

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM TECNOLOGIA AMBIENTAL**  
**– MESTRADO**  
**ÁREA DE CONCENTRAÇÃO EM GESTÃO E TECNOLOGIA**  
**AMBIENTAL**

Núbia Cristina Weber Freitas

**TRATAMENTO DE EFLUENTE DE CAMPUS UNIVERSITÁRIO VIA SISTEMA**  
**DE BAIXO CUSTO COM LEITOS CULTIVADOS (*Wetland*)**

Santa Cruz do Sul, maio de 2008.

# **Livros Grátis**

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

Milhares de livros grátis para download.

Núbia Cristina Weber Freitas

**TRATAMENTO DE EFLUENTE DE CAMPUS UNIVERSITÁRIO VIA SISTEMA  
DE BAIXO CUSTO COM LEITOS CULTIVADOS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Tecnologia Ambiental – Mestrado, Área de Concentração em Gestão e Tecnologia Ambiental, Universidade de Santa Cruz do Sul – UNISC, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Tecnologia Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. Ênio Leandro Machado

Co-orientador: Prof<sup>o</sup>. Dr. Diosnel Antonio  
Rodriguez Lopez

Santa Cruz do Sul, maio de 2008.

Núbia Cristina Weber Freitas

**TRATAMENTO DE EFLUENTE DE CAMPUS UNIVERSITÁRIO VIA SISTEMA  
DE BAIXO CUSTO COM LEITOS CULTIVADOS (*Wetland*)**

Esta Dissertação foi submetida ao Programa de Pós-Graduação em Tecnologia Ambiental – Mestrado, Área de Concentração Gestão e Tecnologia Ambiental, Universidade de Santa Cruz do Sul – UNISC, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Tecnologia Ambiental.

*Dr. Odorico Konrad*

Centro Universitário - UNIVATES

*Dr. Jair Putzke*

Universidade de Santa Cruz do Sul - UNISC

*Dra. Lourdes Teresinha Kist*

Universidade de Santa Cruz do Sul - UNISC

*Dr. Diosnel Antonio Rodriguez Lopez*

Universidade de Santa Cruz do Sul - UNISC  
Co-Orientador

*Dr. Ênio Leandro Machado*

Universidade de Santa Cruz do Sul - UNISC  
Orientador

## **AGRADECIMENTO**

Agradeço primeiramente a Deus, por sua proteção nestes dois anos de estrada e estudos.

Agradeço aos meus filhos Priscila, Camila e Alexandre por compreenderem a minha ausência e esforço na busca da qualificação.

Agradeço ao meu amor, companheiro, esposo e amigo Gilberto, por estar sempre presente nos momentos em que precisei de força para continuar.

Meu agradecimento a minha querida mãe Lucila, que sempre está pronta a ajudar, de uma maneira ou de outra.

Agradeço aos meus amigos amigos, colegas e companheiros de estrada: Ângela, Cristiane, Emitério e Cínara, pelo carinho e atenção dispensada.

Agradeço aos meus colegas de Setor dos laboratórios da URI - Santo Ângelo, Direção do Campus e a Coordenação e Professores do Curso de Ciências Biológicas .

Agradeço ao Professor Co-orientador Diosnel Antonio Rodriguez Lopez que auxiliou em aportes de discussão sempre com bom humor.

Um agradecimento muito especial ao professor Enio Leandro Machado, que soube compreender as dificuldades enfrentadas para a realização deste mestrado e compartilhou na busca de novos conhecimentos e resultados para a conclusão do mestrado em tecnologia ambiental, um sonho realizado.

Aos acadêmicos estagiários Leonardo Benvegnú e Filipe Nerves pela dedicação e presteza, que muito contribuiu na execução dos objetivos propostos neste trabalho.

Muito obrigado!

## RESUMO

O presente trabalho avaliou o tratamento biológico em efluentes secundários de campus universitário com leitos cultivados (*Wetland*), de fluxos sub-superficiais em regime misto ascendente e descendente. Os efluentes secundários foram gerados a partir de reator UASB, em um sistema controlado, na Estação de Tratamento de Efluentes da UNISC - Universidade de Santa Cruz do Sul, na Cidade de Santa Cruz do Sul/RS – Brasil. Foi verificada a eficiência dos leitos cultivados quanto ao cultivo de Capim elefante (*Pennisetum purpureum*), no período de abril de 2007 a agosto de 2007, e a macrófita aquática Espadana (*Zizaniopsis bonariensis*), no período de setembro de 2007 a janeiro de 2008. Foram avaliados os valores de DQO, COT, DBO, OD, SST, Turbidez, Fósforo Total, Coliformes termotolerantes, NTK,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{NO}_3^-$ , condutividade, pH e temperatura, comparando as concentrações citadas do efluente da saída do decantador secundário com os efluentes dos leitos cultivados. Todos os parâmetros caracterizados foram analisados por meio de uma sonda multiparâmetros IQ SensorNet da WTW. A caracterização demonstrou concentração de DQO inferior a  $400 \text{ mg L}^{-1}$  e altos valores de nitrogênio amoniacal ( $70\text{-}500 \text{ mg L}^{-1}$ ), configurando-se o principal problema de impacto ambiental nos efluentes estudados de acordo com a resolução 128/06. O Capim elefante (*Pennisetum purpureum*) sofreu danos foliares devido a baixas temperaturas no mês de julho, não sendo possível quantificar a massa seca. A macrófita aquática Espadana (*Zizaniopsis bonariensis*), demonstrou maior adaptação ao sistema, destacando-se no primeiro leito cultivado de fluxo ascendente, caracterizado por superfície encharcada. Totalizou 0,276 kg (leito cultivado 1) e 0,222 kg (leito cultivado 2) de massa seca em  $1,76 \text{ m}^2$  de área superficial nos respectivos leitos cultivados. Na fase Capim elefante (*Pennisetum purpureum*), obteve-se 81% de redução de DQO e 50% de  $\text{NH}_4^+$  na seqüência dos leitos cultivados 1 e 2. A conversão para nitrogênio nitrato ocorreu principalmente no leito cultivado de fluxo descendente. A Espadana (*Zizaniopsis bonariensis*) mostrou maior adaptação para as variações de temperatura e no leito de fluxo ascendente (regime alagado). Os valores de reduções seqüenciais para este caso foram de 26% de DQO e 50%  $\text{NH}_4^+$ . Menores cargas volumétricas são necessárias para adequações dos valores finais de nitrogênio amoniacal e nitrato. No entanto, o reúso dos efluentes finais para fertirrigação também aparecem como potencial.

PALAVRAS CHAVE: Leitos Cultivados, *Pennisetum purpureum*, *Zizaniopsis bonariensis*

## ABSTRACT

This study analyzed a secondary biological effluent treatment in a university campus using underground flows in a mixed upward and downward system in cultivated beds. The secondary effluents were gotten from a UASB reactor, in a controlled system, at the Effluent Treatment Station at UNISC - Universidade de Santa Cruz do Sul, in Santa Cruz do Sul/RS – Brazil. The efficiency of the cultivated beds concerning the culture of elephant grass (*Pennisetum purpureum*) in a period of time from April, 2007 through August, 2007, and the aquatic Espadana (*Zizaniopsis bonariensis*), in a period of time from September, 2007 through January 2008 were checked. The DQO, COT, DBO, OD and SST values, whirlwindness, total phosphorus, thermo tolerant coliforms, NTK,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{NO}_3^-$ , conductivity, pH and temperature were analyzed comparing the mentioned output effluent concentrations from the secondary pouring off to the cultivated beds. Every characterized parameter was analyzed using a WTW SensorNet IQ multiparameter plummet. The characterization showed concentrations of DQO under  $400 \text{ mg L}^{-1}$  and higher amoniacal nitrogen values ( $70\text{-}500 \text{ mg L}^{-1}$ ), pointing out the main environmental impact problem in the studied effluents according to the resolution 128/06. The elephant grass presented foliage damage due to low temperatures in the month of July, So, it was not possible to quantify the dry mass. The Espadana (*Zizaniopsis bonariensis*) aquatic macrofit, showed a better adaptation to the system, standing out in the first cultivated bed with upward flow, characterized by a swamp surface. Summing up  $0,276 \text{ kg}$  (cultivated bed 1) and  $0,222 \text{ kg}$  (cultivated bed 2) of dry mass in a surface area of  $1,76 \text{ m}^2$  in both cultivated beds. In the elephant grass phase (*Pennisetum purpureum*), a 81% DQO and 50% of  $\text{NH}_4^+$  reductions were showed in the sequence of the cultivated beds 1 and 2. The conversion into nitrogen nitrate happened mainly in the cultivated bed with downward flow. The Espadana (*Zizaniopsis bonariensis*) presented a better adaptation to the temperature variations and also to the cultivated bed with upward flow in the swamp system. The sequential reduction values in the case were 26% of DQO and 50% of  $\text{NH}_4^+$ . Smaller volumetric loads are necessary for the final values of amoniacal and nitrogen nitrate fitnesses. However, the reuse of final effluents for fertiirrigation is showed as potential as well.

