



**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE FEIRA DE SANTANA  
DEPARTAMENTO DE TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL E  
AMBIENTAL**

**ELIZÂNGELA ALVES LUBARINO**

**PÓS-TRATAMENTO DE EFLUENTE DE REATOR ANAERÓBIO EM LAGOA COM  
LEMNA**

**FEIRA DE SANTANA, BA - BRASIL  
OUTUBRO/2013**

ELIZÂNGELA ALVES LUBARINO

PÓS-TRATAMENTO DE EFLUENTE DE REATOR ANAERÓBIO EM LAGOA COM  
LEMNA

Dissertação submetida ao corpo docente do Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Estadual de Feira de Santana, Ba, como parte dos requisitos necessários para obtenção do grau de Mestre em Ciências em Engenharia Civil e Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. Eduardo Henrique Borges Cohim  
Silva

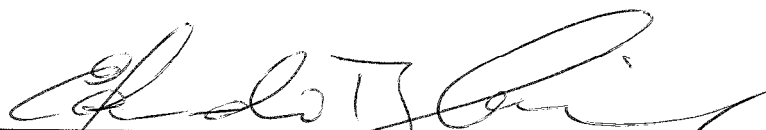
FEIRA DE SANTANA, BA - BRASIL  
OUTUBRO/2013

PÓS-TRATAMENTO DE EFLUENTE DE REATOR ANAERÓBIO EM LAGOA  
COM LEMNA

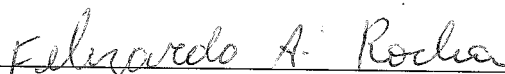
Elizângela Alves Lubarino

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL DA UNIVERSIDADE ESTADUAL DE FEIRA DE SANTANA COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL.

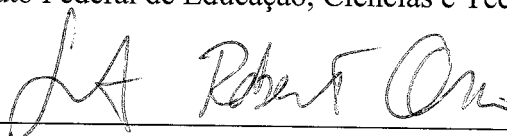
Aprovada por:



Prof. Dr. Eduardo Henrique Borges Cohim Silva (Orientador)  
(Universidade Estadual de Feira de Santana)



Prof. Dr. Felizardo Adenilson Rocha  
(Instituto Federal de Educação, Ciências e Tecnológica da Bahia)



Prof. Dr. Sílvio Roberto Magalhães Orrico  
(Universidade Estadual de Feira de Santana)

FEIRA DE SANTANA, BA – BRASIL

OUTUBRO/2013

**FICHA CATALOGRÁFICA – BIBLIOTECA CENTRAL JULIETA CARTEADO**

Lubarino, Elizângela Alves

L961p Pós-tratamento de efluente de reator anaeróbio em lagoa com  
lemna / Elizângela Alves Lubarino. – Feira de Santana, 2013.

80 f. : il.

Orientador: Eduardo Henrique Borges Cohim Silva.

Mestrado (dissertação) – Universidade Estadual de Feira de Santana,  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, 2013.

1. Águas residuárias domésticas – Remoção e reaproveitamento  
de nutrientes. 2. Lagoa de Lemnas. I. Silva, Eduardo Henrique Borges  
Cohim, orient. II. Universidade Estadual de Feira de Santana. III.  
Título.

CDU: 628.3

Dedico este **Mestrado** a minha mãe, Elizabeth  
Alves, pelo incentivo e apoio em todas as  
minhas escolhas e decisões.

## AGRADECIMENTOS

A DEUS presente em todos os momentos da minha vida.

À minha família, especialmente minha mãe ELIZABETH, que está sempre ao meu lado, me apoiando, me fortalecendo na fé.

Ao meu orientador EDUARDO COHIM que contribuiu para tornar possível a realização desta pesquisa.

Aos membros da banca, FELIZARDO ROCHA e SILVIO ORRICO, pela disposição em contribuir com esta pesquisa, com sugestões e críticas.

A todos os PROFESSORES do programa de pós-graduação, pelos ensinamentos nas aulas ministradas, que permitiram a (re) construção de valores pessoais, acadêmicos e profissionais.

Aos funcionários do PPGECEA, especialmente aos amigos MARIANA, KÁTIA e WELBER, pelo empenho, dedicação, apoio e momentos de descontração, necessários para enfrentar as adversidades, principalmente as administrativas e burocráticas, durante a realização deste estudo.

Aos professores da área de Biologia: FLÁVIO FRANÇA pelo auxílio na identificação da espécie de macrófita em estudo; CARLOS WALACE pelos esclarecimentos e identificação da alga filamentosa que competiu com a lemna durante a fase inicial da pesquisa; LUCIANO VAZ pelo constante incentivo e colaboração.

À CAPES pela concessão da bolsa de estudo, sem ela não seria possível!

Ao professor ROQUE ANGÉLICO pelo apoio logístico que viabilizou as coletas na ETE Jacuípe II (EMBASA).

Aos funcionários da ETE Jacuípe II, que sempre dispostos me auxiliaram nas coletas de lemnas, especialmente a MIRIAN.

A equipe do Laboratório de Saneamento DIONE, ADRIANO E LUÍS, pela amizade e colaboração na realização dos experimentos, análises e pelos lanches da tarde partilhados e recheados de muita alegria.

Aos estagiários do Laboratório de Saneamento LUCAS, DAIANE, GIL e a técnica LEILANE, pela disponibilidade e colaboração durante a realização das análises, além da boa vontade para cuidar especialmente da vidraria, tarefa árdua dentro da dinâmica laboratorial.

Ao técnico JORGE do Laboratório de Geotécnia (Solo), por suas contribuições engenhosas especialmente na montagem do filtro anaeróbio.

A equipe da GEPRO/UEFS, especialmente ao Engenheiro e amigo JODILSON, que pacientemente conduziu as necessárias e possíveis instalações do sistema de tratamento.

Ao pessoal da Manutenção/UEFS que sempre me auxiliou, especialmente a JACIEL, que não mediu esforços, nem tempo para me ajudar, e integrantes de sua equipe que contribuíram para a instalação e manutenção do sistema de tratamento: Sr. MANOEL (pedreiro), Sr. LUÍS (encanador) companhia constante, TEMI, EDMUNDO e DEUSDETE (eletricistas) sempre prestativos.

À minha amiga/irmã TAHISE pelo incentivo, colaboração constante e especialmente por assumir, “de vez em sempre”, minhas tarefas extra mestrado.

A todos os colegas do mestrado, amigos para vida toda, especialmente a NARA, QUELLE, RAFAELA, ANDERSON, ROBERVAL e ROGÉRIO, que fizeram parte desta etapa da minha vida e promoveram momentos de confraternização, especialmente durante as trilhas rumo às animadas refeições no bairro Feira VI.

Enfim, a todos que direta ou indiretamente contribuíram, participaram e estiveram presentes em todos os momentos da realização deste trabalho, a minha eterna gratidão.

“Comece fazendo o que é necessário, depois o  
que é possível, e de repente você estará  
fazendo o impossível. ”

São Francisco de Assis



Resumo da Dissertação apresentada ao PPGECEA/UEFS como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

PÓS-TRATAMENTO DE EFLUENTE DE REATOR ANAERÓBIO  
EM LAGOA COM LEMNA

Elizângela Alves Lubarino

Outubro/2013

Orientador: Prof. Dr. Eduardo Henrique Borges Cohim Silva

Programa: Engenharia Civil e Ambiental

A ausência de tratamento e a disposição inadequada de efluentes domésticos contribuem para a deterioração de corpos receptores. Porém, dentre as alternativas propostas para o pós-tratamento de águas residuárias estão as lagoas de lemnas. Essas lagoas são capazes de captar nutrientes do esgoto com eficiência, bem como, reduzir uma grande quantidade de sólidos em suspensão. Também atuam na inibição de algas, e geram biomassa rica em proteínas que tem utilidades como ração animal e adubo. Esta pesquisa teve por finalidade avaliar e comparar a eficiência do tratamento de efluentes domésticos da lagoa de lemnas, em duas fases distintas, e com diferentes tempos de detenção hidráulica (TDH). Essa lagoa, na Fase I, operou com volume de afluente de 75 litros/dia e TDH de 5, 10 e 15 dias, enquanto que na Fase II, o volume foi aumentado para 140 L/d e TDH foi diminuído para 2,7, 5,4 e 8,0 dias. A estrutura da lagoa de lemna apresentou um volume de 1125 m<sup>3</sup> e área superficial de 2,25 m<sup>2</sup> (profundidade total de 0,6m, profundidade da água 0,5 m, comprimento de 1,5 m e largura 1,5 m). Para tanto, durante as duas fases dessa pesquisa foram monitorados os seguintes parâmetros: na água residuária - temperatura, pH, demanda bioquímica de oxigênio (DBO<sub>5</sub>), oxigênio dissolvido (OD), sólidos suspensos totais

(SST), fósforo (P), coliformes termotolerantes; na macrófita – nitrogênio (N), fósforo (P), produção de biomassa e proteína bruta (%). O sistema de tratamento apresentou como desempenho no polimento de águas residuárias domésticas, a seguinte eficiência de remoção de carga orgânica e nutriente: 80% (Fase I) e 66% (Fase II) para DBO<sub>5</sub>; 83% (Fase I) e 34% (Fase II) para P. As lemnas converteram esses nutrientes em biomassa rica em proteínas com teor médio de PB%, de 27,93%. A produção de proteína em lemnas durante todo o experimento foi de: 355g (LMN1), 367g (LMN2) e 370g (LMN3). Notadamente, a capacidade do sistema em tratar essas águas foi maior na Fase I, com maior TDH. A presença de algas do gênero *Uronema* foi constatada, bem como a competição dessas com a lemna em estudo, mas após as modificações que visaram amenizar as temperaturas essa competição foi controlada. Com a realização deste estudo, foi possível avaliar o pós-tratamento de águas residuárias domésticas, os fatores limitantes para esse sistema e a produção de biomassa de *Lemna valdiviana* Phil., sob as condições climáticas de Feira de Santana, Ba. Enfim é possível concluir que, há potencial de recuperação de nutrientes dessas águas, assim como de reaproveitamento da biomassa produzida, como possível fonte de alimentação animal e de renda.

**Palavras-chave:** Águas residuárias domésticas; Remoção e reaproveitamento de nutrientes; Lagoa de lemnas.

Abstract of Dissertation presented to PPGECEA/UEFS as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

## POST-TREATMENT OF WASTEWATER POND IN ANAEROBIC REACTOR LEMNA

Elizângela Alves Lubarino

October/2013

Advisor: Prof. Dr. Eduardo Henrique Borges Cohim Silva

Department: Civil and Environment Engineering

The absence of treatment and improper disposal of effluents contribute to the deterioration of receiving water bodies. However, among the proposed alternatives for post-treatment of wastewater ponds are to lemnas. These lagoons are capable of capturing the nutrients sewage efficiently and reduce a large amount of suspended solids. Also act by inhibiting algae, and generate biomass rich in protein, which has utilities such as animal feed and fertilizer. This research aimed to evaluate and compare the efficiency of the treatment of domestic sewage pond lemnas in two phases, with different hydraulic retention time (HRT). This pond, in phase I, operated with influent volume of 75 liters/day and HDT of 5, 10 and 15 days, while phase II, the volume was increased to 140 liters/day TDH was decreased to 2.7, 5.4 and 8.0 days. The structure of the pond lemna had a volume of 1,125 m<sup>3</sup> and surface area of 2.25 m<sup>2</sup> (total depth of 0.6 m, 0.5 m water depth, length of 1.5 m and width 1.5 m). Therefore, during the two phases of this research the following parameters were monitored: the wastewater - temperature, pH, biochemical oxygen demand (BOD<sub>5</sub>), dissolved oxygen (DO), total suspended solids (TSS), phosphorus (P), coliforms thermotolerant in macrophyte - nitrogen (N), phosphorus (P), biomass and crude protein (%). The treatment system performance as presented in polishing domestic wastewater, following the removal efficiency of organic and nutrient load: 80% (phase I) and 66%

(phase II) for BOD<sub>5</sub>, 83% (phase I) and 34% (phase II) for P. The lemna converts these nutrients into biomass rich in proteins with an average grade of CP% from 27.93%. The production of protein in lemna throughout the experiment was: 355 g (LMN1), 367 g (LMN2) and 370 g (LMN3). Notably, the ability of the system to treat these waters was higher in phase I, which has the greatest TDH. The presence of algae genus *Uronema* was found, as well as the competition with these lemna study, but after the modifications aimed at mitigating the temperatures this competition was controlled. With this study, it was possible to evaluate the post-treatment of domestic wastewater, the limiting factors for this system and the biomass of *Lemna valdiviana* Phil., under the climatic conditions of Feira de Santana, Ba. Finally, we conclude that there is potential for nutrient recovery of these waters, as well as reuse of biomass produced as a possible source of animal feed and income.

**Keywords:** domestic wastewater, removal and reuse of nutrients; pond lemna.

## SUMÁRIO

<b>RESUMO</b> .....	<b>viii</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>x</b>
<b>LISTA DE FIGURAS</b> .....	<b>xiv</b>
<b>LISTA DE TABELAS</b> .....	<b>xvii</b>
<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>18</b>
<b>2 OBJETIVOS</b> .....	<b>21</b>
2.1 OBJETIVO GERAL.....	21
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	21
<b>3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b> .....	<b>22</b>
3.1 SANEAMENTO AMBIENTAL E ECOLÓGICO .....	22
3.2 TRATAMENTO DE ÁGUAS RESIDUÁRIAS .....	24
3.3 TRATAMENTO ANAERÓBIO.....	25
3.4 MACRÓFITAS AQUÁTICAS .....	27
<b>3.4.1 Caracterização das macrófitas</b> .....	<b>27</b>
<b>3.4.2 Descrição da espécie utilizada neste estudo: <i>Lemna valdiviana</i> Phil.....</b>	<b>29</b>
<b>3.4.3 Tratamento de águas residuárias em lagoa com lemnas</b> .....	<b>30</b>
3.5 DESEMPENHO DO SISTEMA DE LEMNAS NA RECICLAGEM DE NUTRIENTES E PRODUÇÃO DE BIOMASSA.....	34
<b>4 METODOLOGIA</b> .....	<b>36</b>
4.1 LOCALIZAÇÃO.....	36
4.2 DELINEAMENTO EXPERIMENTAL.....	36
<b>4.2.1 Descrição do aparato experimental</b> .....	<b>36</b>
4.3 MONITORAMENTO DO SISTEMA EXPERIMENTAL .....	40
<b>4.3.1 Manejo e avaliação do efluente</b> .....	<b>41</b>
<b>4.3.2 Manejo de remoção e avaliação da biomassa</b> .....	<b>41</b>
<b>4.3.3 Tratamento dos dados</b> .....	<b>43</b>
4.4 DADOS CLIMATOLÓGICOS E CARACTERIZAÇÃO DO AMBIENTE .....	43
<b>4.4.1 Precipitação durante o período experimental Fase I e II (março – junho) ..</b>	<b>43</b>
<b>4.4.2 Temperatura do ambiente no período experimental: março – junho</b> .....	<b>44</b>
<b>5 RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	<b>46</b>
5.1 AVALIAÇÃO DA ÁGUA .....	46
<b>5.1.1 Temperatura na água da lagoa</b> .....	<b>46</b>
<b>5.1.2 Potencial hidrogeniônico (pH)</b> .....	<b>47</b>
<b>5.1.3 Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO<sub>5</sub>)</b> .....	<b>49</b>

<b>5.1.4 Oxigênio dissolvido (OD)</b> .....	<b>51</b>
<b>5.1.5 Sólidos suspensos totais (SST)</b> .....	<b>53</b>
<b>5.1.6 Fósforo na água</b> .....	<b>55</b>
<b>5.1.7 Coliformes termotolerantes (<i>E. Coli</i>)</b> .....	<b>57</b>
<b>5.2 DESEMPENHO GERAL DA LAGOA DE LEMNA</b> .....	<b>59</b>
<b>5.3 AVALIAÇÃO DA LEMNA</b> .....	<b>62</b>
<b>5.3.1 Avaliação do manejo de lemnas</b> .....	<b>62</b>
<b>5.3.2 Avaliação da biomassa de lemna</b> .....	<b>64</b>
<b>6 CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES</b> .....	<b>72</b>
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>75</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 O Ciclo dos nutrientes de acordo com o ECOSAN. ....	23
Figura 2 Distribuição geográfica da subfamília Lemnoideae. Os números indicam limitações ao desenvolvimento por conta de regiões: 1 - desérticas; 2 – de alta pluviosidade; 3 – de muito frio; 5 - com poucos dados.....	27
Figura 3 Desenho esquemático de <i>Lemna valdiviana</i> Phil.: para demonstração das pequenas dimensões das estruturas desse grupo botânico. ....	29
Figura 4 Diagrama de processos biológicos de lemnas (lentilhas d'água).....	32
Figura 5 Modelo do tanque que simulou a lagoa com lemnas com diferentes Tempos de Detenção Hidráulica. ....	36
Figura 6 Filtro anaeróbio: bombona com conduítes (20 mm), cortados em tocos de 2 cm e bomba volumétrica (marca Rule - 360 GPH).....	37
Figura 7 Diagrama esquemático do sistema de tratamento de águas residuárias domésticas através de lagoa com lemnas.....	38
Figura 8 Sistema de tratamento: sombreamento com tela (50% sombra), revestimento do tanque com placas de isopor (50 mm) e o uso de cerca de compensado. ....	39
Figura 9 Valores de precipitação durante o período experimental, março – junho de 2013.....	44
Figura 10 Valores de temperatura máxima, mínima e média do ar ambiente durante a Fase I (março – abril), 2013.....	45
Figura 11 Valores de temperatura máxima, mínima e média do ar ambiente durante a Fase II (maio – junho), 2013.....	45
Figura 12 Valores de temperatura na água da lagoa durante o período: março - junho de 2013.....	46
Figura 13 Variação temporal dos valores de pH no afluente (E1) e nos efluentes (S1, S2 e S3) do sistema de tratamento, na Fase I, março- abril, de 2013. ....	48
Figura 14 Variação temporal dos valores de pH afluente (E1) e afluentes (S1, S2 e S3) do sistema de tratamento na Fase II, maio – junho, de 2013.....	48
Figura 15 Variação temporal dos valores de DBO <sub>5</sub> afluente (E1) e efluentes (S1, S2 e S3) do sistema de tratamento, na Fase I, março- abril, de 2013.....	49
Figura 16 Variação temporal dos valores de DBO <sub>5</sub> afluente (E1) e efluentes (S1, S2 e S3) do sistema de tratamento, na Fase II, maio – junho, de 2013. ....	50
Figura 17 Valores médios de DBO <sub>5</sub> , comparação dos valores médios das saídas (S1, S2 e S3) nas Fases I (A) e II (B).....	51

Figura 18 Variação temporal dos valores de OD afluyente (E1) e efluentes (S1, S2 e S3) do sistema de tratamento, Fase I, abril de 2013. ....	52
Figura 19 Variação temporal dos valores de OD afluyente (E1) e efluentes (S1, S2 e S3) do sistema de tratamento, na Fase II, maio – junho, de 2013.....	52
Figura 20 Variação temporal dos valores de SST afluyente (E1) e efluentes (S1, S2 e S3) do sistema de tratamento, na Fase I, março – abril, de 2013.....	54
Figura 21 Variação temporal dos valores de SST afluyente (E1) e efluentes (S1, S2 e S3) do sistema de tratamento, na Fase II, maio – junho, de 2013. ....	54
Figura 22 Variação temporal dos valores de Fósforo afluyente (E1) e efluentes (S1, S2 e S3) do sistema de tratamento, Fase I, março – abril de 2013.....	55
Figura 23 Variação temporal dos valores de Fósforo afluyente (E1) e efluentes (S1, S2 e S3) do sistema de tratamento, Fase II, maio – junho de 2013. ....	56
Figura 24 Comparação das médias nos diferentes tempos de detenção (TDH) nos efluentes (S1, S2 e S3) nas Fases I (A) e II (B). ....	57
Figura 25 Variação temporal dos valores de coliformes termotolerantes ( <i>E. Coli</i> ) afluyente (E1) e efluentes (S1, S2 e S3) do sistema de tratamento, Fase I e II, março – junho, de 2013. ....	58
Figura 26 Amostras de água (E1, S1, S2 e S3) coletadas no início da pesquisa experimental: 25 de março de 2013. ....	61
Figura 27 Amostras de água (E1, S1, S2 e S3) coletadas em meados da pesquisa experimental: 29 de abril de 2013. ....	61
Figura 28 Amostras de água (E1, S1, S2 e S3) coletadas no final da pesquisa experimental: 03 de junho de 2013. ....	61
Figura 29 Identificação da espécie <i>Lemna valdiviana</i> Phil.: uma raiz e nervura central única. ....	62
Figura 30 Alga do gênero <i>Uronema</i> : clorofíceae filamentosa não ramificada. ....	62
Figura 31 Observação em laboratório da competição estabelecida entre algas do gênero <i>Uronema</i> e as macrófitas <i>Lemna valdiviana</i> Phil. ....	63
Figura 32 Variação temporal dos valores de fósforo nas lemnas na Fase I (março-abril) de 2013.....	64
Figura 33 Variação temporal dos valores de fósforo nas lemnas do sistema de tratamento, Fase II (maio – junho) de 2013.....	65
Figura 34 Valores médios de fósforo nas lemnas (LMN 1, LMN 2 e LMN 3) em todo o período experimental. ....	67
Figura 35 Percentual de nitrogênio (N%) encontrado na <i>Lemna valdiviana</i> Phil., na Fase I e II (março – junho), de 2013.....	68



Figura 36 Teor percentual de proteína bruta (PB%) da macrófita <i>Lemna valdiviana</i> Phil., durante as Fase I e II: (março – junho), de 2013.....	69
Figura 37 Produção de proteína bruta (PB%) da <i>Lemna valdiviana</i> Phil., nas Fase I e II do sistema de tratamento: (março – junho), de 2013. ....	70

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 Eficiência de remoção de poluentes, conforme nível de tratamento.....	25
Tabela 2 Valores comuns de DBO do efluente e de remoção em sistemas anaeróbios .....	26
Tabela 3 Principais mecanismos de remoção de poluentes observados em lagoas com macrófitas. ....	31
Tabela 4 Vantagens e desvantagens do tratamento de águas residuárias em lagoa com lemnas. ....	34
Tabela 5 Concentrações de nutrientes em águas residuárias na entrada e saída de uma lagoa coberta com lemnas.....	34
Tabela 6 Dimensões da lagoa de lemnas. ....	37
Tabela 7 Dimensões do filtro anaeróbio de fluxo ascendente.....	37
Tabela 8 Frequência dos parâmetros.....	40
Tabela 9 Métodos analíticos físico-químicos e microbiológicos. ....	40
Tabela 10 Valores médios de pH da água residuária nas Fases I e II.....	49
Tabela 11 Valores médios de DBO <sub>5</sub> na água residuária nas Fases I e II.....	50
Tabela 12 Valores médios de OD nas Fases I e II.....	52
Tabela 13 Valores médios de SST nas Fases I e II. ....	55
Tabela 14 Valores médios de fósforo na água nas Fases I e II. ....	56
Tabela 15 Valores médio de coliformes termotolerantes ( <i>E. Coli</i> ). ....	58
Tabela 16 Valores médios de pH, DBO <sub>5</sub> , OD, SST e P, obtidos no afluente e efluentes da lagoa de lemna, durante as duas fases de operação.....	59
Tabela 17 Valores médios de remoção (%) de DBO <sub>5</sub> e P, na lagoa de lemnas, nas diferentes fases de operação do sistema. ....	60
Tabela 18 Valores médios do fósforo na lemna, nas Fases I e II.....	66
Tabela 19 Valores médios do nitrogênio (N%), nas Fases I e II. ....	68
Tabela 20 Valores médios de proteína bruta (PB%) <i>Lemna valdiviana</i> Phil. na Fase I e II: (março – junho).....	69
Tabela 21 Valores médios de produção de proteína bruta (PB) da <i>Lemna valdiviana</i> Phil., durante as Fase I e II: (março – junho).....	70

## 1 INTRODUÇÃO

O crescimento populacional e avanço das tecnologias ocasionou o aumento da demanda de consumo de água e conseqüentemente gerou um maior volume de águas residuárias, expandindo assim os riscos de contaminação e de doenças de veiculação hídrica. Para tratar esse volume crescente de águas residuárias foi ampliada também, a necessidade de buscar tecnologias economicamente viáveis (SOUSA et al., 2004).

