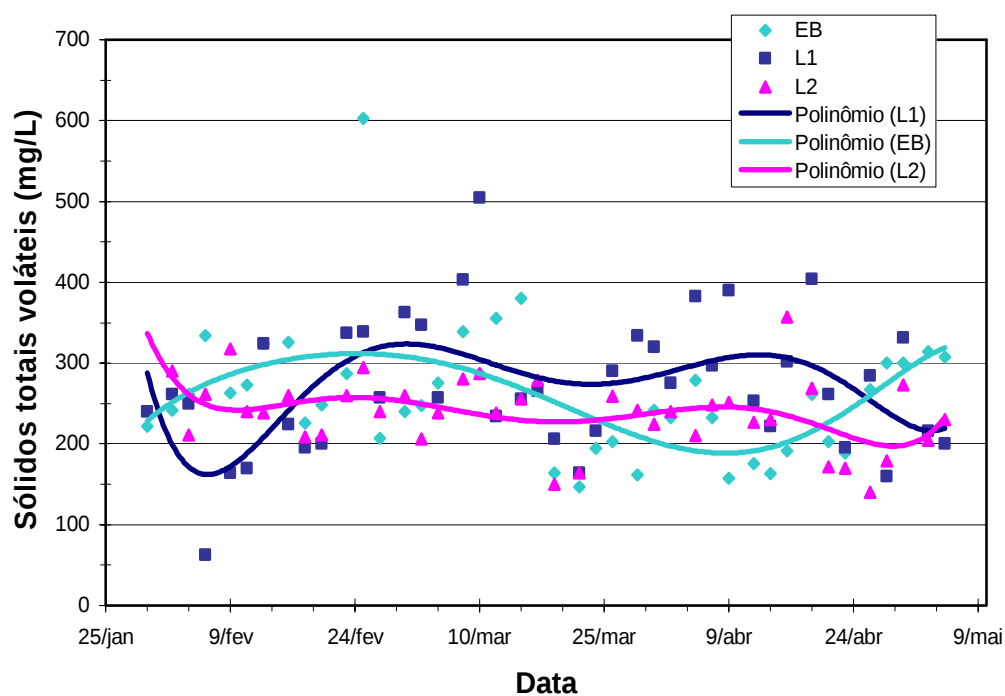


Figura 5.24: Sólidos totais voláteis em função do tempo no esgoto bruto e no interior das lagoas 1 e 2

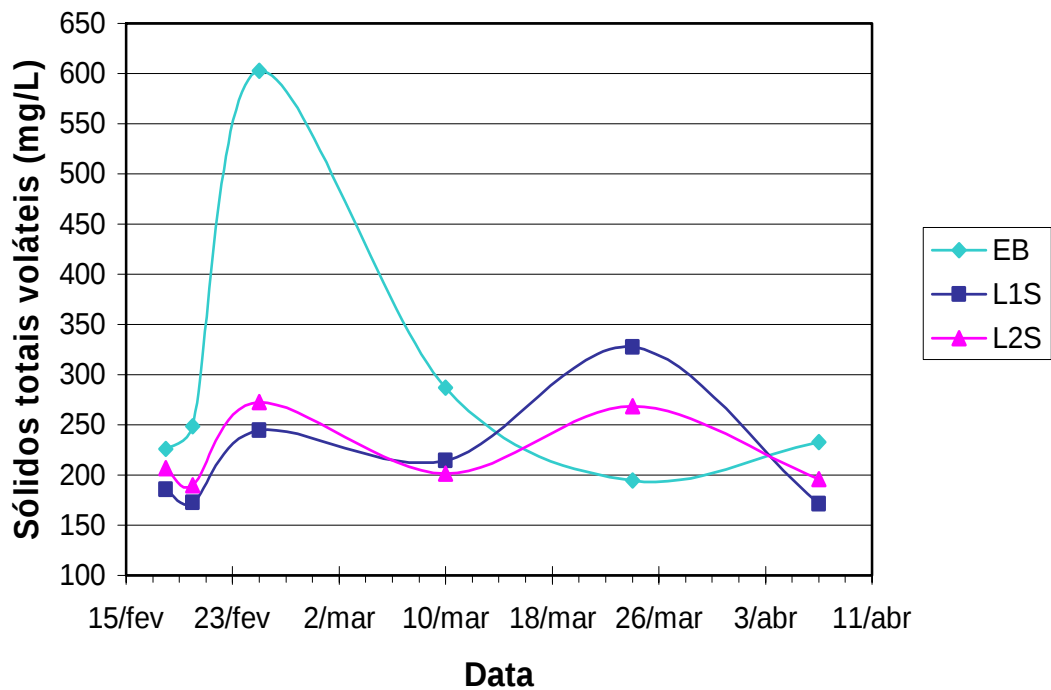


Figura 5.25: Sólidos totais voláteis em função do tempo no esgoto bruto e no efluente das lagoas 1 e 2

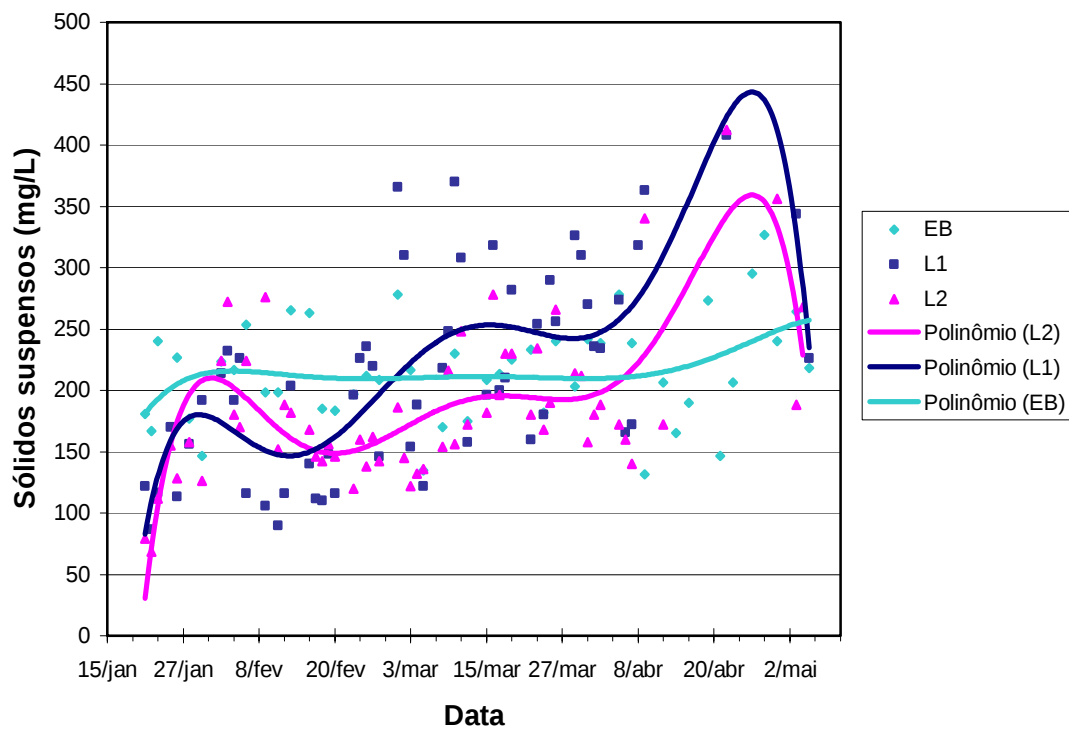


Figura 5.26: Sólidos suspensos em função do tempo no esgoto bruto e no interior das lagoas 1 e 2

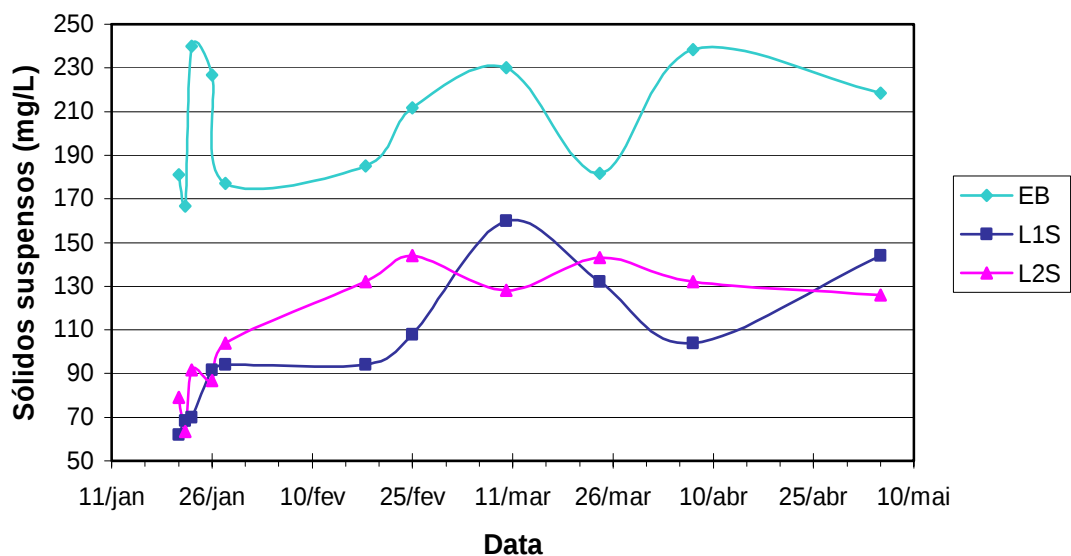


Figura 5.27: Sólidos suspensos em função do tempo no esgoto bruto e no efluente das lagoas 1 e 2

A concentração de sólidos apresenta-se de forma variável (subindo e descendo) para os sólidos totais voláteis e suspensos, sendo que para esse último, a curva do gráfico 5.26 apresentou um crescimento irregular dos valores dos sólidos (eixo y) ao longo do tempo, confirmando a hipótese de aumento da concentração de algas, resultando na redução da eficiência de remoção dos sólidos totais, como observado anteriormente.

▪ Clorofila-a

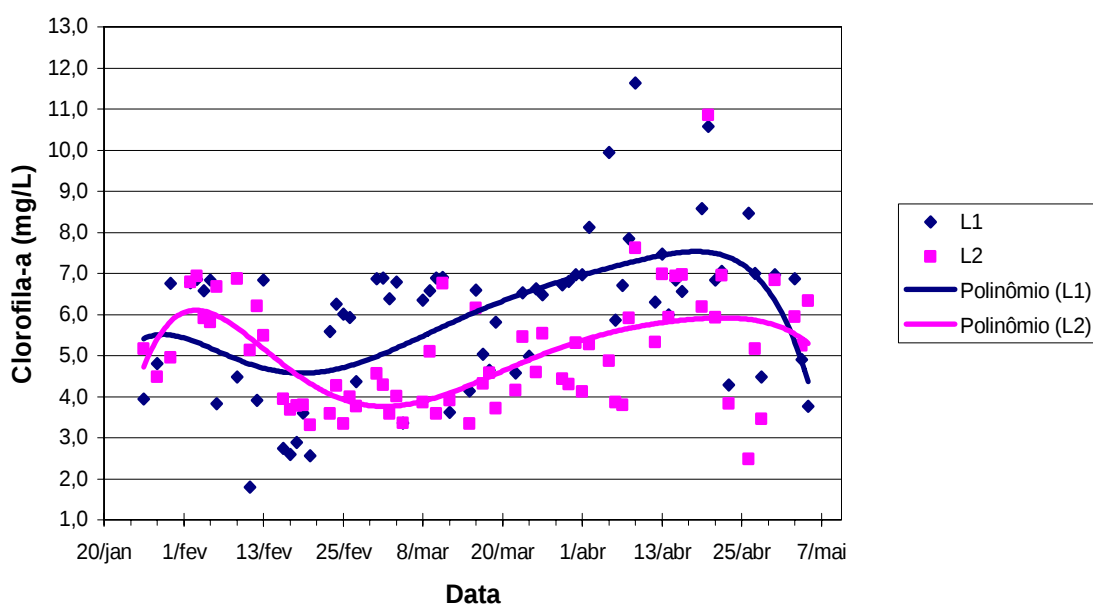


Figura 5.28: Clorofila-a em função do tempo no interior das lagoas 1 e 2

A curva da clorofila-a no interior da lagoa x tempo também tem a forma de onda (sobe e desce), apresentando alguns picos em abril. Verifica-se que em seu gráfico (Figura 5.28), no de SS (Figura 5.26), STV (Figura 5.24) e ST (Figura 5.21), as lagoas 1 e 2 apresentam comportamentos similares, sendo que a lagoa 2 possui menores concentrações de clorofila-a e sólidos suspensos na maior parte do tempo, ou seja, menor quantitativo de algas.

As amostras L1S e L2S, em média, apresentaram valores semelhantes para os dados de ST, STV e SS (Figuras 5.22, 5.25 e 5.27 respectivamente). Apenas no gráfico da Figura 5.23 que se pode perceber maior eficiência de remoção dos ST da lagoa 1 que na lagoa 2 devido ao um motivo não detectado.

A concentração de clorofila-a foi maior que em lagoas reais (1,5 mg/L em média) e teve aumento com o tempo de operação das lagoas (Figura 5.28), com sucessiva queda na eficiência de remoção de ST (Figura 5.23), indicando que o aumento das algas faz com que a eficiência de remoção de ST diminua.

▪ pH

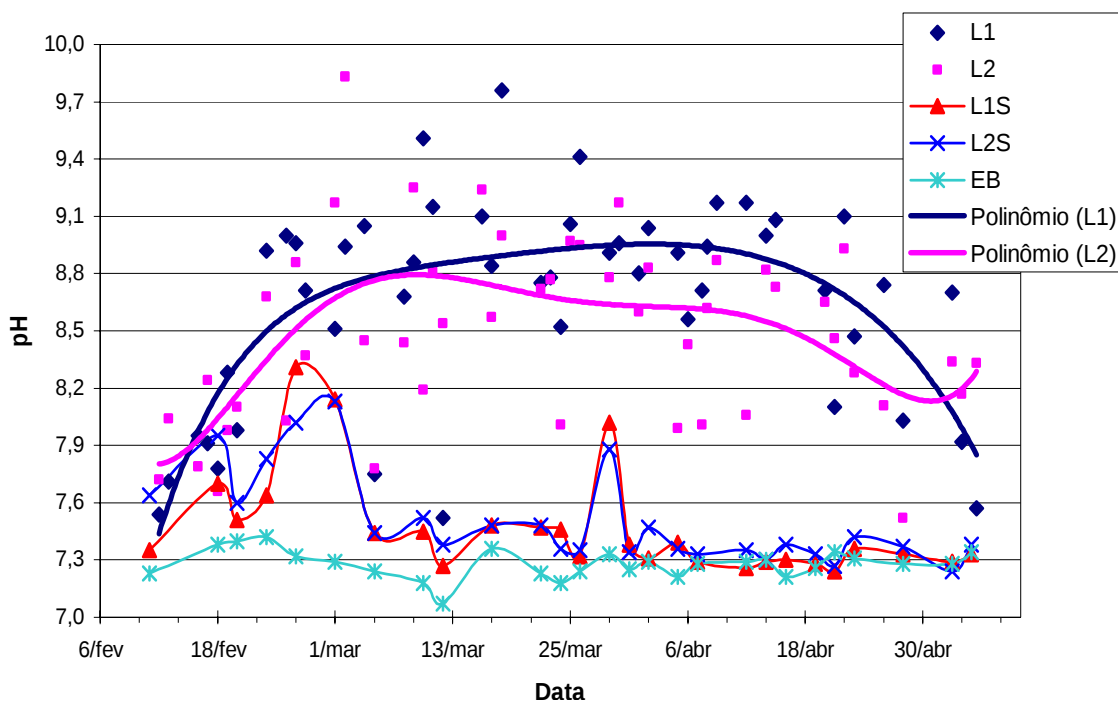


Figura 5.29: pH no esgoto bruto, no interior e efluente das lagoas 1 e 2 em função do tempo

O pH da lagoa 1 é maior que a lagoa 2 na maior parte do tempo, indicando que a atividade fotossintética é mais intensa na lagoa 1. Pode-se perceber que no início do experimento (fevereiro), as curvas da lagoa 1 e 2 são equivalentes, apresentando pequena diferença entre os valores de pH, e em seguida a lagoa 1 passa por uma fase de valores superiores à lagoa 2, fato que acontece também nos gráficos de sólidos e clorofila-a.

Para o pH das amostras L1S e L2S, não se pode dizer que um é maior que o outro, como também acontece com as mesmas amostras de sólidos e clorofila-a.

▪ DQO e DBO

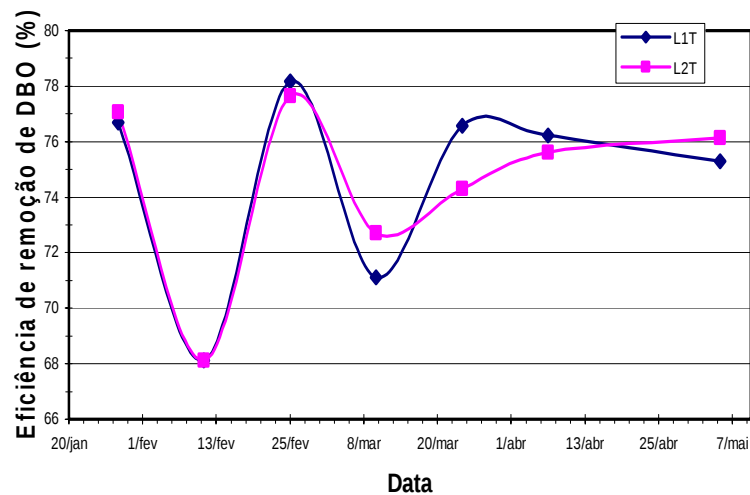


Figura 5.30: Eficiência de remoção de DBO total em função do tempo nas lagoas 1 e 2

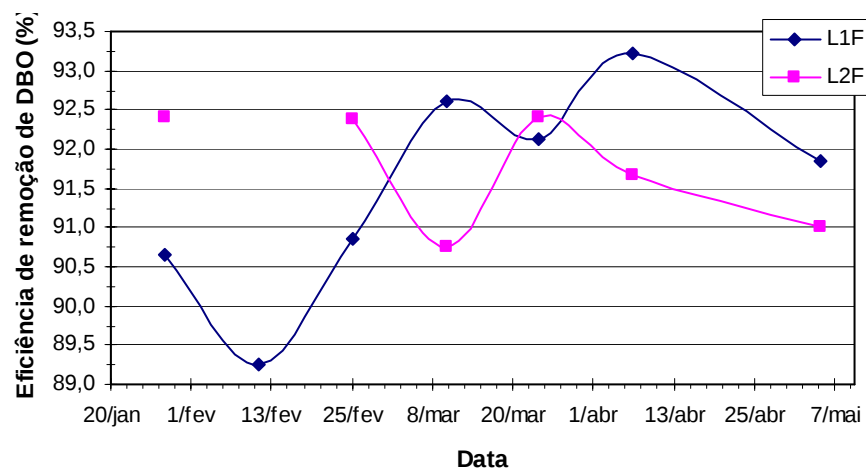


Figura 5.31: Eficiência de remoção de DBO filtrada em função do tempo nas lagoas 1 e 2

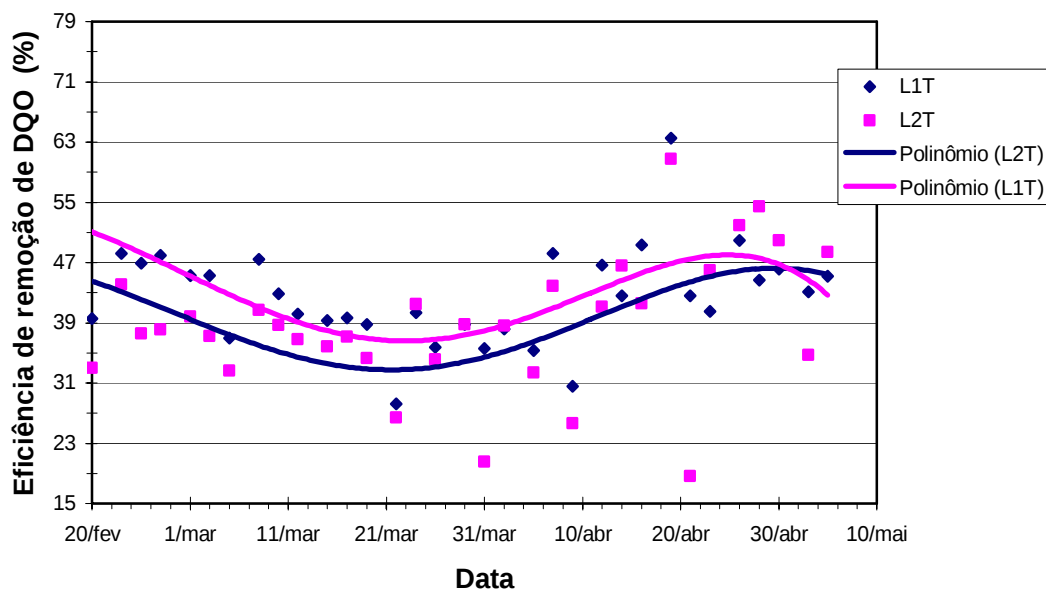


Figura 5.32: Eficiência de remoção de DQO total em função do tempo nas lagoas 1 e 2