KEYWORDS: cultivated beds, *Pennisetum purpureum*, *Zizaniopsis bonariensis*

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b>	Transformação do nitrogênio no <i>wetland</i> .....	19
<b>Figura 2.</b>	Transformação do fósforo nos <i>wetland</i> .....	20
<b>Figura 3.</b>	Reprodução esquemática de um sistema de fitorremediação em tratamento de águas residuárias baseado em macrófitas emergentes .....	24
<b>Figura 4.</b>	<i>Zizaniopsis bonariensis</i> . .....	25
<b>Figura 5.</b>	<i>Pennisetum purpureum</i> .....	26
<b>Figura 6.</b>	Unidade piloto de tratamento .....	30
<b>Figura 7.</b>	Detalhes das medidas dos <i>wetlands</i> .....	33
<b>Figura 8.</b>	Visão estratificada montagem dos Leitoss cultivados.....	34
<b>Figura 9.</b>	Vista panorâmica da unidade piloto implantada na UNISC com leitoss cultivados.....	34
<b>Figura 10.</b>	Esquema geral da unidade de tratamento de efluentes da UNISC .....	37
<b>Figura 11.</b>	Varição das concentrações de material carbonáceo nas etapas sequenciais de anaerobiose e fitorremediação .....	40
<b>Figura 12.</b>	Varição das concentrações de material carbonáceo nas etapas sequenciais de fitorremediação com capim elefante.....	41
<b>Figura 13.</b>	Varição das concentrações de nitrogênio amoniacal nas etapas sequenciais de anaerobiose e fitorremediação com capim elefante.....	42
<b>Figura 14.</b>	Varição das concentrações de nitrogênio amoniacal nas etapas sequenciais de fitorremediação com capim elefante .....	42
<b>Figura 15.</b>	Varição das concentrações de nitrato nas etapas sequenciais de anaerobiose e fitorremediação com capim elefante .....	43
<b>Figura 16.</b>	Varição das concentrações de nitrato nas etapas sequenciais de fitorremediação com capim elefante .....	44
<b>Figura 17.</b>	Capim elefante ( <i>Pennisetum purpureum</i> ) adaptado em sistema de leitoss cultivados ETE/UNISC .....	44
<b>Figura 18.</b>	Capim elefante com danos foliares devido as baixas temperaturas .....	45
<b>Figura 19.</b>	Varição das concentrações de material carbonáceo nas etapas de fitorremediação com Espadana .....	45
<b>Figura 20.</b>	Varição das concentrações de nitrogênio amoniacal nas etapas de fitorremediação com Espadana .....	46
<b>Figura 21.</b>	Varição das concentrações de nitrato nas etapas de fitorremediação com Espadana .....	47
<b>Figura 22.</b>	Leitoss cultivados com Espadana ( <i>Zizaniopsis bonariensis</i> ) antes e após poda .....	48



**LISTA DE TABELAS**

<b>Tabela 1.</b> Constituintes e mecanismos de remoção do sistema <i>wetlands</i> .....	21
<b>Tabela 2.</b> Algumas macrófitas emergentes mais usadas em <i>wetlands</i> e suas condições desejáveis .....	22
<b>Tabela 3.</b> Métodos analíticos para caracterização dos efluentes da unidade piloto.....	31
<b>Tabela 4.</b> Esquema de preenchimento do leito filtrante por unidade construída .....	34
<b>Tabela 5.</b> Dados de caracterização do efluente do tanque equalizador .....	38
<b>Tabela 6.</b> Cargas médias aplicadas no período experimental .....	39
<b>Tabela 7.</b> Profundidade máxima atingida pelas raízes da Espadana durante o período de Operação dos leitos cultivados ... ..	48

## LISTA DE ABREVIATURAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
CONSEMA-RS	Conselho do Meio Ambiente do Rio Grande do Sul
COT/TOC	Carbono Orgânico Total
CV	Coefficiente Volumétrico
DBO	Demanda Bioquímica de Oxigênio
DQO	Demanda Química de Oxigênio
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
ETE	Estação de Tratamento de Esgotos
LC	Leito Cultivado
NH <sub>4</sub> <sup>-</sup>	Amônia Ionizada
NH <sub>4</sub> -N	Nitrogênio Amoniacal
NH <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Amônia Livre
NMP	Número Mais Provável
NO <sub>2</sub>	Óxido nítrico
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Nitrato
NO <sub>3</sub> -N	Nitrogênio Nitrato
NTK	Nitrogênio Total Kjeldal
NTU	Unidade Nefelométrica de Turbidez
OD	Oxigênio Dissolvido
OMS	Organização Mundial da Saúde
pH	Potencial Hidrogênio Iônico
PNMA	Política Nacional de Meio Ambiente
PNRH	Política Nacional de Recursos Hídricos
SON	Solubilidade orgânica do Nitrogênio
SOP	Solubilidade Orgânica do Fósforo
SST/TSS	Sólidos Suspensos Totais
SSMA	Secretaria Saúde e Meio Ambiente
TDH	Tempo de Detenção Hidráulica
UASB	Uplow Anaerobic Sludge Blanket (Reator Anaeróbio de Manta de Lodo)

## SUMÁRIO

1	Introdução .....	11
2	Referencial Teórico .....	14
	2.1 Leitos Cultivados ( <i>Wetlands</i> ).....	14
	2.2 Processos de Depuração da Matéria Orgânica .....	17
	2.3 Macrófitas e Fitorremediação .....	20
	2.3.1 Espadana ( <i>Zizaniopsis bonariensis</i> ).....	25
	2.3.2 Capim elefante ( <i>Pennisetum purpureum</i> ).....	26
	2.4 Fertirrigação .....	26
	2.5 Legislação Hídrica e Ambiental Brasileira Pertinente à Gestão das Águas .....	28
3	Metodologia .....	30
	3.1 Caracterização do Local de Estudo .....	30
	3.2 Caracterização Analítica dos Efluentes .....	30
	3.3 Caracterização da Biomassa .....	32
	3.4 Concepção e Montagem da Unidade de Fitorremediação .....	32
	3.5 Ensaio de Tratamento .....	35
4	Resultados e Discussões .....	37
	4.1 Características Analíticas do Efluente Estudado e da Fonte Geradora .....	37
	4.2 Ensaio de Tratamento .....	39
	4.2.1 Leitos cultivados construídos com Capim elefante.....	40
	4.2.1 Leitos cultivados construídos com Espadana ( <i>Zizaniopsis bonariensis</i> ).....	45
5	Considerações Finais .....	49
6	Referências .....	50

## 1 Introdução

A disponibilidade de água de qualidade é uma condição para a própria vida e deve apresentar padrões físico-químicos e sanitários apropriados para evitar riscos ao meio ambiente, preservando a saúde dos seres vivos. O saneamento ambiental constitui um fator fundamental nos níveis de saúde e na qualidade de vida de um povo.

Nos países em desenvolvimento, onde há deficiências de saneamento básico, a água é o destino final de diversos materiais contaminados e poluentes em geral jogados na atmosfera ou no solo. Esses poluentes podem infiltrar-se até os lençóis freáticos e a água subterrânea em geral, escorrer para os lagos, rios e oceanos, causando sua deteriorização (BRANCO, 1986).

O aumento do consumo de água nos centros urbanos gera, simultaneamente, um maior volume de esgotos sanitários. Estes, por sua vez, exigem uma destinação adequada, caso contrário, haverá o risco de contaminação dos ecossistemas aquáticos. Sendo assim, tecnologias economicamente viáveis de tratamento de águas residuárias devem ser inseridas.

Os sistemas de saneamento devem dispor de um tratamento adequado dos esgotos coletados para alcançar parâmetros exigidos pela legislação. Um sistema adequado de tratamento de esgotos deve ser compatível com a realidade local, demonstrar eficiência, fácil operação, manutenção e baixo custo.

Sistemas alagados (*wetland*) construídos são caracterizados por apresentarem moderado custo de capital, baixo custo de energia e manutenção, estética paisagística e aumento do habitat para a vida selvagem (MICHAEL Jr., 2003 e IWA, 2000, apud LIN *et al.* 2005).

Os “*wetlands*” são considerados hoje como um método de tratamento alternativo na redução do impacto ambiental. As propriedades dos *wetlands* incluem alta produtividade das plantas presentes, existência de grandes superfícies de adsorção no solo e nas plantas, presença de regiões aeróbicas e anaeróbicas e população de microorganismos ativos (URBANIC-BERNIC, 1994).