Os métodos convencionais usados para tratar as águas residuárias objetivam a remoção da carga orgânica, de nutrientes e de microrganismos patogênicos. Embora os sistemas anaeróbios tenham se destacado no tratamento dessas águas, promovendo a remoção da carga orgânica sem consumo exagerado de energia, eles não removem nutrientes eutrofizantes com facilidade e nem microrganismos patogênicos de maneira satisfatória, como confirmam os trabalhos de Barros et al., 1995; Campos, 1999; Tundisi, 2003; Chernicharo et al., 2001.

No Brasil, uma grande aplicabilidade de reatores anaeróbios para tratar esgotos é empregada, são unidades de tratamento primário, com eficiência de remoção de DBO de aproximadamente 70%, o que aponta para a necessidade de um pós-tratamento a nível secundário como os evidenciados nos textos de Barros et al., 1995; Chernicharo et al., 2001; Mota, 2006.

No tratamento secundário dos esgotos, são geralmente utilizadas as lagoas de estabilização, especialmente as facultativas, as quais, por meio de processos naturais, podem remover a matéria orgânica restante, nutrientes eutrofizantes e microrganismos patogênicos, como enfatiza Von Sperling (2005), em seus trabalhos. Porém, nessas lagoas, a reutilização dos nutrientes removidos não é tão satisfatória como acontece em lagoas cobertas por macrófitas (RAN et al., 2004; MAIA, 2008).

O que se percebe é que os tratamentos convencionais de águas e esgoto implicam em custos elevados e uso indiscriminado da água como meio de transporte dos dejetos. De tal modo que, empregam soluções lineares, as quais consideram o ambiente um fornecedor de recursos ilimitados e capaz de processar resíduos infinitamente.

Fica evidente que buscar alternativas a tais sistemas é importante por razões ecológicas, econômicas e sociais, as quais considerem o reúso da água e a reciclagem dos nutrientes desperdiçados, como ressalta Sasse (2005). Portanto, na perspectiva de evitar as desvantagens do sistema convencional, as tecnologias que

têm como base o saneamento ecológico, podem ser vistas como alternativas, pois tendem a adotar abordagens ecossistêmicas, e seguem os caminhos naturais dos ecossistemas e os ciclos fechados de materiais (ESREY et al., 2001). Sendo assim, essas alternativas podem contribuir para uma maior segurança alimentar, reduzir a poluição ambiental e melhorar o gerenciamento das águas, dos solos e dos nutrientes (ESREY et al., 1998).

Para tratar esgotos no Brasil, o emprego de lagoas de reduzida iluminação, com o sombreamento promovido por macrófitas é uma alternativa muito atraente, tomando-se como base, as diversas pesquisas realizadas, mais comumente no sul do país (MOHEDANO, 2004; TAVARES, 2008; MOHEDANO et al., 2010). De acordo com esses trabalhos, as macrófitas são capazes de depurar águas residuárias, das mais diversas origens, inclusive domésticas e, ao mesmo tempo, incorporar os nutrientes em sua biomassa.

As tradicionais formas de tratar águas residuárias não têm considerado essas possibilidades de reaproveitamento e tampouco o fechamento de ciclos de nutrientes. Consequentemente, esses vêm sendo desperdiçados e lançados indiscriminadamente nos mananciais superficiais, notadamente os rios, eutrofizando-os.

Assim, de acordo com os preceitos do saneamento ecológico e, portanto, baseando-se numa abordagem ecossistêmica, as águas residuárias domésticas podem ser reconhecidas como um recurso, que pode estar disponível para o reúso (LANGERGRABER e MUELLEGGER, 2005), desde que consideradas os fins a que se destinam e as condições sanitária exigidas para esses.

Tanto a reciclagem de nutrientes quanto a produção de biomassa a partir de águas residuárias domésticas, bem como o desempenho do tratamento dessas águas, através do uso de lagoa com lemnas pode se dar de forma sustentável (SOUSA et al., 2006).

As lemnas, macrófitas aquáticas flutuantes, apresentam alta capacidade de reprodução e elevado valor nutricional (MAIA, 2008; NASR et al., 2009), de maneira que, apresentam grande potencial de uso como matéria prima para produção de adubo e ração, que podem respectivamente ser empregadas na adubação do solo e na alimentação animal (FRANÇA, 2008; TAVARES, 2008). Têm papel importante na natureza, pois são bioindicadoras de águas eutrofizadas e, ao mesmo tempo, assumem a função de despoluidoras de águas nessas condições (LANDOLT e KANDELER, 1987). Desse modo, essas macrófitas são utilizadas em lagoas para tratar águas ricas em nutrientes (MAIA, 2008; BARÉA e SOBRINHO, 2006).

Nessa perspectiva, esse estudo se propôs a verificar o desempenho de um sistema de pós-tratamento de águas residuárias domésticas proveniente de filtro anaeróbio, através de lagoa com *Lemna valdiviana* Phil.

## 2 OBJETIVOS

### 2.1 OBJETIVO GERAL

Avaliar o desempenho de lagoa com *Lemna valdiviana* Phil., como pós-tratamento de efluente de filtro anaeróbio.

### 2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- a) Verificar a eficiência da lagoa contendo a macrófita *Lemna valdiviana* Phil., na remoção de nutrientes, de sólidos suspensos totais (SST), da demanda bioquímica de oxigênio (DBO) e coliformes termotolerantes.
- b) Analisar o desempenho da *Lemna valdiviana* Phil. em converter os nutrientes para produção de sua biomassa.
- c) Avaliar a influência do tempo de detenção hidráulica no desempenho de lagoa com *Lemna valdiviana* Phil.

### 3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

#### 3.1 SANEAMENTO AMBIENTAL E ECOLÓGICO

Um fator essencial à qualidade de vida e ao nível de saúde de uma população é acesso ao saneamento ambiental. Para poder alcançar este fim, os sistemas de esgotamento sanitário devem dispor de um tratamento adequado dos esgotos coletados, para que possam proteger a saúde pública e preservar o meio ambiente. No entanto, um sistema adequado de tratamento de esgotos deve ter as seguintes características: ser de fácil operação, compatível com a realidade local eficiente e economicamente viável.

Na base da vida no planeta estão como suporte dos ecossistemas: água, energia e nutrientes. No entanto, para geri-los, a natureza emprega fluxos circulares, os quais visam o fechamento dos ciclos, onde os resíduos de uma atividade ou processo são insumos para outra atividade. Enquanto que a ação antrópica utiliza-se de fluxos lineares (COHIM et al., 2007). A solução linear usada pelo homem é insustentável e, equivocadamente, considera que o ambiente é fornecedor de infinitos recursos e capaz de depurar ilimitadamente os resíduos produzidos pela ação antrópica (SOUSA *et al.*, 2006).

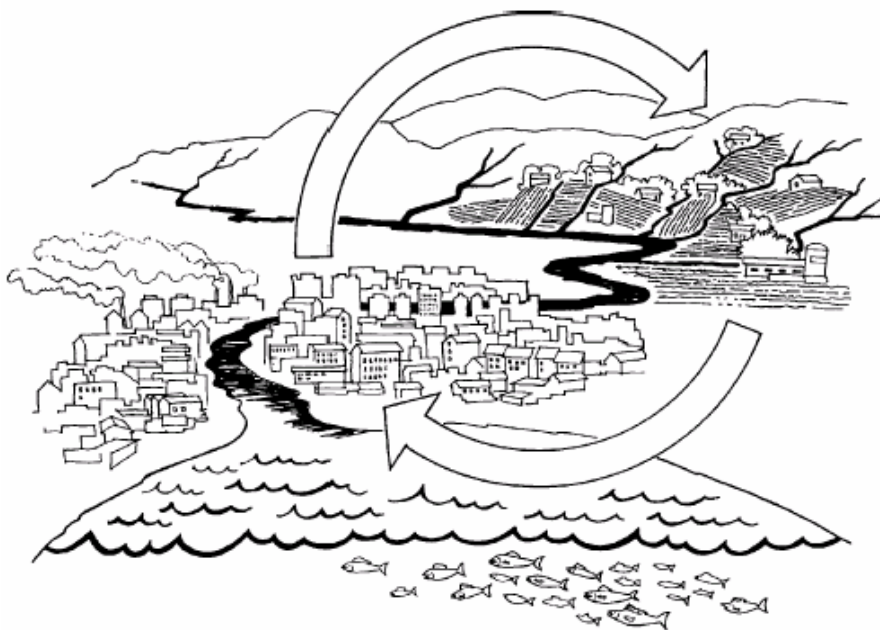
Para solucionar esse equívoco o mais conveniente é o homem procurar copiar a natureza. Para tanto, é importante buscar soluções de saneamento que se adequam aos ciclos naturais. E nessa perspectiva, para gerir melhor as águas residuárias, o grande desafio é rever o uso equivocado da água como veículo de transporte de dejetos e substâncias orgânicas e inorgânicas (COHIM et al., 2009). Essa mudança pode contribuir não só com a redução do uso da água, mas também com a possibilidade de considerar o reaproveitamento dos nutrientes nela presentes.

Contudo, os serviços de abastecimento de água e esgoto, usados por anos em países em desenvolvimento e industrializados, seguiram os conceitos convencionais centralizados e implicaram em elevados custos e consumo de água impactante. Para os sistemas convencionais de esgoto, o meio ambiente é capaz de processar infinitamente os resíduos (“solução linear”). Sistemas esses, que operam transformando o estado da matéria, transferindo de um estágio bioquímico para outro, juntando e carregando todos os dejetos, principalmente para os ecossistemas aquáticos, causando sérios problemas de poluição e de saúde

pública. Portanto, não são adequados como soluções sustentáveis. Desta forma, por razões ecológicas, econômicas e sociais, torna-se cada vez mais necessário buscar alternativas aos sistemas convencionais. Essas alternativas, porém, precisam considerar o reúso da água e a reciclagem dos nutrientes (SASSE, 2005; COHIM et al., 2009).

Com tal finalidade, o saneamento ecológico é considerado como uma alternativa para evitar as desvantagens deste sistema convencional. Tendo como base uma abordagem ecossistêmica, que adota os caminhos naturais dos ecossistemas e os ciclos fechados de materiais. Assim, pode contribuir para a segurança alimentar, reduzir a poluição ambiental e melhorar o gerenciamento das águas, dos solos e dos nutrientes (ESREY et al., 1998).

Originário dos países nórdicos e habitualmente usado na Suécia, ECOSAN é o conceito usado para designar saneamento ecológico. De acordo com Esrey et al., (1998), esse pode ser realizado por uma variedade de tecnologias de baixo custo e soluções eficientes, visando à sustentabilidade econômica (Figura 1).



**Figura 1** O Ciclo dos nutrientes de acordo com o ECOSAN.  
Fonte: ESREY et al. (1998).

O saneamento ecológico, de modo seguro e não poluente, promove a recuperação e reciclagem de nutrientes. É frequentemente usado para se referir ao ciclo fechado, que inclui a reutilização dos nutrientes (ESREY et al., 2001; MANILA, 2003). Ao permitir que se fechem os ciclos dos nutrientes, o ECOSAN apresenta relação especial com a agricultura urbana.



Desse modo, as águas residuárias domésticas podem ser reconhecidas como um recurso, que pode estar disponível para o reúso (LANGERGRABER e MUELLEGGER, 2005). De maneira que, os nutrientes e a matéria orgânica contidos nas excretas humanas podem ser considerados como matéria-prima, desde que devidamente tratados, contribuir aos sistemas locais de produção de alimentos.

### 3.2 TRATAMENTO DE ÁGUAS RESIDUÁRIAS

Para caracterizar os despejos provenientes das mais diversas modalidades de uso da água, tais como uso doméstico, agrícola, comercial, sanitário e industrial utiliza-se o termo “efluente”. A finalidade de um tratamento de efluentes é a de transformar matéria prima (esgoto bruto), em um produto final, como em uma indústria. Desse modo, devem ser empreendidos os mesmos cuidados de indústrias modernas. Sendo assim, a otimização e a qualidade dos serviços devem estar presentes na chamada “indústria” do tratamento de esgotos (CHERNICHARO et al., 2001).

Essas águas residuárias devem atender aos padrões preconizados na legislação, após o tratamento e lançamento nos corpos d’água receptores (PHILIPPI JR e MALHEIROS, 2005). No Brasil, a Resolução que versa sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes é a CONAMA 357/05 (BRASIL, 2005).

As atuais formas de tratar as águas residuárias, não estão sendo eficientes na redução de nutrientes, conseqüentemente, esses vêm sendo lançados nos mananciais hídricos indiscriminadamente. De tal modo, o lançamento de elevadas concentrações de nutrientes, em cursos de água superficiais, pode acarretar a redução dos níveis de oxigênio e promover o aumento da biomassa das algas, produzida no corpo receptor por conta do processo de eutrofização (CHERNICHARO et al., 2001; PHILIPPI JR e MALHEIROS, 2005; MOTA e VON SPERLING, 2009).

No planejamento e na gestão sustentável dos recursos hídricos, é importante destacar que as águas residuárias tratadas, desempenham um papel fundamental. Das principais fontes de consumo e desperdício de água, o esgoto

doméstico se destaca pelo desperdício não só de água, mas de nutrientes que poderiam ser destinados para outros fins (PHILIPPI JR e MALHEIROS, 2005).

Os níveis de tratamento de águas residuárias, geralmente são quatro: tratamento preliminar, primário, secundário e terciário (VON SPERLING, 2005; MOTA, 2006). O tratamento preliminar é constituído por processos físicos, onde se busca a remoção dos materiais flutuantes através da utilização de gradeamento, caixas de remoção de areia, óleos e graxas. No tratamento primário, que também é composto por processos físicos, procede-se a remoção de sólidos suspensos sedimentáveis e matéria orgânica, utilizando-se de peneiramento e sedimentação. No tratamento secundário, além dos processos físicos através do uso de sedimentadores, há processos biológicos. Nesses últimos, podem ser utilizados dois tipos diferentes de tratamento: aeróbicos e anaeróbios. Esse tratamento é projetado para remover matéria orgânica e sólidos em suspensão e dissolvidos. Já o tratamento terciário é projetado para maior eficiência na remoção de nutrientes, principalmente fósforo e nitrogênio, e microrganismos patogênicos, conforme Tabela 1 (BARROS et al., 1995; PHILIPPI JR e MALHEIROS, 2005; MOTA, 2006). Neste último tipo de tratamento podem-se utilizar lagoas com macrófitas (MOHEDANO, 2004; TAVARES, 2008; MAIA, 2008, NASR et al., 2009).

**Tabela 1** Eficiência de remoção de poluentes, conforme nível de tratamento.

NÍVEL DE TRATAMENTO	EFICIÊNCIA MÉDIA DE REMOÇÃO (%)			
	DBO	N	P	Coliformes
Preliminar	0 - 5	0	0	0
Primário	30 - 40	10 - 25	10 - 20	30 - 40
Secundário	70 - 90	30 - 50	20 - 60	60 - 90
Terciário	97 - 99	95 - 99	95 - 99	>99

Fonte: VON SPERLING (2005); METCALF e EDDY (1991).

### 3.3 TRATAMENTO ANAERÓBIO

A tecnologia de reator anaeróbio foi inicialmente desenvolvida para tratar, em indústrias, águas residuárias concentradas. Após discussões sobre tecnologias apropriadas para países em desenvolvimento, esse tratamento foi sendo testado também, para tratar águas residuárias domésticas (KOOIJMANS et al., 1986).

No Brasil, os sistemas anaeróbios têm sido muito utilizados, devido principalmente às características peculiares a eles, tais como: baixo custo, simplicidade operacional e baixa produção de sólidos, aliadas ainda às condições ambientais do país, entre outras implicações (BARROS et al., 1995; CHERNICHARO et al., 2001; MOTA, 2006).

Em relação à DBO, os reatores anaeróbios, apresentam eficiência de remoção de até 70%. Dessa forma, o uso desses sistemas, sem o pós-tratamento não é indicado. Então, é necessário um pós-tratamento a nível secundário (BARROS et al., 1995; MOTA, 2006; CHERNICHARO et al., 2001). Quando os sistemas anaeróbios diversos são bem operados é possível encontrar as faixas de valores de DBO como as apresentadas na Tabela 2 (CHERNICHARO et al., 2001).

**Tabela 2** Valores comuns de DBO do efluente e de remoção em sistemas anaeróbios

SISTEMA ANAERÓBIO	DBO <sub>5</sub> DO EFLUENTE (mg/L)	EFICIÊNCIA DE REMOÇÃO DE DBO (%)
Lagoa anaeróbia	70 a 160	40 a 70
Reator UASB	60 a 120	55 a 75
Fossa séptica	80 a 150	35 a 60
Tanque Imhoff	80 a 150	35 a 60
Fossa séptica + filtro anaeróbio	40 a 60	75 a 85

Fonte: CHERNICHARO et al. (2001)

Os reatores anaeróbios, não conseguem a remoção de fósforo. Em relação aos compostos de nitrogênio, em tratamentos anaeróbios, não ocorre processo de nitrificação. Contudo, em decantadores de reatores anaeróbios, pode acontecer a desnitrificação, em especial quando esses reatores estão atrelados a unidades de pós-tratamento, as quais promovem a nitrificação (CAMPOS, 1999; CHERNICHARO et al., 2001).

Os indicadores microbiológicos apontam baixas eficiências na remoção de coliformes termotolerantes nesses reatores anaeróbios (CAMPOS, 1999).

Portanto, para aumentar a eficiência e viabilizar sistemas compostos por reator anaeróbio é importante que a ele se adicione unidades de pós-tratamento. Uma unidade experimental de pós-tratamento, por lagoa de polimento com chicanas, por exemplo, pode ser indicada como alternativa de pós-tratamento desses efluentes. No entanto, é importante que na escolha das alternativas desses pós-tratamentos, sejam considerados e aplicados critérios técnicos e econômicos (CHERNICHARO et al., 2001).

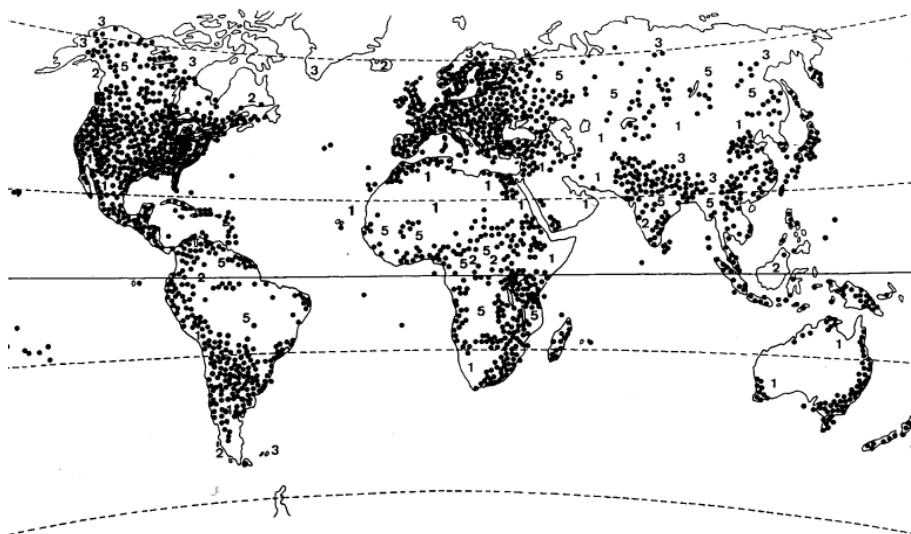
### 3.4 MACRÓFITAS AQUÁTICAS

#### 3.4.1 Caracterização das macrófitas

Para realizar pesquisa com espécies de macrófitas aquáticas é importante ter conhecimento das suas características, dos fatores limitantes para sua ocorrência, crescimento e manejo (TAVARES, 2008; MAIA, 2008).

O termo macrófita aquática, foi definido como plantas herbáceas que crescem na água, em solos cobertos por lâmina d'água ou em solos saturados com água (WEANER e CLEMENTS, 1983; ESTEVES, 1998).

As espécies de lemnas pertencem à família Araceae, e a subfamília Lemnoideae. Essas macrófitas são monocotiledôneas andróginas classificadas como plantas superiores, menores plantas vasculares do mundo e comumente confundidas com algas devido a esse reduzido tamanho (JOURNEY et al., 1993), que não excede os 0,5 cm de comprimento (MAIA, 2008). No mundo, são encontradas 38 espécies e cinco gêneros, enquanto que no Brasil essa é considerada uma família pequena, pois possui apenas quatro gêneros: *Spirodela*, *Lemna*, *Wolffiella* e *Wolffia* (LANDOLT, 1986) e treze espécies. Dentre essas, oito podem ser encontradas no Pantanal (POTT e CERVI, 1999). A distribuição da subfamília Lemnoideae está representada na Figura 2.



**Figura 2** Distribuição geográfica da subfamília Lemnoideae. Os números indicam limitações ao desenvolvimento por conta de regiões: 1 - desérticas; 2 - de alta pluviosidade; 3 - de muito frio; 5 - com poucos dados.

Fonte: LANDOLT (1986)

Popularmente as macrófitas da espécie *lemnas* são conhecidas como “lentilhas d’água” ou como “duckweeds” (erva-de-pato). Morfologicamente, as *lemnas* são simples, pois não possuem caules nem folhas verdadeiras, apenas têm uma ou poucas frondes ovóides e em cada uma delas há uma única raiz sem ramificações (POTT e CERVI, 1999; TSATSENKO e MALYUGA, 2002; SOUZA e LORENZI, 2005).