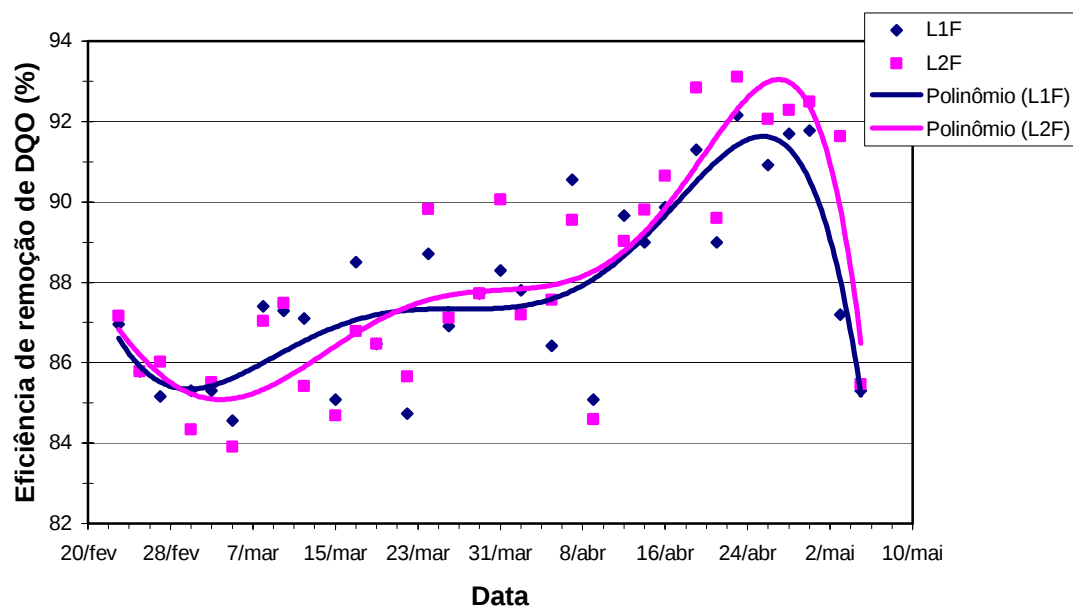


Figura 5.33: Eficiência de remoção de DQO filtrada em função do tempo nas lagoas 1 e 2

Embora as algas tenham atingido maior concentração na lagoa 1, como discutido anteriormente, isso não foi refletido na eficiência de remoção de DBO e DQO, como esperado, pois os gráficos das Figuras 5.30, 5.32 e 5.33 mostram que as duas lagoas apresentam eficiências de remoção praticamente iguais, com exceção do gráfico de eficiência de remoção da DBO filtrada (Figura 5.31), o qual apresentou comportamento diferente dos demais. Tal fato poderia ser explicado pela conclusão de que a diferença da

concentração de algas entre as lagoas pode não ter sido significativa. É importante ressaltar também a elevada eficiência de remoção obtida da amostra filtrada, em torno de 90% tanto para a DBO como a DQO.

▪ Ensaio dos frascos claros e escuros

No ensaio dos frascos claros e escuros, a coleta do esgoto no interior da lagoa e o restante das preparações para o início do ensaio - mergulho do aparato (Figura 4.11), teve duração média de 7 minutos. Ao analisar as reações microbiológicas que ocorrem nesse período com o meio externo, conclui-se que esse tempo é considerado alto, pois a interferência na simulação da produtividade das algas a ser alcançada no interior das lagoas é grande. O tempo em que o aparato permaneceu dentro da lagoa foi em torno de 30 minutos, que é igual ao tempo de ensaio.

Os resultados obtidos em cada ensaio de frascos claros e escuros são apresentados na tabela abaixo:

Tabela 5.3: Resultado dos ensaios de frascos claros e escuros

data	25/02/2004		10/03/2004		15/03/2004	
	L1	L2	L1	L2	L1	L2
início da coleta (h)	12:17	12:04	10:58	11:07	12:40	12:47
fim da coleta (h)	12:24	12:17	11:04	11:12	12:46	12:53
início do ensaio (h)	12:24	12:24	11:04	11:12	12:46	12:53
fim do ensaio (h)	12:45	12:45	11:34	11:42	13:16	13:23

amostra	OD (mg/L)		OD (mg/L)		OD (mg/L)	
00 cm - inicial	4,70	16,72	9,20	3,80	6,46	5,94
00 cm - claro	9,10	5,75	4,97	3,41	7,30	5,38
00 cm - escuro	4,50	4,96	4,12	5,57	6,19	4,62
30 cm - inicial	0,73	0,47	0,00	0,00	0,00	0,00
30 cm - claro	2,02	1,58	0,00	0,00	0,00	0,00
30 cm - escuro	0,42	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
60 cm - inicial	0,22	0,10	0,00	0,00	0,00	0,00
60 cm - claro	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
60 cm - escuro	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

O número de amostras (seis) contidas no aparato foi elevado para o procedimento adotado, de forma que o tempo de retirada das amostras da lagoa ao fim da adição de fixadores de

OD durou cerca de 3 minutos. Assim, existiram muitas alterações externas que prejudicaram o resultado do ensaio, e por esse motivo optou-se por não prosseguir-lo nem calcular a produtividade com os dados obtidos. Por esses dados, observa-se que a concentração de OD foi diminuindo ao longo da fase experimental de tratamento de esgotos: em fevereiro, ainda encontrava-se uma baixa concentração de OD até os 60 cm, já em março, a 30 cm não havia mais oxigênio no meio. No dia 05/05, ao invés da execução do ensaio, foi medido apenas o valor do OD ao longo da profundidade em 4 horários do dia, e os resultados são mostrados na tabela a seguir.

Tabela 5.4: Oxigênio dissolvido ao longo da profundidade em medidas efetuadas em 4 horários ao longo do dia 05/05/04

Data: 05/05/04	L1	L2
amostra	OD (mg/L)	
00 cm (09:00)	0,00	0,30
30 cm (09:00)	0,00	0,00
00 cm (12:00)	0,54	1,16
30 cm (12:00)	0,00	0,00
00 cm (15:00)	0,86	0,62
30 cm (15:00)	0,00	0,00
00 cm (18:00)	0,00	0,00
30 cm (18:00)	0,00	0,00

Pelos resultados ilustrados na tabela acima, pode-se notar que não foi encontrado oxigênio a 30 cm em nenhum horário e a concentração detectada a 0 cm (na superfície) foi baixíssima, concluindo que as lagoas passaram a trabalhar em meio predominantemente anaeróbio. Tal fato ocorreu devido à ausência da reaeração pelo efeito de vento nessa escala de lagoa e também por causa da elevada carga orgânica afluyente. Se houvesse a inferência da reaeração pelo vento, seria observada uma quebra na estratificação em relação ao OD. É interessante ressaltar que nas lagoas piloto deste trabalho, não se percebeu a formação de ondas provocadas pelo vento, como acontece em lagoas de escala real, e portanto, o efeito desse fator pode ser desconsiderado no tratamento de esgotos por lagoas piloto.

▪ Fósforo

As amostras para análise de fósforo foram coletadas em meados de fevereiro, e seus resultados são apresentados na tabela a seguir.

Tabela 5.5: Concentração de fósforo nas amostras de esgoto bruto e efluentes filtrados da lagoa 1 e 2, e remoção de fósforo na lagoa 1 e 2 utilizando amostra filtrada do efluente

Forma	Concentração de fósforo			Remoção de fósforo (%)	
	EB	L1SF	L2SF	L1SF	L2SF
PO₄³⁻ (mg/L)	14,60	11,20	12,00	23,29	17,81

A remoção de fósforo se encontra próxima ao limite inferior (20%) determinado para lagoas facultativas (Tabela 3.1), mostrando que a lagoa em estudo tem comportamento de lagoa real.

▪ Coliformes

Foram coletadas duas amostras para análise de coliformes durante o período do experimento, uma no início de fevereiro e outra no fim de março, e seus resultados são apresentados na tabela a seguir.

Tabela 5.6: Coliformes totais e termotolerantes na amostra de esgoto bruto, efluente da lagoa 1 e 2, e remoção de coliformes totais e fecais na lagoa 1 e 2

	Coliformes (NMP/100mL)			Remoção de coliformes (%)	
	EB	L1S	L2S	L1	L2
Totais	1,57E+08	8,98E+06	1,48E+07	93,92	91,53
Termotolerantes	2,48E+07	7,50E+05	1,33E+06	96,67	94,82

▪ Variação das características de qualidade ao longo do dia

A fim de determinar o comportamento das principais características de qualidade do esgoto ao longo do dia, foram feitas análises em dois dias ao longo do experimento, em pelo menos dois horários no dia. Os resultados são mostrados nas tabelas 5.7 e 5.8 a seguir:

Tabela 5.7: Sólidos totais, sólidos totais voláteis, sólidos suspensos, clorofila-a, DBO e DQO no interior das lagoas 1 e 2 em distintos horários de coleta dos dias 07/04 e 05/05/04

Data	Horário	Sólidos totais (mg/L)		Sól. tot. vol. (mg/L)		Sól. suspensos (mg/L)		Clorofila-a (mg/L)		DBO (mg/L)				DQO (mg/L)			
		L1	L2	L1	L2	L1	L2	L1	L2	L1T	L2T	L1F	L2F	L1T	L2T	L1F	L2F
07/04/04	10:00	457,1	367,1	278,6	188,6	184,0	118,0	5,8	2,7	168	104	46	22	509	301	80	58
	12:15	461,4	414,3	297,1	248,6	172,0	140,0	6,7	3,8	218	122	-	-	494	349	81	66
	16:00	308,6	350,0	171,4	212,9	96,0	202,0	4,7	5,6	96	142	24	16	360	487	73	72
05/05/04	12:15	358,6	407,1	200,0	230,0	226,0	348,0	3,8	6,3	126	188	28	28	433	640	98	97
	16:00	335,7	332,9	172,9	185,7	252,0	192,0	5,1	4,2	118	122	28	20	413	360	100	97

Tabela 5.8: pH e altura do disco de secchi no interior das lagoas 1 e 2 em distintos horários de coleta dos dias 07/04 e 05/05/04

Data	Horário	pH		Secchi (cm)
		L1	L2	L1 e L2
07/04/04	10:00	7,56	7,23	9,0
	12:15	8,71	8,01	9,5
	16:00	8,94	9,19	9,0
05/05/04	12:15	7,57	8,33	11,0
	15:00	9,54	9,32	8,0
	18:00	8,42	9,17	6,5

Observa-se que os valores de ST, STV e DBO total atingem o máximo próximo do meio dia, horário de maior atividade das algas. Nos dados de DBO e DQO filtrada, pode-se notar que eles se mostraram estáveis durante todo o dia, provavelmente pelo fato das algas terem sido removidas por meio da filtração nessa análise.

Os valores de SS, clorofila-a, DQO e profundidade do disco de secchi possuem comportamento quase aleatório, ora apresentando valores pela manhã elevados com diminuição ao longo do dia, ora o contrário. Já para os dados de pH obtidos, nota-se que esse apresentou crescimento no decorrer do dia (início da manhã ao fim da tarde), somente decrescendo no fim da tarde (próximo das 18 h).

▪ Fitoplâncton

Nas Tabelas 5.9 e 5.10 estão contidos os resultados da análise quantitativa e qualitativa do fitoplâncton correspondente ao período de janeiro a março.

Euglena e *Clamydomonas* são gêneros previstos na literatura (Jordão e Pessoa, 1995; Von Sperling, 1996a e Pearson *et al.*, 1987) como pertencentes a lagoas, já os gêneros *Coelastrum* e *Micractinium* não são mencionados como pertencentes a lagoas de estabilização. Nas referências analisadas, são citadas as algas comuns em lagoas de escala real, e talvez os gêneros *Coelastrum* e *Micractinium* sejam característicos de lagoas facultativas piloto. De qualquer forma, os principais gêneros encontrados em lagoas de escala real também o foram em escala piloto, demonstrando a boa representatividade dessa última em estudos de tratamento de esgotos por lagoas de estabilização.

Apesar do gênero *Coelastrum* ter tido uma floração no início da operação das lagoas e em seguida ter tido concentração da ordem de 10⁶ organismos/mL, e do gênero *Micractinium* não ter sido detectável no início, e a partir de março ter aparecido, observa-se que o gênero e a quantidade de algas variaram muito pouco ao longo do período analisado (Figuras 5.9 e 5.10). O fitoplâncton presente na lagoa, se estudado mais profundamente, talvez possa apresentar a possibilidade de avaliar em qual fase de aclimação a lagoa se encontra. Para inclusão desse fator na detecção do estado do tratamento das lagoas, seria necessário um tempo maior de estudo que o analisado, com fins de obtenção de melhor resposta às questões levantadas e maior embasamento para as conclusões.

Tabela 5.9: Resultados da análise quantitativa do número de organismos/mL no período de fim de janeiro a início de março

Gênero	n° de organismos/mL									
	30/jan		02/fev		06/fev		13/fev		05/mar	
	L1	L2	L1	L2	L1	L2	L1	L2	L1	L2
Euglena	1,21E+06	2,90E+06	2,17E+06	2,29E+06	2,53E+06	2,05E+06	1,81E+06	1,45E+06	2,77E+06	2,41E+06
Coelastrum	bloom	bloom	1,33E+06	1,93E+06	8,44E+05	1,81E+06	ND	2,90E+06	2,05E+06	3,38E+06
Chlamydomonas	floração	floração	floração	floração	floração	floração	floração	floração	floração	floração
Micractinium	ND	ND	ND	ND	ND	ND	4,70E+06	ND	5,31E+06	2,77E+06

ND - não detectável

Tabela 5.10: Resultados da análise qualitativa da abundância relativa de organismos no período de fim de janeiro a início de março

		frequência de organismos/mL											
		30/jan		02/fev *		06/fev		13/fev		01/mar		05/mar	
		L1	L2	L1	L2	L1	L2	L1	L2	L1	L2	L1	L2
<i>Euglenófitas</i>	<i>Euglena</i>	raro	raro	raro	ND	raro	pouco	raro	raro	raro	raro	raro	raro
	<i>Phacus</i>	ND	raro	raro	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
	<i>Trachelomonas</i>	raro	raro	raro	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
<i>Cianófitas</i>	<i>Micractinium</i>	ND	ND	ND	ND	ND	ND	pouco	pouco	pouco	pouco	pouco	pouco
<i>Clorófitas</i>	<i>Chlamydomonas</i>	muito	muito	muito	ND	muito	muito	muito	muito	muito	muito	muito	muito
	<i>Coelastrum</i>	raro	raro	raro	ND	raro	ND	ND	pouco	pouco	muito	pouco	pouco
	<i>Closterium</i>	ND	ND	ND	ND	raro	muito	ND	ND	ND	ND	ND	ND
	<i>Pandorina</i>	raro	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND

* neste dia, foi observado, além dos espécimes descritos na tabela, larvas de Chironomide e Anelida

ND - não detectável

▪ Estratificação

A estratificação foi estudada por meio de medições da temperatura do líquido ao longo da profundidade em diversos horários ao longo do dia. A distribuição da temperatura num dia escolhido aleatoriamente é apresentada nas Figuras 5.34 e 5.35 para as lagoas 1 e 2.

Pelas Figuras 5.34 e 5.35, pode-se notar que o comportamento da temperatura ao longo da profundidade foi bastante semelhante para as duas lagoas. O perfil de temperatura foi praticamente uniforme durante o começo da manhã. No decorrer do dia, os primeiros 35 cm de profundidade apresentou aquecimento de até 8°C e o fundo apresentou temperatura maior que o ponto de medida superior a ele somente no período próximo do meio-dia. Somente com as medidas realizadas, não se pode inferir na ocorrência ou não da estratificação e mistura.

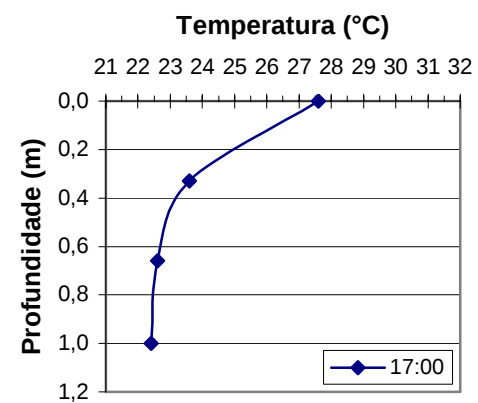
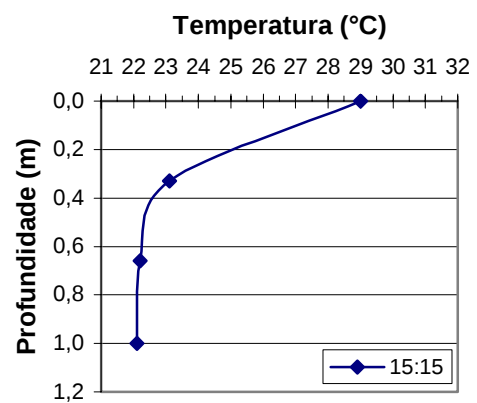
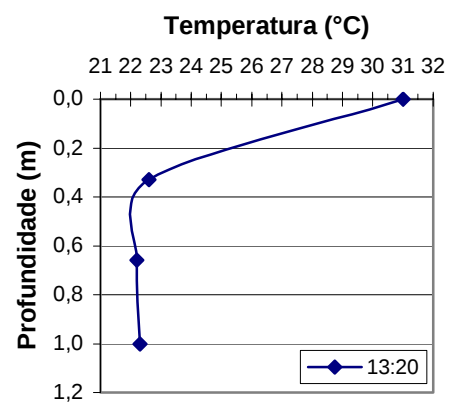
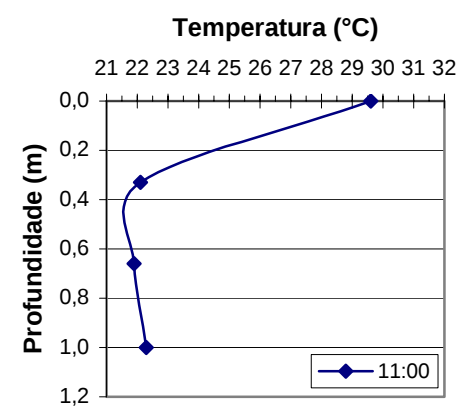
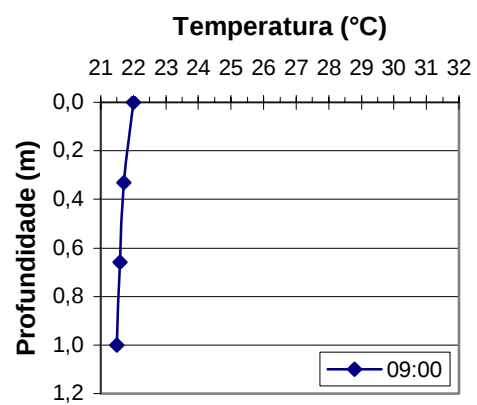
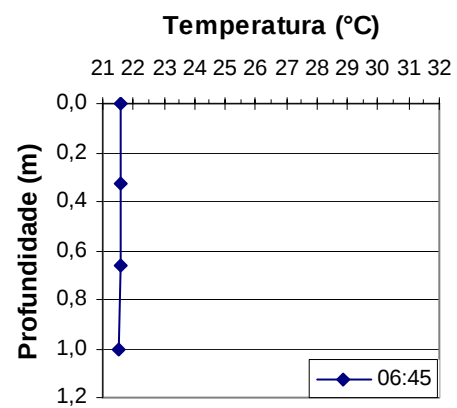


Figura 5.34: Temperatura do líquido ao longo da profundidade na lagoa 1, em 13/02/04