As reações ocorridas na fase aeróbia e anaeróbia dos compostos orgânicos são determinantes para transformação de poluentes em produtos com menor impacto ambiental. A utilização de *wetlands* em tratamentos secundários de efluentes residuais é de grande importância, uma vez que compostos orgânicos lançados em excesso nos corpos d’água causam eutrofização.

A eutrofização é um processo dinâmico, no qual ocorrem profundas modificações qualitativas e quantitativas nas comunidades aquáticas, nas condições físicas e químicas do meio e no nível de produção do sistema, podendo ser considerada uma forma de poluição (ESTEVEVES, 1998).

O tratamento secundário realizado pelos *wetlands* utiliza as macrófitas aquáticas, as quais devem apresentar aspectos de sanidade das plantas, viabilidade do seu cultivo em longo prazo e aspectos estéticos do sistema. Desde a criação do termo macrófitas aquáticas em 1938 o conceito desses vegetais foi sendo moldado por alguns autores, como Cook (1974) e Irgang e Gastal (1996). De acordo com o primeiro autor, as plantas aquáticas são todos os vegetais desde "Charophyta, Bryophyta, Pteridophyta e Spermatophyta cujas partes fotossinteticamente ativas estão permanentemente ou por alguns meses em cada ano submersas no corpo d' água ou flutuantes na superfície d'água". Irgang & Gastal (1996) apud Lisboa e Gastal Jr. (2003), com base no conceito de Cook (1974), incluem as plantas de ambientes salobros e marinhos à definição.

As macrófitas aquáticas emergentes são as mais adequadas para cultivo em *wetlands*. Dentre elas as mais utilizadas são a *Zizaniopsis bonariensis*, o *Phragmites* sp. e a *Scirpus* sp. As macrófitas aquáticas devem desempenhar os seguintes papéis na remoção de poluentes: facilitar a transferência de gases ( $O_2$ ,  $CH_4$ ,  $CO_2$ ,  $N_2O$  e  $H_2S$ ) do sistema; estabilizar a superfície do leito pela formação de denso sistema radicular, protegendo o sistema do processo erosivo e impedindo a formação de canais de escoamento preferencial na superfície do *wetland*; absorver macronutrientes (N e P) e micronutrientes (incluindo metais); suprir, com subprodutos da decomposição de plantas e exsudados das raízes, carbono biodegradável para possibilitar a ocorrência do processo de denitrificação; atuar como isolante térmico nas regiões de clima temperado; proporcionar habitat para vida selvagem e agradável aspecto estético (BRIX 1994 a 1997), REED *et al.* (1995) e TANNER (2001).

A recuperação ou tratamento de águas residuárias de origem doméstica por *wetlands* cultivados indicam resultados satisfatórios na remoção de carga poluidora presente no efluente. As águas residuárias tratadas em *wetlands* podem ser utilizadas na fertirrigação, apresentando-se como uma alternativa em potencial no consumo de um grande volume de efluente. A fertirrigação é realizada em atividades florestais e agrícolas.

O uso de esgotos sanitários em irrigação, tratados ou não, é uma prática antiga em países como Austrália, Israel, Estados Unidos, México e Peru. No Brasil o reuso de águas servidas é pequena, mas registram-se vários exemplos de utilização de esgotos sanitários em irrigação, em geral, de forma espontânea e não controlada (MARQUES *et al.*, 1999).

Este trabalho tem como objetivo avaliar a aplicação de leitos cultivados (*wetlands*) construídos no tratamento de efluentes (águas negras) de campus universitário na etapa pós-anaerobiose, visando especialmente remoção de carga poluente em termos de DQO e nitrogênio amoniacal.

## 2 Referencial Teórico

### 2.1 Leitões Cultivados (*Wetlands*)

O termo *wetlands* significa “aquelas áreas que inundadas ou saturadas pela água de superfície ou a terra em uma frequência e em uma duração suficientes de suportar, e que sob circunstâncias normais suportam uma prevalência da vegetação adaptado tipicamente para a vida em condições saturadas do solo (APHA, 1995).

Os “*wetlands*” naturais destacam-se entre os processos de autodepuração por serem áreas inundadas constante ou sazonalmente, que desenvolvem uma vegetação adaptada à vida em solos alagados, com valor ecológico inestimável quanto à melhoria da qualidade da água. Várzeas de rios, pântanos, brejos e estuários estão entre os ecossistemas mais férteis e produtivos do mundo, apresentando enorme diversidade biológica. Neles a água, os vegetais e o solo formam um ecossistema equilibrado, com a reciclagem de nutrientes. Essa reciclagem é obtida através de processos químicos, físicos e biológicos. Essas áreas ocupam aproximadamente 6% da superfície sólida do planeta. Mas, estão diminuindo em todo mundo, porque são drenados ou aterrados para expansão das cidades, ou alagados para construção de represas, assim como também utilizados como depósitos de lixo ou destruídos pela poluição, sendo lentamente extintos (D'AMBRÓSIO, 2006).

Lautenschlager (2001) apresenta como principais fatores que podem afetar o funcionamento dos leitões cultivados os fatores climáticos, em função da temperatura que afeta as taxas de reações físico-químicas e bioquímicas, a volatilização e a evapotranspiração; radiação solar que afeta a taxa de crescimento da vegetação devido à fotossíntese, a qual depende também do número de horas de insolação por dia; precipitação que afeta o balanço hídrico dos leitões cultivados; vento que afeta a taxa de evapotranspiração e as trocas gasosas entre a atmosfera e o meio aquático. O solo e geologia possuem a capacidade de remoção de poluentes por um leito cultivado é devida as interações poluentes-substrato. O fenômeno de sorção desempenha papel fundamental neste processo e depende das características do substrato e de cada poluente considerado.

As atividades biológicas são importantes para o bom desempenho dos leitões cultivados no que tange à remoção de poluentes. O crescimento microbiológico é limitado tanto pela

presença de substrato em quantidade adequada, como pela temperatura e pelos valores de pH do meio. A temperatura ótima para a população microbiana varia de 15 a 35°C. Seu crescimento também ocorre fora desta faixa, embora seja mais reduzido.

Os “*wetlands*” construídos visam estimular o uso e melhorar as propriedades dos “*wetlands*” naturais, relativas à degradação de matéria orgânica, ciclagem de nutrientes e conseqüentemente, melhorar a qualidade do efluente (MARQUES, 1999).

Esses sistemas artificiais têm sido usados em diversos países para o tratamento secundário e terciário de águas residuárias (SALATI JR. *et al.*, 1999), pois são simples de construir, de fácil operação e manutenção e de custo baixo. Os componentes básicos de um *wetland* são:

1) **Substrato** - pode ser usado como substrato, resíduos de mineração como areia, silte, cascalho, brita e outros; e resíduos orgânicos. O substrato promove espaços vazios que servem de canais de vazão, facilitando o escoamento do esgoto ou da água poluída, de acordo com sua permeabilidade. Constitui, aliado às raízes das macrófitas aquáticas, local ideal para a remoção de nutrientes e para a formação do biofilme microbiano. O substrato deverá ser colocado sobre uma proteção impermeável de lona, manta, asfalto ou argila compactada, que evita a contaminação do solo e eventual infiltração até o lençol freático. Essas camadas permitem a contenção da água poluída no sistema (MARQUES, 1999; SALATI JR. *et al.*, 1999);

2) **Macrófitas aquáticas** – podem ser usadas espécies vegetais nativas que se caracterizam por crescer em locais alagados a maior parte do tempo (JOLY, 1991). Suas raízes captam nutrientes e outras substâncias da água que alimenta o sistema. Incorporam ar pelas folhas e o transfere aos rizomas e raízes através do aerênquima (tecido vegetal de preenchimento). O oxigênio passa das raízes ao substrato, que pode apresentar-se em condições de anaerobiose por estar submerso. Essa transferência de oxigênio aumenta a degradação aeróbia de compostos orgânicos no local (BRIX, 1997). As espécies mais usadas são as dos gêneros *Typha*, *Juncos*, *Scirpus*, *Carex* e *Phragmites*.

3) **Biofilme microbiano** - desenvolvem-se na rizosfera, raízes e substrato. Esse filme biológico é composto por colônias de bactérias, protozoários, micrometazoários e outros microrganismos que degradam a matéria orgânica para sais inorgânicos tornando os nutrientes disponíveis para as macrófita (MARQUES, 1999);



4) **Distribuição da água residuária pelo leito** – deve ser caracterizada pela simplicidade de manutenção e operação. As estruturas de entrada e saída da água de alimentação podem ser trincheiras cheias de pedras para facilitar a distribuição do afluente por todo o leito, diminuir o impacto da correnteza sobre o biofilme e garantir a máxima assimilação de poluentes. Para a drenagem das trincheiras recomenda-se o uso de tubos de PVC, que também controlam o nível de água no sistema. Quando o fluxo se mantém embaixo e perto da superfície do substrato, trata-se de um *wetland* de fluxo subsuperficial e no caso do fluxo de água residuária manter-se na superfície do substrato (o que pode atrair insetos), denomina-se *wetland* de fluxo superficial (MARQUES, 1999).