Ao serem comparadas com outras plantas, as *lemnas* possuem poucas fibras de 5 a 15% (SKILLICORN et al., 1993). Portanto, elas não requerem estruturas para sustentar as suas frondes e não possuem caule (BARÉA e SOBRINHO, 2006; MAIA, 2008). Dessa maneira, a maior parte de seu tecido é fotossinteticamente ativo e devido à grande atividade metabólica proporcionada por esse tecido, apresentam taxas de produção elevadas (TAVARES et al., 2008).

Essa espécie de macrófita pode se reproduzir em águas residuárias, especialmente por essas serem ricas em nutrientes. A reprodução de *lemnas* pode ser tanto sexuada como assexuada. A reprodução sexuada é muito rara devido à floração de *lemnas* ser rara também, como são igualmente incomuns as sementes e frutos. Durante o seu ciclo de vida, que pode abranger de dez dias a várias semanas, uma única fronde possui capacidade reprodutiva de vinte a cinquenta vezes ciclos de vida (SKILLICORN et al., 1993). A reprodução assexuada se dá por brotamento e, assim, as *lemnas* propagam-se vegetativamente e são encontradas comumente na superfície de águas paradas e ricas em nutrientes (SKILLICORN et al., 1993; SOUZA e LORENZI, 2005).

Apresentam elevadas taxas de crescimento e, desse modo, frequentemente dobram sua biomassa em dois a quatro dias, a depender da disponibilidade de nutrientes, da temperatura e luminosidade (SKILLICORN et al., 1993; MAIA, 2008; FRANÇA, 2008).

A produtividade de *lemnas* pode encontrar limitação em climas tropicais, visto que essas macrófitas apresentam taxas ótimas de crescimento em locais com temperaturas entre 25° C a 31° C (BARÉA e SOBRINHO, 2006).

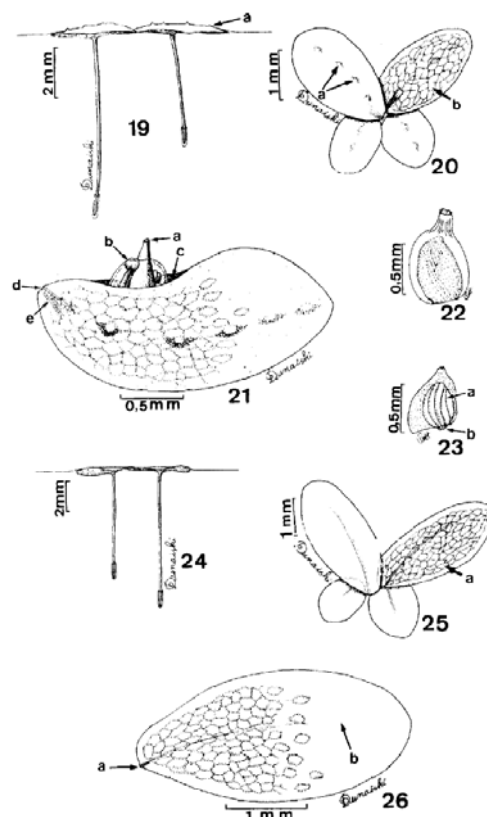
Sendo assim, a temperatura é fator significativo que pode afetar a implantação e o desempenho de sistemas com *lemnas*, pois em temperaturas abaixo de 17°C e acima de 35°C, a remoção de nutrientes e a produção de biomassa diminuem (SMITH e MOELYOWATI, 2001). Portanto, essas taxas de crescimento no verão são comumente altas, enquanto que durante o inverno elas são levemente diminuídas (PORATH e POLLOCK, 1982; EL-SHAFI et al., 2007). Para que essas macrófitas alcancem produção ótima, as condições que devem existir são: pH entre 6,5 e 7,5, temperatura de 27°C, nutrientes adequados no meio

do cultivo, espaço suficiente para seu desenvolvimento e proteção contra as correntes de água ou de vento (FRANÇA, 2008).

Portanto, as lemnas têm papel importante na natureza, pois são bioindicadoras de águas eutrofizadas e ao mesmo tempo assumem a função de despoluidoras de águas nessas condições (LANDOLT e KANDELER, 1987; TSATSENKO e MALYUGA, 2002). Deste modo, elas são utilizadas em lagoas para pós-tratamento de efluentes ricos em nutrientes (HENRY-SILVA e CAMARGO, 2002; RAN et al. 2004; ZIMMO et al., 2004; MOHEDANO et al., 2005).

### 3.4.2 Descrição da espécie utilizada neste estudo: *Lemna valdiviana* Phil.

A *Lemna valdiviana* Phil. (Figura 3) é utilizada em pós-tratamentos de águas residuárias, em lagoas relativamente rasas, por conta de suas características, pois, possui grande capacidade de crescimento vegetativo, associada à grande produção de biomassa, remoção de nitrogênio e fósforo (POTT e CERVI, 1999).



**Figura 3** Desenho esquemático de *Lemna valdiviana* Phil.: para demonstração das pequenas dimensões das estruturas desse grupo botânico.  
Fonte: POTT e CERVI (1999)

A classificação taxonômica da espécie em estudo encontra-se a seguir:

Reino: Plantae

Divisão: Angiospermae

Classe: Monocotyledoneae

Ordem: Arales

Família: Araceae (Lemnaceae)

Subfamília: Lemnoideae

Gênero: *Lemna*

Espécie: *Lemna valdiviana* Phil.

Assim, os autores descrevem a *Lemna valdiviana* Phil. da seguinte maneira:

*“Frondes flutuantes ou levemente submersas, oblongoovadas, assimétricas na base, 2,0-3,8 x 1,2-2,0 mm, 1,5-2,5 vezes mais longa que larga, 4(-10) unidas entre si; 1 camada de células com aerênquima, de 2/3 da base até o ápice da fronde; raras papilas na linha mediana do lado dorsal, visíveis só em material vivo; 2 cavidades reprodutivas e vegetativas, transparentes na borda com rafídeos; apenas 1 nervura na linha mediana, entre o nó e próximo ao ápice da fronde (até 3/4 da mesma). Raiz até 22 mm compr., com película cilíndrica, não alada, na base. Estames de tamanhos diferentes (maturação desigual), 0,25 mm compr. Ovário 0,23 x 0,12 mm, com 1 rudimento seminal. Fruto 0,37-0,43 x 0,23-0,25 mm, estilete persistente; 1 semente, de 0,57 x 0,23 mm, cor castanha, com 15-29 costeletas longitudinais e muitas estrias transversais”.*

POTT e CERVI (1999)

### 3.4.3 Tratamento de águas residuárias em lagoa com lemnas

As lagoas com lemnas podem ser empregadas no tratamento secundário e terciário de efluentes, devido sua capacidade de remover e reutilizar nutrientes (KÖRNER et al., 1998), função essa, que não pode ser alcançada com lagoas de estabilização, as quais apesar de serem sistemas de baixos custos e apresentarem adequadas taxas de remoção de patógenos e substâncias orgânicas (VON SPERLING, 1996), não conseguem reutilizar nutrientes, como fazem bem as lagoas com lemnas (KÖRNER et al., 1998; RAN et al., 2004; ZIMMO et al., 2004; TAVARES, 2008).

O tratamento de águas residuárias em lagoas com lemnas tem sido muito empregado, também, por reduzir algas presentes nesse sistema, bem como da sua capacidade de fixar nutrientes em sua biomassa, apresentando alto teor proteico (ESTEVEZ e CAMARGO, 1986; ZIMMO et al., 2004; MOHEDANO, 2004). Cabe ressaltar que, os processos de remoção de nutrientes com o uso de macrófitas aquáticas, ocorrem não somente pela absorção direta por elas realizada, mas também por meio de uma combinação de mecanismos físicos, químicos e biológicos, tais como: sedimentação, absorção e transformação do nitrogênio por bactérias (nitrificação e desnitrificação) (HENARES, 2008). Os principais mecanismos de remoção de poluentes realizados nas lagoas com macrófitas, que unem processos físicos, químicos e biológicos estão evidenciados na Tabela 3 (MAVIOSO, 2010).

**Tabela 3** Principais mecanismos de remoção de poluentes observados em lagoas com macrófitas.

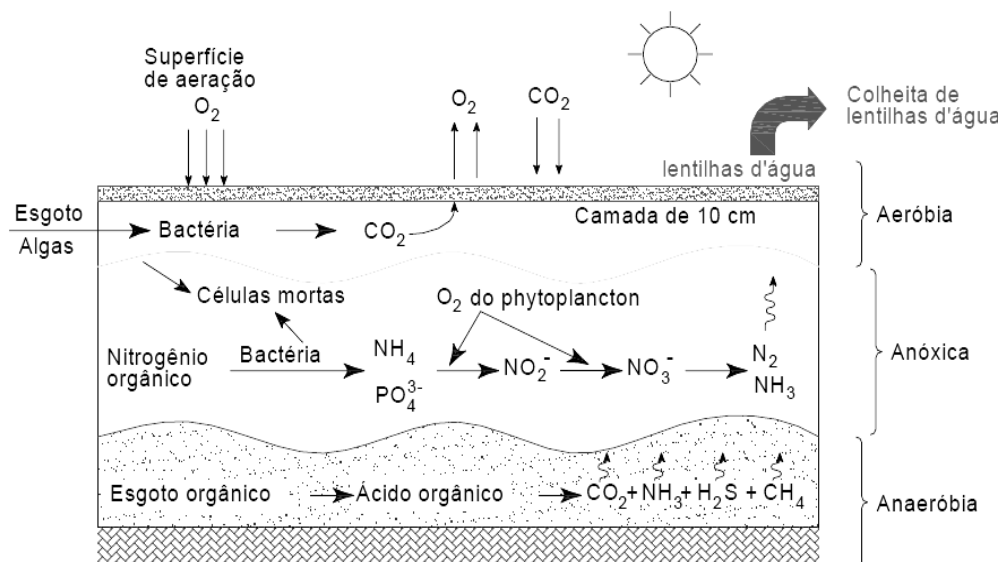
PROCESSOS	MECANISMO DE REMOÇÃO
Físicos	Sedimentação Volatilização
Químicos	Radiação ultravioleta Adsorção Trocas iônicas
Biológicos	Decomposição microbológica Assimilação microbológica Assimilação pelas plantas Decaimento natural Predação microbológica

Fonte: MAVIOSO (2010)

Sendo assim, as substâncias presentes na lagoa podem ser removidas com a combinação de processos físicos, químicos e biológicos, incluindo sedimentação, precipitação, filtração das partículas pelo substrato e raízes das plantas, assimilação pelas plantas e transformações biológicas, mecanismos considerados relativamente simples (MAVIOSO, 2010).

Essa capacidade depuradora de águas residuárias é ampliada quando as lemnas se associam com bactérias anaeróbias e aeróbias. No tratamento de efluentes, a manta de lemnas que cobre a superfície da lagoa, resulta em três zonas diferenciadas: a zona aeróbia, a zona anóxica e a zona anaeróbia (Figura 4) (SMITH e MOELYOWATI, 2001).





**Figura 4** Diagrama de processos biológicos de lentilhas d'água.  
 Fonte: SMITH e MOELYOWATI (2001)

A sombra originada pela cobertura vegetal, dificulta a penetração de luz na água e, conseqüentemente, inibe a atividade fotossintética do fitoplâncton. Assim, as lagoas com lentilhas contribuem para a redução do crescimento das algas, o que também reduz o oxigênio nessa água (SMITH e MOELYOWATI, 2001; SECO, 2008).

Ao comparar sistemas de tratamentos de águas residuárias sem lentilhas, com os sistemas de tratamento com lentilhas, pode-se afirmar que há melhora na degradação da matéria orgânica, em termos de demanda química de oxigênio (DQO) e demanda de bioquímica de oxigênio (DBO) (KÖRNER et al., 1998; MAIA, 2008). Pesquisas sobre degradação da matéria orgânica, em sistema coberto com lentilhas para tratar águas residuárias domésticas, mostram que depois de um tempo de remoção, os pesquisadores observaram que o desempenho no sistema com lentilhas foi de 74 a 78%, enquanto que, no sistema controle (sem lentilhas) foi de 52 a 60% (KÖRNER et al., 1998). Quando se compara dados de remoção de nutrientes obtidos em diferentes estações do ano, confirma-se que a eficiência de remoção de N e P é maior durante o verão, alcançando 98% e 80% respectivamente, enquanto que, no inverno há um decréscimo desses valores, alcançando 44% e 45% respectivamente para N e P (EL-SHAFI et al., 2007).

Em tratamentos operados com tempos de detenção hidráulica (TDH) de 10 e 15 dias, os melhores resultados apareceram com TDH de 15 dias, onde foi possível remover 73,4% de nitrogênio e 65% de fósforo e produzir em média 105 kg/ha/dia de lenha rica em proteína, e alcançar remoção de coliformes termotolerantes entre 3 a 5 logs (NASR et al., 2009).

A macrófita da espécie *lemna* possui alta capacidade em tolerar elevados níveis de nutrientes, como os comumente encontrados em águas residuárias domésticas, e tem acelerada taxa de crescimento que, conseqüentemente, promove uma absorção elevada de nutrientes nessas águas (RAN et al., 2004; BARÉA e SOBRINHO, 2006). Na absorção de nitrogênio, por exemplo, essa espécie demonstra afinidade e preferência pelo nitrogênio na forma de íons de amônio (SKILLICORN et al., 1993). Essa grande afinidade pela assimilação de nitrogênio amoniacal, potencializa a produção de uma biomassa com alto teor proteico (ALAERTS et al., 1996), viabilizando sua utilização como fonte de nutrição animal (ZIMMO et al., 2004; TAVARES, 2008; FRANÇA, 2008).

A importância das macrófitas na depuração ou polimento de águas residuárias (RAN et al., 2004; BARÉA e SOBRINHO, 2006), com a absorção dos íons de amônio, se dá porque o aumento e lançamento desses em mananciais, pode resultar em eutrofização e formação de nitratos nas águas (ORON et al., 1988). Sendo assim, a utilização da macrófita flutuante *lemna*, se justifica especialmente porque nas pesquisas até então realizadas (MOHEDANO, 2004; TAVARES, 2008; FRANÇA, 2008; MAIA, 2008; NASR et al., 2009), ela demonstra ter essa capacidade assimiladora e de polimento de algumas substâncias presentes e, em convertê-las em biomassa de alto valor proteico podendo assim, ser introduzida como suplemento alimentar animal (MOHEDANO et al., 2005).

A sustentabilidade e viabilidade de *Lemna valdiviana* Phil., aplicada para esse fim, foi testada por Tavares et al. (2008), quando esses verificaram o desempenho dessa macrófita no tratamento de efluentes de suinocultura e sua contribuição para a sustentabilidade dessa atividade. França (2008) verificou em seus estudos a boa qualidade nutricional da *Lemna valdiviana* Phil., aliada a baixos custos, sugerindo testes de digestibilidade com peixes. Mohedano et al. (2010), avaliaram o potencial de reúso do efluente de uma pequena produção de suínos, após o tratamento em um sistema com lagoas de macrófitas lemnáceas e, depois de um ano de monitoramento, obteve excelentes resultados no polimento do efluente, que, para as variáveis analisadas, apresentaram as seguintes eficiências: NTK 98%, P= 94%, DBO<sub>5</sub>= 95%, ST = 92% e *Escherichia coli* (*E. Coli*) = 2 log.

As lagoas cobertas com lemnas apresentam muitas vantagens, mas também algumas desvantagens quando comparadas com outros processos de tratamento convencional de esgoto (Tabela 4) (SMITH e MOELYOWATI, 2001).

**Tabela 4** Vantagens e desvantagens do tratamento de águas residuárias em lagoa com lemnas.

VANTAGENS	DESVANTAGENS
Alta remoção de nutrientes	As lagoas com lemnas não podem receber cargas orgânicas elevadas sem que haja um pré-tratamento;
Inibição do crescimento das algas	Apresentam baixa remoção de patogênicos;
Diminuição de odores e proliferação de insetos	Devem ser implantadas em regiões onde não haja muito vento;
Redução de produtos utilizados na desinfecção	O cultivo das lemnas provoca efeito negativo na sua utilização em locais onde o esgoto pode conter compostos orgânicos tóxicos e metais pesados;
Diminuição do investimento inicial	Custo de manutenção e operação maior que o das lagoas facultativas;
Possibilidade de reúso do efluente na indústria e agricultura; e de gerar receitas adicionais ocasionadas pela venda da biomassa produzida.	Áreas ocupadas maiores que as ocupadas por sistemas convencionais.

Fonte: Adaptada de BARÉA e SOBRINHO (2006).

### 3.5 DESEMPENHO DO SISTEMA DE LEMNAS NA RECICLAGEM DE NUTRIENTES E PRODUÇÃO DE BIOMASSA

Diversos estudos têm dado atenção ao desempenho das macrófitas aquáticas para o tratamento e reciclagem de nutrientes oriundos de efluentes domésticos (RAN et al., 2004; POLISEL, 2005), pela sua capacidade de assimilar rapidamente os nutrientes e de convertê-los diretamente em biomassa (ALAERTS et al., 1996; BARÉA e SOBRINHO, 2004; TAVARES, 2008). Essas e outras pesquisas apontam a eficiência que tratamentos de águas residuárias com lemnáceas podem alcançar (Tabela 5).

**Tabela 5** Concentrações de nutrientes em águas residuárias na entrada e saída de uma lagoa coberta com lemnas.

PARÂMETRO	AFLUENTE	EFLUENTE	REMOÇÃO%
DBO <sub>5</sub> (mg/L)	125	5	96
N (mg/L)	10,5	0,03	74
P TOTAL (mg/L)	1,95	0,4	77
PO <sub>4</sub> (mg P/L)	0,95	0,05	95

Fonte: Adaptada de ALAERTS et al. (1996).

Apesar de existir no mundo uma variedade imensurável de ingredientes que podem ser testados como substitutos alimentares para animais, poucos apresentam

algum potencial nutritivo e a grande maioria desses tem limitação quanto à disponibilidade em larga escala, valor nutricional e preço. No entanto, macrófitas aquáticas da subfamília Lemnoideae foram testadas como fontes proteicas para complementar a alimentação animal, mostrando-se promissoras, devido ao custo reduzido e alta qualidade nutricional dessas (ORON et al., 1988; MOHEDANO, 2004; TAVARES et al., 2008; XU e SHEN, 2011; MOHEDANO et al., 2012 b).

Quando essas taxas de crescimento acelerado são associadas a capacidade das lemnas em absorver nutrientes, há uma enorme potencialização do uso dessa macrófita para o tratamento de águas residuárias (SKILLICORN et al., 1993). Essa capacidade de absorção de nutrientes das lemnas lhes confere a composição que possibilita a sua utilização como suplemento ou fonte dietética para animais, incluindo aves, suínos, e bovinos (SKILLICORN et al., 1993; TAVARES et al., 2008).

As taxas de produção de proteínas das lemnas por hectare são 10 vezes maiores que as da soja. E a sua produção fresca vai de 550 a 1200 kg/ha.dia (BARÉA e SOBRINHO, 2006). Portanto, são atrativas fontes de alimento quando comparadas a outras culturas como soja, arroz e o milho, onde a maior parte da biomassa é desprezada no beneficiamento (TAVARES, 2004).

Águas residuárias possuem excesso de nutrientes que eutrofizam o ambiente, a base da tecnologia com lagoa de lemnas, que é eficaz para tratamento dessas águas, ocorre quando as lemnas são colhidas e trazem consigo os nutrientes e minerais antes presentes no sistema, nutrientes esse que são convertidos em biomassa de grande valor nutricional (JOURNEY et al., 1993).

Dentre essas macrófitas flutuantes, pode-se destacar as da espécie *Lemna valdiviana* Phil. como responsáveis por uma grande produtividade primária, atuantes na ciclagem de nutrientes, utilizando-os para seu desenvolvimento e crescimento, e assim, apresentando alto potencial de produção de biomassa. Dessa maneira, sua biomassa tem grande valor nutricional com potencial para uso na alimentação ou na formulação de rações animais (FRANÇA, 2008; TAVARES et al., 2008).

## 4 METODOLOGIA

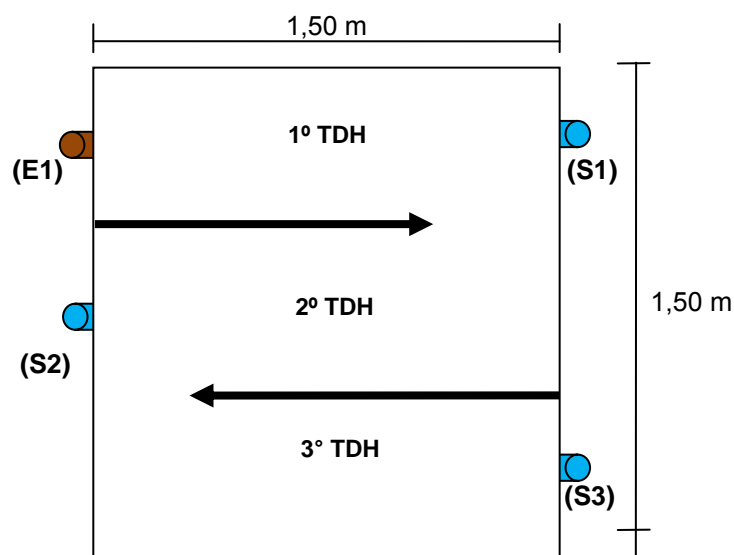
### 4.1 LOCALIZAÇÃO

O estudo foi conduzido na Universidade Estadual de Feira de Santana (UEFS), (coordenadas geográficas de 12° 16' 24" Sul, 38° 57' 20" Oeste, altitude 232 m). As características climáticas da região apresentam temperatura média anual de 24,5°C e pluviosidade média de 848 mm por ano. A pesquisa experimental ocorreu de março e a junho de 2013, em duas Fases (I e II).

### 4.2 DELINEAMENTO EXPERIMENTAL

#### 4.2.1 Descrição do aparato experimental

Dentro do campus da UEFS, construiu-se um tanque de alvenaria com duas chicanas, o qual simulou uma lagoa de polimento coberta com lemnas, para a realização do experimento (Figura 5).



Pontos de coletas de amostras de água:

- E1 = Entrada do sistema.
- S1 = Saída da primeira câmara.
- S2 = Saída da segunda câmara.
- S3 = Saída da terceira câmara.