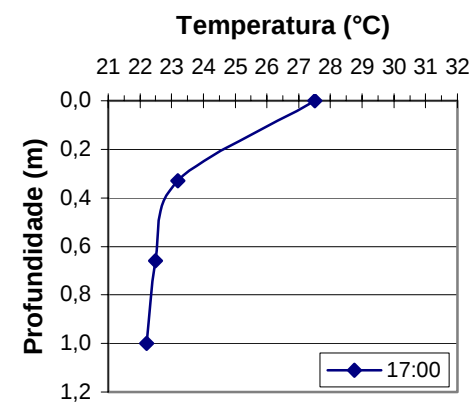
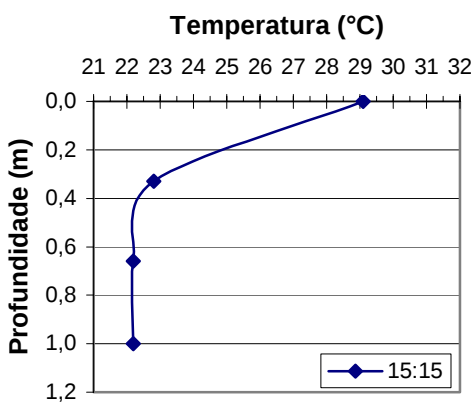
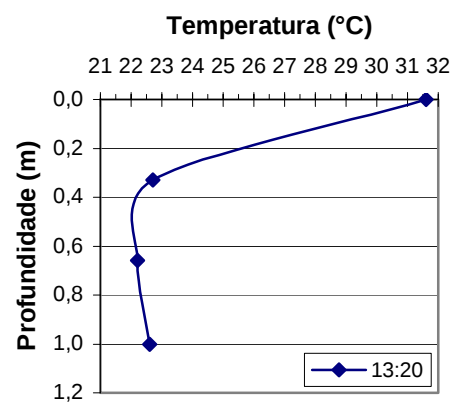
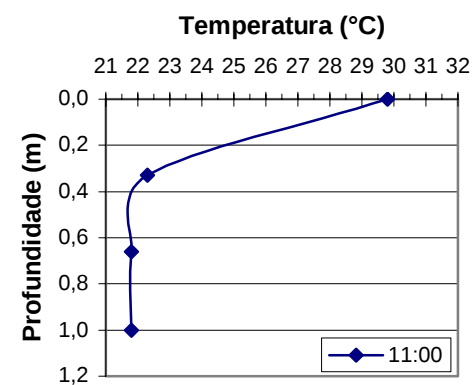
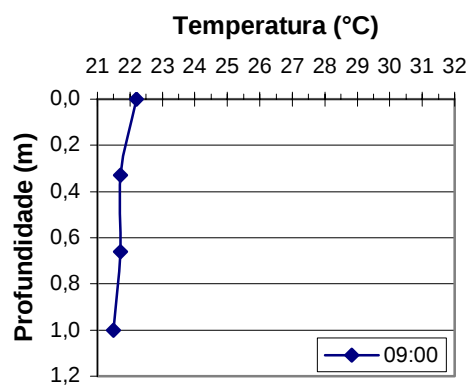
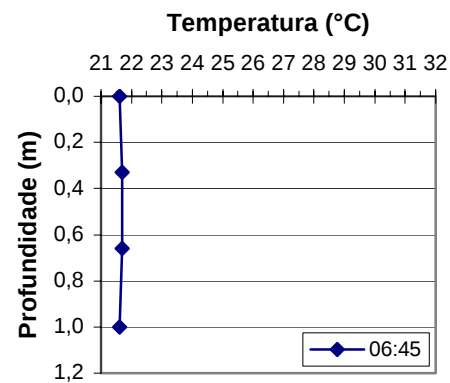


Figura 5.35: Temperatura do líquido ao longo da profundidade na lagoa 2, em 13/02/04

5.2.2 - Relações entre os dados obtidos

Nesse item, foram feitas diversas tentativas de formular relações entre os dados obtidos, tais como:

- Radiação solar x eficiência de remoção da taxa de aplicação superficial de DQO;
- Temperatura do líquido x eficiência de remoção da taxa de aplicação superficial de DQO;
- Temperatura do ar x eficiência de remoção da taxa de aplicação superficial de DQO;
- Radiação solar x clorofila-a;
- Radiação solar x sólidos suspensos;
- Radiação solar x pH;
- Altura do disco de secchi x radiação solar;
- Altura do disco de secchi x pH;
- Clorofila-a x pH;
- Eficiência de remoção de SS x clorofila-a;
- Clorofila-a x sólidos suspensos.

Não será comparado dado entre uma lagoa e outra e sim entre um parâmetro e outro. A busca de relações entre os dados foi feita por meio de gráficos apresentados nas Figuras 5.36 a 5.57.

▪ Radiação solar x eficiência de remoção da taxa de aplicação superficial de DQO

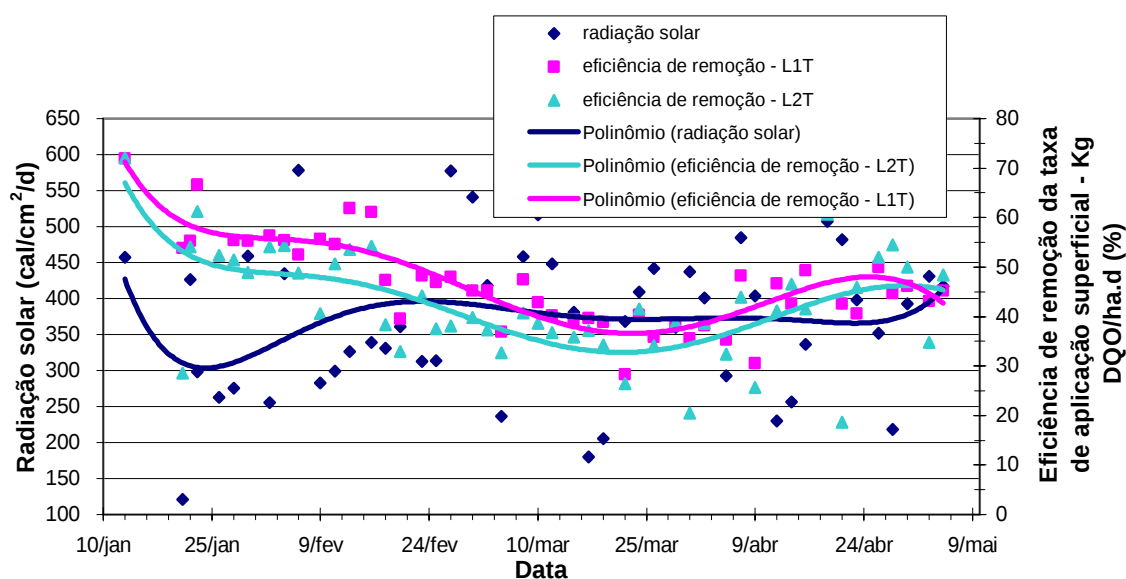


Figura 5.36: Comportamento da radiação solar e eficiência de remoção total das lagoas 1 e 2 em função do tempo

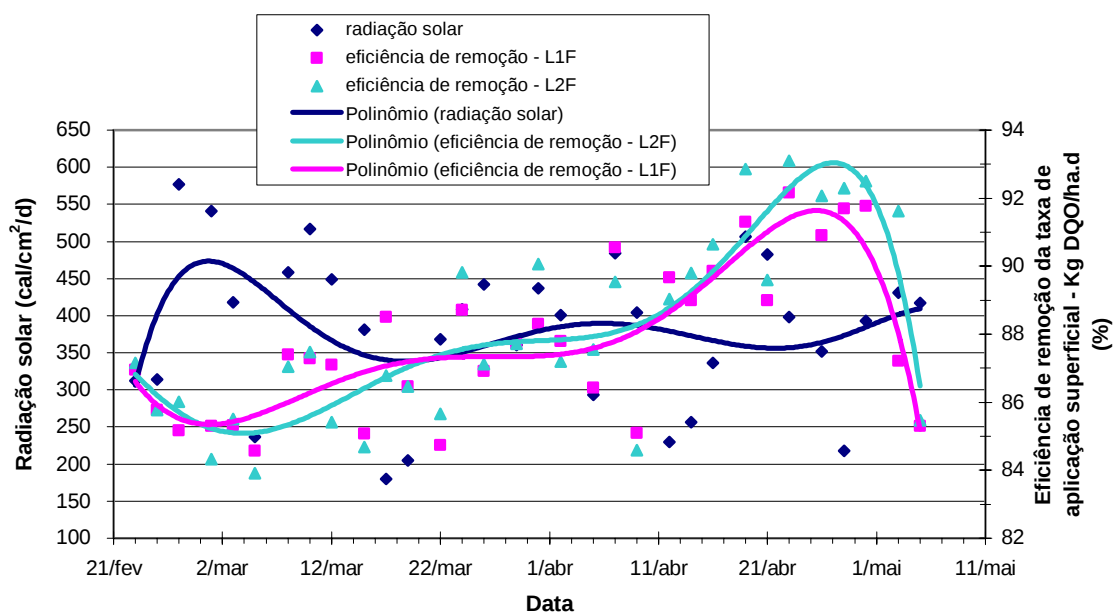


Figura 5.37: Comportamento da radiação solar e eficiência de remoção filtrada das lagoas 1 e 2 em função do tempo

Nas Figuras 5.36 e 5.37, observa-se que tanto para a análise da amostra total como da amostra filtrada, o comportamento da radiação solar e da eficiência de remoção da taxa de aplicação superficial não são relacionáveis aparentemente, como se esperaria de acordo com a literatura. Dados (ou parâmetros) relacionáveis são os que apresentam uma função de correlação (linear, exponencial, logarítmica, polinomial e de potência) entre si com R^2 satisfatório (acima de 0,60). Em alguns gráficos, como os da Figura 5.36 e 5.37 por exemplo, não é necessário a elaboração da função entre os dados, pois pelo comportamento das curvas, é possível verificar se há ou não a correlação procurada entre eles.

Na Figura 5.37, a eficiência de remoção da taxa de aplicação superficial filtrada está aumentando ao longo do período de operação das lagoas, demonstrando que as lagoas ainda estão ganhando eficiência. Pode-se comentar que, o gráfico proposto (Figura 5.37) talvez apresentasse maior correlação entre os dados, se o período de operação das lagoas fosse maior, visto que as lagoas analisadas são “novas” em termos de tempo de funcionamento total. Na Figura 5.36, a eficiência de remoção da taxa de aplicação superficial total diminui até o dia 25/03 aproximadamente, e em seguida, aumenta. Esse comportamento da eficiência de remoção da taxa de aplicação superficial total adverte para a instabilidade da análise de amostras totais em termos de DQO devido ao fato de que a concentração de algas é muito variável.

▪ **Temperatura do líquido x eficiência de remoção da taxa de aplicação superficial de DQO**

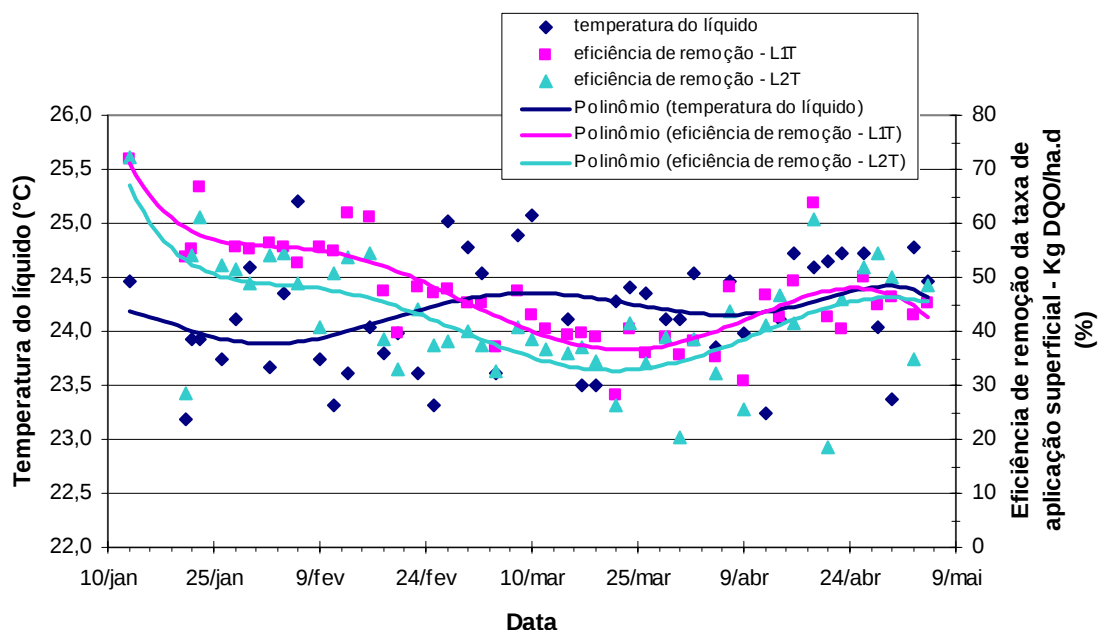


Figura 5.38: Comportamento da temperatura do líquido e eficiência de remoção total das lagoas 1 e 2 em função do tempo

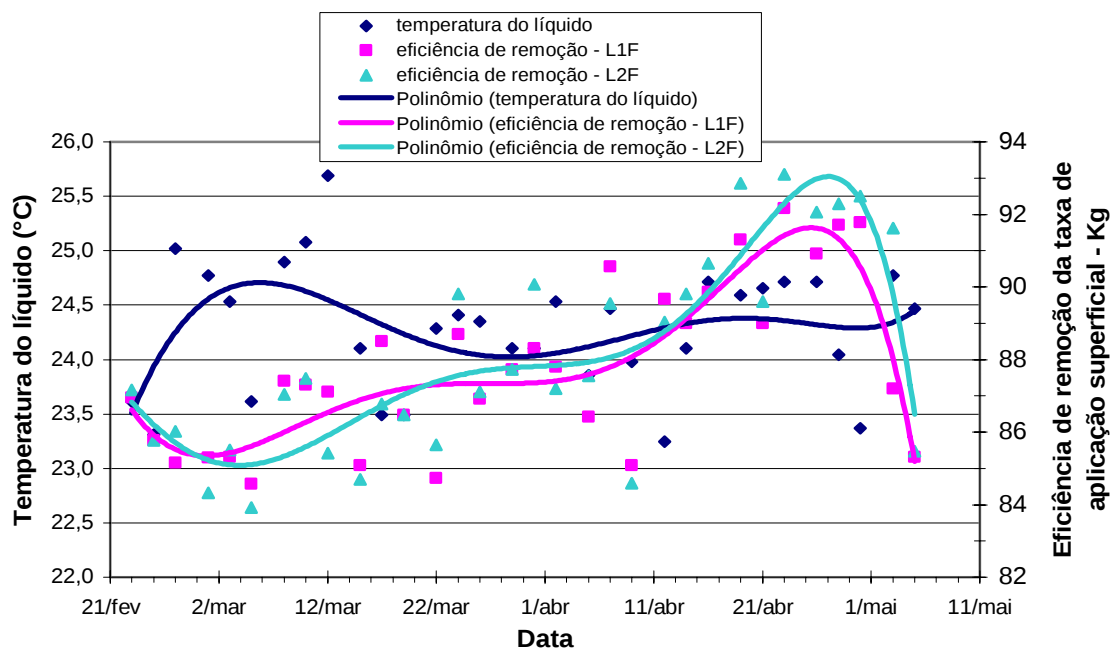


Figura 5.39: Comportamento da temperatura do líquido e eficiência de remoção filtrada das lagoas 1 e 2 em função do tempo

Nas Figuras 5.38 e 5.39, observou-se que o comportamento entre os dados (temperatura do líquido versus eficiência da taxa de aplicação superficial) não se relacionavam no presente trabalho.

▪ **Temperatura do ar x eficiência de remoção da taxa de aplicação superficial de DQO**

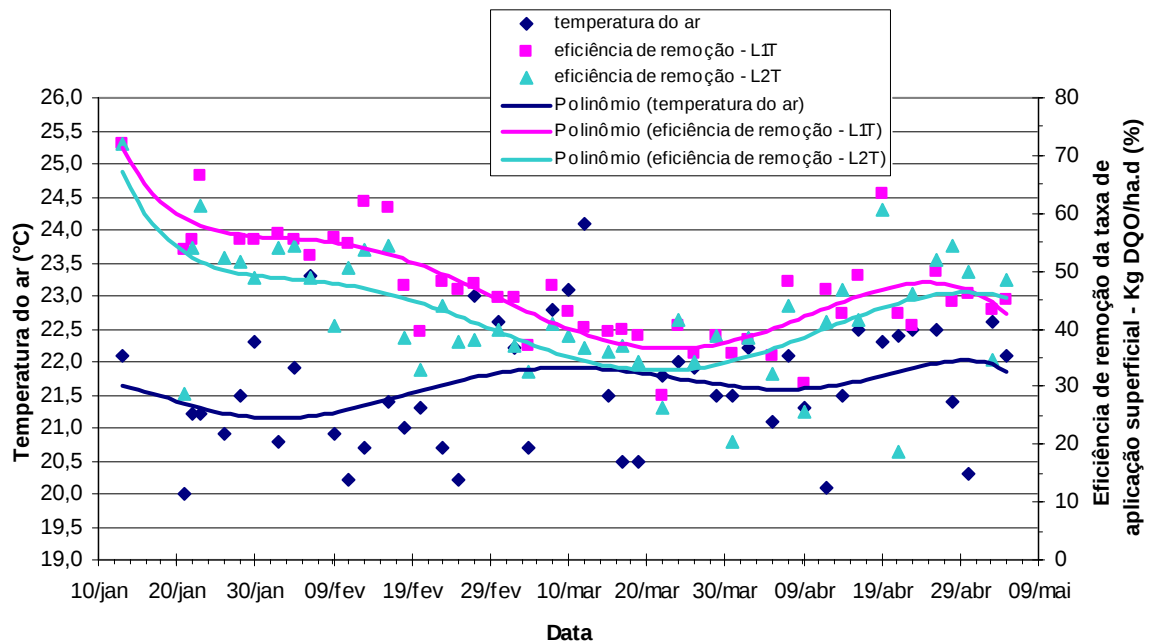


Figura 5.40: Comportamento da temperatura do ar e eficiência de remoção total das lagoas 1 e 2 em função do tempo

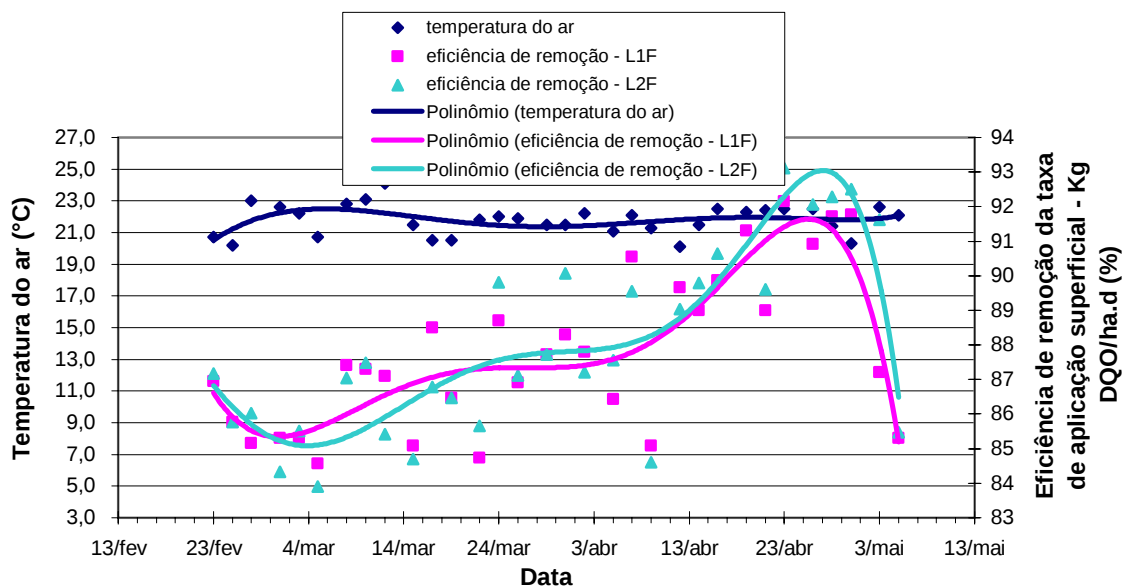


Figura 5.41: Comportamento da temperatura do ar e eficiência de remoção filtrada das lagoas 1 e 2 em função do tempo

Nas Figuras 5.40 e 5.41, observou-se que o comportamento entre os dados não se relacionaram no presente trabalho.