No primeiro sistema, de fluxo horizontal, o esgoto é disposto na porção inicial (zona de entrada) e percola vagorosamente pelo material filtrante até a porção final. Essa percolação tende a seguir na horizontal e é provocada por uma pequena declividade de fundo. Nesse sistema, o esgoto entra em contato com zonas aeróbias, anóxicas e anaeróbias. A primeira zona é mais evidente ao redor das raízes e rizomas das macrófitas aquáticas, uma vez que essas transportam oxigênio da parte aérea para as raízes, além da ocorrência de fenômenos como a convecção e difusão de oxigênio atmosférico (COOPER *et al.* 1996; Brix, 1997). A segunda e a terceira zonas ocorrem nas camadas mais profundas do leito filtrante.

Esse sistema possui, de forma geral, boa performance na remoção de matéria orgânica (DBO e sólidos suspensos) e Nitrogênio (nitrificação e denitrificação), com ênfase na denitrificação (COOPER *et al.*, 1996).

Os sistemas de fluxo vertical são módulos escavados no terreno, com superfície plana, preenchidos com um material de recheio – material filtrante composto na maioria das vezes por camadas de areia e brita. Da mesma forma do sistema de fluxo horizontal, as macrófitas aquáticas são plantadas diretamente no material de recheio. O efluente é disposto intermitentemente sob a superfície do módulo, inundando-o e percolando verticalmente ao longo de todo o perfil vertical, sendo coletado no fundo por meio de um sistema de drenagem/coleta (SEZERINO, 2002).

A forma de aplicação intermitente promove um grande arraste de oxigênio atmosférico para o material filtrante. Quando nova aplicação é realizada, o oxigênio anteriormente introduzido na massa sólida se mantém dentro da mesma e, somado com a nova quantidade de oxigênio arrastada por esta nova aplicação, a quantidade de oxigênio dentro do material filtrante tornando-se suficiente para a degradação da matéria orgânica da amônia (COOPER *et al.*, 1996).

Nesse sistema também ocorre introdução de oxigênio no material filtrante pela transferência da parte aérea para as raízes das plantas. Porém, a entrada de oxigênio dessa forma é bem inferior à porção difundida / arrastada da atmosfera (IWA, 2000).

As bactérias heterótrofas, comumente encontradas em águas naturais e nas que recebem matéria orgânica, proliferam no substrato, formando um biofilme que promove a autodepuração dessa água. Na degradação biológica dos constituintes orgânicos dos esgotos e na eliminação de patógenos em *wetlands* artificiais, o substrato e as raízes das macrófitas aquáticas têm papel crucial (HAGENDORF *et al.*, 2000).

## 2.2 Processos de Depuração da Matéria Orgânica

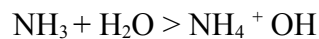
Os processos de depuração da matéria orgânica, transformação da série nitrogenada e retenção de fósforo são físicos – filtração e sedimentação; químicos – adsorção, complexação e troca iônica; biológicos – degradação microbiológica aeróbia e anaeróbia, predação e retirada de nutrientes pelas macrófitas, ocorrendo tanto no material filtrante como na rizosfera. O maior mecanismo de remoção de nitrogênio orgânico nos *Wetlands* construídos é a seqüência dos processos de amonificação, nitrificação e denitrificação (IWA, 2000; COOPER *et al.*, 1996).

O primeiro processo é a conversão do nitrogênio orgânico em nitrogênio inorgânico, especialmente amônia. Esse processo já é realizado antes da entrada dos esgotos nas ETEs, ou seja, no sistema de coleta e interceptação. O processo de nitrificação necessita de um meio aeróbio e é realizado em duas etapas, primeiramente as *Nitrosomonas* (bactérias autotróficas) oxidam a amônia ( $\text{NH}_3$ ) a Nitrito ( $\text{NO}_2$ ). Em seguida as *Nitrobacter* oxidam o Nitrito a Nitrato ( $\text{NO}_3$ ) (PELCZAR, 1981).

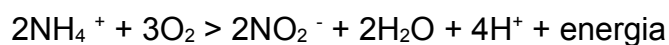
A denitrificação é definida como um processo no qual bactérias quimioheterotróficas reduzem o nitrato ( $\text{NO}_3$ ) a óxido nítrico, óxido nitroso e finalmente a nitrogênio gasoso. Esse processo requer condições anóxicas, onde o oxigênio dissolvido não está presente, sendo então disponibilizado o oxigênio de fontes como o nitrato, nitrito, fosfato ou até mesmo o sulfato (COOPER *et al.*, 1996).

O nitrogênio é frequentemente ilimitado em solos inundados, em *wetlands* naturais ou em *wetlands* agrícolas tais como lavouras de arroz (GAMBRELL e PATRICK, 1978). A transformação do nitrogênio em solos do wetland envolve diversos processos microbiológicos, alguns fazem o nutriente menos disponível para o desenvolvimento das plantas. As transformações do nitrogênio que dominam solos de *wetlands* são mostradas na

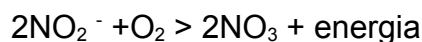
Figura 1. O íon amônio é preliminar ao nitrogênio mineralizado na maioria de solos inundados do *wetland*, embora muito do nitrogênio é fixado acima em formas orgânicos em solos altamente orgânicos. A presença de uma zona oxidada sobre a zona anaeróbia ou reduzida é crítica para diversas reações. A mineralização do nitrogênio deve-se à transformação biológica do nitrogênio orgânico combinado ao nitrogênio do amônio durante a degradação da matéria orgânica esta reação ocorre sob circunstâncias anaeróbias e aeróbicas e fazem parte da amonificação (GAMBRELL e PATRICK, 1978). As fórmulas típicas para a mineralização de um composto orgânico simples do nitrogênio, são dadas como:



Uma vez que o íon do amônio ( $\text{NH}_4^+$ ) é dado na fórmula, pode fazer diversas reações possíveis. Pode ser absorvido por plantas através de seus sistemas da raiz ou por microorganismos anaeróbicos e ser convertido para matéria orgânica. Pode também ficar imobilizado com a troca de íon em partículas negativamente carregadas do solo. Por causa das condições anaeróbicas em solos do *wetland*, o amônio normalmente seria restrito de uma oxidação mais adicional e construiria até níveis excessivos para a camada oxidada fina na superfície de muitos solos do *wetland*. O gradiente entre concentrações elevadas do amônio nos solos reduzidos e concentrações baixas na camada oxidada causa uma difusão ascendente do amônio, muito lentamente, à camada oxidada. Este nitrogênio do amônio é oxidado então com o processo da nitrificação em duas etapas por *Nitrisomonas sp.*:

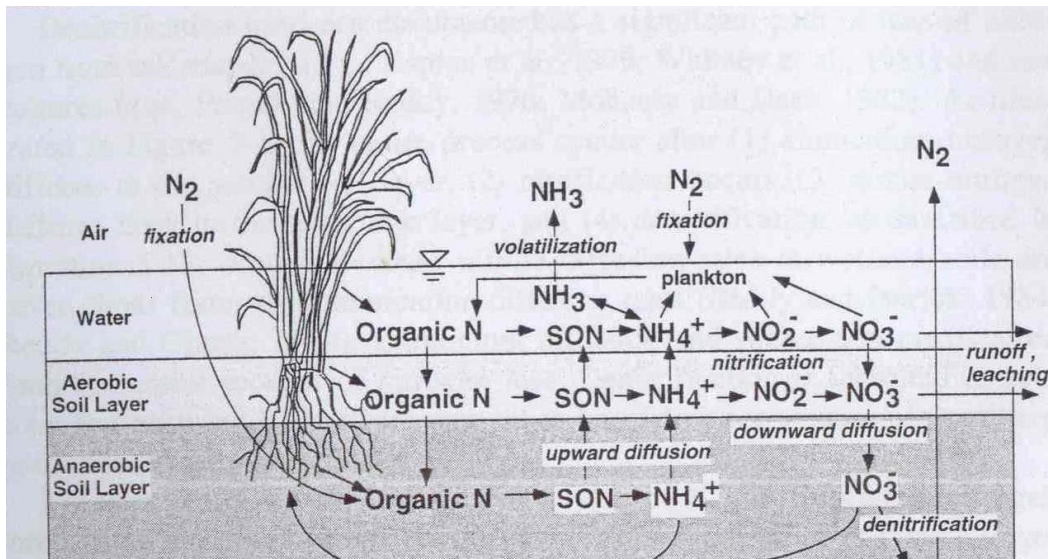


e *Nitrobacter sp*



A nitrificação pode também ocorrer na rizosfera oxidada das plantas onde o oxigênio adequado está frequentemente disponível para converter o amônio-nitrogênio ao nitrato-nitrogênio. O nitrato como o íon negativo melhor que o íon positivo do amônio, não são sujeitos a imobilização que carregou negativamente partículas do solo e são assim muito mais móveis na solução. Se não assimilados imediatamente por plantas ou por micróbios nem for

perdida com o fluxo do esgoto por sua mobilidade rápida, terá o potencial de atravessar a redução óxido de nitrogênio à redução do nitrato das diversas reações. Os mais prevalentes são redução à amônia e denitrificação. A denitrificação, realizado pelos microorganismos em condições anaeróbicas, com nitrato agindo como um aceitador terminal do elétron resulta na perda do nitrogênio, como ele converteu-se ao óxido nitroso gasoso e ao nitrogênio molecular (GOSELINK 1993 e MITSCH, 1993),  $C_6H_{12}O_6 + 4NO_3 \leftrightarrow 6CO_2 + 6H_2O + 2N_2$ .