**Figura 5** Modelo do tanque que simulou a lagoa com lemnas com diferentes Tempos de Detenção Hidráulica.

As dimensões da lagoa estão expressas na Tabela 6

**Tabela 6** Dimensões da lagoa de lemnas.

DIMENSÕES LAGOA DE LEMNAS	
Área (m <sup>2</sup> )	2,25
Largura (m)	1,5
Comprimento (m)	1,5
Chicanas (und.)	2,0
Profundidade total (m)	0,6
Profundidade da água (m)	0,5
Volume (m <sup>3</sup> )	1125

O experimento se deu pela operação da lagoa de lemnas para o polimento do afluente doméstico originário da Residência Universitária (RU/UEFS). O sistema de tratamento de esgoto doméstico da RU é composto por fossa séptica e sumidouro. O afluente gerado foi submetido a tratamento anaeróbio em filtro anaeróbio de fluxo ascendente, confeccionado de acordo esquema e dimensões apresentado na Figura 6 e Tabela 7



**Figura 6** Filtro anaeróbio: bombona com conduítes (20 mm), cortados em tocos de 2 cm e bomba volumétrica (marca Rule - 360 GPH).

**Tabela 7** Dimensões do filtro anaeróbio de fluxo ascendente.

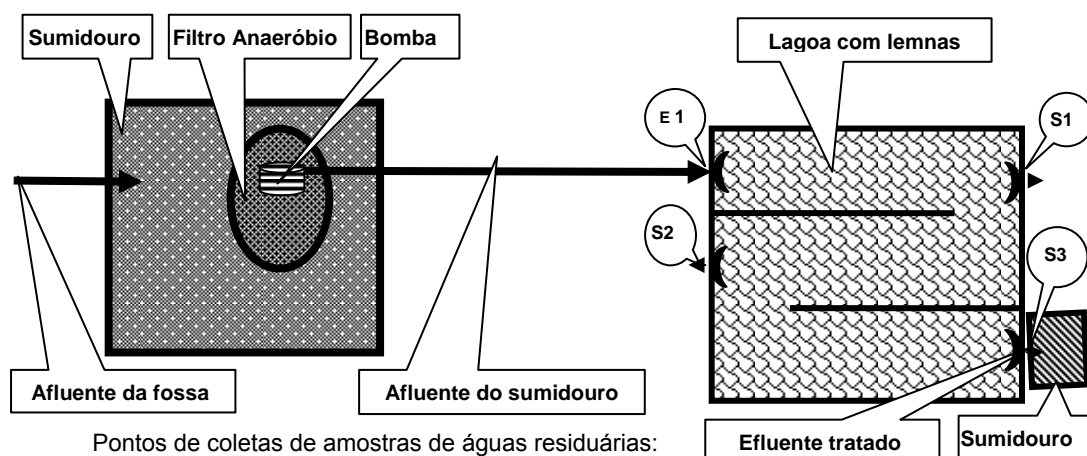
DIMENSÕES DO FILTRO	
Capacidade	50 L
Tampa	Fixa
Altura	58 cm
Comprimento	50 cm
Diâmetro	34 cm
Espessura do meio suporte	40 cm

O filtro anaeróbio foi colocado dentro do sumidouro, reservatório do sistema de tratamento de esgoto da RU. O afluente doméstico desse sumidouro, por fluxo ascendente, penetrou o filtro anaeróbio por furos feitos no fundo da bombona, atravessou o meio suporte (conduítes de 20 mm, cortados em tocos de 2 cm), e foi bombeado por bomba volumétrica de drenagem de embarcação (bomba de porão – marca Rule, de 360 GPH), afixada na parte superior da bombona, e foi lançado por essa para alimentar a lagoa de lemnas.

Durante todo o período experimental, dividido em duas fases distintas (I e II), de acordo com programação realizada por temporizador digital, as cargas do afluente pré-tratado foram aplicadas das oito às vinte horas, totalizando sete cargas por dia, com intervalos entre elas de duas horas:

- Fase I: no período de março a abril de 2013, foram lançados 75 L/d (sete cargas com duração de dois minutos cada), e TDH de 5, 10 e 15 dias (com nível de água da lagoa de 0,50 m nos três TDH).
- Fase II: no período de maio a junho de 2013 lançados 140 L/d (sete cargas diárias, com duração de cinco minutos cada), e TDH de 2,7, 5,4 e 8,0 dias. O aumento no volume do afluente lançado para a lagoa (Fase II) foi feito para reajustar o nível de água (0,50 m) da lagoa, visto que esse foi rebaixado por conta da alta evaporação e coletas.

O efluente do pós-tratamento foi lançado em um sumidouro, construído para esse fim ao lado da lagoa. O aparato experimental completo está representado no seguinte diagrama esquemático (Figura 7).



Pontos de coletas de amostras de águas residuárias:

- E1 = Entrada do sistema.
- S1 = Saída do primeiro compartimento.
- S2 = Saída do segundo compartimento.
- S3 = Saída do terceiro compartimento.

**Figura 7** Diagrama esquemático do sistema de tratamento de águas residuárias domésticas através de lagoa com lemnas.

A macrófita usada para colonizar a lagoa foi coletada em um dos decantadores da ETE Jacuípe II, localizada no Bairro Nova Esperança, no município de Feira de Santana, operada pela Empresa Baiana de Saneamento (EMBASA). A identificação dessa macrófita foi feita no laboratório de botânica da UEFS, usando chave de identificação específica (POTT e CERVI, 1999).

Os problemas com as temperaturas altas e com a competição com as algas, observados durante as diversas tentativas de estabelecimento e desenvolvimento das lemnas na lagoa, que se deram de outubro a março de 2013, serviram para nortear as modificações necessárias, que realizadas permitiram a continuidade desse projeto. Sendo assim, para minimizar os fatores limitantes de estabelecimento da lemna no tanque fez-se:

- Sombreamento de cinquenta por cento (50%), com tela de polietileno na cor preta, para reduzir a radiação solar incidente sobre as plantas, a temperatura, a evaporação da água e amortecer ventos fortes;
- Revestimento externo do tanque com placas de isopor (50 mm), para amenizar o calor excessivo e ação direta dos raios solares nas paredes do mesmo;
- Isolamento do tanque com cerca de arame e compensado para impedir a entrada de animais que bebiam (cães e cavalos) e alimentavam-se das macrófitas (cavalos).

Todas as adaptações para minimizar os fatores limitantes, estão na Figura 8.



**Figura 8** Sistema de tratamento: sombreamento com tela (50% sombra), revestimento do tanque com placas de isopor (50 mm) e o uso de cerca de compensado.



#### 4.3 MONITORAMENTO DO SISTEMA EXPERIMENTAL

O monitoramento da eficiência do sistema de tratamento foi feito pela amostragem do afluente e efluente, em quatro pontos selecionados correspondendo diferentes tempos de detenção hidráulica (TDH), a fim de conhecer a dinâmica dos parâmetros indicadores da qualidade do mesmo (Tabela 8).

**Tabela 8** Frequência dos parâmetros

TIPO DE PARÂMETRO	FREQUÊNCIA DE AMOSTRAGEM	VARIÁVEIS ANALISADAS
Físico-químicos (11)*	Semanal	pH, T°, OD, DBO <sub>5</sub> , SST
Nutrientes na água (20)*	Duas vezes na semana	Fósforo
Nutrientes na lemna (20)*	Duas vezes na semana	Nitrogênio e Fósforo
Microbiológicos (5)*	Quinzenal	Coliformes Termotolerantes
Manejo de lemnas (20)*	Duas vezes na semana	Produção de Biomassa

\*Entre parênteses o número de campanhas de cada parâmetro

A verificação da temperatura foi realizada *in loco*, no momento das coletas, com termômetro. Para os demais parâmetros, amostras da água e da macrófita foram coletadas e transportadas para o Laboratório de Saneamento (LABOTEC I), no Departamento de Tecnologia da UEFS, e analisadas segundo os padrões estabelecidos pelo Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (APHA, 1998). A descrição dos métodos encontra-se na Tabela 9.

**Tabela 9** Métodos analíticos físico-químicos e microbiológicos.

VARIÁVEIS	MÉTODO	NORMA	FREQUÊNCIA
Oxigênio Dissolvido (OD)	Winkler modificado pela azida sódica	NBR 10559/1988	Semanal
Sólidos Suspensos Totais (SST)	Gravimétrico.	NBR 10664/1989	Semanal
pH	Eletrométrico - pHmetro de bancada	NBR 14339/1999	Semanal
DBO <sub>5</sub>	Respirométrico - OXITOP	APHA, 1998	Semanal
Nitrogênio (NTK)	Digestão, destilação e titulação	APHA, 1998	Duas vezes na semana
Fósforo (P)	Colorimétrico do Ácido Ascórbico	APHA, 1998.	Duas vezes na semana
Coliformes termotolerantes (NMP/100ml)	Método do substrato cromogênico Colilert INDEX®	APHA, 1998	Quinzenal

Os dados climáticos foram obtidos na Estação Climatológica da UEFS. As variáveis coletadas foram: temperatura e pluviosidade.

#### 4.3.1 Manejo e avaliação do efluente

As coletas de amostras de afluente e efluentes foram realizadas semanalmente em todas as etapas do sistema: antes do tratamento na entrada do sistema (E1), e depois do tratamento em suas três saídas (S1, S2, e S3). Foram encaminhadas para o Laboratório de Saneamento, no mesmo dia da coleta, para os procedimentos de análises físico-químicas (pH, Temperatura, OD, DBO<sub>5</sub>, SST, P) e microbiológicas (Coliformes Termotolerantes), segundo *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (APHA, 1998).

#### 4.3.2 Manejo de remoção e avaliação da biomassa

##### 4.3.2.1 Manejo de remoção da biomassa de lemna

Para realizar a avaliação da biomassa da macrófita fez-se o manejo das macrófitas na lagoa de tratamento, com coletas de amostras duas vezes na semana, a partir da retirada de duzentos gramas em cada câmara, sendo assim, seiscentos gramas (600g) por coleta, totalizando, portanto mil e duzentos gramas (1200g) por semana durante todo o período experimental, que teve início em março e término em junho de 2013.

As lemnas foram coletadas da superfície da lagoa, com o auxílio de uma peneira, deixada nela até cessar o gotejamento. Com uma balança verificou-se o peso fresco dessas. Depois foram armazenadas em sacos plásticos e encaminhadas ao laboratório para secar na estufa a 50°C por 24 h. Para posterior pesagem e verificação do peso seco.

Em condições favoráveis com concentração alta de nutrientes, luminosidade e temperatura adequadas, as lemnas dobram em massa de três a quatro dias e cobrem completamente a superfície da água. (HANCOCK & BUDDHAVARAPU, 1993). Assim, para a determinação da quantidade de biomassa de lemnas

produzida e avaliação das taxas de crescimento foi utilizado o método do quadrado de PVC (20 cm de lado), o qual foi disposto no tanque com dois gramas de lemna em seu interior. A cada quatro dias as lemna presentes nesse quadrado foram coletadas e pesadas.

#### 4.3.2.2 Avaliação da biomassa de lemna

No laboratório de Saneamento da UEFS (LABOTEC I/UEFS), as amostras de biomassa de *Lemna valdiviana* Phil., após secagem, pesagem e moagem foram analisadas quimicamente para determinação dos teores de: fósforo e nitrogênio total Kjeldahl (NTK). Para a determinação dos teores de fósforo, amostras de lemna foram submetidas à solubilização em ácido diluído de acordo com Silva, (1999) e, depois determinadas pelo método do Ácido ascórbico (APHA 1998). Para o NTK, foi realizada a digestão sulfúrica, seguida de determinação pelo método Kjeldahl. A metodologia utilizada para essas análises seguiu as recomendações de APHA (1998).

Além dessas análises, também se realizou a determinação do teor de proteína bruta (PB%). Assim, para calcular o teor do percentual de proteína bruta (PB%) da macrófita *Lemna valdiviana* Phil., o teor de nitrogênio percentual (N%) encontrado nessa macrófita foi multiplicado pelo fator 6,25 (Equação 1). Esse fator foi estabelecido tendo em vista que, 100 g de proteínas têm em média 16 g de nitrogênio então,  $100/16 = 6,25$ .

(Equação 1)

$$PB\% = N\% \times 6,25$$

Os resultados foram obtidos através dessa fórmula e expressos em porcentagem de proteína.

A partir da desidratação em estufa a 50°C por 24h, no laboratório, obteve-se o peso seco da lemna (massa seca). Para quantificar a produção de proteínas da lemna, multiplicou-se esse peso seco encontrado, pelo percentual de proteína da biomassa dessa macrófita.

### 4.3.3 Tratamento dos dados

A eficiência de remoção das variáveis analisadas pelo sistema de tratamento da pesquisa foi calculada com base nos valores médios das variáveis de entrada e saídas do sistema de tratamento (Equação 2).

(Equação 2)

$$E\% = \frac{Af - Ef}{Af} \times 100$$

Em que E é a eficiência de remoção em percentual (%), Af é a concentração de entrada (afluente) e Ef é a concentração de saída (efluente) do nutriente.

Os dados também foram tratados estatisticamente, para determinar os valores médios, desvio padrão, elaboração de gráficos representativos, analisar e interpretar os dados numéricos das amostras coletadas ao longo do monitoramento. Para tanto foi utilizada a análise de variância, seguida do método de Tukey para comparações múltiplas, quando necessário, com nível de significância de 5%.

## 4.4 DADOS CLIMATOLÓGICOS E CARACTERIZAÇÃO DO AMBIENTE

### 4.4.1 Precipitação durante o período experimental Fase I e II (março – junho).

Durante o período experimental, marços a junho de 2013 foram coletados os dados de precipitação, os quais estão apresentados na Figura 9.



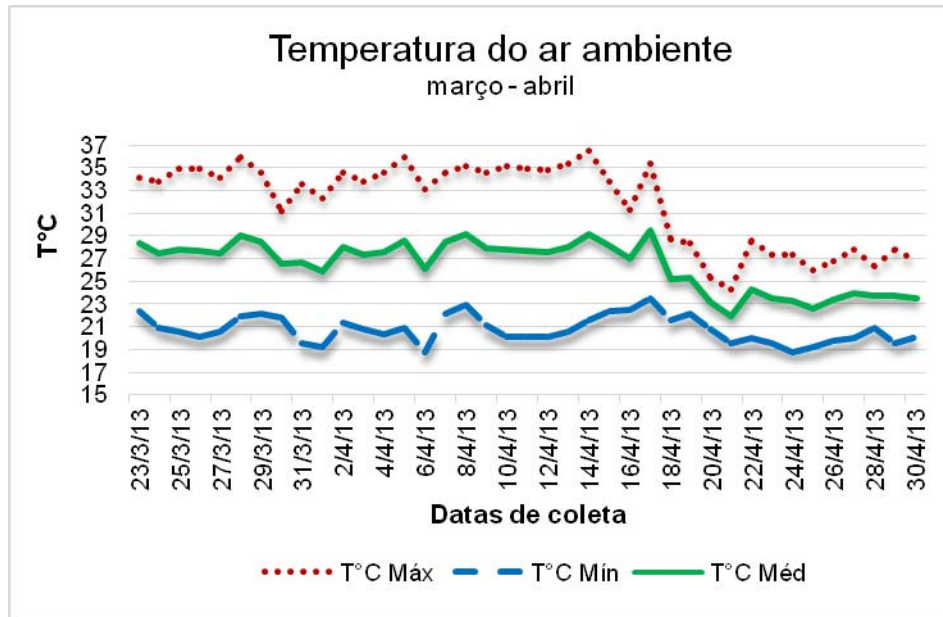
**Figura 9** Valores de precipitação durante o período experimental, março – junho de 2013.

A precipitação influi na temperatura da água e no tempo de detenção hidráulica, conseqüentemente, pode afetar a eficiência de remoção do tratamento (KUSCHK et al., 2003). A chuva pode provocar a diluição das substâncias presentes nas águas residuárias domésticas, com exceção dos sólidos em suspensão e da matéria orgânica, devido re-suspensão do sedimento.

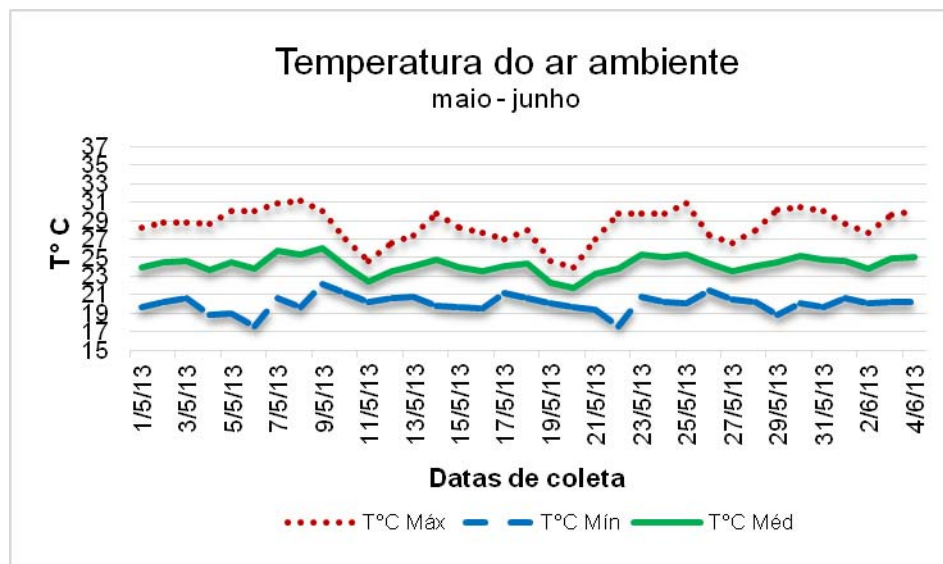
#### 4.4.2 Temperatura do ambiente no período experimental: março – junho

É importante analisar a temperatura, pois essa apresenta relação direta com o metabolismo dos microrganismos. De maneira que, no ambiente aquático, quanto maior for a temperatura da água, maior será a taxa metabólica dos microrganismos que o habita, podendo acarretar a aceleração dos processos de biodegradação da matéria orgânica, bem como, a assimilação de nutrientes e o consumo do oxigênio dissolvido nesse meio (APHA, 1998).

No início do experimento a temperatura máxima da água, chegou a ultrapassar 35°C, mas a partir de meados de abril se manteve abaixo de 30°C. A temperatura do ar ambiente, esteve por quase todo o restante do período experimental, abaixo dos 30°C e isso favoreceu o crescimento das macrófitas em estudo. Os valores de temperatura máxima, mínima e média do ambiente durante o período do experimento estão apresentados na Figura 10 e Figura 11.



**Figura 10** Valores de temperatura máxima, mínima e média do ar ambiente durante a Fase I (março – abril), 2013.



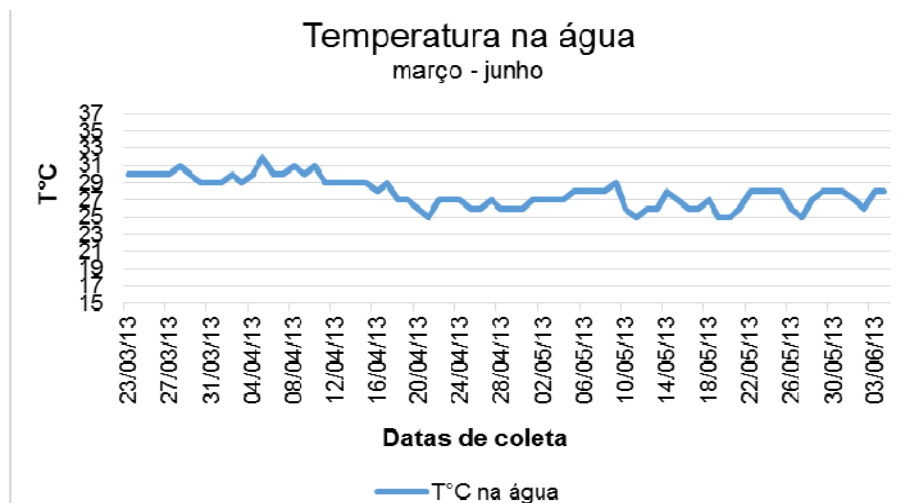
**Figura 11** Valores de temperatura máxima, mínima e média do ar ambiente durante a Fase II (maio – junho), 2013.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1 AVALIAÇÃO DA ÁGUA

#### 5.1.1 Temperatura na água da lagoa

As temperaturas na água da lagoa foram também verificadas durante todo o período experimental: março – junho de 2013 (Figura 12).



**Figura 12** Valores de temperatura na água da lagoa durante o período: março - junho de 2013.

Com relação à variação da temperatura (amplitude térmica) na água da lagoa, ao longo do período experimental (Fase I e II), observou-se que essa foi atenuada em aproximadamente 3 °C, e em quase todo o restante do período de estudo, manteve-se entre 27 e 28,5 °C, o que representou um benefício para a permanência das lemnas, especialmente por conta das medidas adotadas para amenizar essa temperatura.

No entanto, o valor de temperatura inicialmente encontrado estava acima do valor ideal, que é de 27 °C, portanto pode-se inferir que a temperatura teve influência na produção de *Lemna valdiviana* Phil., assim como no tratamento por elas promovido. Apesar das lemnas se reproduz a temperaturas que variam de 6 a 33 °C, o valor ideal para essa macrófita é de 27 °C (JOURNEY et al.,1993). Sendo assim, se a temperatura na água tivesse permanecido nesse valor desde o início da

pesquisa, poderia ter colaborado mais, para uma média maior de produção de lemnas.

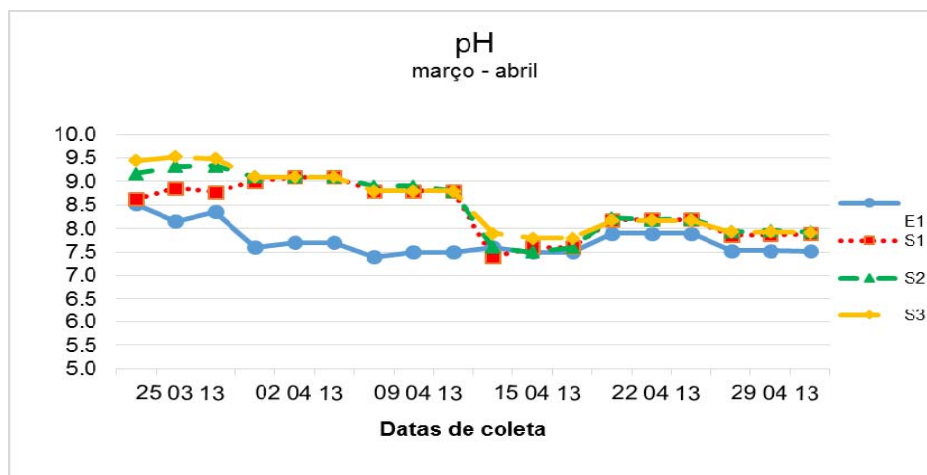
Dessa maneira, na Fase I de operação do sistema, o valor médio da temperatura foi de  $29 \pm 1,8$  °C enquanto que, na Fase II, reduziu para  $27 \pm 1,1$  °C.