▪ Radiação solar x clorofila-a

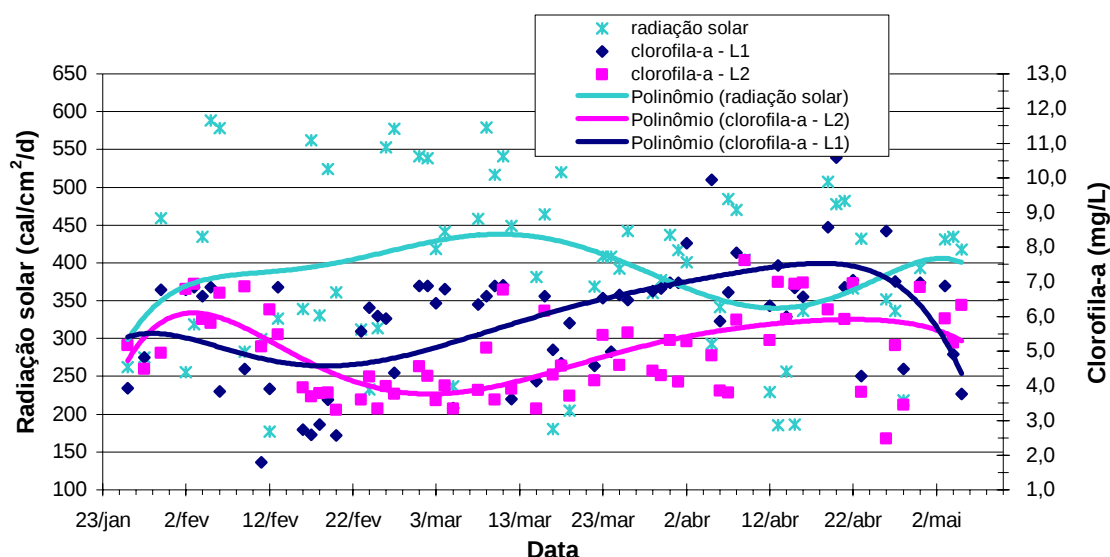


Figura 5.42: Comportamento da radiação solar e clorofila-a no interior das lagoas 1 e 2 em função do tempo

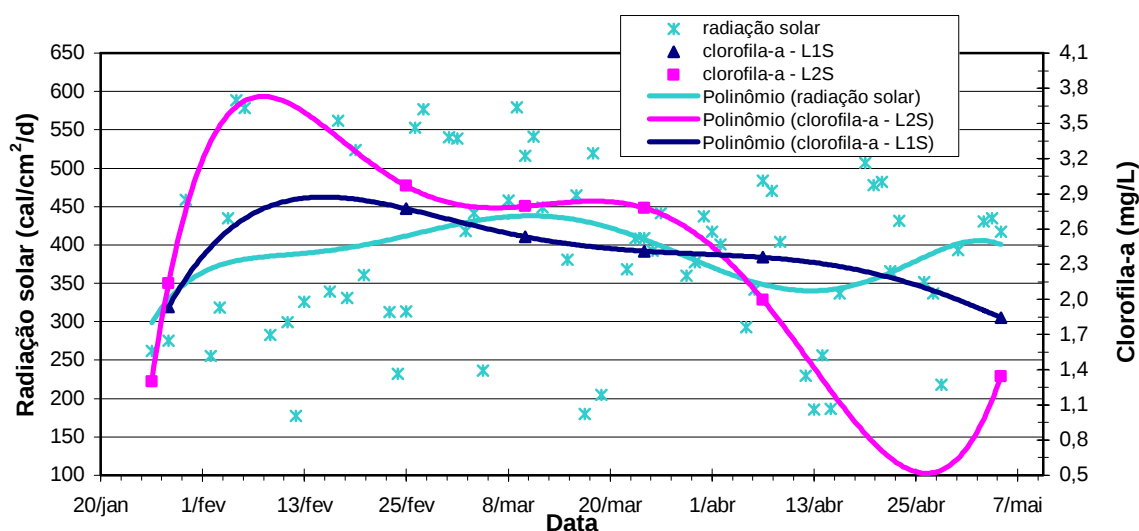


Figura 5.43: Comportamento da radiação solar e clorofila-a no efluente das lagoas 1 e 2 em função do tempo

O comportamento da radiação solar e clorofila-a (no interior da lagoa e no efluente), também não apresentaram correlação (Figuras 5.42 e 5.43). Com o objetivo de melhor explorar esses dados, foi feita outra forma de apresentação: retirando-se a data constante dos gráficos das Figuras 5.42 e 5.43, e correlacionando a radiação (eixo x) versus clorofila-a (eixo y). O resultado é exposto nas Figuras 5.44 (a e b) da página seguinte.

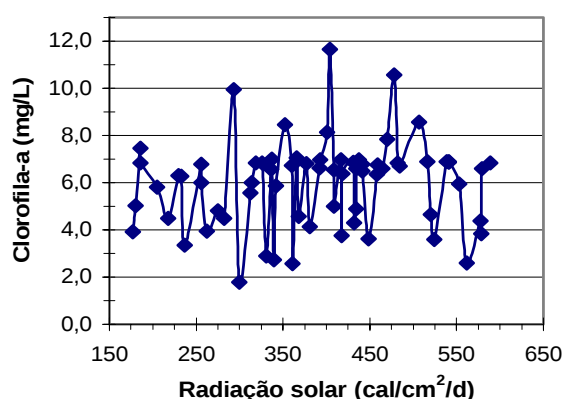


Figura 5.44a: Clorofila-a no interior da lagoa 1 x radiação solar

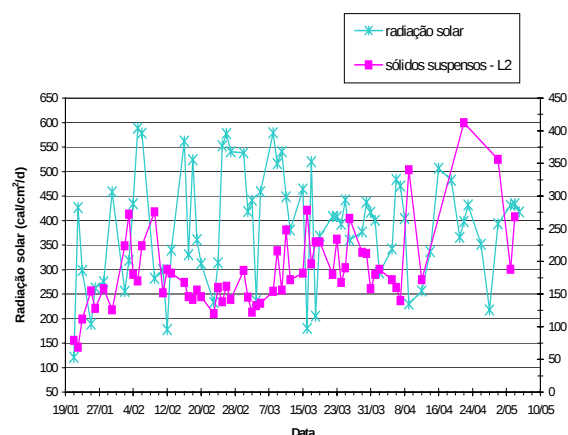


Figura 5.44b: Clorofila-a no interior da lagoa 2 x radiação solar

Como ilustrado nas Figuras 5.44 (a e b), a radiação solar e a clorofila-a se correlacionam por meio de uma curva de altos e baixos, onde uma linha de tendência (de quaisquer função) teria um valor de R^2 muito baixo. Tal fato, juntamente com os detectados nas correlações feitas anteriormente, demonstra a dificuldade de estabelecer relações entre os dados da forma proposta pelo presente trabalho.

▪ Radiação solar x sólidos suspensos

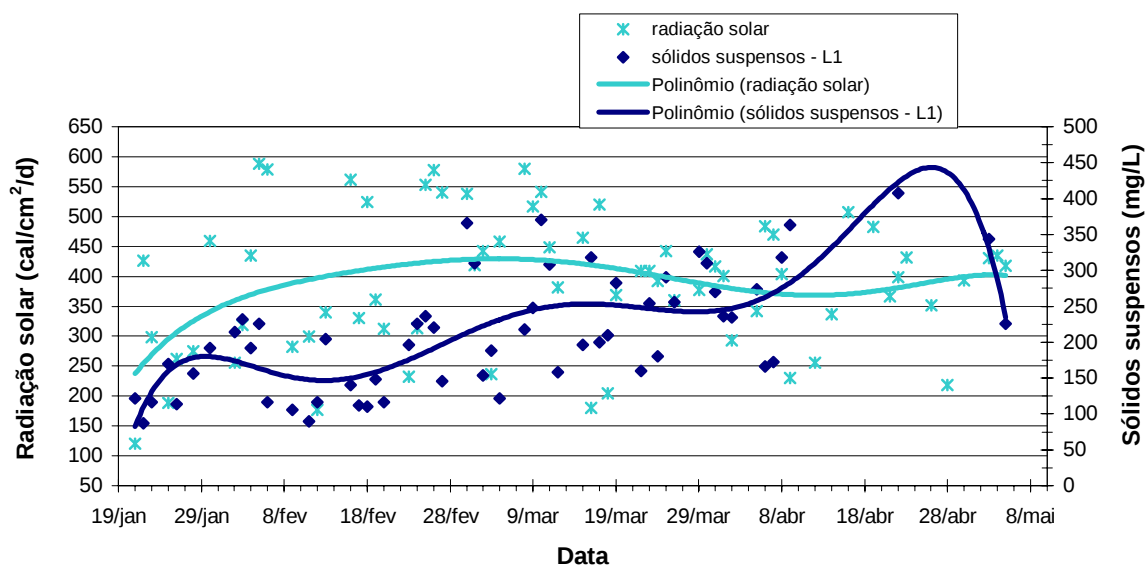


Figura 5.45: Comportamento da radiação solar e dos sólidos suspensos no interior da lagoa 1 em função do tempo

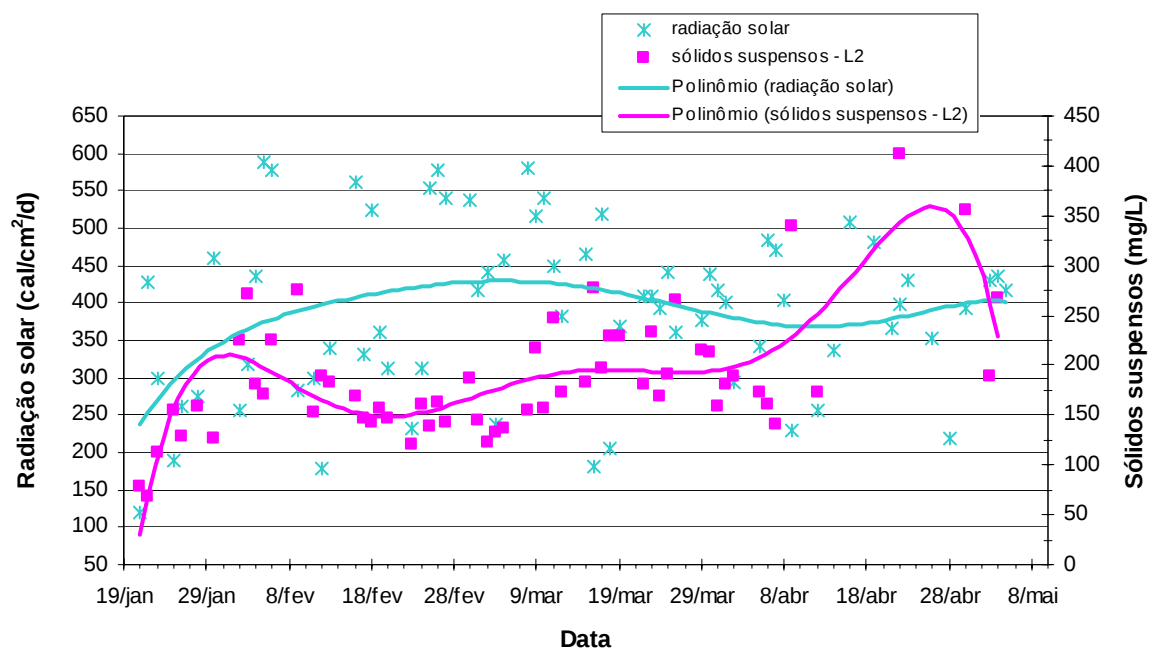


Figura 5.46: Comportamento da radiação solar e dos sólidos suspensos no interior da lagoa 2 em função do tempo

As Figuras 5.45 e 5.46 também ilustram um comportamento irregular, ou seja, sem uma relação entre os dados de forma explícita. Com o intuito de explorar os dados de radiação e sólidos suspensos com maior profundidade, foi elaborado um gráfico radiação solar versus sólidos suspensos da lagoa, ilustrado a seguir:

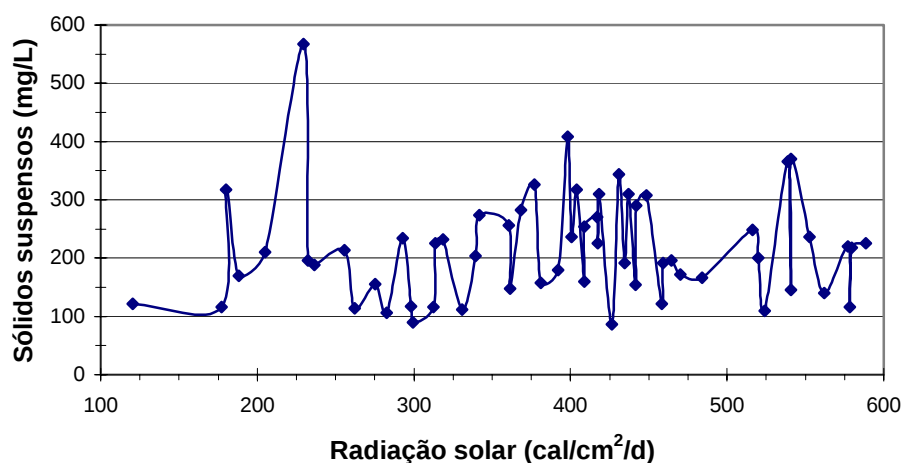


Figura 5.47: Sólidos suspensos no interior da lagoa 1 x radiação solar

Como se pode notar, também não há uma relação entre os dados de radiação solar e sólidos suspensos (Figura 5.47).

▪ Radiação solar x pH

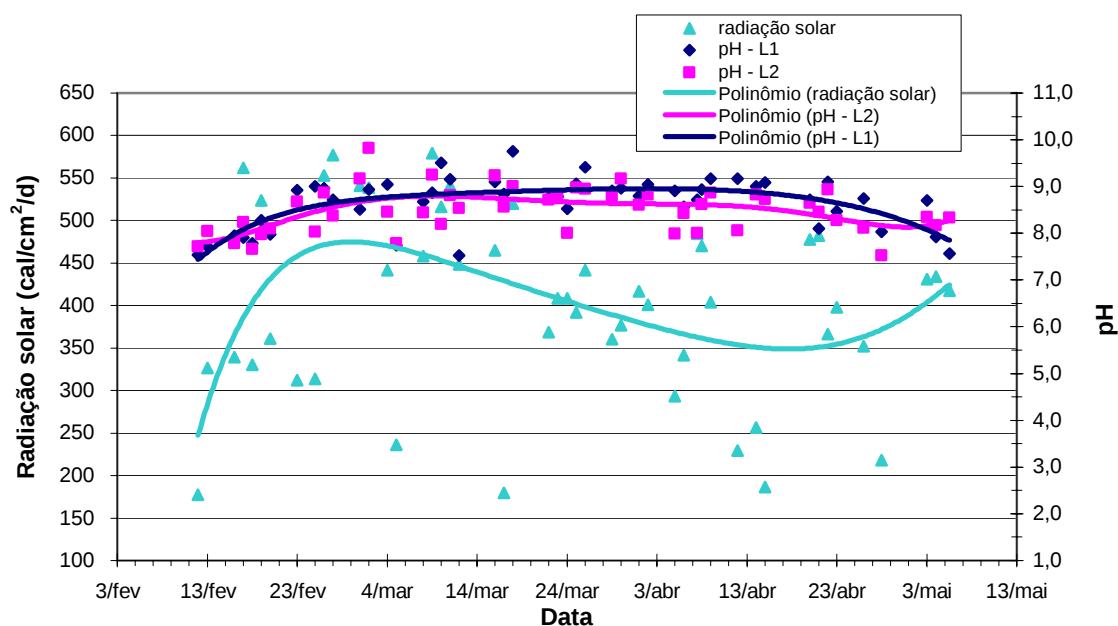


Figura 5.48: Comportamento da radiação solar e pH no interior das lagoas 1 e 2 em função do tempo

Na Figura 5.48 pode ser observado que o comportamento das curvas de pH e radiação solar ao longo do tempo de operação das lagoas não apresentaram correlação.

▪ Altura do disco de secchi x radiação solar

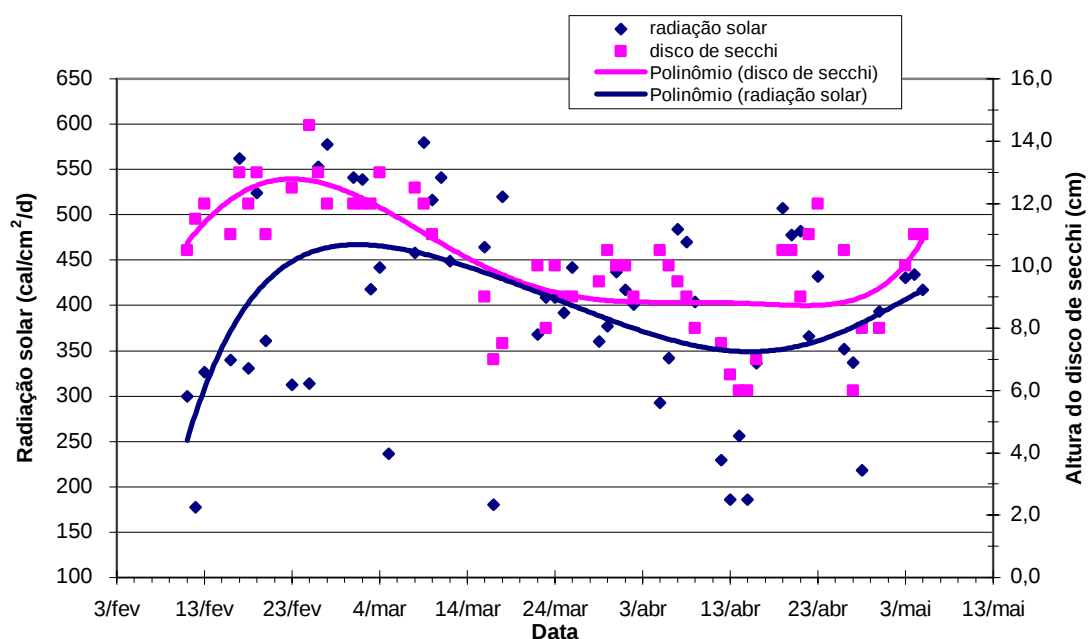


Figura 5.49: Comportamento da radiação solar e da altura do disco de secchi nas lagoas 1 e 2 em função do tempo

A profundidade do disco de secchi segue um comportamento semelhante ao da radiação solar somente a partir de março (Figura 5.49). Tentativas de obtenção de relação entre os outros dados continuam sendo feitas, e têm seguido a mesma tendência do apresentado até o momento. Os gráficos estão ilustrados nas Figuras 5.50 a 5.55.

▪ Altura do disco de secchi x pH

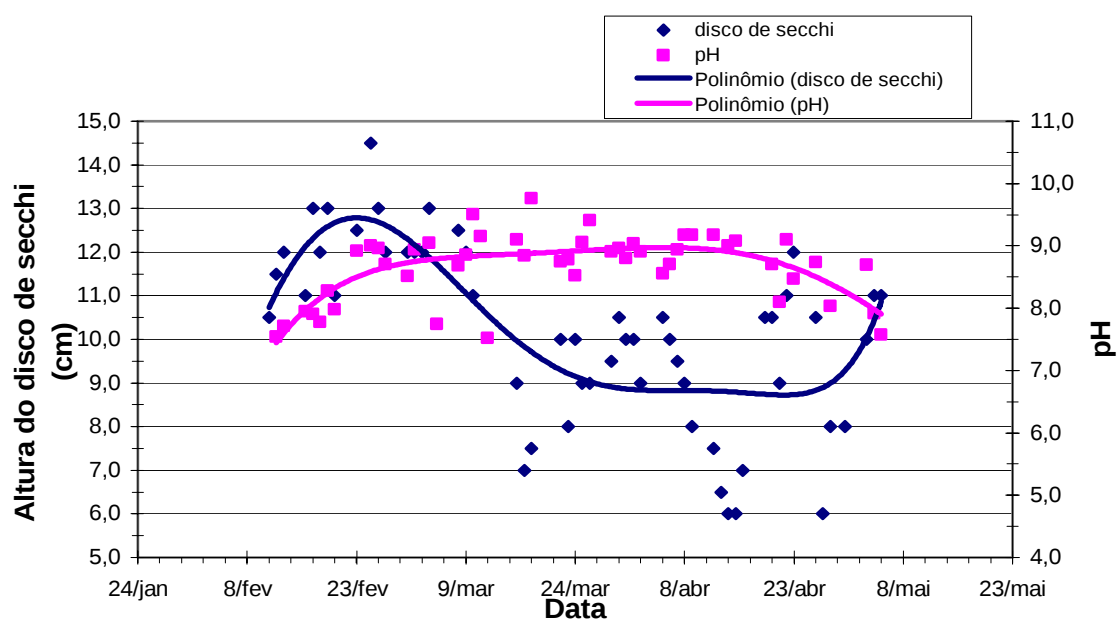


Figura 5.50: Comportamento da altura do disco de secchi e do pH na lagoa 1 em função do tempo

▪ Clorofila-a x pH

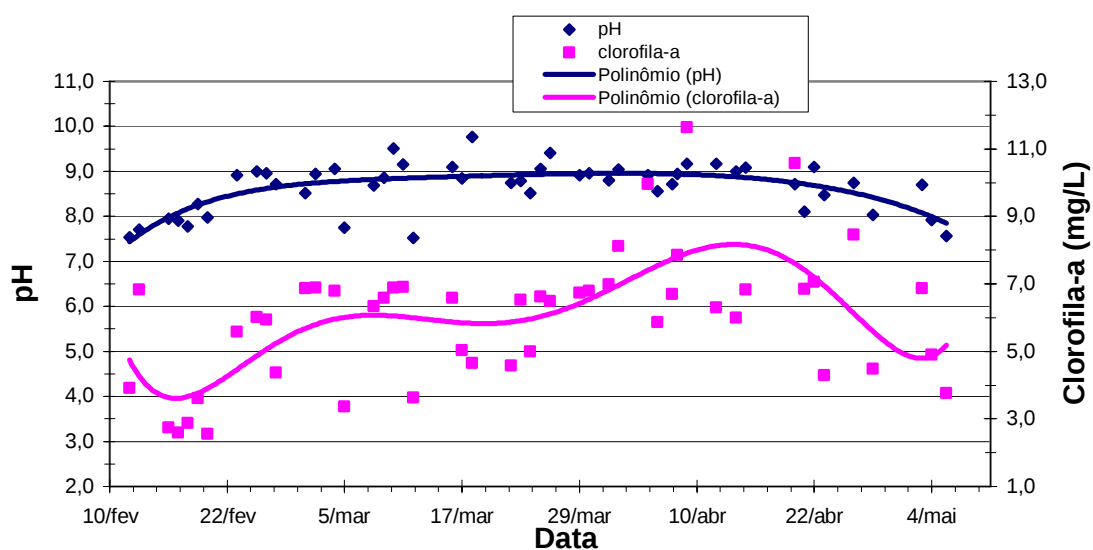


Figura 5.51: Comportamento do pH e da clorofila-a no interior da lagoa 1 em função do tempo