**Figura 1.** Transformação do Nitrogênio no *Wetland*. SON significa solubilidade orgânica do Nitrogênio. Fonte: Gosselink e Mitsch, 1993.

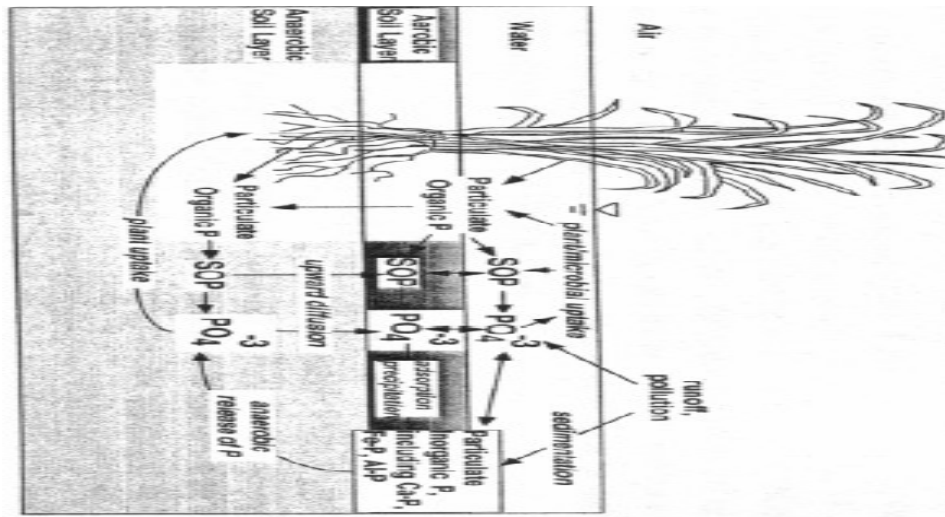
A importância vital do nitrogênio está relacionada à constituição de aminoácidos, proteínas, atividade enzimática, assim como síntese de clorofila (MARSCHNER, 1990; MALAVOLTA *et al.*, 1989).

O nitrogênio, na forma de nitrato, é solúvel em água e, uma vez presente no solo, possui grande potencial de atingir o lençol freático. Esse potencial é maximizado quando for aplicado efluente em solo de característica arenosa, com maior permeabilidade (CAMPOS, 1999).

A contaminação da água subterrânea com nitratos pode afetar a saúde humana, se ela for utilizada para abastecimento público. A presença de nitratos em concentrações elevadas pode causar a metahemoglobinemia, principalmente em crianças. Além disso, pode ocorrer a formação de nitrosaminas cancerígenas (DI BERNARDO, 1993). Tem-se que seus valores limites, apresentados pela OMS, devem ser inferiores a  $10\text{mg/L}^{-1}$ , em  $N-NO_3$ .

Outro elemento da matéria orgânica é o fósforo, um dos produtos químicos mais importantes nos ecossistemas e nos *wetlands*, onde não são nenhuma exceção. Foi descrito

como um nutriente limitado principalmente em pântanos. Em outros *wetlands* tais como pântanos de sal agrícolas, o fósforo é um mineral importante, embora não se considere um fator limitado por causa de sua abundância relativa e estabilidade bioquímica. A retenção de fósforo é considerada um dos atributos mais importantes de *wetlands* naturais e construídos. Embora o fósforo não seja alterado diretamente por mudanças no potencial redox como são nitrogênio, o ferro, o manganês, e o enxofre, é afetado indiretamente nos solos e nos sedimentos por sua associação com diversos elementos, especialmente o ferro. O fósforo é absorvido relativamente às plantas e ao consumo microscópico (Figura 2). A precipitação de insolubilidade com fósforo, ferro, cálcio, e alumínio férrico ocorre sob circunstâncias aeróbicas (GOSSELINK e MITSCH, 1993).



**Figura 2.** Transformação do Fósforo nos *Wetland*. SOP indica solubilidade orgânica do Fósforo. Fonte: Gosselink e Mitsch, 1993

A adsorção do fósforo em partículas da argila, hidróxidos férricos e de alumínio e óxidos, possibilita a fixação do fósforo na matéria orgânica em consequência de sua incorporação nos biomas das bactérias, das algas e de macrófitas aquáticas vasculares.

### 2.3 Macrófitas Aquáticas e Fitorremediação

As plantas aquáticas são componentes essenciais dos leitos cultivados e contribuem para a transformação dos nutrientes nos processos físicos químicos e microbiológicos; além de removerem nutrientes para seu próprio crescimento (GOPAL, 1999). A diversidade destas

plantas, conhecidas em águas continentais é relativamente alta, e são representadas por 28 famílias, 116 gêneros e 950 espécies (MARGALEF, 1983 apud FONSECA *et al.*, 2004).

Segundo Campos (1999), as principais funções das macrófitas aquáticas são: a tomada de nutrientes e outros constituintes do efluente; a transferência de oxigênio para o substrato; a inibição do crescimento de algas sobre o substrato devido à sombra promovida pelas folhas; os rizomas, raízes que servem de suporte para o crescimento de biofilmes e bactérias. A terminologia utilizada para descrever o conjunto de vegetais adaptados ao ambiente aquático é muito variada. Na literatura especializada podem ser encontrados termos como hidrófitas, helófitas, limnófitas, plantas aquáticas, macrófitas, entre outros .

Na Tabela 1 estão apresentados alguns mecanismos de remoção para alguns constituintes.

**Tabela 1.** Constituintes e mecanismos de remoção do sistema wetlands

<b>Constituintes</b>	<b>Mecanismos de remoção</b>
Sólidos suspensos	Sedimentação e filtração
Material orgânico solúvel	Degradação aeróbia e anaeróbia Amonificação, nitrificação e denitrificação(biológico)
Nitrogênio	Utilização pela planta Volatilização de amônia
Fósforo	Adsorção Utilização pela planta Adsorção e troca de cátions
Metais	Complexação, precipitação Utilização pela planta Oxidação redução (bioquímica) Sedimentação Filtração
Patógenos	Predação, morte natural, irradiação UV, excreção de antibióticos proveniente das raízes das macrófitas

Fonte: Adaptado de COOPER *et al.* (1996)

Segundo Campos (2002) apud Mannarino *et al.* (2003), quanto ao tipo de vegetação empregado nos leitos cultivados construídos, podem ser classificadas em:

- a) Flutuantes: podem estar fixadas abaixo da superfície, na superfície e acima da superfície, e sua folhagem principal flutua na superfície da água;
- b) Submergentes: crescem sob a água e podem estar fixadas por raízes;

- c) Emergentes: os sistemas que utilizam plantas aquáticas emergentes tem vegetação desenvolvida de forma que o sistema radicular encontra-se preso ao sedimento ao caule e as folhas encontram-se parcialmente submersas. A profunda penetração do sistema radicular permite atingir vários níveis ao longo da camada de sedimentos, dependendo da espécie considerada. A Tabela 2 indica as macrófitas mais frequentemente usadas em *wetlands* e suas condições desejáveis.

**Tabela 2.** Algumas macrófitas emergentes mais usadas em *wetlands* e suas condições desejáveis

Espécie emergente	Temperatura	Tolerância à salinidade (mgL <sup>-1</sup> )	pH
<i>Typha</i>	10 a 30	30.000	4,0 a 10,0
<i>Juncus</i>	16 a 26	20.000	5,0 a 7,5
<i>Phragmites</i>	12 a 33	45.000	2,0 a 8,0
<i>Schoenoplectus</i>	16 a 27	20.000	4,0 a 9,0
<i>Carex</i>	14 a 32	20.000	5,0 a 7,5

Fonte: Adaptado de REED (1992)

As macrófitas aquáticas crescem em solos onde não há grande fluxo de oxigênio. O oxigênio da atmosfera consegue penetrar no solo por uma rede de poros e chega até as raízes. Essas plantas possuem na sua estrutura uma rede chamada aerênquimas, que são estruturas desenvolvidas para transportar o oxigênio da atmosfera através das folhas e caules, a fim de suprir a demanda de oxigênio no sistema radicular da planta (AMABIS *et al.* 1979; HAMMER, 1997 apud HUSSAR, 2001).