### 5.1.2 Potencial hidrogeniônico (pH)

Em geral, quando o pH aproxima-se de 9, ocorre a retirada de gás carbônico das águas por algas no processo de fotossíntese. Deste modo, os valores de pH mais altos, encontrados nas análises iniciais podem ser explicados por conta da presença de algas, inclusive as do gênero *Uronema*, que competiram com as lemnas quando essas ainda não haviam completado a cobertura da superfície da lagoa. Esse aumento no valor de pH (aumento da concentração de hidroxilas) pode ter ocorrido pois, na água, a fotossíntese utiliza o dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) dissolvido e produz oxigênio causando uma mudança no equilíbrio carbonato-bicarbonato-dióxido de carbono (KADLEC e KNIGHT, 1996). Assim, quanto maior for a biomassa vegetal em relação à massa de água, maior será o pH da água e em menor período de tempo ocorrerá alterações do pH da mesma.

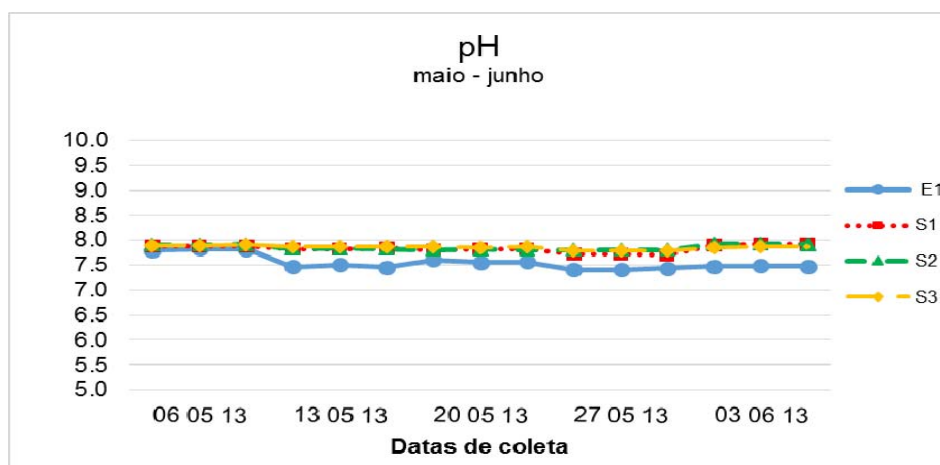
Pode-se perceber, portanto, que em uma lagoa como a de lemnas, os níveis de pH encontrados podem servir como indicadores do desempenho dessa. De tal modo que, os valores de pH encontrados inicialmente acima de 8 foram produzidos pelas taxas fotossintéticas, que demandaram mais  $\text{CO}_2$  do que as quantidades repostas pela respiração das bactérias e pela decomposição da matéria orgânica, enquanto que os valores de pH abaixo de 8 denotam uma redução da fotossíntese, e conseqüentemente concentrações mais elevadas de  $\text{CO}_2$  (KAYOMBO *et al.*, 2002). Nos pontos amostrados (E1, S1, S2 e S3), os valores médios e o desvio padrão para o pH, na Fase I (março – abril), estão apresentados na Figura 13.





**Figura 13** Variação temporal dos valores de pH no afluente (E1) e nos efluentes (S1, S2 e S3) do sistema de tratamento, na Fase I, março- abril, de 2013.

Após a cobertura total da lagoa de lemnas e da realização sistemática do manejo da biomassa das mesmas, foi observado redução nos valores médios de pH nos efluentes (Figura 14).



**Figura 14** Variação temporal dos valores de pH afluente (E1) e efluentes (S1, S2 e S3) do sistema de tratamento na Fase II, maio – junho, de 2013.

Analisando os valores médios de pH na de entrada (E1) do sistema, notou-se que esse é menos alcalino que os valores de pH dos efluentes que passam pelo sistema. Avaliando que nesse sistema há ainda, proliferação de algas como comentado anteriormente. Nas análises subsequentes, os valores médios do pH de entrada (E1) ficaram menos alcalinos, assim como os valores médios desse nos efluentes de saídas (S1, S2 e S3), que seguiram essa tendência de redução da alcalinidade. No início oscilavam entre  $8,4 \pm 0,6$  a  $8,6 \pm 0,6$  e após cobertura total da lagoa por lemnas, esses valores foram reduzidos e estabilizaram-se entre  $7,8 \pm 0,1$  a  $7,9 \pm 0,0$  (Tabela 10).

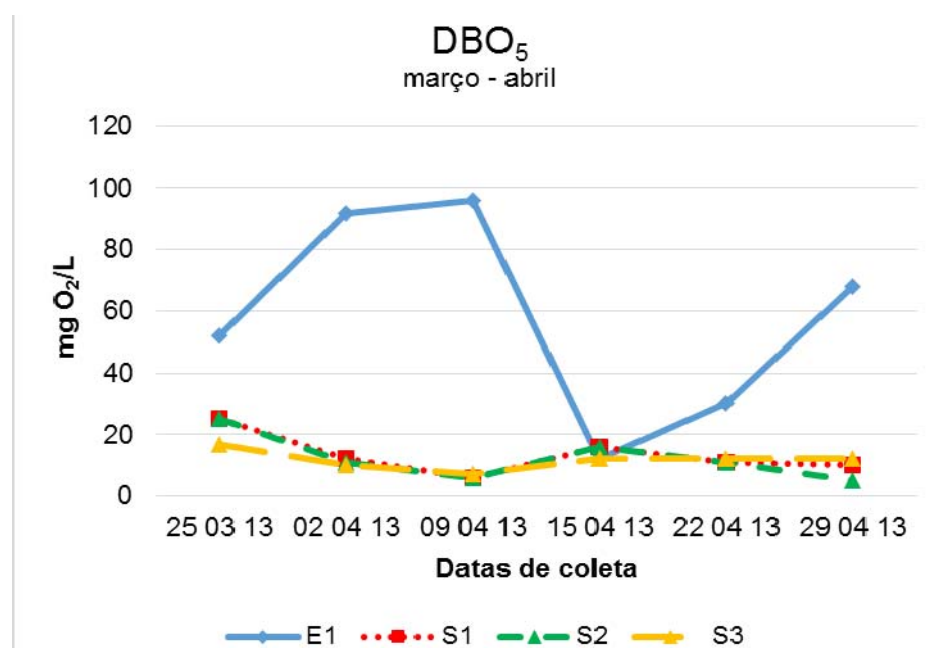
**Tabela 10** Valores médios de pH da água residuária nas Fases I e II.

AMOSTRAS	E1	S1	S2	S3
Fase I (março-abril)				
MÉDIA	7,70	8,40	8,50	8,60
DESV PAD	0,32	0,57	0,65	0,64
Fase II (maio-junho)				
MÉDIA	7,6	7,8	7,9	7,9
DESV PAD	0,15	0,07	0,05	0,04

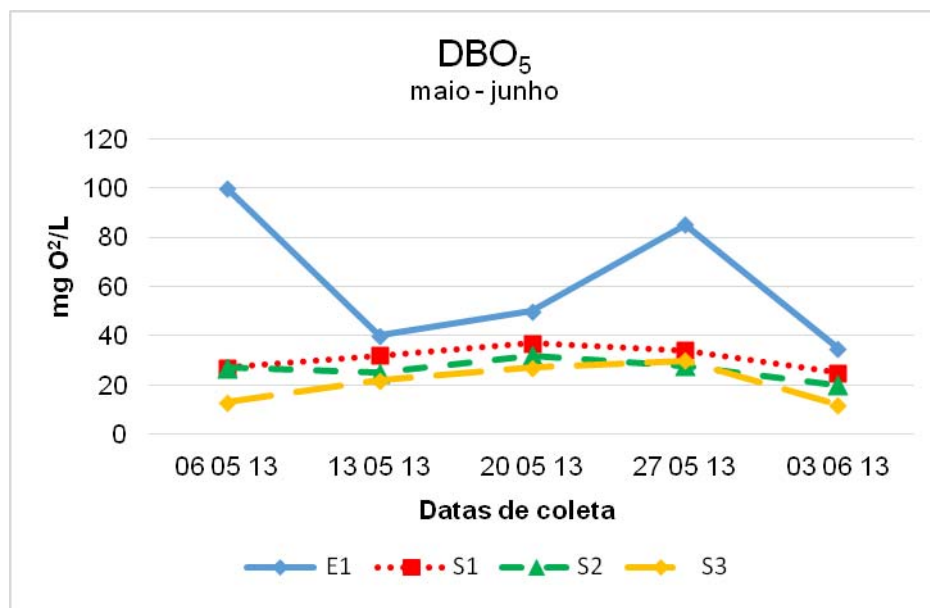
As lemnas se reproduzem em pH de 5,0 a 9,0, embora os valores ideais de pH para essa macrófita estejam entre 6,5 a 7,5 (JOURNEY et al., 1993). Diante dos valores de pH encontrados, os quais no início do experimento mantiveram acima dos valores ideais, pode-se inferir que, esses tiveram influência na produtividade de *Lemna valdiviana* Phil., bem como no tratamento por elas proposto. Porém, esta variável estabilizou-se durante todo o restante do período experimental, contribuindo para uma produção média de lemnas melhor.

### 5.1.3 Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO<sub>5</sub>)

A variação temporal dos valores obtidos de DBO<sub>5</sub>, nas Fases I e II está apresentada na Figura 15 e Figura 16.



**Figura 15** Variação temporal dos valores de DBO<sub>5</sub> afluente (E1) e efluentes (S1, S2 e S3) do sistema de tratamento, na Fase I, março- abril, de 2013.



**Figura 16** Variação temporal dos valores de DBO<sub>5</sub> afluente (E1) e efluentes (S1, S2 e S3) do sistema de tratamento, na Fase II, maio – junho, de 2013.

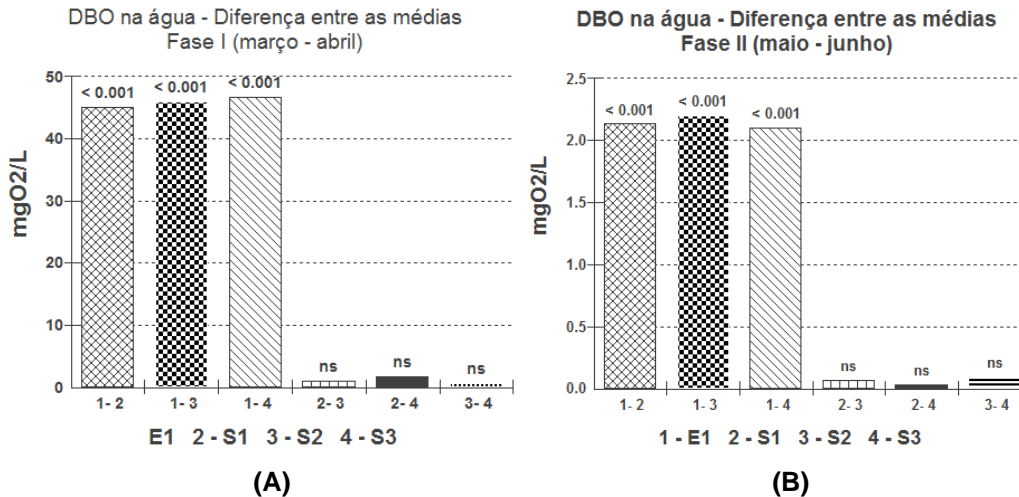
A DBO<sub>5</sub> na Fase I (março – abril), apresentou valor médio na entrada (E1) de 58,3 mg O<sub>2</sub>/L e, valor médio na saída (S3 - efluente final) de 11,7 mg O<sub>2</sub>/L, o que representa uma redução média de 80%. Enquanto que a DBO<sub>5</sub> na Fase II (maio – junho) apresentou valor médio na entrada (E1) de 62,0 mgO<sub>2</sub>/L e valor médio na saída (S3 - efluente final) de 20,8 mgO<sub>2</sub>/L, o que representa uma eficiência de redução média de 66%. Os valores médios e desvio padrão de DBO<sub>5</sub>, nos pontos amostrados em ambas as fases, estão apresentados na Tabela 11.

**Tabela 11** Valores médios de DBO<sub>5</sub> na água residuária nas Fases I e II.

AMOSTRAS	E1	S1	S2	S3
Fase I (março-abril)				
MÉDIA	58,3	13,3	12,3	11,7
DESVIO	33,6	6,6	7,4	3,3
Fase II (maio-junho)				
MÉDIA	62,0	31,0	26,4	20,8
DESVIO	28,8	4,9	4,4	8,1

As lagoas de lemna apresentam excelentes resultados na redução dos níveis de DBO<sub>5</sub> contidos em águas residuárias. Alaerts et al. (1996), no tratamento do esgoto doméstico com lemna, em Bangladesh, obtiveram média de redução para DBO de 96%. Lagoas como essas apresentaram, em um ano de monitoramento, excelentes resultados para a variável DBO<sub>5</sub>, com remoção de 95% (MOHEDANO, 2010).

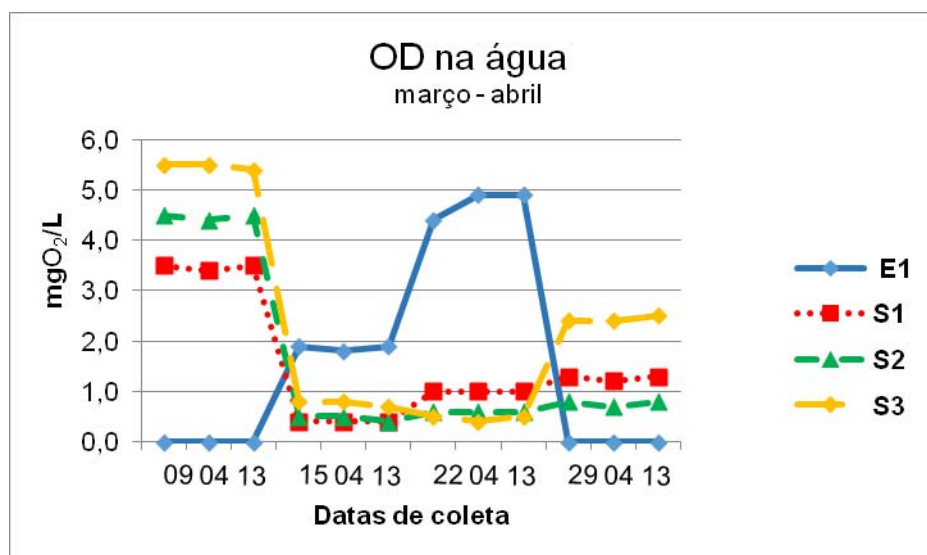
A partir da comparação dos valores médios de DBO<sub>5</sub> na água coletada nas saídas (S1, S2 e S3) na mesma fase, observou-se que não houve diferença significativa entre esses valores (Figura 17).



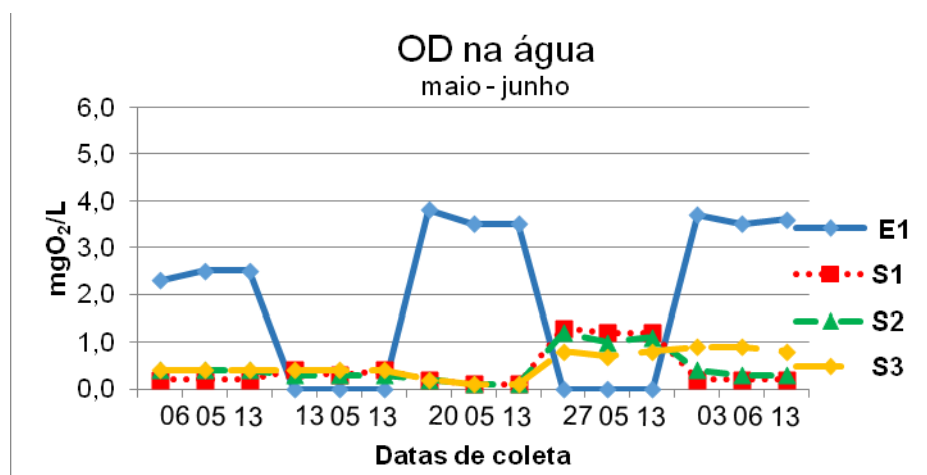
**Figura 17** Valores médios de DBO<sub>5</sub>, comparação dos valores médios das saídas (S1, S2 e S3) nas Fases I (A) e II (B).

#### 5.1.4 Oxigênio dissolvido (OD)

A lagoa de lemna em estudo foi alimentada por afluyente de esgotos domésticos em todo o período experimental, e esse excesso de matéria orgânica foi causa da diminuição do oxigênio dissolvido (OD). Sendo assim, o decréscimo dos teores de OD na água, observados ao longo do experimento ocorreu devido ao aumento da carga orgânica. Esse tipo de lagoa também contribuiu para inibir as algas e, assim gerou também redução do oxigênio nessas águas. Houve variação temporal dos valores de oxigênio dissolvidos ao longo do experimento: Fase I e II (Figura 18, Figura 19 e Tabela 12).



**Figura 18** Variação temporal dos valores de OD afluente (E1) e efluentes (S1, S2 e S3) do sistema de tratamento, Fase I, abril de 2013.



**Figura 19** Variação temporal dos valores de OD afluente (E1) e efluentes (S1, S2 e S3) do sistema de tratamento, na Fase II, maio – junho, de 2013.

**Tabela 12** Valores médios de OD nas Fases I e II.

AMOSTRAS	E1	S1	S2	S3
Fase I (março-abril)				
MÉDIA	1,6	1,5	1,9	2,3
DESVIO	2,1	1,2	1,7	2,1
Fase II (maio-junho)				
MÉDIA	1,2	0,4	0,5	0,5
DESVIO	1,7	0,4	0,3	0,3

Conforme pode ser observado nas figuras e tabela anteriormente apresentadas, a concentração de OD sofreu evidentes flutuações. Em lagoa de lemna esta é uma variável que divide a opinião de autores, pois a atividade fotossintética dessa favorece a oxigenação, enquanto que a manta vegetal, na superfície, diminui o contato da água com a atmosfera e assim reduz a difusão do

oxigênio. Experimentos para avaliar a dinâmica de OD, em lagoas com lemnáceas, foram desenvolvidos por Alaerts et al. (1996), esses constataram que a coluna d'água permaneceu aeróbia durante todo o período experimental.

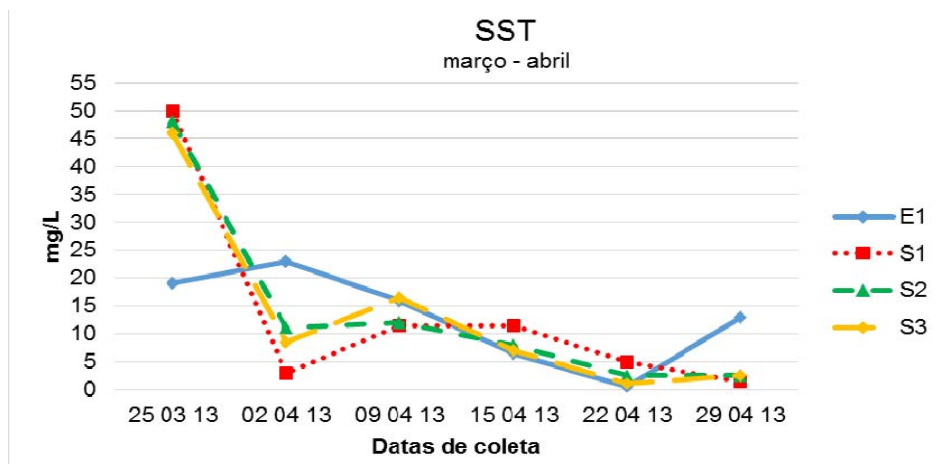
Na lagoa em estudo, algumas coletas na entrada (E1) do sistema, apresentaram valores de oxigênio dissolvido de 0 mgO<sub>2</sub>/L, esses valores são normalmente encontrados para águas residuárias de sistemas anaeróbios e, nesse mesmo ponto de coleta ocorreram picos de elevadas concentrações de OD, aproximando-se de 5,0 mgO<sub>2</sub>/L e simulando uma falsa tendência cíclica ao longo do monitoramento. Esse aumento nos valores de OD pode ser explicado, pois as coletas foram feitas na tubulação de entrada (E1), no momento de bombeamento do afluente do sumidouro para a lagoa, o que provavelmente gerou turbilhonamento, introduziu ar nos tubos e, conseqüente incorporação desse ar na água residuária em estudo.

Nos pontos de coleta das saídas (S1, S2 e S3), tanto na Fase I como na II, alguns valores elevados de OD foram observados também, coincidentemente nas coletas em dias chuvosos, que possivelmente contribuíram para este acréscimo. Outro motivo para os picos de OD nessas águas, retratado por Körner et al. (1998), é a taxa de incorporação de O<sub>2</sub> de 1mgO<sub>2</sub>/L/h no meio líquido pelas lemnas. E segundo Iqbal (1999), essa taxa de incorporação pode variar entre 3 a 4g/m<sup>2</sup>/dia.

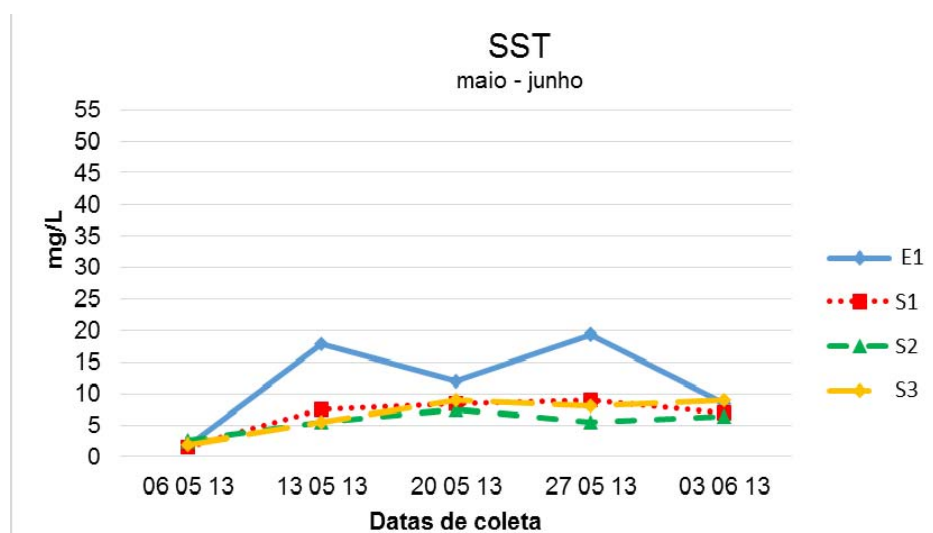
#### 5.1.5 Sólidos suspensos totais (SST)

Na Fase I o que se observou nos valores médios das saídas foi um incremento de SST. Esse aumento de SST constatado nessa fase, que foi em média, mais quente, pode ser explicado devido à proliferação de algas. O mesmo verificou Maia (2008), ao analisar o desempenho de uma lagoa de lemnas no polimento de efluentes domésticos.

A variação temporal dos valores de SST afluente (E1) e efluentes (S1, S2 e S3) do sistema de tratamento, na Fase I e II (Figura 20 e Figura 21).