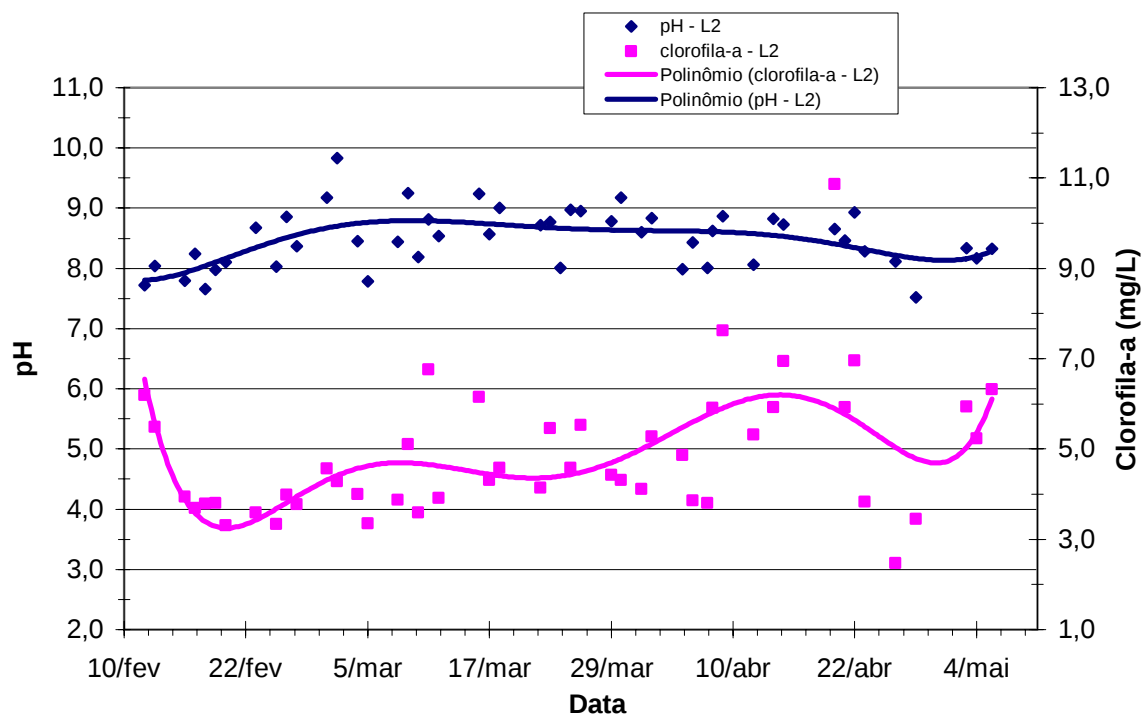


Figura 5.52: Comportamento do pH e da clorofila-a no interior da lagoa 2 em função do tempo

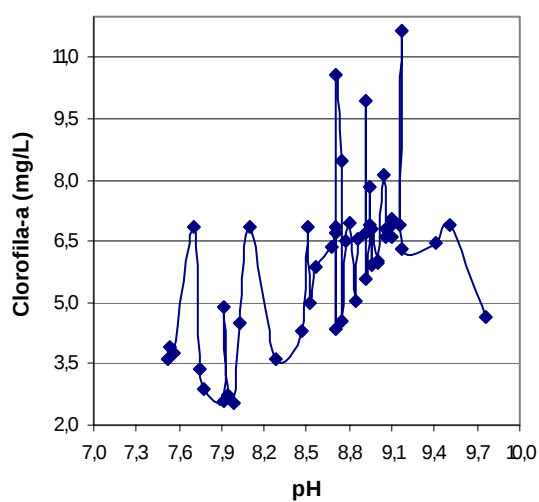


Figura 5.53a: Clorofila-a x pH no interior da lagoa 1

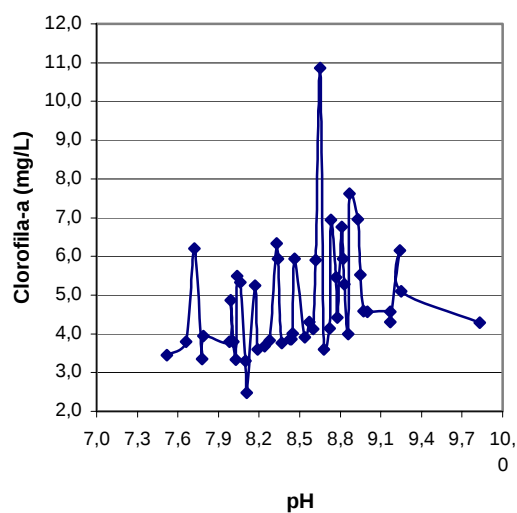


Figura 5.53b: Clorofila-a x pH no interior da lagoa 2

▪ **Eficiência de remoção de SS x clorofila-a**

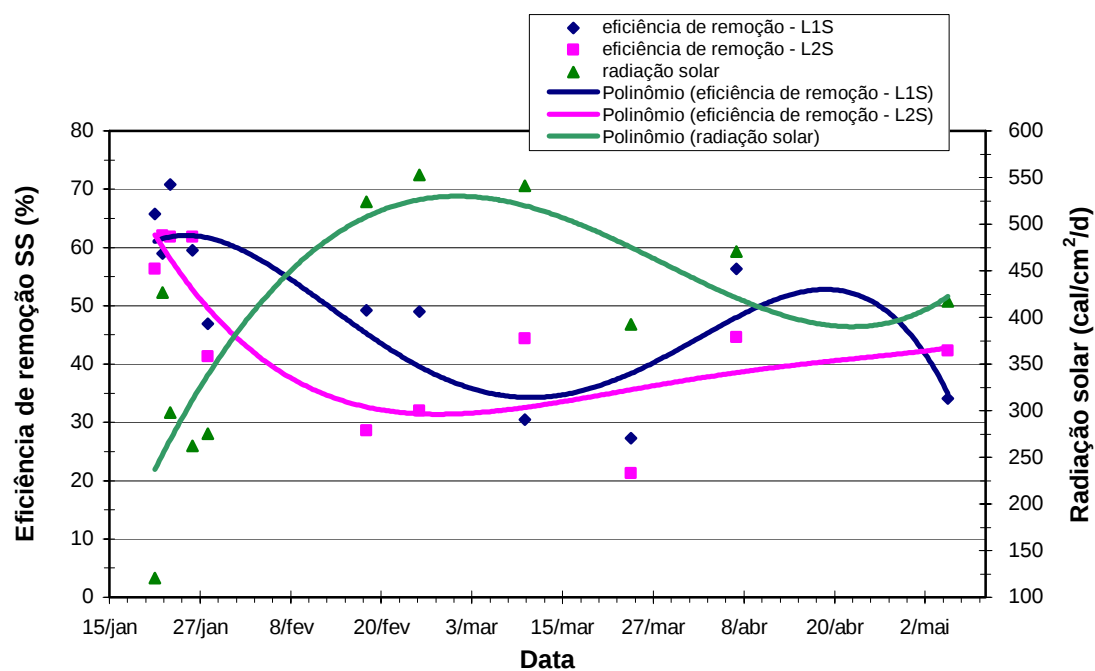


Figura 5.54: Comportamento da eficiência de remoção de sólidos suspensos e dos sólidos suspensos no interior da lagoa 2 em função do tempo

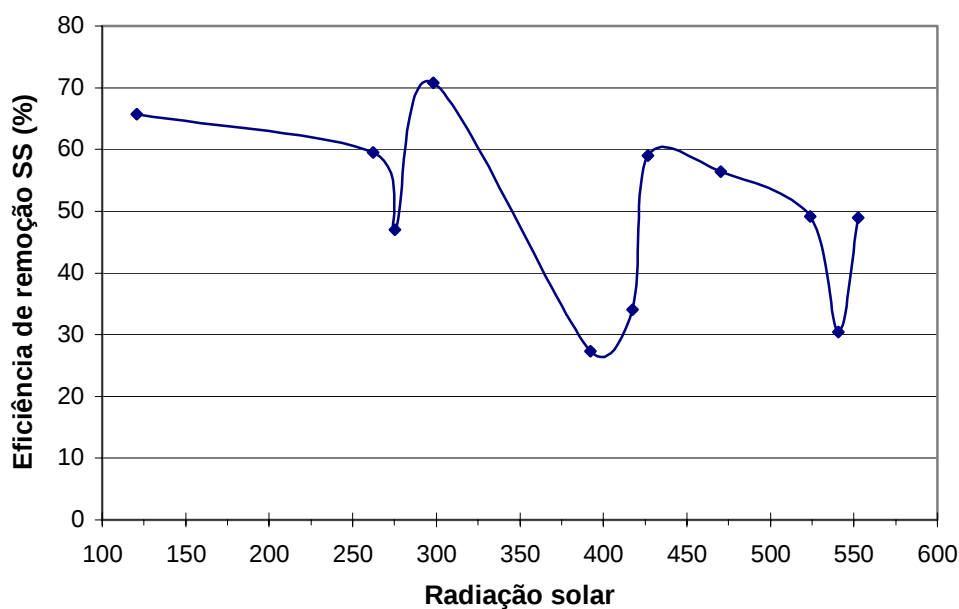


Figura 5.55: Eficiência de remoção de sólidos suspensos no efluente da lagoa 1 x radiação solar

▪ Clorofila-a x sólidos suspensos

A relação entre a clorofila-a e os sólidos suspensos já é uma relação conhecida na literatura, e a determinação dessa relação para o presente trabalho é feita a seguir:

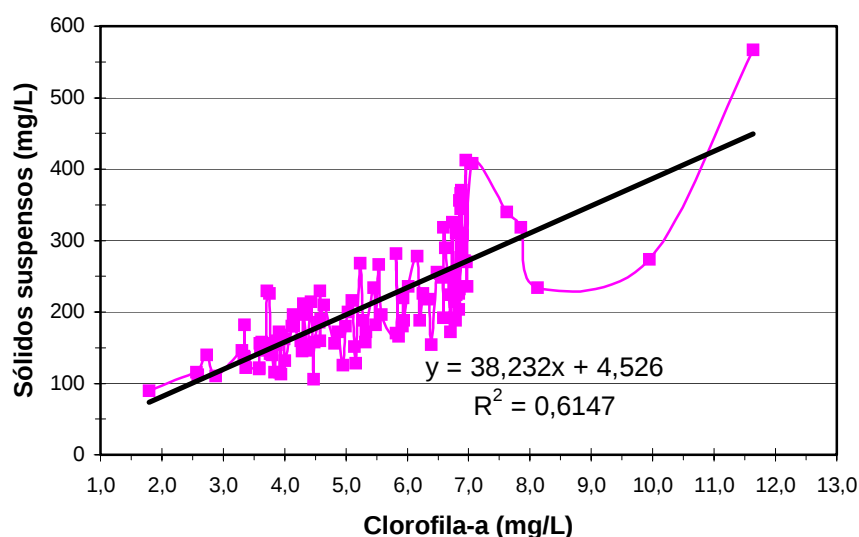


Figura 5.56: Relação entre a clorofila-a e sólidos suspensos no interior das lagoas, ponto P2 à profundidade do disco de secchi

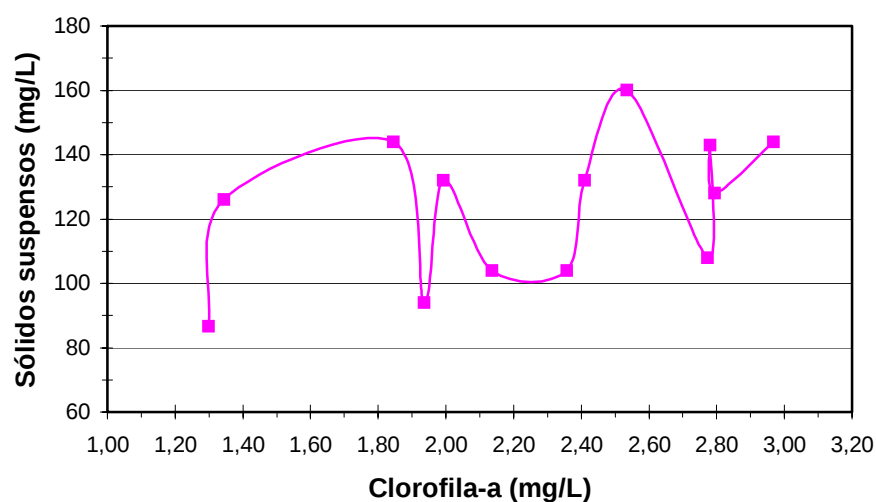


Figura 5.57: Relação entre a clorofila-a e sólidos suspensos do efluente das lagoas

As Figuras 5.56 e 5.57 ilustram que a relação entre a clorofila-a e os sólidos suspensos é válida para as amostras retiradas no interior das lagoas, mas não para as amostras do efluente.

Em todos os gráficos apresentados nesse item, com exceção da relação entre a clorofila-a e os sólidos suspensos, nenhuma relação foi encontrada entre os dados, sejam DBO, DQO, radiação, temperatura, SS, pH, profundidade do disco de secchi, etc. Em teoria, as relações entre os dados existem, por exemplo a relação entre a clorofila-a e a eficiência de remoção de DBO. Mas, como essas relações não foram conhecidas, conclui-se que a análise efetuada no presente trabalho não foi eficiente para tal, e que os dados não podem ser pensados da forma proposta, principalmente o de radiação solar. Nela, os dados utilizados foram diários, e talvez, relações condizentes podem ser encontradas com os dados mais trabalhados, por exemplo fazendo uma relação da eficiência de remoção de DBO versus radiação solar acumulada em um certo período, ou da clorofila-a versus a radiação acumulada, pH versus clorofila-a acumulada.

5.2.3 - Determinação de coeficiente de remoção da DBO (K)

Os valores de K_T reais foram calculados para cada modelo de mistura por meio das equações 3.8, 3.9 e 3.10, e em seguida o K_T foi convertido em K_{20} utilizando a equação 3.13 com $\theta = 1,085$. Os K_T e K_{20} são constantes na Tabela 5.11 juntamente com os valores de K_{20} preditivos propostos por Arceivala (1981) e Vidal (1983), *apud* Von Sperling (1996a) e uma faixa recomendada por Arceivala (1981).

Comparando-se os valores de K_T e K_{20} da Tabela 5.11, nota-se que os primeiros são superiores ao segundo em todos os casos, demonstrando que a eficiência real é maior que a prevista quando da utilização do K_{20} . Oliveira (1993), *apud* Mendes *et al.* (1995) relata que a existência de diferenças significantes nos valores de K e K_{20} é uma evidência de riscos (econômicos e para a eficiência do sistema) na utilização de K_{20} para o projeto de lagoas, fato a ser considerado quando a posição geográfica oferece condições climáticas favoráveis.

Segundo Von Sperling (1996a), ao se obter o valor de K tendo por base dados experimentais, deve-se sempre reportar a temperatura, vazão e as principais relações geométricas da lagoa (profundidade, comprimento e largura), além do modelo hidráulico assumido nos cálculos, pois o K real está associado a todos esses fatores. Saqqar e Pescod (1996) relatam que distintos K s têm sido encontrados para diferentes lagoas no mesmo mês e na mesma temperatura, confirmando assim as observações de Von Sperling (1996a), sendo portanto o K influenciado por diversos fatores e não somente a temperatura.

Tabela 5.11: Valores de K_T e K_{20} (d^{-1}) das lagoas piloto para as amostras total e filtrada do efluente e valores de K_{20} (d^{-1}) teóricos

	fluxo em pistão								mistura completa								fluxo disperso								
Temp. (°C)	L1F		L2F		L1T		L2T		L1F		L2F		L1T		L2T		L1F		L2F		L1T		L2T		
	K _T	K ₂₀	K _T	K ₂₀	K _T	K ₂₀	K _T	K ₂₀	K _T	K ₂₀	K _T	K ₂₀	K _T	K ₂₀	K _T	K ₂₀	K _T	K ₂₀	K _T	K ₂₀	K _T	K ₂₀	K _T	K ₂₀	
24,1	0,59	0,42	0,68	0,49	0,36	0,26	0,39	0,28	2,42	1,73	3,20	2,29	0,82	0,59	0,88	0,63	0,61	0,44	0,70	0,50	0,37	0,26	0,40	0,29	utilizando o tempo de de- tenção obti- do pelo méto- do de van Haandel e Le- ttinga (1994)
23,3	0,56	0,43	-	-	0,29	0,22	0,30	0,23	2,08	1,59	-	-	0,53	0,40	0,56	0,43	0,57	0,44	-	-	0,29	0,22	0,31	0,24	
23,3	0,60	0,46	0,68	0,52	0,38	0,29	0,39	0,30	2,48	1,89	3,19	2,44	0,89	0,68	0,91	0,69	0,62	0,47	0,70	0,53	0,39	0,30	0,40	0,31	
25,1	0,65	0,43	0,63	0,42	0,31	0,20	0,34	0,22	3,13	2,07	2,58	1,70	0,62	0,41	0,70	0,46	0,67	0,44	0,65	0,43	0,32	0,21	0,35	0,23	
24,4	0,64	0,45	0,68	0,47	0,36	0,25	0,36	0,25	2,92	2,04	3,20	2,23	0,82	0,57	0,76	0,53	0,66	0,46	0,70	0,49	0,37	0,26	0,36	0,25	
24,5	0,67	0,47	0,65	0,45	0,36	0,25	0,37	0,26	3,43	2,38	2,89	2,01	0,80	0,56	0,82	0,57	0,69	0,48	0,68	0,47	0,37	0,26	0,38	0,26	
24,5	0,63	0,44	0,63	0,44	0,35	0,24	0,38	0,26	2,82	1,96	2,66	1,85	0,76	0,53	0,84	0,58	0,65	0,45	0,66	0,46	0,36	0,25	0,38	0,26	
Médias		0,44		0,46		0,25		0,26		1,95		2,09		0,53		0,56		0,45		0,48		0,25		0,26	
24,1	0,54	0,39	0,60	0,43	0,33	0,24	0,34	0,24	2,20	1,57	2,83	2,03	0,75	0,54	0,78	0,56	0,55	0,39	0,62	0,44	0,34	0,24	0,35	0,25	utilizando o tempo de de- tenção obti- do pelo méto- do de <i>Le- venspiel modi- ficado</i> (1987)
23,3	0,51	0,39	-	-	0,26	0,20	0,27	0,21	1,87	1,43	-	-	0,49	0,37	0,50	0,38	0,52	0,40	-	-	0,26	0,20	0,27	0,21	
23,3	0,54	0,41	0,60	0,46	0,35	0,27	0,35	0,27	2,26	1,73	2,82	2,15	0,81	0,62	0,81	0,62	0,56	0,43	0,62	0,47	0,35	0,27	0,36	0,27	
25,1	0,59	0,39	0,55	0,36	0,28	0,18	0,30	0,20	2,85	1,88	2,28	1,51	0,56	0,37	0,62	0,41	0,61	0,40	0,57	0,38	0,29	0,19	0,31	0,20	
24,4	0,58	0,40	0,60	0,42	0,33	0,23	0,32	0,22	2,66	1,86	2,83	1,98	0,74	0,52	0,67	0,47	0,60	0,42	0,62	0,43	0,34	0,24	0,32	0,22	
24,5	0,61	0,42	0,58	0,40	0,33	0,23	0,33	0,23	3,12	2,17	2,56	1,78	0,73	0,51	0,72	0,50	0,63	0,44	0,60	0,42	0,33	0,23	0,33	0,23	
24,5	0,57	0,40	0,56	0,39	0,32	0,22	0,33	0,23	2,56	1,78	2,35	1,63	0,69	0,48	0,74	0,51	0,59	0,41	0,58	0,40	0,32	0,22	0,34	0,24	
Médias		0,40		0,41		0,22		0,23		1,77		1,84		0,49		0,49		0,41		0,42		0,23		0,23	
Métodos preditivos														K ₂₀											
Arceivala (1981) - eq. 3.11 (fluxo em pistão)														0,20											
Vidal (1983), <i>apud</i> Von Sperling (1996a) - eq. 3.12 (fluxo em pistão)														0,18											
Faixa usualmente adotada - Arceivala (1981) (mistura completa)														0,30 a 0,35											

5.2.4 - Aplicação dos resultados obtidos aos modelos existentes

▪ Comparação da DBO real com a obtida pelo método empírico mais utilizado

Os valores de DBO efluente reais (obtidos no experimento) e teóricos (obtidos pelo método empírico mais utilizado), são apresentados na Tabela 5.12. Os teóricos foram calculados utilizando as equações 3.8, 3.9 e 3.10, cujos resultados já foram vistos anteriormente (Tabela 4.2), sendo porém repetidos aqui com o objetivo de comparar com os valores reais.