A taxa de liberação de oxigênio para as raízes depende da concentração interna de oxigênio e da permeabilidade nas paredes das raízes, sendo esses fatores influenciados pelo clima, pela espécie de planta cultivada, pelo tipo e manejo do sistema. Com o monitoramento de cada espécie, pode-se determinar qual delas realiza melhor o tratamento dos resíduos líquidos. Entre as principais espécies utilizadas no tratamento de efluentes encontramos a *Scirpus spp.*, *Phragmites australis*, *Typha spp.*, *Canna flaccida*, *Eleocharis spp.*, *Juncus spp.*, como emergentes. *Elodea nuttallii*, *Egeria densa*, *Ceratophyllum demersum* como plantas submergentes. Entre as plantas flutuantes mais utilizadas encontramos *Lemna spp.*, *Spirodela spp.*, *Wolffia arrhiza*, *Azolla caroliniana* e *Eichhornia crassipes* (VALENTIM, 1999).

As macrófitas aquáticas apresentam algumas adaptações anatômicas: todas as estruturas responsáveis pela redução da transpiração nas plantas terrestres como cutícula e estômatos, perdem a sua função na maioria das macrófitas aquáticas. Esta adaptação é

especialmente notória nas macrófitas aquáticas submersas, nas quais a cutícula é muito reduzida e os estômatos são inexistentes ou não funcionais. Os tecidos de sustentação estão ainda presentes, sofrendo, porém, redução nas macrófitas aquáticas flutuantes, com folhas flutuantes e notadamente nas submersas. O aerênquima assume o principal papel de sustentação, pois mais de 70% do volume destas plantas é ocupado por ar. Pode-se considerar assim, a redução do xilema, redução da cutícula e do grau de lignificação como as adaptações mais importantes das macrófitas ao meio aquático (ESTEVES, 1998).

No meio aquático a difusão de oxigênio e gás carbônico é muito lenta, quando comparada com o ar. Além disso, a concentração destes gases na água é muitas vezes inferior à do ar e pode sofrer grandes alterações em curto período de tempo. Estas dificuldades são contornadas pelas macrófitas aquáticas reduzindo a cutícula a uma fina camada; reduzindo a espessura da folha a três camadas de células; armazenando no aerênquima os gases produzidos na fotossíntese e na respiração; aumentando os espaços intercelulares nas folhas, caule e pecíolo (ESTEVES, 1998).

Conforme CUNNINGHAM (1996) apud Dinardi *et al*, em anos recentes passou-se a dar preferência por métodos *in situ* que perturbem menos o ambiente e sejam mais econômicos. Dentro deste contexto, a biotecnologia oferece a fitorremediação como alternativa capaz de empregar sistemas vegetais fotossintetizantes e sua microbiota com o fim de desintoxicar ambientes. A fitorremediação pode ser classificada dependendo da técnica a ser empregada, da natureza química ou da propriedade do poluente. Assim, a fitorremediação pode ser compreendida em:

- Fitoextração: envolve a absorção dos contaminantes pelas raízes, os quais são nelas armazenados ou são transportados e acumulados nas partes aéreas. É aplicada principalmente para metais (Cd, Ni, Cu, Zn, Pb) podendo ser usada também para outros compostos inorgânicos.

- Fitoestabilização: os contaminantes orgânicos ou inorgânicos são incorporados à lignina da parede vegetal ou ao húmus do solo precipitando os metais sob formas insolúveis, sendo posteriormente aprisionados na matriz.

- Fitoestimulação: as raízes em crescimento (extremidades e ramificações laterais) promovem a proliferação de microrganismos degradativos na rizosfera, que usam os metabólitos exudados da planta como fonte de carbono e energia.

- Fitovolatilização: elementos dos subgrupos II, V e VI da tabela periódica, mais especificamente, mercúrio, selênio e arsênio, são absorvidos pelas raízes, convertidos em formas não tóxicas e depois liberados na atmosfera.

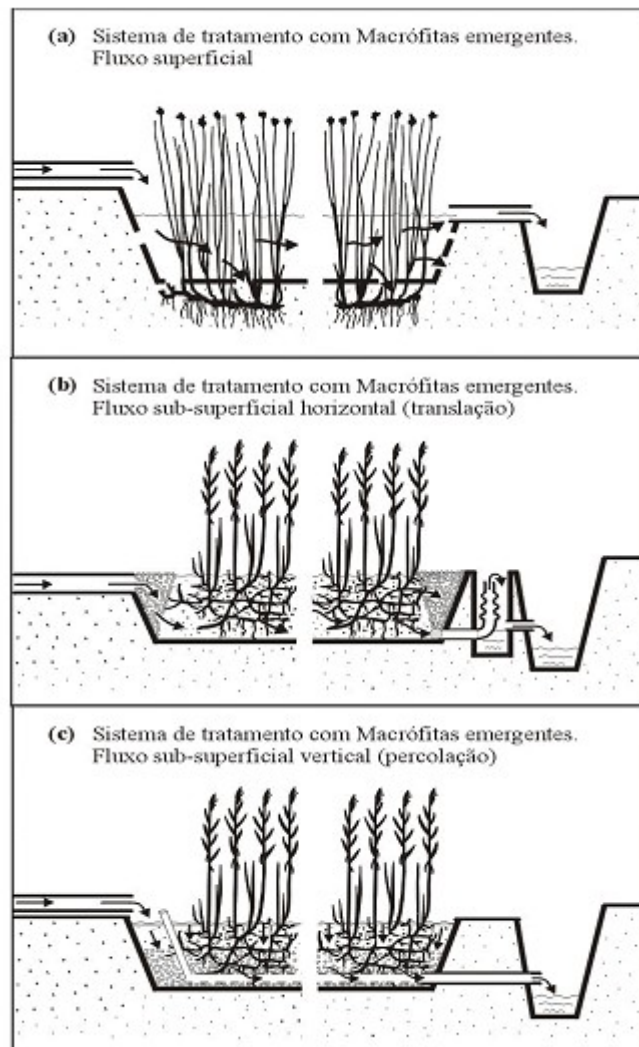


- Fitodegradação: os contaminantes orgânicos são degradados ou mineralizados dentro das células vegetais por enzimas específicas.

- Rizofiltração: é a técnica que emprega plantas terrestres para absorver, concentrar e/ou precipitar os contaminantes de um meio aquoso, particularmente metais pesados ou elementos radiativos, através do seu sistema radicular. As plantas são mantidas num reator sistema hidropônico, através do qual os efluentes passam e são absorvidos pelas raízes, que concentram os contaminantes.

- Capas vegetativas: vegetais, constituídas de capins ou árvores, feitas sobre aterros sanitários (industriais e municipais), usadas para minimizar a infiltração de água da chuva e conter a disseminação dos resíduos poluentes e odores, evitando que o lixo fique a céu aberto.

Na Figura 3, observa-se a reprodução esquemática de um sistema de fitorremediação em tratamento de águas residuárias baseado em macrófitas emergentes.



**Figura 3.** Reprodução esquemática de um sistema de fitorremediação em tratamento de águas residuárias baseado em macrófitas emergentes. Fonte: Rodriguez, 1985.

### 2.3.1 Espadana (*Zizaniopsis bonariensis*)

Smith *et al.* (1982) descreve o gênero como formado por plantas perenes, rizomatosas, altas e robustas. Folhas com lâminas largas planas. Inflorescências perfeitas, terminais, formando panículas. Espiguetas pediceladas, roliças ou muito pouco dorso-ventralmente comprimidas, duma só flor unissexual, ambos os sexos na mesma inflorescência com as flores masculinas basais. Glumas faltando. Lema inferior sete-nervada, aristada; lema superior 3-nervada, inerme. Pálea ausente. Estames 6; estilete comprido, persistente. Fruto aquênio, cilíndrico.

Espécie tipicamente aquática (Figura 4), é citada como importante para minimizar a erosão de barrancos lodosos de rios.