**Figura 20** Variação temporal dos valores de SST afluente (E1) e efluentes (S1, S2 e S3) do sistema de tratamento, na Fase I, março – abril, de 2013.



**Figura 21** Variação temporal dos valores de SST afluente (E1) e efluentes (S1, S2 e S3) do sistema de tratamento, na Fase II, maio – junho, de 2013.

Os SST na Fase I (março – abril), apresentaram valor médio na entrada (E1) de 13,0 mg/L e valor médio na saída (S3 - efluente final) de 13,6 mg/L, o que representou um acréscimo de SST nessa fase e não uma redução como se esperava. Na Fase II (maio – junho), os SST apresentaram valor médio na entrada (E1) de 11,9 mg/L e valor médio na saída (S3 - efluente final) de 6,7 mg/L, o que representou uma redução média de 44%. Na Fase II, as lemnas já haviam se estabelecido e então promoveram uma redução das algas e assim, observou-se uma eficiência na remoção do SST favorável. Os valores médios para SST, nos pontos amostrados, em ambas as fases, estão apresentados Tabela 13.

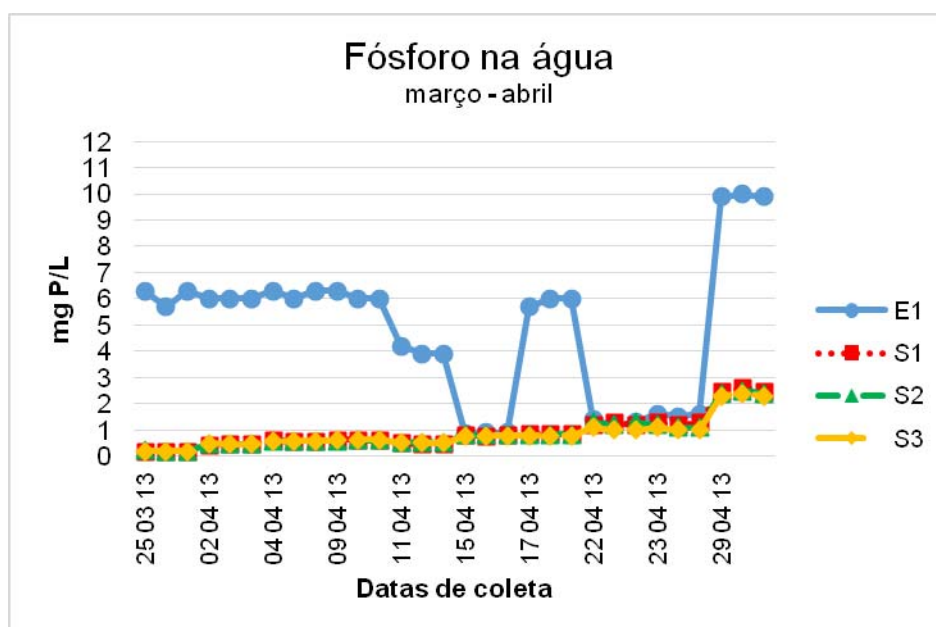
**Tabela 13** Valores médios de SST nas Fases I e II.

AMOSTRAS	E1	S1	S2	S3
Fase I (março-abril)				
MÉDIA	13,0	13,7	14,0	13,6
DESVIO	8,3	18,3	17,1	16,8
Fase II (maio-junho)				
MÉDIA	11,9	6,7	5,5	6,7
DESVIO	7,3	3,0	1,9	2,9

Em estudos com esgoto doméstico, El-Shafai et al. (2006) apontaram uma redução para SST de 91%, enquanto que Mohedano (2004), conseguiu eficiência de remoção para SST de 99,7%, em TDH de 13 dias. Na Fase II de operação da lagoa em estudo, obteve-se uma redução média de 44%, em TDH de 8 dias, assinalando assim, que essa lagoa de lemna tem potencial para ampliar ainda mais essa remoção, bastando para tanto seguir uma sistematização do manejo da biomassa e aumentar o TDH.

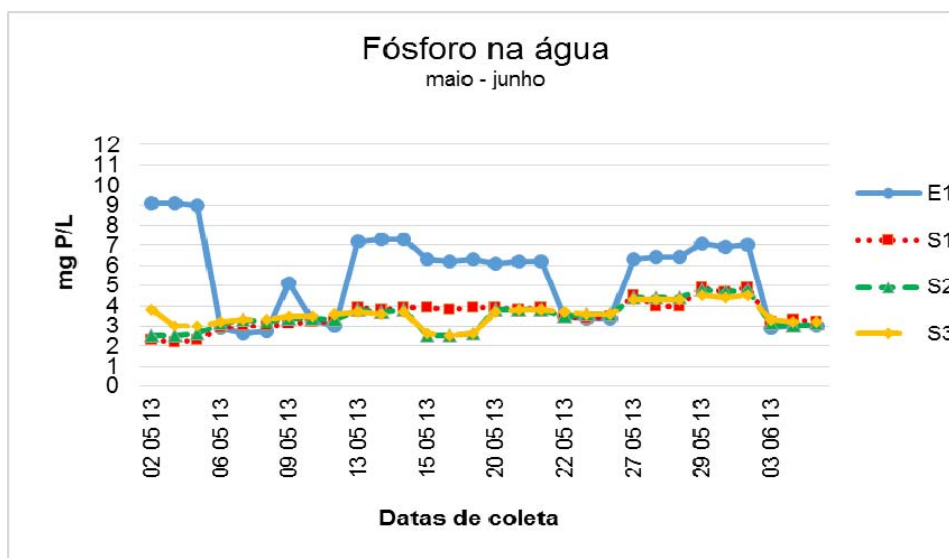
#### 5.1.6 Fósforo na água

A variação temporal dos valores de fósforo no afluente (E1) e efluentes (S1, S2 e S3) do sistema de tratamento, na Fase I e Fase II (Figura 22 e Figura 23).



**Figura 22** Variação temporal dos valores de Fósforo afluente (E1) e efluentes (S1, S2 e S3) do sistema de tratamento, Fase I, março – abril de 2013.





**Figura 23** Variação temporal dos valores de Fósforo afluente (E1) e efluentes (S1, S2 e S3) do sistema de tratamento, Fase II, maio – junho de 2013.

O fósforo apresentou valor médio no afluente (entrada - E1) de 4,8 mg P/L e valor médio no efluente final (saída - S3) de 0,8 mgP/L, o que representa uma redução média de 82,7%, na Fase I. Na Fase II, o fósforo apresentou valor médio no afluente (entrada - E1) de 5,5 mgP/L e valor médio no efluente final (saída - S3) de 3,6 mg P/L, o que representa uma redução média de 34,5 % (Tabela 14).

**Tabela 14** Valores médios de fósforo na água nas Fases I e II.

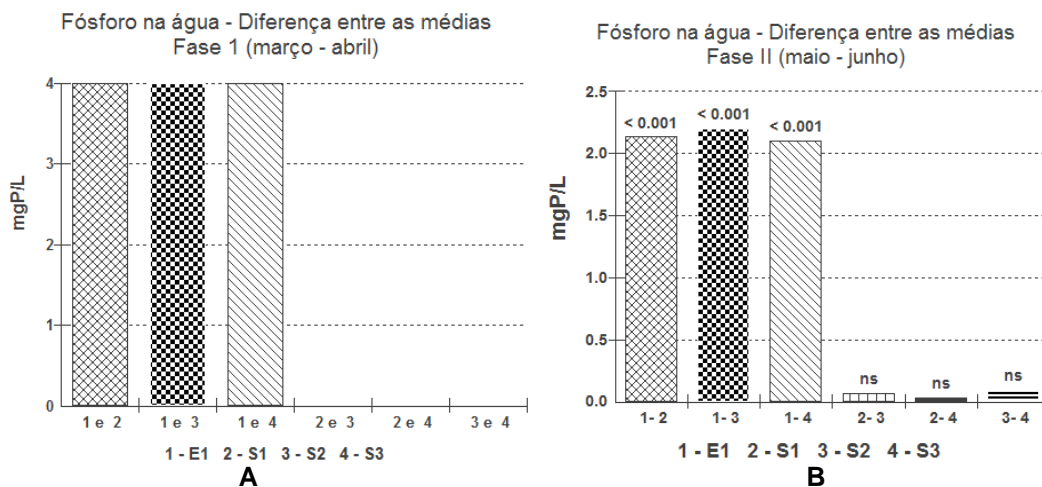
AMOSTRAS	E1	S1	S2	S3
Fase I (março – abril)				
MÉDIA	4,80	0,90	0,88	0,83
DESVIO	2,75	0,64	0,61	0,57
C. VAR	0,57	0,71	0,69	0,68
Fase II (maio – junho)				
MÉDIA	5,5	3,6	3,5	3,6
DESVIO	2,08	0,69	0,70	0,54
C. VAR	0,38	0,19	0,20	0,15

Assim, na Fase I dessa pesquisa, com TDH de 15 dias, conseguiu-se uma redução média de 83% para o P, maior que os valores encontrados nos estudos de Nasr et al. (2009), em que os melhores resultados, também apareceram com TDH de 15 dias, e assim foi possível remover 65% de fósforo.

Da Fase I para a Fase II da pesquisa houve uma redução da remoção média de fósforo, quando se comparou os valores médios da entrada (E1) e saída (S3),

durante todo o período experimental (março a junho). Mostrando assim que, com a redução do TDH houve redução de eficiência de remoção (%). Sendo assim, na Fase II, com TDH de 8 dias, a remoção média para P foi de 34%, e mesmo assim foi maior que a encontrada por Maia (2008), que obteve eficiência de remoção de 32% para P em TDH de 10 dias.

A análise de variância foi realizada como critérios de comparação das médias nas três saídas de efluentes (S1, S2 e S3), comparando-as entre si, em todo o período experimental. Essa análise da variação mostrou que não houve significância (ns) entre a comparação dessas médias (Figura 24).



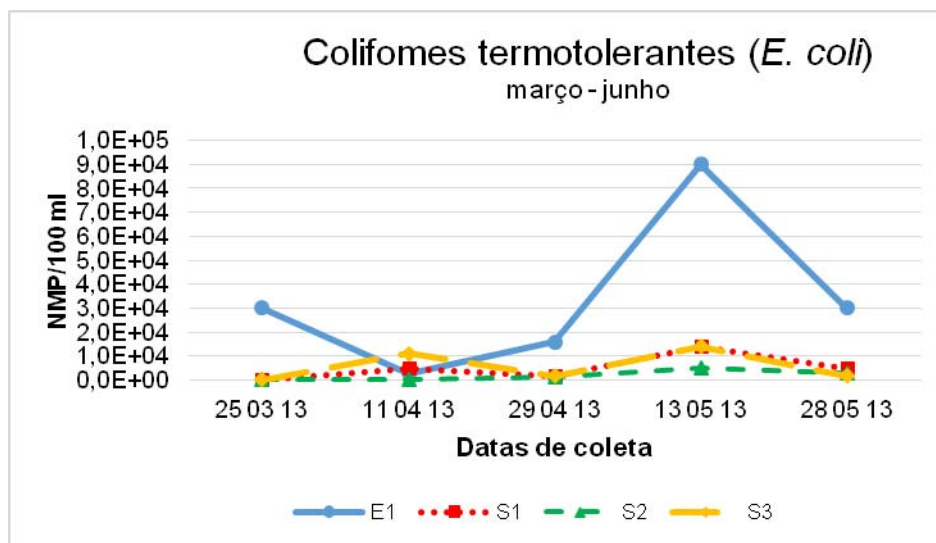
**Figura 24** Comparação das médias nos diferentes tempos de detenção (TDH) nos efluentes (S1, S2 e S3) nas Fases I (A) e II (B).

Ao comparar os valores médios de fósforo, entre as três saídas das câmaras desse sistema, na mesma fase, não se encontrou diferenças significativas desses valores. Ficando evidente a importância de um monitoramento com maior duração para verificar as interferências da sazonalidade.

No entanto ao avaliar a eficiência do sistema proposto para tratar essas águas residuárias domésticas, com fases e TDH distintos, tanto pôde-se observar que houve eficiência de remoção média das variáveis  $DBO_5$  e P, quanto diferenças significativas entre os valores médios nas saídas comparadas entre fases distintas.

### 5.1.7 Coliformes termotolerantes (*E. Coli*)

A variação temporal dos valores de coliformes termotolerantes (*E. Coli*) no afluente (E1) e efluentes (S1, S2 e S3) do sistema de tratamento, nas Fases I e II, encontram-se na Figura 25.



**Figura 25** Variação temporal dos valores de coliformes termotolerantes (*E. Coli*) afluente (E1) e efluentes (S1, S2 e S3) do sistema de tratamento, Fase I e II, março – junho, de 2013.

Os coliformes termotolerantes (*E. Coli*) apresentaram valor médio no afluente (entrada - E1) de  $3,4E+04$ , e valor médio no efluente final (saída - S3) de  $3,7E+03$ , o que representa uma redução média de 89,0 % (Tabela 15).

**Tabela 15** Valores médio de coliformes termotolerantes (*E. Coli*).

AMOSTRA	E1	S1	S2	S3
MÉDIA	$3,4E+04$	$5,1E+03$	$1,9E+03$	$3,7E+03$
DESVIO	$3,3E+04$	$5,4E+03$	$2,1E+03$	$5,8E+03$
C. VAR	$9,9E-01$	$1,0E+00$	$1,1E+00$	$1,6E+00$

Sendo assim, nas duas fases do experimento obteve-se uma remoção média de 89% para coliformes termotolerantes (*E. Coli*). Tavares (2008), também em um sistema de lemnáceas, encontrou para a *E. Coli*, eficiência de remoção média de 93%.

Vale ressaltar que, os principais fatores responsáveis pela remoção dos coliformes, como insolação, elevação do pH e substâncias bactericidas produzidas pelas algas, não estão presentes nas lagoas de lemnas. A ação da radiação UV solar que é um mecanismo importante para a redução de coliformes e que tem efeito bactericida (IQBAL, 1999), na lagoa em estudo, esse mecanismo não contribuiu devido ao sombreamento promovido pela biomassa flutuante da *Lemna valdiviana* Phil., que forma uma manta na superfície da lagoa e que bloqueia a

passagem dessa radiação solar impedindo sua ação bactericida. Entretanto, mesmo sem essa contribuição a lagoa de lemna mostrou uma boa remoção de coliformes.

Portanto, o ato de remover sistematicamente a biomassa das lemnas da lagoa em estudo contribuiu para o decaimento bacteriano. Visto que, a retirada periódica de biomassa pode remover os coliformes aderidos a essa. Deste modo, este último fator mostrou-se mais efetivo nesse decaimento bacteriano, pois com a retirada da biomassa das lemnas, os organismos protegidos em suas raízes foram consequentemente removidos.

## 5.2 DESEMPENHO GERAL DA LAGOA DE LEMNA

Uma visão geral do desempenho da lagoa de *Lemna valdiviana* Phil., nas diferentes Fases (I e II), está apresentada nas Tabela 16 e Tabela 17.

**Tabela 16** Valores médios de pH, DBO<sub>5</sub>, OD, SST e P, obtidos no afluente e efluentes da lagoa de lemna, durante as duas fases de operação.

VARIÁVEIS	AFLUENTE (E1)	EFLUENTE (S1)	EFLUENTE (S2)	EFLUENTE (S3)
Fase I				
pH (11) *	7,7±0,3 a	8,4±0,6 a	8,5±0,6 a	8,6±0,6 a
DBO (11) * mgO <sub>2</sub> /L	58,3±33,6 a	13,3±6,6	12,3±7,4	11,7±3,3
OD (11) * mgO <sub>2</sub> /L	1,6±2,0	1,5±1,2	1,9±1,7	2,3±2,1
SST (11) * mg /L	13,0±8,3 a	13,7±18,3 a	14,0±17,1 a	13,6±16,8 a
P (20) * mgP/L	4,8±2,7 a	0,9±0,6	0,9±0,6	0,8±0,6
Fase II				
pH (11) *	7,6±0,1 a	7,8±0,07a	7,8±0,05 a	7,9±0,04 a
DBO (11) * mgO <sub>2</sub> /L	62,0±28,8 a	31,0±4,9	26,4±4,4	20,8±8,1
OD (11) * mgO <sub>2</sub> /L	1,2±1,7	0,4±0,4	0,48±0,3	0,51±0,3
SST (11) * mg/L	11,9±7,3 a	6,7±3,0 a	5,50±1,9 a	6,70±2,9 a
P (20) * mgP/L	5,5±2,1a	3,6±0,7	3,5±0,7	3,6±0,5

\*Entre parênteses o número de campanhas; Os valores médios das variáveis, na mesma coluna, seguidos pela mesma letra (a) não diferem estatisticamente ( $p < 0,05$ ), nas Fases I e II do sistema.

A lagoa com lemnas apresentou-se como um ambiente alcalino, ocorreu uma baixa variação de pH (entre 7 e 8,5). Nesse ecossistema, inicialmente, mesmo ocorrendo altas taxas fotossintéticas, o consumo de CO<sub>2</sub> foi equilibrado pela dissociação de bicarbonato de cálcio. Portanto, mesmo com a pequena variação encontrada, os valores médios de pH, entre as Fases I e II, não mostraram-se significativas ( $p < 0,05$ ). O mesmo foi observado com os SST. Esse na Fase I, apresentou aumento e não remoção, que só ocorreu na Fase II.

O OD apresentou diferença significativa entre as Fases I e II, mas com a entrada de ar durante o processo de bombeamento da água residuária para a lagoa, o que possivelmente distorceu os resultados dessa variável, e apresentou grandes oscilações em seus valores durante todo o período experimental.

Nas Fases I e II, as variáveis DBO<sub>5</sub> e P não apresentaram diferenças significativas entre as médias na entrada (E1) do sistema em fases distintas. No entanto, nos demais pontos de coletas (S1, S2 e S3) houve diferença significativa dessas variáveis. E verificou-se também, uma eficiência de remoção dessas no sistema de tratamento em estudo.

O TDH em lagoas de lemnas, geralmente encontra-se entre 15 e 25 dias (IQBAL, 1999; ALAERTS et al., 1996; EL-SHAFI et al., 2006). Sendo assim, foi possível observar que a eficiência de remoção (%) na Fase I, que operou com TDH de 15 dias, como sugerido pelos autores anteriormente citados, notadamente teve maior desempenho. Enquanto que, a Fase II, com TDH de 8 dias, teve menor desempenho, como apresentado na Tabela 17.

**Tabela 17** Valores médios de remoção (%) de DBO<sub>5</sub> e P, na lagoa de lemnas, nas diferentes fases de operação do sistema.

FASES	REMOÇÃO (%)			
	P (20) *	DBO (11) *	SST (11) *	<i>E. Coli</i> (5) *
I	83	80	0	94
II	35	66	44	87

\*Entre parênteses o número de campanhas

Uma análise comparativa visual do afluente (E1) e efluentes (S1, S2 e S3) no início, meio e fim da operação do sistema, também pode contribuir para a percepção do desempenho dessa lagoa. Observou-se que, no momento inicial do experimento (Figura 26), havia muitas algas e uma coloração esverdeada predominava na lagoa, a qual foi diminuindo ao longo do polimento promovido pelas lemnas (Figura 27 e Figura 28).



**Figura 26** Amostras de água (E1, S1, S2 e S3) coletadas no início da pesquisa experimental: 25 de março de 2013.



**Figura 27** Amostras de água (E1, S1, S2 e S3) coletadas em meados da pesquisa experimental: 29 de abril de 2013.

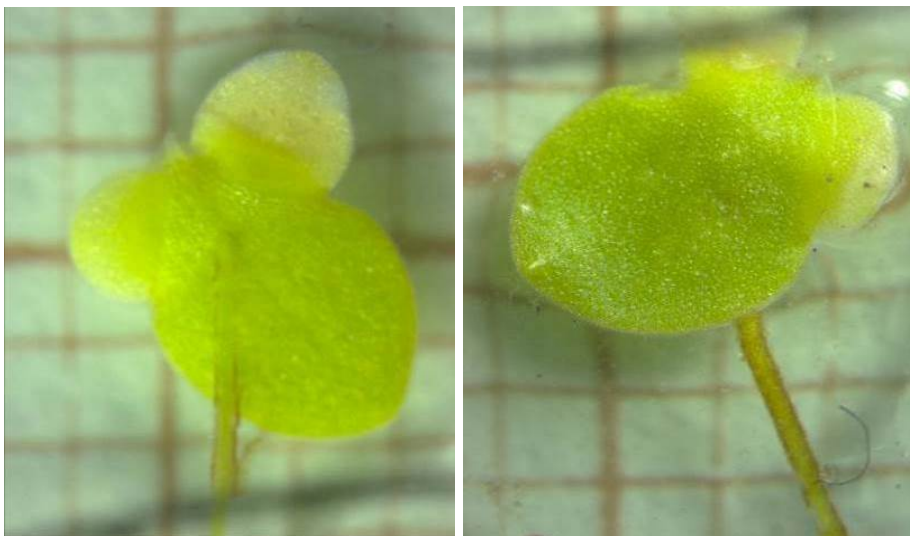


**Figura 28** Amostras de água (E1, S1, S2 e S3) coletadas no final da pesquisa experimental: 03 de junho de 2013.

### 5.3 AVALIAÇÃO DA LEMNA

#### 5.3.1 Avaliação do manejo de lemnas

Inicialmente fez-se a identificação da espécie de lemna, no Laboratório de Botânica da UEFS, a partir da análise de características observadas em lupa, microscópio e com auxílio da chave de identificação específica (POTT e CERVI, 1999), chegando nessa análise a espécie de *Lemna valdiviana* Phil. (Figura 29).