Tabela 5.12: Valores de DBO efluente obtidos experimentalmente e pelo método empírico mais utilizado

DBO efluente (mg/L)		
Método empírico *	Fluxo em pistão (eq. 3.9)	30,4
	Mistura completa (eq.3.8)	101,6
	Fluxo disperso (eq. 3.10)	94,2
Média obtida no experimento	Filtrada	25,4
	Total	76,8

** a DBO efluente calculada pelo método empírico é da amostra filtrada*

Comparando a DBO efluente resultante do método empírico com o valor real da amostra filtrada, nota-se que são próximas para o modelo fluxo em pistão (modelo de maior eficiência), mostrando que as lagoas atingiram menor DBO que a prevista pelo método de cálculo empírico mais utilizado.

▪ Modelo de Silva e Mara (1979)

Foi utilizada a taxa de aplicação superficial afluyente do experimento para calcular a taxa de aplicação total efluente por meio da equação 3.14 proposta por Silva e Mara (1979). O valor da taxa total efluente calculada e os valores reais (de L1T e L2T) ao longo do tempo são ilustrados na figura a seguir:

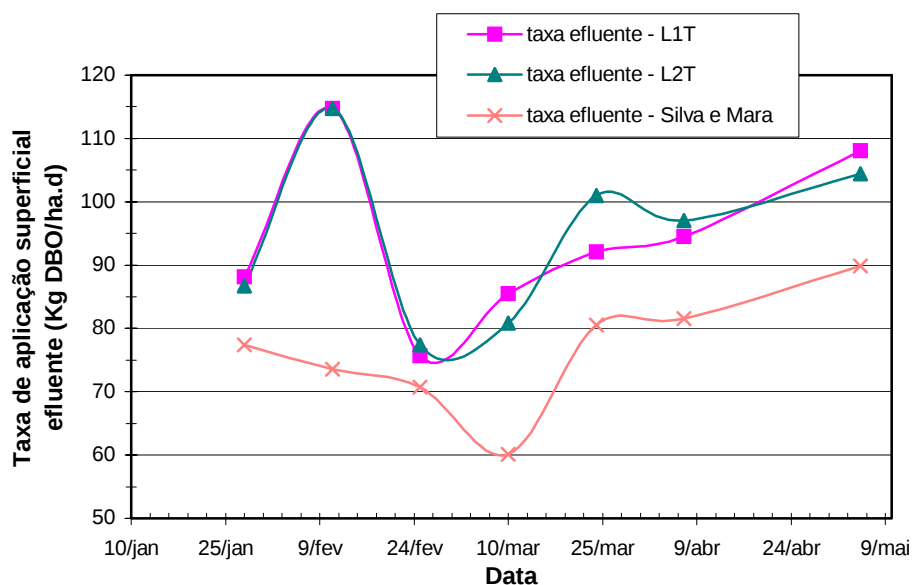


Figura 5.58: Taxa de aplicação superficial efluente total (Kg DBO/ha.d) da lagoa 1 e 2 e do modelo de Silva e Mara

As condições de formulação do modelo de Silva e Mara (1979) foram semelhantes a do experimento: o afluente é esgoto bruto e a região possui clima quente. Porém, percebe-se que a taxa efluente resultante de Silva e Mara (1979) é menor que as reais (Figura 5.58), e que esse modelo não se reflete as condições do experimento.

▪ Modelo de Teixeira Pinto *et al.* (1995)

Da mesma forma que o modelo de Silva e Mara (1979), foi utilizada a taxa de aplicação superficial afluente do experimento para calcular a taxa de aplicação efluente total por meio da equação 3.15 proposta por Teixeira Pinto *et al.* (1995). O valor da taxa efluente total calculada e os valores reais (de L1T e L2T) ao longo do tempo são ilustrados na figura abaixo:

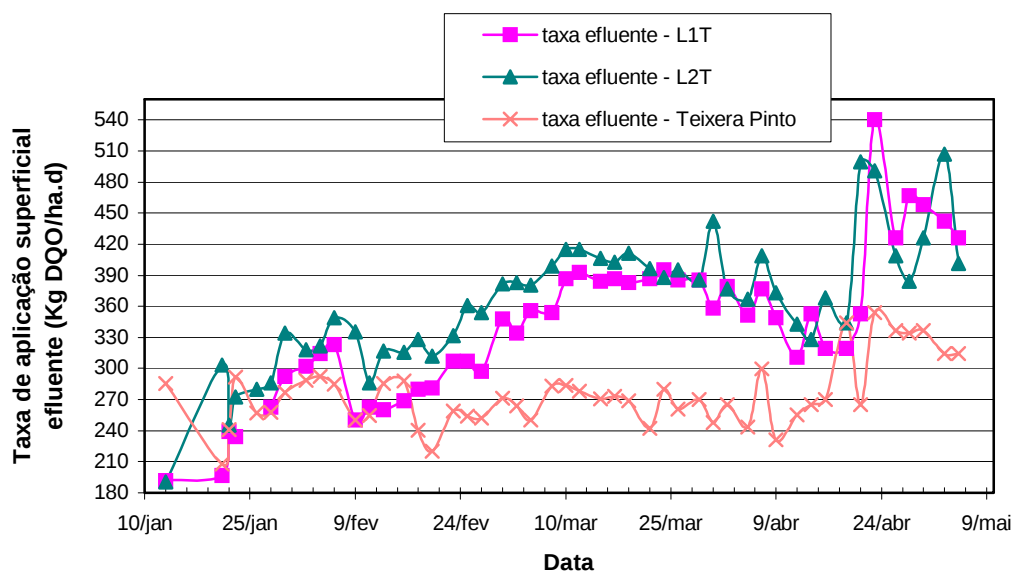


Figura 5.59: Taxa de aplicação superficial efluente total (Kg DQO/ha.d) da lagoa 1 e 2 e do modelo de Teixeira Pinto

Como mostra na figura acima, na maior parte do tempo da fase experimental, a taxa total efluente de Teixeira Pinto *et al.* (1995) é menor que as taxas totais reais, situação semelhante à aplicação do modelo de Silva e Mara (1979), embora os dois modelos possuam tipos de afluente diferentes. Na próxima figura, será ilustrada outra aplicação do modelo de Teixeira Pinto *et al.* (1995), que difere da anterior apenas no tipo da amostra, que será filtrada.

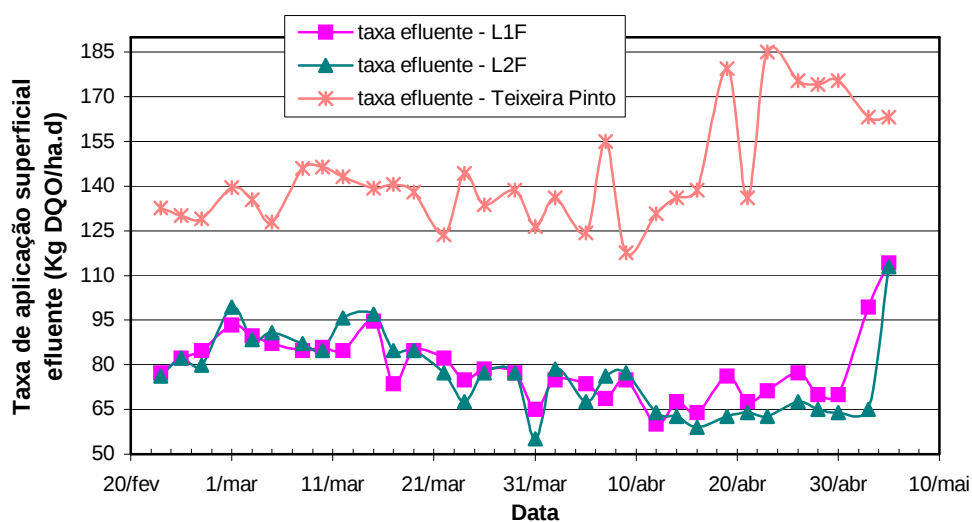


Figura 5.60: Taxa de aplicação superficial filtrada efluente (Kg DQO/ha.d) da lagoa 1 e 2 e do modelo de Teixeira Pinto

A taxa de aplicação superficial filtrada efluente do modelo (eq. 16) permaneceu maior que a real em todo o tempo experimental, provavelmente em grande parte devido à elevada concentração de algas formada no experimento piloto, que quando retiradas pela filtração, provocou grande decaimento no valor da taxa efluente, assim como também provocou o aumento no caso das taxas efluentes totais (Figuras 5.58 e 5.59).

Comparando-se a taxa efluente resultante da aplicação do método de Teixeira Pinto *et al.* (1995) para dados de entrada do experimento e a taxa efluente obtida no experimento, pode-se perceber que para amostras totais, a taxa efluente prevista pelo modelo é menor que a do experimento (Figura 5.59), e para amostras filtradas, o comportamento é contrário (Figura 5.60). Tal situação demonstra que lagoas reais apresentam maior retenção das algas que lagoas piloto.

▪ Modelo proposto pelo experimento

Assim como Silva e Mara (1979) e Teixeira Pinto *et al.* (1995) propuseram uma equação de primeiro grau para cálculo da taxa de remoção superficial dado uma taxa de aplicação superficial afluyente, também foram determinadas equações a partir dos dados obtidos no experimento. Os gráficos da taxa de aplicação superficial versus taxa de remoção superficial (em termos de DBO e DQO) com as linhas de tendência são ilustrados nas Figuras 5.61 e 5.62.

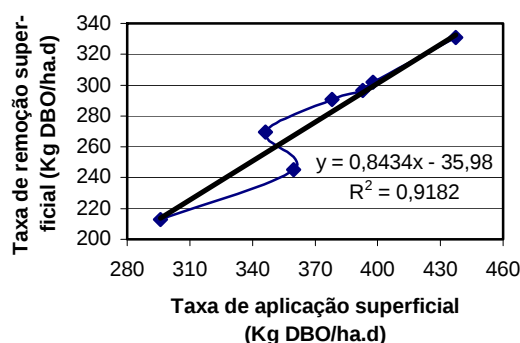


Figura 5.61a: Relação entre a taxa de remoção superficial e a aplicada para efluente total (Kg DBO/ha.d)

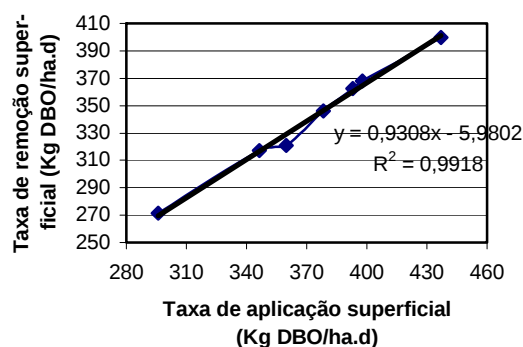


Figura 5.61b: Relação entre a taxa de remoção superficial e a aplicada para efluente filtrado (Kg DBO/ha.d)

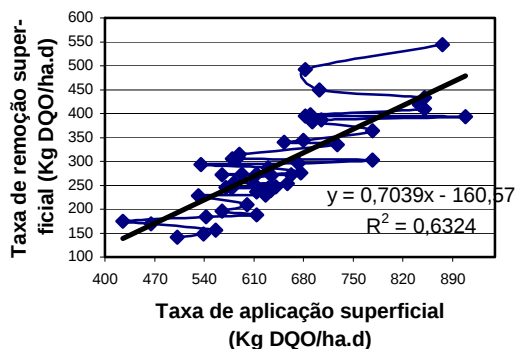


Figura 5.62a: Relação entre a taxa de remoção superficial e a aplicada para efluente total (Kg DQO/ha.d)

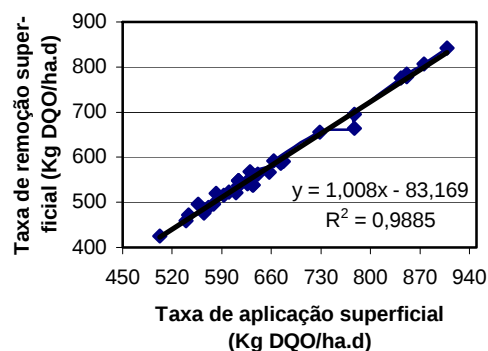


Figura 5.62b: Relação entre a taxa de remoção superficial e a aplicada para efluente filtrado (Kg DQO/ha.d)

Nota-se que as equações resultantes do experimento apresentaram ótimos valores de R^2 , com exceção do obtido na relação entre a taxa de remoção superficial e a aplicada para efluente total (Figura 5.62a). A Figura 5.62a reflete a dificuldade de manipular dados de DQO de amostras totais e também demonstra a necessidade de padronização de análise dos dados, pois alguns estudos são feitos utilizando a DQO total e outros a filtrada, enquanto sabe-se que as amostras filtradas são menos variáveis e mais fáceis de relacionar com outros fatores. Segundo Von Sperling (1996a), a comunidade europeia já estabeleceu que se deve reportar a DBO filtrada para caracterizar o efluente de lagoas facultativas.

As análises dos modelos de Silva e Mara (1979), Teixeira Pinto *et al.* (1995) e o proposto pelo experimento demonstram que a aplicabilidade é restrita às características particulares da lagoa, da região, etc. A utilização desses modelos em outras situações que não a original de formulação é uma análise de riscos.

5.2.5 - Observações visuais

No decorrer da fase experimental (período de operação das lagoas), as lagoas passaram por algumas mudanças de aspecto visual, entre elas a flutuação de lodo de diversas cores e consistência, aparecimento de uma “nata” semelhante à espuma e presença de larvas, ilustradas nas Figuras 5.63 a 5.74 por fotos ordenadas em seqüência da data e hora em que foram tiradas. Esses acontecimentos não tiveram sua causa detectada e foram intitulados por mudanças porque possuíam caráter instável:

- o lodo e as larvas apresentaram maior frequência de ocorrência no início do experimento, diminuindo ao longo desse e chegando no fim com baixa concentração;
 - a “nata” surgia e rapidamente, num intervalo de uma hora aproximadamente, desaparecia.
- Foi observado também que sua concentração era maior na lagoa 2;



Figura 5.63: Flutuação de lodo (19/02/04 – 18:03)



Figura 5.64: Formação de uma “nata” com aspecto de espuma em baixa concentração (20/02/04 – 10:21)



Figura 5.65: Formação de uma “nata” com aspecto de espuma em alta concentração (25/02/04 – 16:46)



Figura 5.66: Formação de uma “nata” com aspecto de espuma em um lado da lagoa (25/02/04 – 16:46)

A formação da “nata” em um lado da lagoa, como mostra na Figura 5.66, sugere que a causa tenha sido o efeito do vento. O lodo flotado sinaliza que as lagoas estão entrando em equilíbrio (Figuras 5.63, 5.67, 5.68, 5.69 e 5.71).



Figura 5.67: Flutuação de lodo verde claro de forma dispersa (26/02/04 – 09:23)



Figura 5.68: Flutuação de lodo verde claro e “nata” (26/02/04 – 09:24)



Figura 5.69: Flutuação de lodo verde claro (29/02/04 – 08:34)



Figura 5.70: Formação de uma “nata” com aspecto de escuma em alta concentração e forma diferente (29/02/04 – 18:35)



Figura 5.71: Lodo formando uma fina camada superficial concentrado próximo às bordas laterais (02/03/04 – 07:59)



Figura 5.72: Concentração de larvas próximas às bordas laterais (22/03/04 – 13:00)



Figura 5.73: Concentração de larvas junto à tubulação de saída do efluente (22/03/04 – 13:04)



Figura 5.74: Concentração de larvas próximas às bordas laterais (22/03/04 – 13:55)

A tabela a seguir descreve o que as figuras acima representam.

Tabela 5.13: Descrição da representação das figuras referentes às mudanças de aspecto visual

Figuras	Representação
5.63, 5.67, 5.68, 5.69 e 5.71	Diferentes formas e aspectos atingíveis de lodo durante o experimento
5.64, 5.65, 5.66, 5.68 e 5.70	Diferentes formas e aspectos atingíveis da “nata” durante o experimento
5.72, 5.73 e 5.74	Locais de concentração das larvas

É interessante ressaltar que as observações visuais relatadas nesse item não são comuns, pelo menos não nessa magnitude, em lagoas de escala real, sugerindo a possibilidade de lagoas piloto apresentarem fenômenos microbiológicos e/ou físicos diferentes. De qualquer forma, isso deve ser estudado com maior profundidade para comprovação da hipótese.

6 - CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

6.1 - CONCLUSÕES

A análise dos resultados obtidos no presente trabalho converge às conclusões a seguir, organizadas de acordo com cada objetivo correspondente (vide capítulo 2).

6.1.1 - Conclusões gerais

Ao analisar a aplicabilidade do uso de lagoas de estabilização em escala piloto para pesquisas sobre tratamento de esgotos domésticos (objetivo geral do presente trabalho) pode-se concluir que:

- Os principais gêneros de fitoplâncton encontrados em lagoas de escala real também o foram em escala piloto, demonstrando a boa representatividade dessa última em estudos de tratamento de esgotos por lagoas de estabilização;
- Em 5 meses de operação das lagoas, notou-se que a tratabilidade dos esgotos atingiu níveis bons a partir do primeiro mês, mostrando potencial para estudos em lagoas piloto;
- Embora as lagoas apresentem diferenças entre elas no sistema hidráulico de saída do efluente (o da lagoa 2 é ramificado e o da lagoa 1 é unitário), e a lagoa 1 ter apresentado maior concentração de clorofila-a (e conseqüentemente maior sólidos e pH) e a lagoa 2, maior temperatura, o ensaio pode ser considerado como em duplicata, visto que o desempenho e a hidrodinâmica das duas lagoas foram similares;
- As lagoas piloto apresentaram maior concentração de algas que lagoas reais. Também houve algumas mudanças no aspecto visual da lagoa, tais como flotação de lodo, presença de larvas e aparecimento de uma “nata” com aspecto de espuma, que não ocorrem, pelo menos na magnitude detectada, em lagoas reais;
- No início da fase de operação das lagoas, havia concentração de OD até 60 cm de profundidade, e ao longo do tempo a concentração foi decrescendo até que se detectou OD somente na camada superficial, no final de operação das lagoas. Tal

comportamento pode ser explicado pela carga orgânica afluyente elevada e pela não ocorrência da reaeração da superfície pelo vento;

- Levando-se em conta a presença das algas, as lagoas apresentaram características referentes às lagoas facultativas, embora tenha havido a ocorrência de anaerobiose no meio líquido detectada na presença de OD.

6.1.2 - Conclusões específicas

A seguir, são apresentadas as conclusões referentes aos objetivos específicos do presente trabalho.

Objetivo específico “1” (vide capítulo 2):

- A técnica de adição do traçador utilizada no ensaio, por homogeneização do sal em todo volume da lagoa, obteve bom desempenho com resultados condizentes. Entretanto, a mesma não dispõe de ferramentas para a análise da presença e concentração de zonas mortas e curtos-circuitos;
- O ensaio de traçador apresentou o número de dispersão (d) aproximadamente igual a zero, classificando o modelo de mistura das lagoas para próximo do fluxo pistão. Por outro lado, o tempo de detenção e o formato da curva de tempo de ensaio x concentração mostram que o modelo de mistura é o de mistura completa. O parâmetro que talvez seja o mais adequado para análise do modelo hidráulico de lagoas piloto seria o tempo de detenção e a curva de tempo de ensaio x concentração resultantes do ensaio. Deve-se ressaltar que a mistura de camadas, a qual ocorre com maior intensidade em lagoas de escala piloto, também influencia no modelo hidráulico da lagoa;
- O perfil de temperatura na fase de traçador (lagoas contendo água potável) se mostrou muito distinto do perfil na fase de tratamento de esgotos, mostrando que a estratificação só deve ser estudada com a presença de esgotos nas lagoas, ou seja, lagoa em tratamento. Nessa última fase, a estratificação ocorreu mais acentuadamente durante o dia, diminuindo sua magnitude à noite, período em que provavelmente tenha acontecido uma rápida mistura.