**Figura 4.** *Zizaniopsis bonariensis* Fonte: Putzke, 2006.

### 2.3.2 Capim elefante (*Pennisetum purpureum*)

O capim elefante (*Pennisetum purpureum*) (Figura 5), também chamado de capim-cameroon, erva-elefante foi introduzido no país para fins forrageiros, adaptando-se às nossas condições climáticas, tomando logo a característica de uma planta daninha. É uma planta perene, ereta, cespitosa, rizomatosa, de colmos compactos com nós bem salientes, de 1,5 a 3,5 m de altura, pertencente à Família *Poaceae*. Originária da África, propagam-se por sementes e rizomas. Pode ser encontrada infestando lavouras anuais quanto perenes, mas principalmente infesta terrenos baldios, beira de estradas e margens de canais. É uma planta muito agressiva e de difícil controle. Possui excelentes qualidades forrageiras, produzindo até 400 toneladas de massa verde por ha/ano. A inflorescência apresenta panículas cilíndricas, compactas, com 8 - 30 cm de comprimento por 1,5 - 3 cm de espessura, eretas com longas hastes na parte terminal dos colmos e de seus ramos; cerdas de coloração variável: esverdeada, amarealda, castanha ou purpurescente. Em cada grupo de espiguetas geralmente apenas uma é fértil (LORENZI, 2000).



**Figura 5.** *Pennisetum purpureum* Fonte: Putzke, 2006.

### 2.4 Fertirrigação

Historicamente, sabe-se que, embora existam referências quanto a disposição de esgotos no solo em épocas muito remotas, como foi o caso da irrigação com esgotos

executada em Atenas antes da Era Cristã. O que influenciou de forma tecnicamente correta a utilização controlada de esgotos foram as iniciativas inglesas levadas a efeito por volta de 1850, quando se buscou a despoluição do rio Tâmis, implantando-se o sistema separador absoluto, direcionando as águas da chuva para os cursos de água e os esgotos para os *land farms*<sup>(1)</sup>. A importância dessa iniciativa é materializada na frase enunciada por Sir Edwin Chadwick: “as chuvas para o rio e os esgotos para o solo”. Em razão da complexidade dos grandes centros urbanos, para os dias atuais isso não pode ser tomado como uma regra. Contudo, na época, a técnica foi disseminada rapidamente na Europa e Estados Unidos.

Até fins do século XIX e início do XX, essa foi a forma mais praticada e bem sucedida de tratamento e disposição de esgotos resultantes da atividade urbana. Atualmente, a aplicação de esgotos e efluentes no solo é vista como uma forma efetiva de controle da poluição e uma alternativa viável para aumentar a disponibilidade hídrica, em regiões que sofrem com a escassez de água, sendo os maiores beneficiários dessa tecnologia os aspectos econômicos, ambientais e de saúde pública.

A utilização de esgotos tratados na agricultura apresenta diversas vantagens; além de dar uma destinação final aos dejetos líquidos, impede que os mesmos sejam lançados no meio ambiente evitando, desta forma, a contaminação e poluição dos mananciais das águas de superfície e do solo, e, portanto, a disseminação de doenças (SHUVAL et al, 1997).

A Organização Mundial da Saúde (OMS) assegura que o tratamento primário de esgotos domésticos já é suficiente para torná-los adequados à irrigação de culturas de consumo indireto. No entanto, recomendam-se tratamentos secundário e terciário quando estas águas forem utilizadas na irrigação das culturas para uso direto (METCALF & EDDY, 2003).

Durante as duas últimas décadas, o uso de esgotos para irrigação de culturas aumentou significativamente, em razão dos seguintes fatores:

- Dificuldade crescente de identificar fontes alternativas de águas para irrigação;
- Custo elevado de fertilizantes;
- A segurança de que os riscos de saúde pública e impactos sobre os solos são mínimos, se as precauções adequadas forem efetivamente tomadas;
- Os custos elevados dos sistemas de tratamento, necessários para descarga de efluentes em corpos receptores;
- A aceitação sócio-cultural da prática do reúso agrícola;

---

<sup>1</sup> *Land farms* – áreas destinadas ao tratamento de efluentes, normalmente realizado por irrigação, escoamento ou infiltração-percolação. A escolha do processo depende da permeabilidade do solo, em razão da qual é fixada a carga a ser aplicada.

- Reconhecimento, pelos órgãos gestores de recursos hídricos, do valor intrínseco da prática.

Segundo Hespanhol (2001), a demanda atual para o setor agrícola brasileiro representa 70% do volume total captado, com forte tendência para chegar a 80% até o final desta década. Assim, diante do significado que essas grandes vazões assumem, em termos de gestão de nossos recursos hídricos, é de extrema importância que se atribua prioridade para institucionalizar, promover e regulamentar o reúso para fins agrícolas, em âmbito nacional.

## **2.5 Legislação hídrica e ambiental brasileira pertinente à gestão das águas**

A Lei nº 6.938/81, que instituiu a Política Nacional de Meio Ambiente (PNMA), estabelece, como princípios norteadores das ações governamentais para o meio ambiente, “incentivos ao estudo e pesquisa de tecnologias orientadas para o uso e a proteção dos recursos naturais”, além da “racionalização do uso da água”. A Lei define ainda como objetivos a serem atingidos, a “preservação e restauração dos recursos ambientais com vistas à sua utilização racional e disponibilidade permanente, concorrendo para a manutenção do equilíbrio ecológico propício à vida”.

A Lei nº 9.433/97, que instituiu a Política Nacional de Recursos Hídricos (PNRH), também oferece fundamentos jurídicos para a racionalização do uso da água, e conseqüentemente condicionantes legais para o reúso da água, alternativa viável na preservação e conservação ambiental. A Lei tem como um de seus objetivos “a utilização racional integrada dos recursos hídricos, com vistas ao desenvolvimento sustentável”. Define também, como conteúdo mínimo dos planos de recursos hídricos, “as metas de racionalização de uso, aumento da quantidade e melhoria da qualidade dos recursos hídricos disponíveis”. Já com relação à cobrança tem como objetivo “incentivar a racionalização do uso da água”.

A Resolução do CONAMA nº 357, que entrou em vigor em 18 de março de 2005, estabelece a classificação das águas com base nos usos preponderantes e prioritários (sistema de classes de qualidade), estabelecendo nível de qualidade a ser alcançado e/ou mantido em um trecho do corpo hídrico ao longo do tempo. Esse instrumento usado pela PNRH de classificação das águas tem relação com o reúso de água, já que esse tipo de água pode ser considerado como classe inferior, além desse tipo de água servir como medida de definição do nível de qualidade, segundo os usos preponderantes.

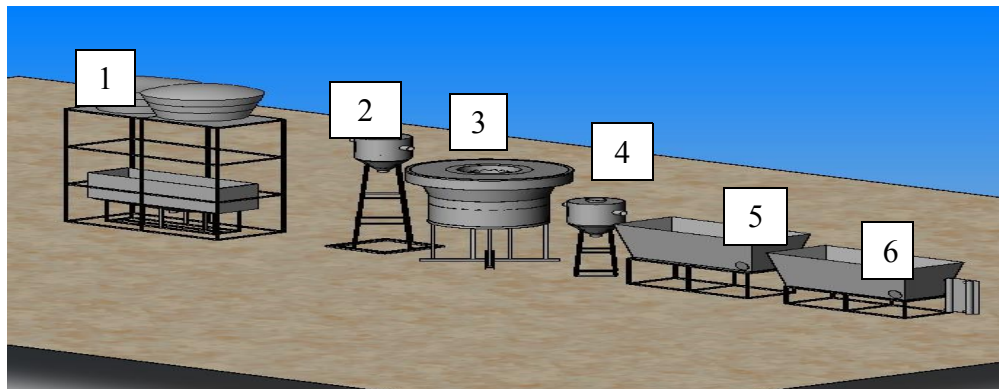
Conforme a Resolução, o padrão de lançamento pode ser excedido desde que os padrões de qualidade dos corpos de água receptores sejam mantidos e desde que haja

autorização do órgão fiscalizador estadual ou municipal, resultante de estudos de impacto ambiental. É muito importante salientar que não é permitida a diluição de águas residuais com outras águas (abastecimento, mar, refrigeração), com o objetivo de atender aos padrões de lançamento. O nível de tratamento desejado ou exigido por lei, depende das características do próprio esgoto e do padrão de lançamento, ou mesmo se a água residual tratada for reutilizada. De um modo geral o que se deseja remover das águas residuais é matéria orgânica, sólidos em suspensão, compostos tóxicos, compostos recalcitrantes, nutrientes (nitrogênio e fósforo) e organismos patogênicos.

### 3 Metodologia

#### 3.1 Caracterização do Local de Estudo

O estudo foi realizado na Estação de Tratamento de Esgotos (ETE), no Campus da UNISC – Universidade de Santa Cruz do Sul, RS, em um sistema integrado UASB e Leitos Cultivados (*Wetlands*) em escala piloto montado especialmente para realização dos estudos integrados de anaerobiose e fitorremediação (Figura 6). O levantamento dos dados foram executados através da coleta direta dos dados e de informações obtida junto a coordenação do campus. Foram considerados para o levantamento de dados os valores de vazão afluente, características da fonte geradora, configurações da rede de coleta e da estação de tratamento e os parâmetros de controle para a emissão final.