**Figura 29** Identificação da espécie *Lemna valdiviana* Phil.: uma raiz e nervura central única.

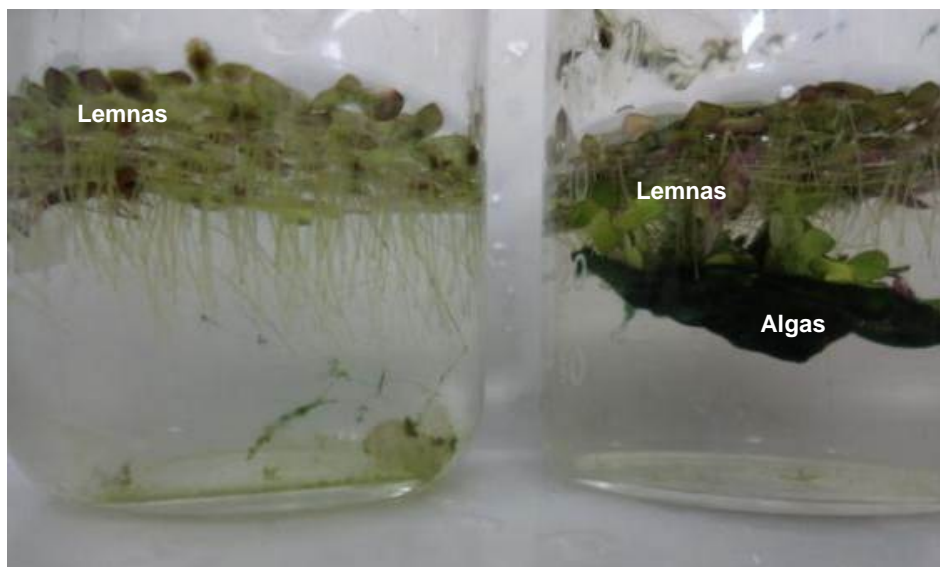
Os fatores limitantes, como a temperatura elevada, inicialmente interferiram no estabelecimento e no desenvolvimento das lemnas, ao ponto dessas não conseguirem se estabelecer e perderem a competição para outras espécies, tais como as algas do gênero *Uronema*, coletadas na lagoa de lemnas e identificadas no Laboratório de Ficologia (LAFICO/UEFS). Estas algas se estabeleceram enquanto os problemas com as altas temperaturas da água não tinham ainda sido resolvidos. Algas do gênero *Uronema* são macroalgas com filamentos que crescem soltos, não se ramificam e se dissociam em fragmentos de uma a poucas células e suas células terminais são arredondadas (Figura 30).



**Figura 30** Alga do gênero *Uronema*: clorófitae filamentosa não ramificada.  
Fonte: <http://algalweb.net/SHEW/Jan05/Uronema-e.jpg>

Trata-se de uma clorófitica filamentososa, não ramificada. Seus representantes ocorrem geralmente fixos a partes submersas de plantas aquáticas. Essas algas estão presentes em ambientes ricos em nutrientes, como as águas residuárias domésticas. São classificadas de acordo com a abundância de matéria orgânica no meio em que estão, assim podem ser consideradas como:  $\alpha$  – mesossapróbicas (saprofilas) moderado a forte poluição orgânica;  $\beta$  – mesossapróbicas (saproxenos) moderada poluição, indicadores de baixa qualidade das águas – ou águas com características de zonas poluídas ou de poluição forte.

Observou-se o comportamento das algas do gênero *Uronema* e das macrófitas *Lemna valdiviana* Phil., em laboratório, e percebeu-se que as algas envolveram as raízes das lemnas, de maneira que, as lemnas tiveram dificuldades em capturar os nutrientes e começaram a ficar amarelada, esbranquiçada até morrer (Figura 31).



**Figura 31** Observação em laboratório da competição estabelecida entre algas do gênero *Uronema* e as macrófitas *Lemna valdiviana* Phil.

Para as lemnas, assim como para diversos outros organismos, o crescimento de uma população descreve uma curva com quatro etapas (latência, crescimento exponencial, estabilização e decaimento (PHILIPPI e SEZERINO, 2004). Mas, para a melhor eficiência em lagoas de tratamento é desejável manter a população na fase de crescimento exponencial, sendo necessária para isso, à renovação do efluente (nutrientes) e a remoção constante da biomassa. Essa remoção da biomassa de lemnas, durante o processo de tratamento, é fundamental para a manutenção da densidade ótima (SKILLICORN et al., 1993; IQBAL, 1999).

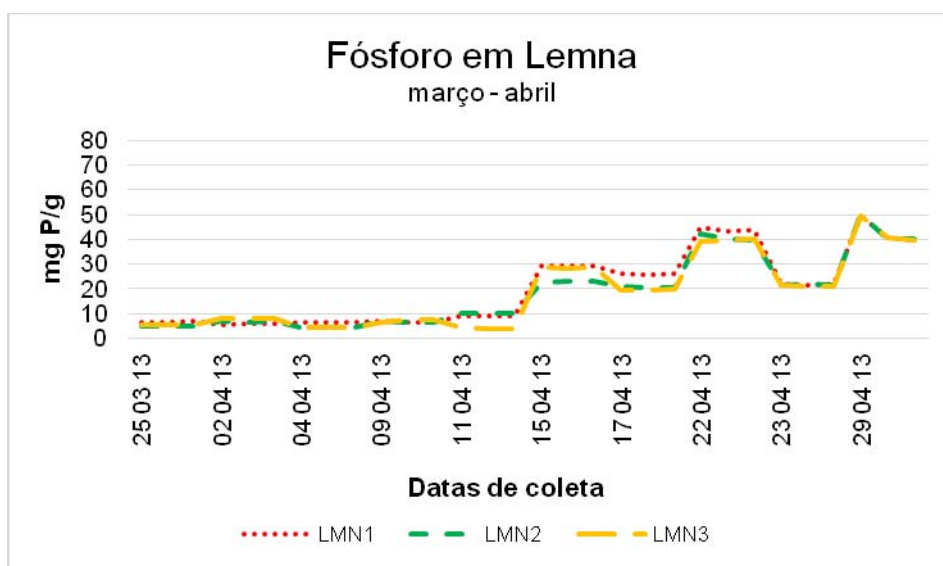


Nesse estudo, a colheita de biomassa da lagoa de lemna, foi necessária para induzir a multiplicação das mesmas e a troca por plantas mais jovens, mas quando o ambiente da lagoa não era propício a este crescimento, principalmente com a competição com as algas do gênero *Uronema*, não foi possível efetuar essa colheita sistemática, visto que caso fosse realizada teria uma diminuição da área coberta favorecendo assim, o ressurgimento das algas em questão. Portanto, a remoção sistemática foi subestimada e isso refletiu no potencial de polimento da lagoa em estudo.

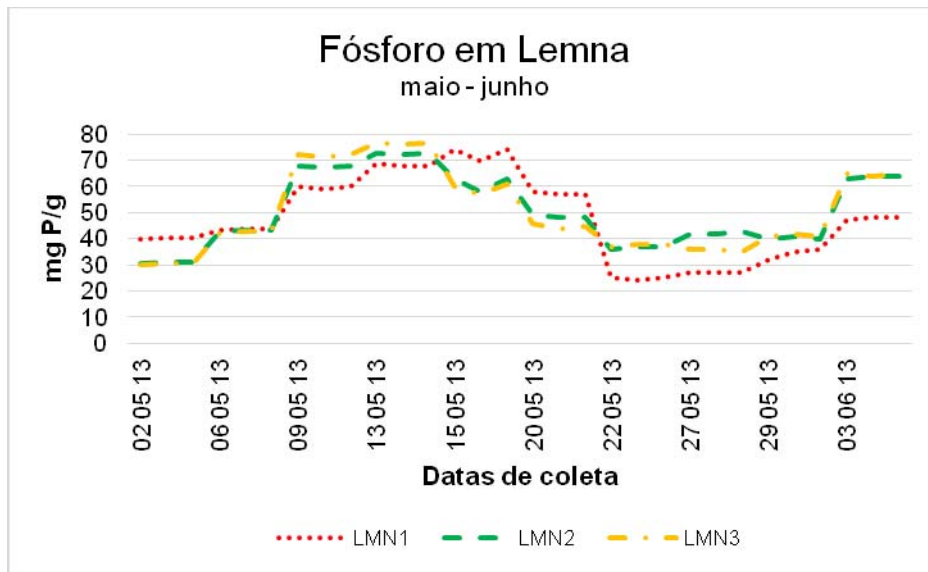
### 5.3.2 Avaliação da biomassa de lemna

#### 5.3.2.1 Fósforo na *Lemna valdiviana* Phil.

O papel da macrófita *Lemna valdiviana* Phil., é o de recuperar nas águas residuárias domésticas, os nutrientes que são desperdiçados e lançados em corpos de águas, eutrofizando-os. A recuperação de fósforo pelas lemnas, na Fase I e II, está representada na Figura 32 e Figura 33, e seus valores médios na Tabela 18.



**Figura 32** Variação temporal dos valores de fósforo nas lemnas na Fase I (março- abril) de 2013.



**Figura 33** Variação temporal dos valores de fósforo nas lemnas do sistema de tratamento, Fase II (maio – junho) de 2013.

A remoção de fósforo em águas residuárias é regulada por vários processos biológicos e, dentre eles a absorção direta pelas lemnas. Essa capacidade de absorção de fósforo depende da forma de fósforo que está disponível na água, da constância de coleta e da taxa de crescimento das macrófitas, a qual depende da concentração desse nutriente no meio. A forma de fósforo assimilável pelas plantas é o ortofosfato. No entanto, a taxa de consumo desse nutriente pelas macrófitas é diretamente proporcional à taxa de crescimento das mesmas.

Na Figura 33, houve uma redução dessa absorção de fósforo, que pode ser explicada devido às lemnas terem alcançado a densidade ótima, e nesse ponto a colheita sistemática deveria ter sido ampliada, para que essas lemnas seguissem sua curva de crescimento e mantivessem sua população no estágio exponencial de crescimento. Aproximadamente, cada fronde (mãe) germina 10 frondes (filhas) antes de morrer, e essas depois de mortas ainda continuam flutuando e concorrendo por luz e espaço. E a elevação da densidade populacional destas macrófitas, sem a constante remoção, causa prejuízo no desempenho do tratamento, pois ao morrer as lemnas devolvem todas as substâncias antes removidas à lagoa.

Na lagoa em estudo, foi possível perceber que a biomassa não estava sendo removida em quantidades satisfatórias, quando observaram-se manchas brancas nas frondes das lemnas e sobreposição dessas. Todavia, mesmo sabendo que durante o processo de tratamento fosse essencial a remoção sistemática da biomassa de lemnas para a manutenção da densidade ótima dessas (SKILICORN et al.,1993; IQBAL, 1999), apesar disso a preocupação em gerar clareiras e

consequentes ressurgimentos de algas competidoras do gênero *Uronema*, visto que essas apresentaram um potencial maior em provocar mortandade nas lemnas, e assim comprometer todo o sistema de tratamento em avaliação.

A principal via de remoção do fósforo, na lagoa em estudo, foi a absorção direta feita pela biomassa das lemnas. Mas, a variação dessa absorção tem relação direta com a concentração com que esse nutriente chegou na lagoa. Logo, como essa concentração variou muito, a absorção de fósforo pelas lemnas seguiu essa tendência.

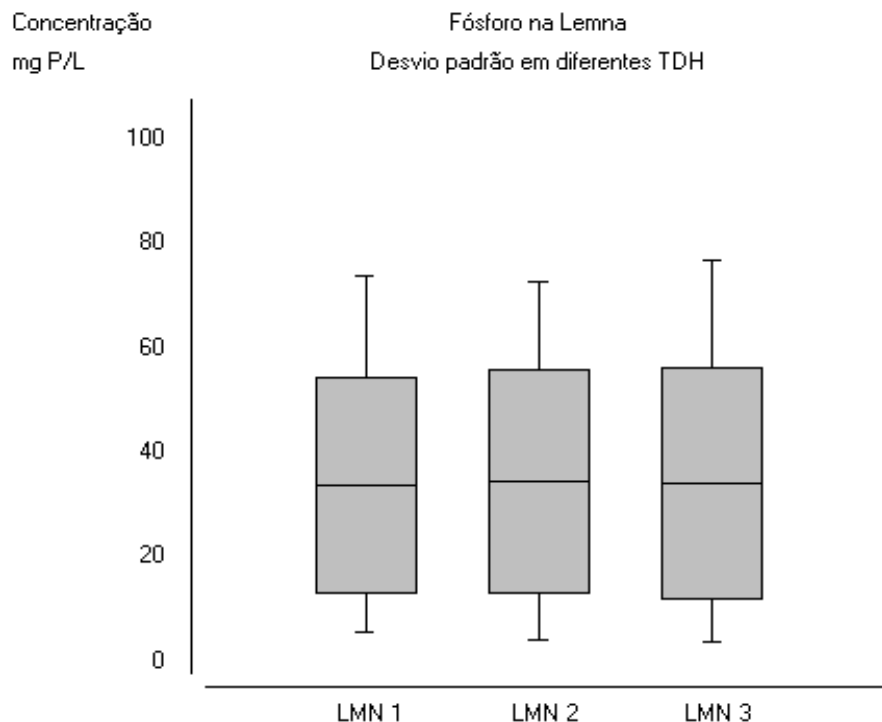
De tal modo, comparando se a Fase I com a II, percebeu-se aumento dessa absorção nos valores médios apresentados na Tabela 18.

**Tabela 18** Valores médios do fósforo na lemna, nas Fases I e II.

AMOSTRA	LMN1 (mg P/g)	LMN2 (mg P/g)	LMN3 (mg P/g)
Fase I (março – abril)			
MÉDIA	19,91	18,21	18,09
DESVIO	14,83	14,03	14,40
C. VAR	0,74	0,77	0,80
Fase II (maio – junho)			
MÉDIA	47,58	50,71	50,51
DESVIO	16,08	13,96	15,68
C. VAR	0,34	0,28	0,31

Uma efetiva redução do fósforo foi verificada na água, principalmente devido à absorção pela biomassa de lemnas. Porém, os pesquisadores Körner e Vermaat (1998) afirmam que, as lemnas removem 52% do fósforo e bactérias fixadas nas raízes dessas macrófitas contribuem com remoções que variam de 31 a 71%. Logo, esses autores concordam para reafirmar o papel fundamental dessa macrófitas na remoção de fósforo em sistemas de tratamento como o que está sendo avaliado, seja através da absorção direta ou aderidos às bactérias em suas raízes.

A comparação dos valores médios de fósforo nas lemnas em cada câmara está apresentada na Figura 34. Nessa percebe-se que não houve diferença significativa entre as médias de LMN 1, LMN 2 e LMN 3.

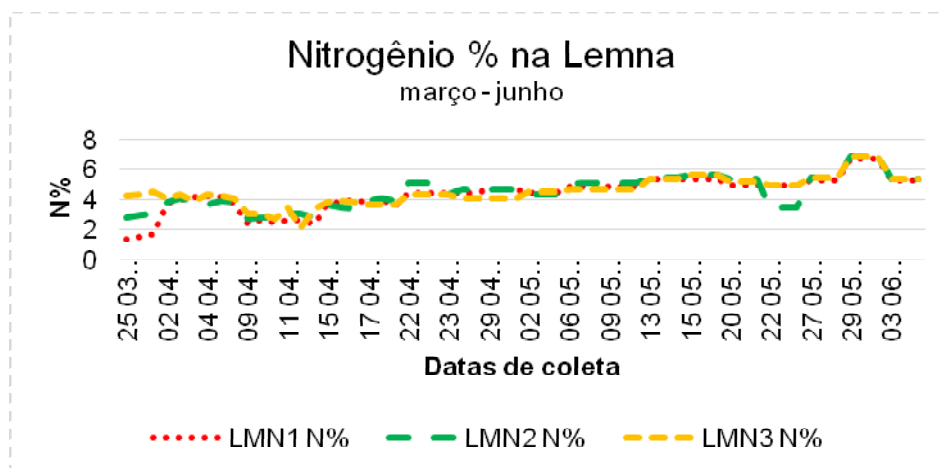


**Figura 34** Valores médios de fósforo nas lemnas (LMN 1, LMN 2 e LMN 3) em todo o período experimental.

Como visto, as lemnas desempenharam um papel fundamental no tratamento de águas residuárias domésticas, devido a sua capacidade em remover substâncias como o fósforo, de maneira direta ou indireta, e ainda reverter esse em produção de biomassa rica nesse nutriente.

#### 5.3.2.2 Nitrogênio na *Lemna valdiviana* Phil..

O percentual de nitrogênio (N%) encontrado na *Lemna valdiviana* Phil. na Fase I e II (março – junho) está apresentado na Figura 35. Os valores médios de N% da Fase I e II estão na Tabela 19.



**Figura 35** Percentual de nitrogênio (N%) encontrado na *Lemna valdiviana* Phil., na Fase I e II (março – junho), de 2013.

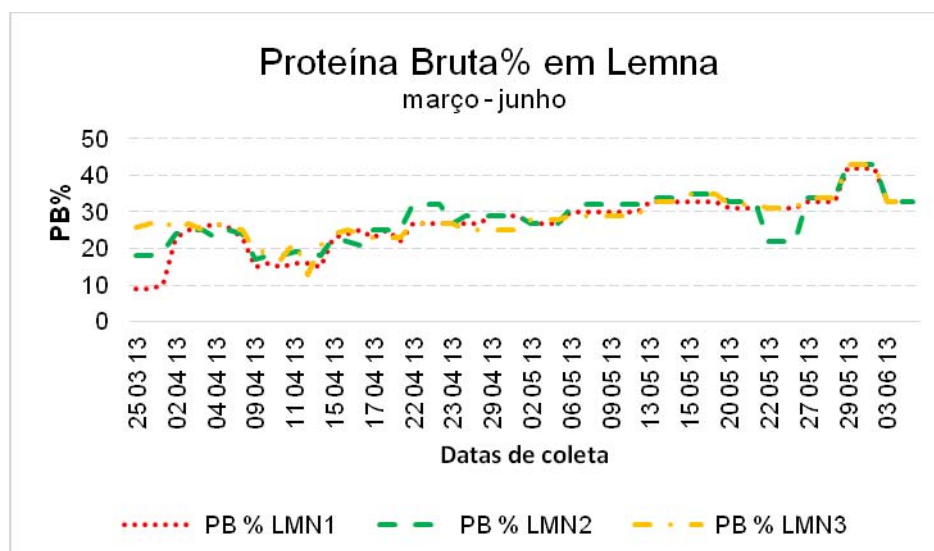
Assim, encontrou-se valor médio de N (%) de  $4,4 \pm 1,2$  na LMN 1 (primeira câmara do sistema de tratamento),  $4,5 \pm 0,1$  na LMN 2 (segunda câmara) e  $4,55 \pm 0,9$  na LMN 3 (terceira câmara), com pequenas variações entre essas. Esses valores estão dentro da faixa de variação encontrada por Landolt e Kandeler (1987) que afirmam ter em *Lemna valdiviana* Phil., teores de nitrogênio (N%) com variações de 0,8 - 7,8%.

**Tabela 19** Valores médios do nitrogênio (N%), nas Fases I e II.

AMOSTRA	LMN 1 (N%)	LMN 2 (N%)	LMN 3 (N%)
MÉDIA	4,36	4,50	4,55
DESV PAD	1,16	1,05	0,92
C. Var	0,27	0,23	0,20

De acordo com a pesquisa de França (2008), quando há aumento de nutrientes disponíveis à *Lemna valdiviana*, tal como o nitrogênio, há também um teor mais elevado de proteína bruta.

O teor de proteína bruta em percentual (PB%) encontrada na *Lemna valdiviana* Phil., na Fase I e II, está na Figura 36 e os seus valores médios na Tabela 20.



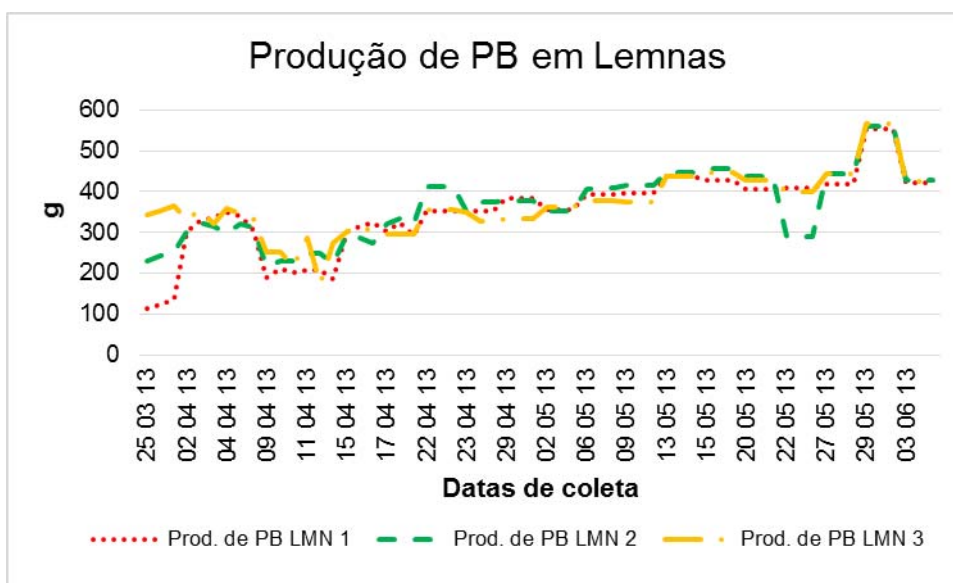
**Figura 36** Teor percentual de proteína bruta (PB%) da macrófita *Lemna valdiviana* Phil., durante as Fase I e II: (março – junho), de 2013.

**Tabela 20** Valores médios de proteína bruta (PB%) *Lemna valdiviana* Phil. na Fase I e II: (março – junho)

AMOSTRA	% PB LMN 1	% PB LMN 2	% PB LMN 3
MÉDIA	27,18	28,22	28,38
DESV PAD	7,26	6,54	5,75
C. Var	0,27	0,23	0,20

No presente estudo, o teor médio de PB%, encontrado na biomassa de lemnas foi de 27,93% (médias entre LMN 1, 2 e 3). Mohedano et al. (2010) encontraram teor médio em sistema de lemnáceas de 35%. No entanto, diversos dados sobre o teor de proteína na biomassa de lemnáceas são encontrados, em lagoas de tratamento, variando entre 20 e 45% (IQBAL, 1999; MOHEDANO, 2004).

A produção de proteína bruta (prod. PB) da *Lemna valdiviana* Phil., está apresentada na Figura 37 e seus valores médios, na Tabela 21.



**Figura 37** Produção de proteína bruta (PB%) da *Lemna valdiviana* Phil., nas Fase I e II do sistema de tratamento: (março – junho), de 2013.

**Tabela 21** Valores médios de produção de proteína bruta (PB) da *Lemna valdiviana* Phil., durante as Fase I e II: (março – junho)

AMOSTRA	Prod. de PB LMN 1	Prod. de PB LMN 2	Prod. de PB LMN 3
MÉDIA	355	367	370
DESV PAD	95,00	86,04	75,28
C. Var	0,27	0,23	0,20

Vale ressaltar que, três fatores precisam estar equilibrados e mantidos dentro de limites ideais, para que a produção de lemna possa desenvolver e são eles: temperatura, cargas de nutrientes e pH (JOURNEY et al.,1993). E apesar de no presente estudo, estes fatores não estiveram dentro desses limites ideais para produção de *L. valdiviana* Phil. Inicialmente havia um desequilíbrio entre eles, que foi sendo equalizado durante as fases do experimento.

Então, ao relacionar os valores de pH e temperatura encontrados no início da pesquisa pode-se inferir que os mesmos tiveram influência na produtividade de *L. valdiviana* Phil, uma vez que, essas lemnas se reproduzem a temperaturas que variam de 6 a 33°C e pH de 5,0 a 9,0 (JOURNEY et al., 1993). No entanto, durante o restante do período experimentais, estas variáveis foram aproximando-se dos valores ideais para essa macrófita, que é de 27°C de temperatura e pH entre 6,5 a 7,5, estabilizando-se e então possibilitando uma produção maior de lemnas e melhor desempenho dessas no tratamento de águas residuárias.