Objetivo específico “2” (vide capítulo 2):

- Apesar das lagoas terem trabalhado com elevada taxa de aplicação superficial (430 Kg.DBO/ha.d) e tempo de detenção pequeno (em torno de 4 dias), o desempenho foi satisfatório e similar ao obtido em lagoas de escala real. A eficiência de remoção de DBO filtrada, DQO filtrada, ST, STV, SS, fósforo e coliformes foi em torno de 90, 85, 30, 30, 40, 20 e 90% respectivamente. O valor médio da DBO filtrada e de SS efluente foi de 25 e 107 mg/L respectivamente, cumprindo portanto os padrões para efluentes de lagoas de estabilização estabelecidos pela Comunidade Européia (Von Sperling, 1996a): DBO filtrada ≤ 25 mg/L e SS ≤ 150 mg/L;
- Da forma proposta, utilizando dados diários, não foi obtida nenhuma relação entre parâmetros de qualidade e o clima. Há que se destacar também que a eficiência de remoção da taxa de aplicação superficial filtrada aumenta ao longo de todo período de operação das lagoas, demonstrando que as lagoas ainda estão ganhando eficiência, ou seja, “amadurecendo” e talvez isso seja mais um fator de impedimento na formação de relações;
- Os valores reais do coeficiente de remoção de DBO (K) se mostraram similares aos obtidos pelos métodos preditivos.

6.2 – RECOMENDAÇÕES

- Os modelos de relação entre a taxa de remoção superficial e a aplicada são de aplicação única para a lagoa no qual foram criados, não devendo ser extrapolados para outras, mesmo em regiões de climas similares;
- No Brasil, deveria existir uma padronização de uso de somente da amostra filtrada para análise do efluente de lagoas facultativas. A amostra filtrada apresenta menor dispersão, já que está livre de algas;
- Nos estudos em lagoas piloto, poderia ser simulado o efeito de vento, utilizando um equipamento que provocasse a mistura do meio líquido;
- Estudos devem ser desenvolvidos na tentativa de identificar o fitoplâncton e o estágio de maturação das lagoas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Agunwamba, J. C. et al. (1992). "Prediction of the dispersion number in waste stabilization ponds." *Water Research*, **26** (85).
- APHA, AWWA, e WPCF (1985). *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. 16ª edição, AWWA, Washington, EUA.
- Arceivala, S. J. (1981). *Wastewater treatment and disposal*. Marcel Dekker, New York, 892p.
- Athayde Júnior, G. B. A., S. T. S. e Silva, S. A. (2001). "Comportamento de lagoas facultativas secundárias no tratamento de águas residuárias domésticas." *Anais (em CD-ROM) do XXI Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental*, João Pessoa, PB, Brasil.
- Azevedo Netto, J. M. (1975). "Lagoas de estabilização: generalidades – desenvolvimento - histórico." In: Azevedo Netto, J. M. (coord.). *Lagoas de estabilização*. Companhia Estadual de Tecnologia de Saneamento Básico e de Controle de Poluição das Águas – CETESB, 2ª ed, São Paulo, Brasil, p 1-6.
- Branco, S. M. (1971). *Hidrobiologia aplicada à engenharia sanitária*. CETESB, São Paulo, 449p.
- Campell Scientific, Inc. *CR10 Operator's Manual*.
- Ceballos, B. S. O., Sousa, M. S. M. e König, A. (1997). "Influência da biomassa algal nas flutuações da qualidade da coluna de água e do efluente final no ciclo diário de uma lagoa facultativa primária." *Anais (em CD-ROM) do XIX Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental*, Foz do Iguaçu, RS, Brasil.
- Esteves, F. A. (1998). *Fundamentos de Limnologia. Interciência*. FINEP, Rio de Janeiro, 602p.
- Gloyna, E. F. (1973). *Estanques de estabilizacion de aguas residuales*. Organización Mundial de la Salud - OMS, Ginebra, Suíça, 192p.
- Gu, R. e Stefan, H. G. (1995). "Stratification dynamics in wastewater stabilization ponds." *Water Research*, **29** (8), p. 1909-1923.
- Hamakawa, P. J. (1999). "Elementos climáticos." *Revista Ação Ambiental*, ano II, nº 7, Editora UFV, p. 10-12.
- Hartley, W. R. e Weiss, C. M. (1970). "Ligh intensity and the vertical distribution of algae in tertiary oxidation ponds." *Water Research*, **4**, p.751-763.

- Hosetti, B. e Frost, S. "A review of the control of biological waste treatment in stabilization ponds." *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, **28** (2), p. 193-218.
- IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (2002). Censo Demográfico – 2000. Rio de Janeiro, RJ.
- Jordão, E. P. e Pessoa, C. A. (1995). *Tratamento de esgotos domésticos*. Associação Brasileira de Engenharia Sanitária - ABES, 3ª ed, Rio de Janeiro, Brasil, 720p.
- Kellner, E. e Pires, E. C. (1998). *Lagoas de estabilização: projeto e operação*. Associação Brasileira de Engenharia Sanitária - ABES, Rio de Janeiro, Brasil, 244p.
- Kellner, E. e Pires, E. C. (2002). "The influence of thermal stratification on the hydraulic behavior of waste stabilization ponds." *Water Science and Technology*, **45** (1), p. 41-48.
- König, A., Sousa, M. S. M., Costa, N. A. F., Freitas, V. L. B. e Ceballos, B. S. O. (1999). "Variação nictemeral da qualidade do efluente final de uma lagoa facultativa secundária e a influência das algas." *Anais (em CD-ROM) do XX Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental*, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- Larcher, W. (2000). *Ecofisiologia vegetal*. São Carlos, RiMa, tradução Carlos Henrique B. A. Prado, 531p.
- Mara, D. (1976). *Sewage treatment in hot climates*. English Language Book Society – ELBS / John Wiley & Sons.
- Mara, D. D. (1996). "Waste stabilization ponds: effluent quality requirements and implications for process design." *Water Science and Technology*, **33** (7), p. 23-31.
- Marecos do Monte, M. H. F. and Mara, D. D. (1987). "The hydraulic performance of waste stabilization ponds in Portugal." *Water Science and Technology*, **19** (12), p. 219-227.
- Mendes, B. S., do Nascimento, M. J., Pereira, M. I., Bailey, G., Lapa, N., Morais, J. e Oliveira, J. S. (1995). "Efficiency of removal in stabilization ponds II. Statistical analysis of K values." *Water Science and Technology*, **31** (12), p. 231-238.
- Metcalf & Eddy, Inc.(1991). *Wastewater Engineering – Treatment, Disposal and Reuse*. 3ª edição, McGraw-Hill, 1334p.
- Middlebrooks, E. J. (1987). "Design equations for BOD removal in facultative ponds." *Water Science and Technology*, **19** (12), p. 187-193.
- Moreno, M. D. (1990). "A tracer study of the hydraulics of facultative stabilization ponds." *Water Research*, **24** (8), p. 1025-1030.

- Naméche, T. e Vassel, J. L. (1996). "New method for studying the hydraulic behaviour of tanks in series – application to aerated lagoons and waste stabilization ponds." *Water Science and Technology*, **33** (8), p. 105-124.
- Naméche, T. e Vassel, J. L. (1998). "Hydrodynamic studies and modelization for aerated lagoons and waste stabilization ponds." *Water Research*, **32** (10), p. 3039-3045.
- Oliveira, L. F. F. (1999). "Eficiências de remoção de carga orgânica por lagoas de estabilização." *Anais (em CD-ROM) do XX Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental*, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- Pearson, H. W., Mara, D. D., Mills, S. W. e Smallman, D. J. (1987). "Factors determining algal populations in waste stabilization ponds and the influence of algae on pond performance." *Water Science and Technology*, **19** (12), p. 131-140.
- Pearson, H. W., Mara, D. D. e Arridge, H. A. (1995). "The influence of pond geometry and configuration on facultative and maturation waste stabilisation pond performance and efficiency." *Water Science and Technology*, **31** (12), p. 129-139.
- Polprasert, C. e Bhattarai, K. K. (1985). "Dispersion Model for Waste Stabilization Ponds." *Journal of the Environmental Engineering Division, ASCE*, **111**(1), p. 45-59.
- Queiroz, T. R. (2001). *Remoção de sólidos suspensos de efluentes de lagoas de estabilização por meio de processos naturais*. Dissertação de Mestrado, Universidade de Brasília, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Brasília, DF, 229p.
- Saqqar, M. M. e Pescod, M. B. (1996). "Performance evaluation of anoxic and facultative wastewater stabilization ponds." *Water Science and Technology*, **33** (7), p. 141-145.
- Sampaio, E. S. (1998). *Fisiologia vegetal: teoria e experimentos*. Editora UEPG - Universidade Estadual de Ponta Grossa, Ponta Grossa, 179p.
- Shilton, A. e Harrison, J. *Guidelines for the hydraulic design of waste stabilisation ponds*. Institute of Technology and Engineering, Massey University, Private Bag 11-222, Palmerston North, New Zealand, 64p.
- Silva, S. A. e Mara, D. D. (1979). *Tratamentos biológicos de águas residuárias: lagoas de estabilização*. Rio de Janeiro, ABES.
- Teixeira Pinto, M. A., Neder, K. D., Ludovice, M. L. (1995). "Assessing oxidation ponds design criteria in a tropical town with low water availability." In: 3rd. International Association on Water Quality – IAWQ, International Specialist Conference and Workshop: Waste Stabilization Ponds, Technology and Applications, João Pessoa, 1995. Anais. João Pessoa, Universidade Federal da Paraíba. p. 6-13.

- Torres, J. J., Soler, A., Sáez, J., Leal, L. M. e Aguilar, M. I. (1999). "Study of the internal hydrodynamics in three facultative ponds of two municipal WSPS in Spain." *Water Research*, **33** (5), p. 1133-1140.
- Tsutiya, M. T. (2001). "Uso agrícola dos efluentes das lagoas de estabilização do estado de São Paulo." *Anais (em CD-ROM) do XXI Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental*, João Pessoa, PB, Brasil.
- Van Haandel, A. C. e Lettinga, G. (1994). *Tratamento anaeróbio de esgotos. Um manual para regiões de clima quente*. Ed. do autor, p. III-24 – III-28.
- Von Sperling, M. (1996b). *Princípios do tratamento biológico de águas residuárias. Volume 2 – Princípios básicos do tratamento de esgotos*. Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental – DESA, UFMG, Belo Horizonte, Brasil, 211p.
- Von Sperling, M. (1996a). *Princípios do tratamento biológico de águas residuárias. Volume 3 - Lagoas de Estabilização*. Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental – DESA, UFMG, Belo Horizonte, Brasil, 140p.
- Yáñez, F. (1993). *Lagunas de estabilizacion. Teoria, diseño, evaluacion y mantenimiento*. Empresa Pública de Teléfonos, Agua Potable y Alcantarillado de Cuenca - ETAPA, Cuenca, Equador, 421p.
- Yáñez, F. (2000). "Aspectos destacados en la tecnología de lagunas de estabilizacion." *Anais (em CD-ROM) do Seminário Internacional de Tratamiento de Aguas Servidas*. 30 nov. a 2 dez., Porto Alegre, RS, Brasil.
- Wetzel, R. G. e Lukens, G. E. (1991). *Limnological analyses*. Second edition, Ed. Springer, 391p.
- Wood, M. G., Howes, T., Keller, J. e Johns, M. R. (1998). "Two dimensional computacional fluid dynamic models for waste stabilisation ponds." *Water Research*, **32** (3), p. 958-963.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS EM APUD

- Abdel-Razik, M. H. (1991). *Dynamic modelling of facultative waste stabilization ponds*. PhD Thesis, Imperial College.
- Caldwell, D. H. (1946). *Sewage oxidation ponds: performance, operation and design*. *Sewage Wks J.*, 18, 433p.
- König, A. (1984). *Ecophysiological studies on some algae and bacteria of waste stabilization ponds*. Tese de Doutorado. Universidade de Liverpool, Inglaterra, 175p.
- Levenspiel, O. (1962). *Chemical Reaction Engineering: An introduction to the design of chemical reactors*. John Wiley, New York, 501p.
- Oliveira, J. F. S. (1993). *Lagunagem em Portugal. Conceitos básicos e aplicações práticas*. Lisboa. IPAMB.
- Oliveira, F. F. (1996). *Remoção de algas e nitrificação terciária de efluente de lagoas de estabilização facultativas através de biofiltros aerados de leito submerso*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Ambiental, Centro Tecnológico, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, ES, Brasil, 138p.
- Van Heuvelen, W. e Svore, J. H. (1954). *Sewage lagoons in North Dakota*. *Sewage ind Wastes*, **26**, 771.
- Vidal, W. L. (1983). *Aperfeiçoamentos hidráulicos no projeto de lagoas de estabilização, visando redução da área de tratamento: uma aplicação prática*. In: *Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental*, Camboriú, 20 a 25 novembro, ABES.

APÊNDICES

APÊNDICE A - TEMPERATURA DO LÍQUIDO E CONDUTIVIDADE AO LONGO DA PROFUNDIDADE DURANTE O ENSAIO DE TRAÇADOR

Tabela A.1: Temperatura do líquido ao longo da profundidade em três pontos das lagoas e temperatura do ar no instante de medição da temperatura do líquido

	L1						L2						Da- ta	Horário
	P1		P2		P3		P1		P2		P3			
	líqu.	ar	líqu.	ar	líqu.	ar	Líqu.	ar	líqu.	ar	líqu.	ar		
a	27,5	31,0	27,5	30,6	27,3	29,7	27,6	28,6	27,8	27,4	27,9	28,0	24/09/2003	L1
b	27,3	30,9	27,1	30,3	27,0	29,2	27,7	28,4	27,5	27,3	27,6	27,8		17:16
c	27,1	30,9	27,1	30,3	26,9	29	27,2	28,3	27,2	27,2	27,2	27,6		L2
d	26,9	30,8	26,9	30,1	26,8	28,8	27,1	28,2	27,1	27,2	27,1	27,5		17:31
a	27,3	27,6	27,2	26,2	26,9	25,3	27,3	24,6	27,2	24,7	27,1	24,9	24/09/2003	L1
b	26,8	27,3	26,8	26,0	26,7	25,0	27,0	24,5	26,9	24,8	26,6	24,8		19:20
c	26,6	27,1	26,7	25,9	26,7	24,9	26,8	24,6	26,8	24,9	26,6	24,7		L2
d	26,5	27,0	26,6	25,7	26,6	24,7	26,7	24,7	26,7	24,9	26,6	24,7		19:34
a	24,3	31	24,1	30,4	23,9	30,7	24,9	30,8	25	30,7	24,7	31,2	25/09/2003	L1
b	24,1	30,7	24,2	30,5	23,9	30,6	24,1	30,9	24,2	30,7	24,1	31,1		08:47
c	24,3	30,2	24,3	30,5	24,2	30,6	24,2	30,8	24,2	30,7	24,3	31,0		L2
d	24,4	30,0	24,4	30,9	24,7	30,6	24,4	30,6	24,1	30,8	24,9	30,0		09:05
a	26,2	33,0	26,2	34,2	26,0	34,3	26,9	34,1	26,9	35,0	26,8	34,8	25/09/2003	L1
b	25,9	32,7	26,1	34,8	26,0	34,2	26,2	34,0	26,1	35,0	26,7	34,1		12:30
c	26,2	33,3	26,3	34,2	26,4	34,1	26,5	33,8	26,2	35,2	26,1	34,2		L2
d	26,4	34,2	26,6	34,0	26,8	34,3	26,2	34,0	26,7	35,2	27,1	34,3		13:00
a	27,7	31,6	27,4	30,3	27,3	29,8	27,7	29,2	27,6	28,7	27,7	28,4	25/09/2003	L1
b	27,5	31,1	27,2	30,2	27,0	29,7	27,5	29,2	27,1	28,7	27,0	28,4		17:10
c	27,2	30,7	27,1	30,0	27,0	29,6	27,1	29,0	26,9	28,6	26,9	28,4		L2
d	27,1	30,5	26,9	29,8	26,9	29,5	27,0	28,9	26,7	28,4	26,8	28,3		17:25
a	25,4	15,7	25,7	16	25,6	16,8	26,3	16,4	26,5	16,2	26,3	15,9	26/09/2003	L1
b	25,6	15,8	25,6	16,1	25,7	16,7	25,7	16,3	25,6	16,1	25,4	15,8		00:15
c	25,6	15,8	25,6	16,4	25,7	16,5	25,6	16,3	25,5	16,1	25,4	15,8		L2
d	25,5	15,9	25,5	16,8	25,6	16,5	25,5	16,2	25,5	16,1	25,4	15,8		00:35

continua...

Tabela A1: Temperatura do líquido ao longo da profundidade em três pontos das lagoas e temperatura do ar no instante de medição da temperatura do líquido (continuação)

	L1						L2						Da- ta	Horário
	P1		P2		P3		P1		P2		P3			
	líqu.	ar	líqu.	ar	líqu.	ar	líqu.	ar	líqu.	ar	líqu.	ar		
a	23,7	11,6	24,1	12,7	24,0	13,9	24,9	14,4	25,1	15,3	24,8	15,9	26/09/2003	L1
b	23,9	11,8	24,1	13,0	24,0	14,0	24,0	14,6	23,9	15,4	23,8	16,0		06:20
c	23,9	12,1	24,0	13,2	24,0	14,1	23,9	14,8	23,9	15,6	23,7	16,1		L2
d	23,8	12,3	23,5	13,6	23,9	14,2	23,9	15,0	23,8	15,7	23,6	16,1		06:37
a	26,6	33,1	26,7	32,1	26,4	33,5	27,2	33,9	27,3	34,9	27,2	38,8	26/09/2003	L1
b	26,3	33,7	26,5	32,7	26,5	33,7	26,3	34,0	26,3	34,8	26,4	33,2		13:50
c	26,5	33,9	26,6	32,9	26,6	33,8	26,6	34,3	26,5	34,3	26,6	33,1		L2
d	26,4	33,7	26,5	33,3	26,7	33,9	26,6	34,3	26,5	34,0	26,7	33,0		14:20
a	24,1	23,6	24,1	25,0	24,1	25,5	25,3	26,1	25,2	28,6	25,2	28,9	27/09/2003	L1
b	24,2	23,8	24,1	25,1	24,0	25,5	24,1	26,9	24,1	28,6	24,0	28,8		07:40
c	24,2	24,1	24,0	25,2	24,1	25,5	24,2	27,4	24,1	28,7	24,1	28,7		L2
d	24,5	24,6	24,3	25,3	24,3	25,5	24,5	27,9	24,3	28,8	24,3	28,7		08:25
a	26,1	31,0	25,9	32,6	25,6	32,6	26,8	32,8	26,9	32,2	26,8	31,5	27/09/2003	L1
b	25,8	33,1	25,9	32,7	25,7	32,6	25,8	32,7	25,9	32,1	25,8	31,4		12:40
c	26,0	32,8	26,2	32,8	26,2	32,6	26,0	32,4	26,1	31,9	26,3	31,3		L2
d	26,0	32,7	26,2	32,8	26,8	33,0	25,9	32,2	26,0	31,8	26,3	31,2		13:10
a	26,0	24,9	26,3	25,5	26,0	24,9	26,7	24,0	26,8	23,7	26,6	23,4	27/09/2003	L1
b	25,9	24,9	26,3	25,7	25,7	24,8	26,0	23,7	25,8	23,7	25,6	23,1		16:25
c	25,8	24,9	26,1	25,6	25,7	24,6	25,6	23,5	25,6	23,7	25,6	22,8		L2
d	25,8	25	25,8	25,4	25,7	24,2	25,7	23,5	25,7	23,6	25,5	22,5		17:00
a	24,6	21,1	24,7	21,4	24,5	21,7	25,3	21,4	25,4	21,4	25,3	21,7	28/09/2003	L1
b	21,4	21,2	24,2	21,5	24,0	21,6	24,1	21,4	24,1	21,4	24,1	21,8		08:06
c	24,0	21,3	24,2	21,7	24,1	21,5	24,1	21,4	24,1	21,6	24,0	21,8		L2
d	24,0	21,4	24,0	21,7	24,0	21,5	24,0	21,4	24,0	21,7	23,9	21,8		08:33
a	24,1	20,9	24,0	21,6	24,0	22,2	24,7	22,0	24,7	21,8	24,7	22,0	29/09/2003	L1
b	23,2	21,1	23,1	21,8	23,1	22,3	23,2	21,9	23,2	21,9	23,1	22,0		09:10
c	23,3	21,3	23,2	22,0	23,0	22,3	23,1	21,8	23,2	22,0	23,1	22,0		L2
d	23,2	21,3	23,2	22,1	23,0	22,3	23,2	21,8	23,2	22,0	23,1	22,0		09:28
a	24,3	25,8	24,3	25,6	24,1	26,1	25	26,8	25,1	29,3	24,9	29,5	29/09/2003	L1
b	23,2	25,8	23,3	25,6	23,2	26,2	23,4	27,4	23,3	29,2	23,2	29,8		12:10
c	23,2	25,8	23,3	25,8	23,2	26,3	23,3	28,0	23,3	29,1	23,3	30,1		L2
d	23,4	25,7	23,5	25,9	23,5	26,4	23,8	28,8	23,9	29,3	23,9	30,4		12:30

continua...