Assim sendo, em climas tropicais, como o de Feira de Santana, Bahia, a produção de lemnas inicialmente encontrou limitação, pois, essas macrófitas apresentam taxas ótimas de crescimento que estão entre 25° C a 31° C (BARÉA e

SOBRINHO, 2006). Mas, no período de janeiro a meados de março, as temperaturas nessa cidade ultrapassaram isso, assim o estabelecimento e a produção da macrófita em estudo foi um desafio que foi sendo sanado após adoção de medidas para estabilizar essa variável.

No entanto, deve-se atentar para a importância de um bom manejo de lemnas na lagoa, visto que é o ato de remover essas macrófitas sistematicamente, que possibilitaria maior desempenho da lagoa no tratamento proposto. Sendo assim, nessa pesquisa se verificou uma necessidade maior em retirar da lagoa em estudo, as lemnas, para que o desempenho dessas fosse ampliado. Contudo, essa ação não foi realizada, pois, promoveria abertura de clareiras na superfície da lagoa, as quais favoreceriam o ressurgimento de algas do gênero *Uronema* e possibilitariam nova competição entre lemnas e algas como discutido anteriormente.

Um dos valores adicionados ao uso desse sistema de tratamento é a possibilidade de reutilização da produção das plantas, uma vez que a biomassa obtida pode ter usos múltiplos como alimento, papel, biocombustíveis (PERBANGKHEM & POLPRASERT, 2010). Mesmo sob essas condições, os resultados encontrados de produção de proteína bruta, indicaram a valorização do tratamento de efluentes, por lagoas de lemnas e a sua viabilização econômica, a partir do uso da biomassa da *Lemna valdiviana* Phil., como uma fonte de proteína importantes para a alimentação de animais e ou a adubação, podendo inclusive ser revertida em uma fonte de renda.



## 6 CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES

Os dados obtidos na entrada e nas saídas do sistema de tratamento foram comparados objetivando a confirmação da redução das concentrações de nutrientes e da maioria das variáveis monitoradas, exceto para os sólidos suspensos totais, visto que no início do monitoramento, houve um incremento e não remoção dos mesmos. A DBO<sub>5</sub> e fósforo foram notadamente reduzidos especialmente na Fase I. Quanto aos parâmetros microbiológicos, na lagoa de lemnas, o decaimento bacteriano ocorreu mesmo com o sombreamento promovido pela biomassa das lemnas, que bloqueou o efeito bactericida da radiação solar, mas o manejo dessa biomassa favoreceu esse decaimento.

No entanto, para admitir a eficiência do sistema sazonalmente seria necessário um acompanhamento mais prolongado, visto que, não houve diferenças significativas ao comparar os valores médios nas saídas durante a mesma fase de operação. Um monitoramento mais prolongado reduziria a indução de erros na interpretação, pois o processo de polimento promoveu a redução de parâmetros em decorrência do metabolismo dos organismos atuantes e das variáveis ambientais, que no caso das macrófitas em questão, são fatores limitantes de sua atuação e desempenho. Desses, como discutido anteriormente, a temperatura e a competição com algas inicialmente foram mais limitantes, trouxeram transtornos, ao ponto de reduzir o período experimental, e somente quando foram amenizadas as temperaturas, tanto naturalmente, quanto com adoção de estratégias artificiais, como sombreamento com tela (50% de sombra) e isolamento térmico das paredes do tanque com uso de placas de isopor esses fatores foram controlados e assim as lemnas puderam realizar o polimento das águas em estudo.

Contudo, cabe destacar que a lagoa poderia ter tido um desempenho maior na remoção dos nutrientes, principalmente se a retirada de biomassa empregada tivesse sido maior e mais constante, permitindo que a mesma sempre estivesse no estágio exponencial de crescimento. Assim, consumiria mais nutrientes, conseqüentemente poderia ter maior produção de biomassa e uma evolução mais minuciosa do quadro de redução de nutrientes pela macrófita *Lemna valdiviana* Phil poderia ter sido constatado. Embora, mesmo com o monitoramento curto, a lagoa de lemnas tenha apresentado redução na concentração de nutrientes (fósforo) e de matéria orgânica (DBO<sub>5</sub>).

Neste estudo, de forma geral, o tratamento de águas residuárias em lagoa de lemnas foi influenciado positivamente pelo tempo de detenção hidráulica (TDH),

quanto maior esse tempo, melhor a eficiência de remoção das substâncias e variáveis analisadas nas diferentes fases. As melhores eficiências de remoção foram encontradas durante a Fase I, que apresentou maior TDH e, esses resultados foram semelhantes a outras pesquisas realizadas em clima tropical e com esse mesmo TDH.

Os resultados das análises destas variáveis, em uma escala temporal, durante o monitoramento do experimento, mostraram que a lagoa de lemna ao receber as águas residuárias domésticas, já tratadas por fossa séptica, a depender das concentrações presentes nesse afluente, é fonte de nutrientes, que são importantes à produção e valorização da biomassa, nesse caso, de macrófitas flutuantes da espécie *Lemna valdiviana* Phil.

Deste modo, no sistema de tratamento em estudo, a macrófita escolhida e analisada, *Lemna valdiviana* Phil., apresentou capacidade de promover melhor polimento das águas residuárias, quando em comparação com outras espécies vegetais, pois essa possui baixo conteúdo de fibras (aproximadamente 5%), assim não requer estrutura de sustentação, logo o seu tecido é quase todo fotossinteticamente ativo, o que lhe confere alta atividade metabólica, e isso reflete diretamente em taxas elevadas de sua produção e de recuperação das substâncias presentes nas águas residuárias domésticas da RU/UEFS.

A capacidade da lagoa de lemna em polir, verificada nessa pesquisa, apresenta outras vantagens dessa em relação a outras lagoas visto que, essa macrófita é macroscópica e flutuante, o que facilita sua coleta e manejo, além de apresentar palatabilidade, não necessitando, portanto, de tratamentos adicionais para sua aceitação como alimento. Sendo assim, o seu manejo em sistemas de tratamento, em pequenas comunidades ou instituições, por exemplo, torna-se mais fácil e mais barata, podendo ser revertida inclusive, em fonte de renda.

Portanto, em águas impactadas por efluentes domésticos, as macrófitas da espécie em estudo, apresentaram potencial em polir e reaproveitar os nutrientes nela presentes. E, além disso, promover o fechamento de ciclos, especialmente os de nutrientes, seguindo desse modo os princípios do saneamento ecológico.

Ao cultivar *Lemna valdiviana* Phil., sobre essas águas ainda, produz-se uma biomassa que apresenta potencialidades para ser usada como complemento de dietas animais ou como adubo, devido à sua riqueza nutricional. O efluente final, assim polido, pode ser destinado ao reúso, desde que observadas e adotadas condições sanitárias adequadas aos respectivos fins a que se destinam essas águas.

Recomenda-se o reúso do efluente gerado com esse tratamento realizado dentro do campus da UEFS, para irrigar jardins, lavar pátios, carros entre outros nessa instituição, contribuindo assim para redução do uso de água potável para fins menos nobres. Sugere-se também a divulgação e aplicação desse modelo de lagoa baseada nos princípios aqui pesquisados, em pequenas comunidades e outras instituições, estreitando os laços da universidade com a sociedade.

## REFERÊNCIAS

ALAERTS, G.; MAHBUBAR, R.; KELDERMAN, P. Performance analysis of a full-scale duckweed-covered sewage lagoon. **Water Res.** v. 30, n. 4, p. 843 - 852, 1996.

APHA; AWWA; WEF. **Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater**. 20a ed. Washington, D. C.: Amer. Public. Health Assoc., Americ. Water Works Association, Water Poll. Control Federation, 1998. 1134p.

BARÉA, L. C.; ALEM SOBRINHO, P. **Comportamento de lagoa de polimento na Região Metropolitana de Curitiba e possibilidade de uso de lentilhas d'água para melhoria da qualidade do efluente**. Sanare (SANEPAR), v. 24, p. 46-60. 2006.

BARROS, R. T. V.; CHERNICHARO, C. A. L.; HELLER, L.; VON SPERLING, M. **Manual de Saneamento e Proteção Ambiental para os Municípios**. v.2, DESA/UFMG, 1995. 221p.

BRASIL, Ministério do Meio Ambiente, Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA. Resolução n. 357 de 17 de março de 2005. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**, Brasília, n. 53, 2005.

CAICEDO, J. R. **Effect of Operational Variables on Nitrogen Transformations in Duckweed Stabilization Ponds**. Tese. Delft, The Netherlands. 2005.163pp.

CAMPOS, J. R. (Coordenador). **Tratamento de esgotos sanitários por processo anaeróbico e disposição controlada no solo**. Rio de Janeiro: ABES - PROSAB. 1999.464 p.

CHERNICHARO, C. A. L. et al. (Coordenador). **Pós-tratamento de efluentes anaeróbios**. Belo Horizonte: PROSAB, 2001. 544p.

COHIM, F.; FONTOURA, K.; COHIM, E.; KIPERSTOK, A. Do saneamento tradicional ao saneamento ecológico: a necessidade de construir uma dimensão sociocultural. In: CONFERÊNCIA INTERNACIONAL EM SANEAMENTO SUSTENTÁVEL, 25-28 nov. 2007, Fortaleza-CE. **Anais...** Fortaleza-CE, 2007.

COHIM, E.; KIPERSTOK, A.; PHILLIPI, L. S.; ALVES, W. C.; GONÇALVES, R. F. **Perspectivas futuras: água, energia e nutrientes**. In: GONÇALVES, F. (coordenador). **Conservação de água e energia em sistemas prediais e públicos de abastecimento de água/Ricardo**. Rio de Janeiro: ABES, 2009.

EL-SHAFI, S.A., EL-GOHARY, F.A., NASR, F.A., VAN DER STEEN, N.P. GIJZEN, H.J. Nutrient recovery from domestic wastewater using a UASB-duckweed ponds system. **Bioresour. Technol.** n. 98, p. 798 - 807. 2007.

ESREY, S. A. et al. **Cerrando el ciclo**. Saneamiento ecológico para la seguridad alimentaria. UNDP, SIDA, México. 2001.

ESREY, S. et al. **Ecological sanitation**. SIDA, Stockholm, 1998. Disponível em: <<http://www.ecosanres.org/PDF%20files/Ecological%20Sanitation.pdf>> Acesso em: 20 abril 2012.

ESTEVEES, F. A. **Fundamentos de Limnologia**. 2. ed. Rio de Janeiro: Interciência, 1998.

ESTEVEES, F. A.; CAMARGO, A. F. Sobre o papel das macrófitas aquáticas na estocagem e ciclagem dos nutrientes. **Acta Limnológica Brasileira**, São Paulo, v.1, 1986. p. 273-298.

FRANÇA, G. M. de O. **Efeito de doses de excrementos de aves na produção e qualidade nutricional de *Lemna valdiviana* Phil. (Araceae) para piscicultura**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, Centro de Ciências Agrárias, Ambientais e Biológicas. Cruz das Almas, BA, 58 p. 2008.

HANCOCK, S.J.; BUDDHAVARAPU L. **Control of Algae Using Duckweed (*Lemna*) Systems: constructed wetlands for water quality improvement**. G. A. Moshiri, Eds. Lewis Publishers, Florida. 399-406. 1993.

HENARES, M. N. P. **Utilização de macrófitas aquáticas flutuantes no tratamento de efluentes de carcinicultura**. Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista, Centro de Aquicultura, Jaboticabal, 2008.

HENRY-SILVA, G. G.; CAMARGO, A. F. M. Valor nutritivo de macrófitas aquáticas flutuantes (*Eichhornia crassipes*, *Pistia stratiotes* e *Salvinia molesta*) utilizadas no tratamento de efluentes de aquicultura. Maringá: **Acta Scientiarum**, v.24, n.2, 2002. p.519-526.

IQBAL, S. **Duckweed aquaculture. Potentials, possibilities and limitations, for combined wastewater treatment and animal feed production in developing countries**. SANDEC Report N°6/99, EAWAG/ SANDEC, Duebendorf, Switzerland, 1999. 91pp.

JOURNEY, W. K.; SKILLICORN, P.; SPIRA, W. **Duckweed aquaculture. A new aquatic farming system for developing countries**. World Bank Publication. 67pp. Washington, D.C. 1993.

KADLEC, R. H; KNIGHT, R. L. **Treatment Wetlands**. Boca Raton: Lewis Publishers, 1996. 893p.

KAYOMBO, S. Et al. Diurnal cycles of variation of physical – chemical parameters in waste stabilization ponds. **Water Research**, v.1, n.3, p. 287-291, 2002.

KOOIJMANS, J. L., LETTINGA, G., VAN VELSEN, A. F. M. **Application of the UASB process treatment of domestic sewage under sub-tropical conditions: the Cali case, Anaerobic treatment: a grownup technology** - EWPCA Conference, Amsterdam, The Netherlands, 1986. p. 4237-4360.

KÖRNER, S.; LYATUU, G.B.; VERMAAT, J.E. The influence of *Lemna gibba* on the degradation of organic material in duckweed-covered domestic wastewater. **Water Res.** v. 32, n. 10, p. 3092–3098. 1998.

- KÖRNER, S.; VERMAAT, J.E. The relative importance of Lemna gibba, bacteria and algae for the nitrogen and phosphorus removal in duckweed – covered domestic wastewater. **Water Res.** v. 32, n. 12, p. 3651–3661, 1998.
- KUSCHK, P., et al. 2003. Annual cycle of nitrogen removal by a pilot-scale subsurface horizontal flow in a constructed wetland under moderate climate. *Water Research*, v. 37, p. 4236–4242.
- LANDOLT, E. **Biosystematic investigations in the family of duckweeds (Lemnaceae)** - The family of Lemnaceae – a monographic study. v.1. Veröff. Geobot. Inst., Zürich, v 71: 1-566, 1986.
- LANDOLT, E.; KANDELER, R. **Biosystematic investigations in the family of duckweeds (Lemnaceae)** – The family of Lemnaceae - a monographic study v.2. Veröff. Geobot. Inst., Zürich, v.95: 1-638,1987.
- LANGERGRABER, G.; MÜLLEGGER, E. **Ecological sanitation - A way to solve global sanitation problems?** Environment International, Austria. 2005.
- MAIA, I. S. **Avaliação de lagoas de maturação modificadas com a presença de suportes e macrófitas da família Lemnaceae no tratamento de esgotos domésticos, 2008.** Dissertação de Mestrado - Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental - Tecnologias de Saneamento Ambiental. Florianópolis, 183, 2008.
- MANILA, C. F. **Ecological Sanitation – An Introduction to the Philippines.** Philippines, 2003.
- MAVIOSO. J. F. **Tratamento de águas residuárias através de leitos de macrófitas:** A influência da vegetação. Instituto Superior Técnico. Universidade Técnica de Lisboa. 2010.
- METCALF, L.; EDDY, H. P. *Wastewater engineering: treatment and reuse.* Revised by George Tchobanoglous, Franklin L. Burton, H.David Stensel, 4th ed. New York: McGraw-Hill Publishing Company, 2003.1819p.
- METCALF, L.; EDDY, H. P. *Wastewater engineering treatment, disposal and reuse.* New York: McGraw-Hill; 1991, 1334 p.
- MOHEDANO, R. A. BELLI FILHO, P.; COSTA, R. H. R; VELHO, V. F.; TAVARES, J. M. R. **Uso de lagoas de macrófitas lemnáceas no tratamento de dejetos suínos com enfoque na oxidação da matéria orgânica.** XV Simpósio Luso-Brasileiro de Engenharia Sanitária (SILUBESA), ABES, Belo Horizonte – MG, 2012 a.
- MOHEDANO, R. A; COSTA, R.H; TAVARES, F.A; BELLI FILHO, P. High nutrient removal rate from swine wastes and protein biomass production by full-scale duckweed ponds. . **Bioresour Technol**, v.112:98-104. 2012 b.
- MOHEDANO, R. A.; BELLI FILHO, P.; HOFMANN, S. M. **Reúso de efluentes em pequenas propriedades de produção de suínos, após o polimento com lagoas de macrófitas lemnáceas (*Landoltia punctata* – Araceae).** X Simpósio Ítalo-Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental I (SIBESA), Maceió AL, 2010.

- MOHEDANO, R. A.; FRACALOSSO, D. M.; RODRIGUES, J. B. R. **Lemna valdiviana** uma planta que trata os efluentes e alimenta peixes cultivados. *Panorama da Aquicultura*, Rio de Janeiro, v. 87, p. 33-40. 2005.
- MOHEDANO, R. A. **Tratamento de efluente e produção de alimento, em cultivo de tilápias (*O. niloticus*), através da macrófita aquática *Lemna valdiviana* (Lemnaceae)** – Uma contribuição para a sustentabilidade da aquicultura. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, Departamento de Aquicultura, Florianópolis, 2004, 44 p.
- MOTA, S. **Introdução à engenharia ambiental**. Rio de Janeiro: ABES, 2006. 388p.
- MOTA, F. S.; VON SPERLING, M. (Coord.). **Nutrientes de esgoto sanitários: utilização e remoção**. Rio de Janeiro: (Projeto PROSAB, Edital 5), ABES v.2., 2009. 428p.
- NASR, F. A.; DOMA, H. S.; NASSAR, H. F. Treatment of domestic wastewater using an anaerobic baffled reactor followed by a duckweed pond for agricultural purposes. **Environmentalist**, v.29: 270–279, 2009
- ORON, G.; DE-VEGT, A.; PORATH, D. Nitrogen removal and conservation of duckweed growth on waste-water. **Wat. Res.**, v.22, 1.79-84. 1988.
- PERBANGKHEM, T.; POLPRASERT, C. Biomass production of papyrus (*Cyperus papyrus*) in constructed wetland treating low-strength domestic wastewater. **Bioresource Technology**, v. 101, 2010.
- PHILIPPI, L. S.; SEZERINO, P. H. **Aplicação de sistemas tipo wetlands no tratamento de águas residuárias**. Florianópolis, 2004, 144 p.
- PHILIPPI JR., A.; MALHEIROS, T. F. **Águas residuárias: visão de saúde pública e ambiental**. In: PHILIPPI JR., A. **Saneamento, saúde e ambiente**. Barueri: Manole, vol. 20. 2005.
- POLISEL, K. C. **Desempenho de lagoas de maturação utilizando macrófitas e chicaneamento**. Tese apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos (SP), Brasil. 2005.
- PORATH, D.; POLLOCK, J. Ammonia stripping by duckweed and its feasibility circulating aquaculture. **Aquat. Bot.**, 1982. 13: 125-131.
- POTT, V. J.; CERVI, A.C. A família Lemnaceae Gray no Pantanal (Mato Grosso e Mato Grosso do Sul), Brasil. **Revista Brasileira de Botânica**, São Paulo, v.22, n.2, 1999. p.153-174, ago.
- RAN, N.; AGAMI, M.; ORON, G. A pilot study of constructed wetlands using duckweed (*Lemna gibba* L.) for treatment of domestic primary effluent in Israel. **Water Research**, vol. 38: 2241-2248. 2004.
- SASSE, A. **Sanitation Concepts for Separate Treatment of Urine, Faeces and Greywater**. Task 8, Fertilizer usage. Berlim, 2005.
- SECO, M. T. D. H. C. **Avaliação de leitos de macrófitas no tratamento de águas residuárias domésticas em Portugal: sistemas de fluxo sub-superficial horizontal**. Dissertação Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro, Vila Real, 2008.

- SILVA, F. C. (Org.). **Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos; Campinas: Embrapa Informática Agropecuária. 1999.
- SMITH, M. D.; MOELYOWATI, I. Duckweed based wastewater treatment (DWWT): design guidelines for hot climates. **Water Science and Technology**, v.43, n. 11, p. 291-299, 2001.
- SOUSA; J. T. de; HENRIQUE, I. N.; LEITE, V. D. ; LOPES, W. S. **Tratamento de águas residuárias: uma proposta para a sustentabilidade ambiental**. Revista de Biologia e Ciências da Terra, Suplemento Especial - Número 1 - 2º Semestre, 2006, 90- 97.
- SOUSA, J. T.; VAN HAANDEL, A.; LIMA, E. P. C., HENRIQUE, I. N. Utilização de wetland construído no pós-tratamento de esgotos domésticos pré-tratados em reator UASB. Engenharia Sanitária e Ambiental, v. 9, n. 4. 285-290 p. 2004.
- SOUZA, V. C.; LORENZI, H. **Botânica sistemática**: Guia ilustrado para identificação das famílias de Angiospermas da flora brasileira, baseado em APGII. Instituto Plantarum, Nova Odessa, Brasil. 2005. 291p.
- SKILLICORN, P.; SPIRA, W.; JOURNEY, W. **Duckweed aquaculture. A new aquatic farming system for developing countries**. Washington: The World Bank, 1993. 74 p.
- TAVARES, F. A. **Eficiência da *Lemna sp.* no tratamento de efluentes líquidos de suinocultura e sua utilização como fonte alternativa de alimento para tilápias**. Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, Departamento de Aquicultura, Florianópolis. 2004. 86p.
- TAVARES, F. A. **Reúso de água e polimento de efluentes de lagoas de estabilização por meio de cultivo consorciado de plantas da família Lemnaceae e tilápias** – Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-graduação em Engenharia Ambiental. Florianópolis, 2008. 237p.
- TAVARES, F. A.; RODRIGUES, J. B. R.; BELLI FILHO, P.; LOBO-RECIO, M. A.; LAPOLLI, F. R. **Desempenho da macrófita *Lemna valdiviana* no tratamento terciário de efluentes de suinocultura e sua contribuição para a sustentabilidade da atividade**. Biotemas, vol. 21, n.1, 2008.
- TSATSENKO, L. V.; MALYUGA, N. G. **Lemnaceae - bioindicators for the ecosystem**. 2002. Disponível em: <http://webcenter.ru/%7Educkweed/index-e.htm>. Acesso: fevereiro de 2012.
- TUNDISI, J. G. **Água no século XXI: enfrentando a escassez**. RIMA/IIE, 2003. 247p.
- USEPA – United States Environmental Protection Agency. 2000. **Manual for Constructed Wetlands Treatment of Municipal Wastewaters**. EPA/625/R-99/010, Cincinnati, 166p.



VON SPERLING, M. **Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos**. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental. Belo Horizonte: Ed. da UFMG. 2005. 452p.

XU, J., SHEN, G. Growing duckweed in swine wastewater for nutrient recovery and biomass production. **Bioresour. Technol.** 102, 848–853. 2011

ZIMMO, O.; VAN DER STEEN, N., GIJZEN, H. Comparison of ammonia volatilization rates in algae and duckweed-based waste stabilization ponds treating domestic wastewater. **Water Research** 37: 4587-4594, 2004.

WEANER, J. E.; CLEMENTS, F. E. **Plant Ecology**. New York: Mc. Graw Hill, 1983.