Tabela A1: Temperatura do líquido ao longo da profundidade em três pontos das lagoas e temperatura do ar no instante de medição da temperatura do líquido (continuação)

	L1						L2						Da- ta	Horário
	P1		P2		P3		P1		P2		P3			
	líqu.	ar	líqu.	ar	líqu.	ar	líqu.	ar	líqu.	ar	líqu.	ar		
a	25,1	25,1	25,9	25,4	25,8	25,3	26,5	25,9	25,4	26,1	24,8	26,1	29/09/2003	L1
b	25,2	24,3	25,9	24,6	25,8	24,3	26,4	24,1	25,3	24,4	24,5	24,4		16:10
c	26,4	24,5	25,9	24,8	25,7	24,7	26,2	24,4	25,1	24,4	24,3	24,4		L2
d	26,4	24,5	25,9	24,8	26,0	24,7	25,5	24,5	24,9	24,4	24,0	24,4		16:35
a	24,1	23,2	24,3	25,0	24,1	26,1	25,0	26,1	24,9	27,0	24,6	28,1	30/09/2003	L1
b	23,2	23,7	23,3	25,2	23,3	26,0	23,2	26,3	23,2	27,0	23,0	28,1		09:00
c	23,2	24,1	23,2	25,7	23,3	26,2	23,2	26,6	23,2	27,1	23,0	28,0		L2
d	23,3	24,4	23,3	25,8	23,4	26,3	23,5	26,7	23,5	27,4	23,4	28,1		09:32
a	25,6	25,5	25,6	25,4	25,6	25,3	26,2	25,1	26,1	24,8	26,3	24,7	30/09/2003	L1
b	24,9	25,5	25,0	25,4	25,0	25,2	24,8	25,1	24,8	24,8	24,8	24,6		17:10
c	24,8	25,5	24,8	25,3	24,9	25,2	24,7	24,9	24,5	24,8	24,6	24,5		L2
d	24,9	25,4	24,7	25,3	24,7	25,2	24,6	24,9	24,5	24,8	24,6	24,5		17:30
a	24,6	23,6	24,7	24,7	24,7	25,8	25,4	26,5	25,2	26,4	25,2	27,0	01/10/2003	L1
b	23,5	24,0	23,7	25,1	23,7	26,0	23,7	26,5	23,6	26,6	23,7	27,1		08:13
c	23,5	24,2	23,7	25,4	23,7	26,1	23,7	26,4	23,6	26,7	23,7	27,2		L2
d	23,7	24,5	23,9	25,5	24,0	26,4	23,7	26,2	23,6	26,8	23,7	27,3		08:31
a	25,6	30,6	25,7	31,3	25,2	30,4	25,9	30,1	25,9	29,5	25,9	29,3	01/10/2003	L1
b	24,2	31,0	24,4	31,2	24,1	30,3	24,0	30	24,1	29,3	24,1	29,4		12:15
c	24,5	31,3	24,6	31,0	24,3	30,3	24,2	29,8	24,3	29,3	24,3	29,4		L2
d	24,4	31,5	24,9	30,6	24,9	30,3	24,3	29,7	24,7	29,2	24,6	29,2		12:38
a	26,4	25,8	26,4	25,8	26,1	25,9	26,9	25,8	26,9	25,6	26,8	25,6	01/10/2003	L1
b	25,6	25,8	25,5	25,9	25,3	25,9	25,5	25,7	25,4	25,7	25,4	25,5		17:11
c	25,5	25,8	25,5	25,9	25,3	25,9	25,2	25,6	25,2	25,7	25,2	25,5		L2
d	25,4	25,8	25,4	25,9	25,3	25,9	25,2	25,6	25,2	25,8	25,2	25,5		17:30
a	25,0	23,2	25,0	24,5	24,8	25,1	25,6	25,9	25,5	26,5	25,3	26,9	02/10/2003	L1
b	23,8	23,7	24,0	24,7	23,8	25,2	23,7	26,0	23,7	26,5	23,6	26,8		08:32
c	23,9	23,9	23,9	24,9	24,0	25,3	23,8	26,1	23,8	26,6	23,7	26,7		L2
d	24,2	24,0	24,2	24,9	24,3	25,4	24,1	26,6	24,1	26,6	24,2	26,6		08:50
a	26,2	28,6	26,4	29,6	26,1	30,6	26,9	30,9	27	31,2	26,7	31,1	02/10/2003	L1
b	25,0	28,7	25,2	30,1	25,2	30,7	24,8	31,0	24,8	31,3	24,7	31,0		12:05
c	25,0	28,8	25,1	30,3	25,3	30,8	24,9	30,9	24,9	31,2	24,9	31,0		L2
d	25,2	28,8	25,3	30,4	25,4	30,9	25,1	31,0	25,1	31,2	25,0	31,0		12:23

continua...

Tabela A1: Temperatura do líquido ao longo da profundidade em três pontos das lagoas e temperatura do ar no instante de medição da temperatura do líquido (continuação)

	L1						L2						Da- ta	Horário
	P1		P2		P3		P1		P2		P3			
	líqu.	ar	líqu.	ar	líqu.	ar	líqu.	ar	líqu.	ar	líqu.	ar		
a	27,2	25,9	27,2	25,9	26,9	26,0	27,8	26,0	27,8	25,8	27,6	25,9	02/10/2003	L1
b	26,2	25,8	26,2	25,9	26,1	26,0	25,9	25,9	25,9	25,9	25,7	25,9		17:20
c	26,1	25,8	26,1	25,9	26,0	26,0	25,8	25,8	25,8	26,0	25,7	25,9		L2
d	26,1	25,8	26,1	26,0	26,0	26,0	25,8	25,8	25,8	26,0	25,6	25,9		17:35
a	24,9	23,9	24,7	26	24,6	26,5	25,5	26,8	25,4	27,4	25,3	27,7	03/10/2003	L1
b	23,6	25,0	23,5	26,1	23,5	26,5	23,4	26,9	23,4	27,3	23,4	27,7		08:35
c	23,8	25,2	23,6	26,2	23,7	26,5	23,6	27,0	23,5	27,4	23,5	27,7		L2
d	24,2	25,4	24,0	26,3	23,9	26,6	23,9	27,2	23,7	27,5	23,7	27,7		09:01
a	26,7	30,4	26,5	31,2	26,2	32,1	27,3	32,1	27,5	32,0	27,2	32,4	03/10/2003	L1
b	25,2	30,4	25,2	31,6	25,1	32,0	25,1	32,0	25,1	32,2	24,9	32,5		12:05
c	25,5	30,5	25,5	31,6	25,5	31,9	25,2	32,0	25,4	32,2	25,3	32,6		L2
d	25,9	30,6	26,1	31,7	26,1	31,9	26	31,9	25,9	32,3	26,0	32,9		12:23
a	27,6	27,1	27,6	27,1	27,4	27,1	28,2	26,9	28,2	26,6	28,2	26,6	03/10/2003	L1
b	26,8	27,0	26,8	27,2	26,7	27,0	26,5	26,8	26,6	26,6	26,5	26,6		17:10
c	26,8	27,0	26,7	27,2	26,7	27,0	26,5	26,8	26,6	26,6	26,4	26,5		L2
d	26,8	27,1	26,7	27,2	26,7	27,0	26,5	26,6	26,6	26,6	26,4	26,5		17:36
a	27,3	30,1	27,0	30,6	26,8	31,0	27,9	30,9	28,0	30,7	27,9	31,0	04/10/2003	L1
b	26,1	30,2	26,3	30,6	26,1	30,9	26	30,7	26,0	30,8	26,1	30,9		12:20
c	26,1	30,2	26,1	30,7	26,1	31,0	25,9	30,6	26,0	30,9	25,9	30,8		L2
d	26,3	30,4	26,2	30,8	26,2	30,9	26,0	30,6	26,1	31,0	25,9	30,7		12:47
a	27,5	30,2	27,8	30,7	27,6	30,6	28,4	29,8	28,3	30,3	28,6	30,6	04/10/2003	L1
b	26,8	30,3	27,0	30,8	27,0	30,4	26,7	30,0	26,7	30,3	26,8	30,6		15:40
c	26,9	30,4	27,1	30,8	27,0	30,3	26,6	30,1	26,7	30,4	26,7	30,6		L2
d	27,2	30,4	27	30,7	27,0	30,2	26,6	30,2	26,9	30,5	26,7	30,5		16:00
a	24,3	24,7	24,4	26,4	24,5	27,2	26,1	27,7	25,8	27,9	25,7	28,0	05/10/2003	L1
b	24,3	25,6	24,3	26,6	24,5	27,2	24,2	27,8	24,1	27,9	24	28,0		08:25
c	24,4	25,8	24,4	26,8	24,6	27,3	24,2	27,7	24,2	27,9	24,2	28,1		L2
d	24,7	25,9	24,6	27,0	24,7	27,3	24,4	27,6	24,5	27,9	24,5	28,0		08:45
a	26,4	29,5	26,4	30,8	26,4	31,7	28,3	31,9	28,3	32,2	27,8	33,1	05/10/2003	L1
b	26,2	29,9	26,3	31,1	26,4	31,7	26,0	31,9	26,0	32,6	25,8	33,3		12:04
c	26,4	30,1	26,5	31,3	26,5	31,7	26,0	32,0	26,2	32,8	26,2	33,2		L2
d	27,1	30,3	27,2	31,4	27,1	31,7	27,0	32,0	27,2	33	27,1	33,2		12:17

continua...

Tabela A1: Temperatura do líquido ao longo da profundidade em três pontos das lagoas e temperatura do ar no instante de medição da temperatura do líquido (continuação)

	L1						L2						Da- ta	Horário
	P1		P2		P3		P1		P2		P3			
	líqu.	ar	líqu.	ar	líqu.	ar	líqu.	ar	líqu.	ar	líqu.	ar		
a	25,7	24	25,4	26,6	25,5	28,0	27,0	29,8	26,7	30,8	26,6	31,4	06/10/2003	L1
b	25,6	24,5	25,4	27,0	25,5	28,4	25,4	29,9	25,3	30,9	25,2	31,4		08:48
c	25,6	25,0	25,6	27,3	25,7	28,7	25,5	30,1	25,4	31,1	25,5	31,4		L2
d	25,8	25,5	25,8	27,5	25,8	28,9	25,7	30,2	25,8	31,2	25,7	31,3		09:03
a	27,1	31,3	27,1	31,8	27,3	32,9	29,1	33,7	28,9	33,7	28,6	33,6	06/10/2003	L1
b	27,1	31,4	27,1	32,0	27,2	33,0	26,9	33,7	26,9	33,7	26,8	33,9		12:05
c	27,1	31,5	27,2	32,3	27,2	33,2	26,9	33,6	26,9	33,8	27,0	33,9		L2
d	27,5	31,6	27,7	32,6	27,7	33,3	27,5	33,6	27,4	33,8	27,6	33,9		12:20
a	27,6	30,0	27,7	29,3	27,5	28,9	28,6	28,8	28,7	28,6	28,5	28,4	06/10/2003	L1
b	27,5	29,6	27,6	29,2	27,5	28,8	27,3	28,7	27,3	28,5	27,2	28,4		16:46
c	27,5	29,4	27,6	29,1	27,4	28,8	27,3	28,7	27,3	28,5	27,2	28,4		L2
d	27,4	29,4	27,6	29,0	27,4	28,8	27,2	28,6	27,3	28,5	27,2	28,4		17:08
a	25,5	24,1	25,4	25,2	25,4	25,9	26,5	26,8	26,5	27,4	26,5	29,8	07/10/2003	L1
b	25,4	24,4	25,4	25,3	25,4	26,0	25,4	27,0	25,3	27,4	25,4	29,8		08:50
c	25,5	24,6	25,4	25,5	25,4	26,2	25,3	27,1	25,3	27,5	25,4	29,9		L2
d	25,5	24,9	25,5	25,6	25,4	26,3	25,5	27,3	25,4	27,6	25,5	30,0		09:05

Tabela A.2: Condutividade ao longo da profundidade em três pontos das lagoas

	L1			L2			
	P1	P2	P3	P1	P2	P3	
fundo	93,2 (a 26,4°C)	94,8 (a 26,6°C)	94,6 (a 26,5°C)	104,3 (a 27,0°C)	104,9 (a 27,0°C)	104,7 (a 27,0°C)	25/09/03 14:40 h
meio	92,8 (a 26,5°C)	94,1 (a 26,5°C)	94,7 (a 26,7°C)	97,4 (a 26,6°C)	97,0 (a 26,6°C)	97,3 (a 26,5°C)	
superfície	91,3 (a 26,7°C)	93,0 (a 26,8°C)	93,7 (a 27,0°C)	92,4 (a 26,8°C)	93,3 (a 26,9°C)	94,1 (a 27,0°C)	
fundo	87,5 (a 24,5°C)	87,4 (a 24,5°C)	87,5 (a 24,5°C)	103,5 (a 25,5°C)	104,8 (a 25,4°C)	101,4 (a 25,2°C)	26/09/03 01:30 h
meio	87,8 (a 24,6°C)	87,7 (a 24,6°C)	87,8 (a 24,6°C)	92,0 (a 24,6°C)	93,3 (a 24,6°C)	90,4 (a 24,5°C)	
superfície	87,1 (a 24,6°C)	87,6 (a 24,6°C)	87,8 (a 24,5°C)	89,2 (a 24,5°C)	90,3 (a 24,4°C)	88,3 (a 24,4°C)	
fundo	81,9 (a 26,2°C)	81,5 (a 26,2°C)	80,5 (a 26,2)	98,8 (a 27,0°C)	100,1 (a 27,0°C)	98,5 (a 27,0°C)	26/09/03 15:25 h
meio	79,4 (a 26,2°C)	79,0 (a 26,2°C)	78,9 (a 26,2)	77,0 (a 26,1°C)	84,3 (a 26,4°C)	79,5 (a 26,1°C)	
superfície	78,3 (a 26,2°C)	78,1 (a 26,1°C)	76,7 (a 25,9)	74,8 (a 25,9°C)	75,1 (a 25,0°C)	76,8 (a 26,0°C)	

APÊNDICE B - PRECIPITAÇÃO, RADIAÇÃO E INSOLAÇÃO

Tabela B.1: Precipitação, radiação solar e insolação de 01/01 a 05/05/04

Data	Precipitação (mm)	Radiação (cal/cm ² /dia)	Insolação (h)	Data	Precipitação (mm)	Radiação (cal/cm ² /dia)	Insolação (h)
01/01/2004	6,6	324,32	1,9	12/02/2004	25,6	175,03	0,0
02/01/2004	0,0	425,61	4,5	13/02/2004	6,8	344,45	3,1
03/01/2004	26,7	342,92	0,7	14/02/2004	5,4	551,17	7,2
04/01/2004	0,0	432,66	2,4	15/02/2004	3,7	304,84	2,1
05/01/2004	0,7	413,60	3,3	16/02/2004	11,0	359,46	2,5
06/01/2004	11,1	439,69	4,6	17/02/2004	30,7	612,30	8,8
07/01/2004	0,0	440,86	5,1	18/02/2004	3,5	349,37	3,6
08/01/2004	0,1	361,50	0,9	19/02/2004	32,6	569,03	6,5
09/01/2004	0,1	505,71	6,6	20/02/2004	9,4	384,22	1,9
10/01/2004	2,9	436,29	3,5	21/02/2004	20,0	490,60	5,1
11/01/2004	4,2	425,93	3,6	22/02/2004	34,3	375,16	2,1
12/01/2004	38,0	204,05	0,1	23/02/2004	5,7	328,69	1,6
13/01/2004	1,3	493,50	6,8	24/02/2004	15,5	237,79	0,5
14/01/2004	15,4	386,01	3,2	25/02/2004	14,9	330,11	2,1
15/01/2004	2,8	404,03	3,3	26/02/2004	1,4	601,86	6,2
16/01/2004	20,1	179,54	0,7	27/02/2004	15,6	629,81	9,0
17/01/2004	0,0	386,60	2,0	28/02/2004	0,0	560,59	5,5
18/01/2004	0,2	379,76	4,8	29/02/2004	16,2	482,53	3,1
19/01/2004	48,1	359,68	3,3	01/03/2004	1,2	588,18	7,8
20/01/2004	22,5	258,37	1,2	02/03/2004	0,6	585,77	9,2
21/01/2004	31,4	110,60	0,0	03/03/2004	21,2	448,97	4,4
22/01/2004	1,5	458,48	3,5	04/03/2004	21,9	475,64	4,7
23/01/2004	6,8	312,33	0,9	05/03/2004	29,9	242,44	2,1
24/01/2004	21,0	155,33	0,0	06/03/2004	0,1	286,67	1,8
25/01/2004	21,4	187,57	0,2	07/03/2004	0,0	491,72	6,9
26/01/2004	20,6	271,73	1,4	08/03/2004	0,0	494,57	9,9
27/01/2004	15,8	282,80	0,6	09/03/2004	0,0	632,22	11,1
28/01/2004	3,9	286,22	0,3	10/03/2004	0,0	560,64	9,2
29/01/2004	0,0	545,97	10,2	11/03/2004	0,0	588,42	8,9
30/01/2004	0,0	495,36	6,2	12/03/2004	0,0	483,45	7,7
31/01/2004	0,0	455,51	5,6	13/03/2004	8,2	333,42	2,9
01/02/2004	17,6	265,22	1,2	14/03/2004	33,2	398,82	5,2
02/02/2004	4,9	264,18	0,5	15/03/2004	12,0	406,65	3,6
03/02/2004	13,7	335,61	2,4	16/03/2004	9,0	501,65	7,6
04/02/2004	5,1	467,44	3,3	17/03/2004	12,0	178,16	0,1
05/02/2004	0,0	642,72	8,7	18/03/2004	0,1	564,56	9,1
06/02/2004	0,0	630,86	2,0	19/03/2004	10,7	206,62	0,8
07/02/2004	31,0	325,92	1,6	20/03/2004	5,2	349,41	3,9
08/02/2004	1,6	470,42	4,4	21/03/2004	22,5	376,88	5,8
09/02/2004	5,2	294,60	2,0	22/03/2004	3,8	392,18	4,3
10/02/2004	99,3	163,18	0,0	23/03/2004	0,0	438,06	7,4
11/02/2004	14,1	313,92	1,2	24/03/2004	0,0	438,10	9,1

continua...

Tabela B1: Precipitação, radiação solar e insolação de 01/01 a 05/05/04 (continuação)

Data	Precipitação (mm)	Radiação (cal/cm ² /dia)	Insolação (h)	Data	Precipitação (mm)	Radiação (cal/cm ² /dia)	Insolação (h)
25/03/2004	4,0	419,37	6,9	15/04/2004	6,6	185,14	1,1
26/03/2004	0,1	475,75	7,9	16/04/2004	0,0	355,96	8,8
27/03/2004	42,0	344,84	5,2	17/04/2004	0,0	490,50	3,7
28/03/2004	0,5	555,24	9,5	18/04/2004	0,0	508,26	10,0
29/03/2004	0,1	383,27	7,1	19/04/2004	0,0	549,79	10,7
30/03/2004	61,3	402,25	6,4	20/04/2004	0,0	516,94	11,1
31/03/2004	0,6	470,52	7,4	21/04/2004	0,0	521,76	11,4
01/04/2004	5,0	447,64	7,8	22/04/2004	0,0	389,72	9,4
02/04/2004	0,6	429,13	6,9	23/04/2004	0,0	426,33	9,9
03/04/2004	2,7	499,20	9,6	24/04/2004	0,0	464,27	8,8
04/04/2004	0,0	390,44	7,1	25/04/2004	0,0	420,79	8,2
05/04/2004	9,3	306,63	5,2	26/04/2004	0,0	373,56	6,5
06/04/2004	1,0	362,09	4,3	27/04/2004	0,0	356,36	5,8
07/04/2004	0,0	523,96	8,6	28/04/2004	0,6	221,20	1,5
08/04/2004	32,9	508,11	8,2	29/04/2004	0,0	372,36	7,8
09/04/2004	12,7	432,81	6,9	30/04/2004	0,0	420,47	9,82
10/04/2004	6,2	431,64	5,8	01/05/2004	0,0	443,74	10,8
11/04/2004	57,0	349,68	2,9	02/05/2004	0,0	458,04	9,0
12/04/2004	14,5	234,57	1,7	03/05/2004	0,0	463,40	10,5
13/04/2004	4,3	184,57	0,1	04/05/2004	0,0	467,39	10,2
14/04/2004	0,0	264,77	2,0	05/05/2004	0,0	448,11	9,4

Livros Grátis

(<http://www.livrosgratis.com.br>)

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

[Baixar livros de Literatura](#)
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)
[Baixar livros de Matemática](#)
[Baixar livros de Medicina](#)
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)
[Baixar livros de Meteorologia](#)
[Baixar Monografias e TCC](#)
[Baixar livros Multidisciplinar](#)
[Baixar livros de Música](#)
[Baixar livros de Psicologia](#)
[Baixar livros de Química](#)
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)
[Baixar livros de Serviço Social](#)
[Baixar livros de Sociologia](#)
[Baixar livros de Teologia](#)
[Baixar livros de Trabalho](#)
[Baixar livros de Turismo](#)