**Figura 6.** Unidade piloto de tratamento. Fonte: César Neitzke. 1 – Reservatório/SupORTE com Leito de Secagem; 2 – Decantador Primário; 3 – Reator UASB; 4 – Decantador Secundário; 5 – Wetland 1; 6 – Wetland 2.

#### 3.2 Caracterização Analítica do Efluente

Os efluentes estudados foram coletados na saída do decantador secundário, pós reator UASB, saídas e entradas dos wetlands construídos em duplo estágio de fluxo alternado. As amostras coletadas dispensaram procedimentos de preservação, devido ao encaminhamento sequencial para determinações analíticas e ensaios de tratamento.

Os parâmetros analíticos caracterizados incluíram inicialmente: COT; DQOt; DQOd; DBO; SST, Turbidez;  $\text{NH}_4\text{-N}$ ;  $\text{NH}_4$ ;  $\text{NO}_3\text{-N}$ ;  $\text{NO}_3$ ; pH e Temperatura. Adicionalmente foram caracterizados nos efluentes bruto (ETE/UNISC) e tratado os parâmetros condutividade, fósforo total, nitrogênio total Kjeldahal e coliformes termotolerantes.

A Tabela 3 apresenta o resumo dos métodos e princípios dos parâmetros analíticos caracterizados.

**Tabela 3.** Métodos analíticos para caracterização dos efluentes da unidade piloto.

<b>Tipos de Análise</b>	<b>Método</b>	<b>Princípios</b>
DQO <sub>t</sub>	IQ Sensor NET WTW	Espectrofotométrico/Quimiométrico
DQO <sub>d</sub>	IQ Sensor NET WTW	Espectrofotométrico/Quimiométrico
DBO	IQ Sensor NET WTW	Espectrofotométrico/Quimiométrico
COT	IQ Sensor NET WTW	Espectrofotométrico/Quimiométrico
SST	IQ Sensor NET WTW	Ótico/Nefelométrico/Quimiométrico
TURB	IQ Sensor NET WTW	Ótico/Nefelométrico/Quimiométrico
$\text{NH}_4\text{-N}$	IQ Sensor NET WTW	Espectrofotométrico/Quimiométrico
$\text{NH}_4^+$	IQ Sensor NET WTW	Espectrofotométrico/Quimiométrico
$\text{NO}_3\text{-N}$	IQ Sensor NET WTW	Espectrofotométrico/Quimiométrico
$\text{NO}_3^-$	IQ Sensor NET WTW	Espectrofotométrico/Quimiométrico
Temperatura	IQ Sensor NET WTW	-
Fósforo Total	Colorimétrico/Molibdato de Amônio	Espectrofotométrico
NTK	Digestão ácida	Colorimetria
Coliformes	Tubos Múltiplos	Princípio de Diluição para
Termotolerantes		Extinção/Equação de Thompson
pH	Eletroquímico	Potenciométrico

Exceto os parâmetros NTK, fósforo total, coliformes termotolerantes, pH e condutividade, feitos de acordo com APHA, 1995. Para analisar as propriedades físico-químicas dos efluentes nas diferentes etapas (módulos) de tratamento foi utilizada a sonda multiparâmetros IQ Sensor Net da WTW.

### 3.3 Caracterização da Biomassa

A caracterização da biomassa foi realizada a partir da determinação da coleta da biomassa a uma altura de 0,10m acima da superfície do meio suporte em amostras de áreas com 0,5m<sup>2</sup> na parte inicial, média e final de cada leito cultivado. A massa verde foi

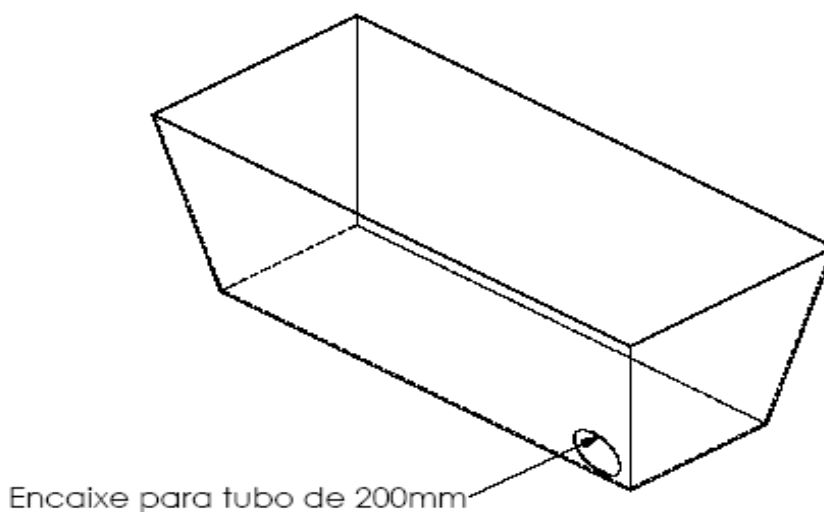


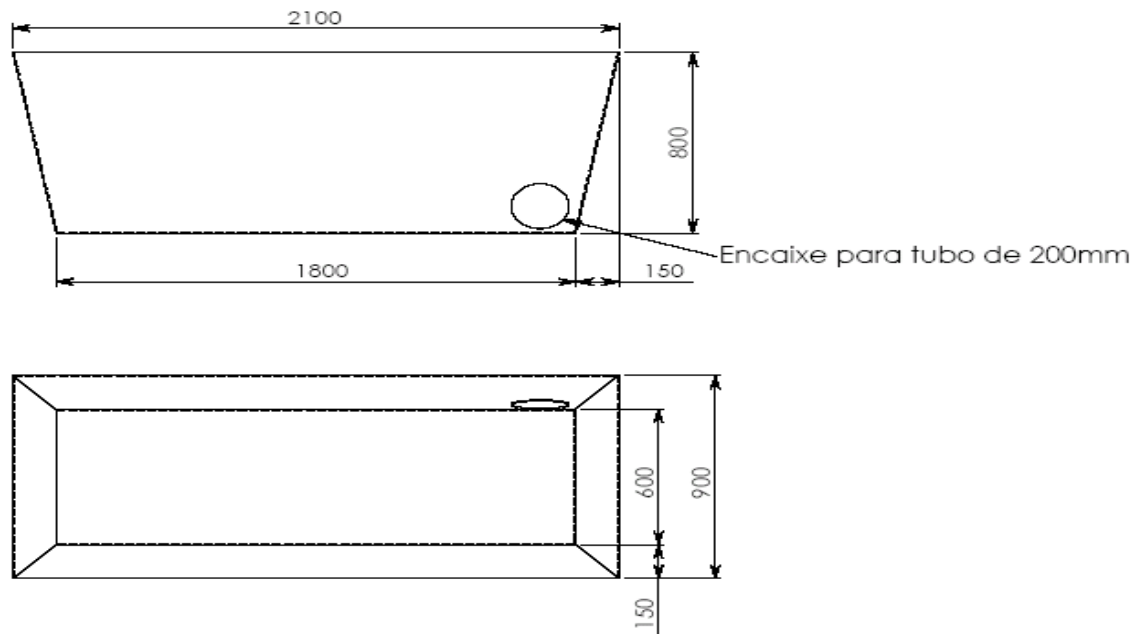
encaminhada para pesagem em balança granatária e, após, submetida a 70°C em estufa bacteriológica até atingir massa seca com peso constante. A análise do comprimento das raízes foi realizada retirando-se uma planta completa no início, meio e fim de cada leito cultivado. A caracterização da biomassa foi realizada no final de cada fase quando a macrófita aquática apresentou plena floração, demonstrando fase adulta.

### 3.4 Concepção e Montagem da Unidade de Fitorremediação

A concepção e montagem dos leitos cultivados construídos obedeceu dimensionamento e dados recomendados em METCALF & EDDY (2003), onde sistemas de 0,6 a 0,8 m de profundidade do leito suportado são adotados para fluxos subsuperficiais. Os leitos possuem sistema de fluxo subsuperficial com entrada de afluente ascendente no primeiro leito e descendente no segundo.

Os leitos cultivados foram construídos em fibra de vidro, possuem forma retangular com fundo em forma de tronco de cone, ambos com volume total de 1,19 m<sup>3</sup>, coeficiente volumétrico (CV) de 0,54 m<sup>3</sup>d<sup>-1</sup>m<sup>-2</sup>, preenchidos com camadas sobrepostas de substrato até aproximadamente, 0,15 m de sua borda superior (volume reservado para se evitar transbordamentos em função de picos de precipitações pluviométricas ou entupimento) (Figura 7). O leito de filtragem formou-se com 20% de pedra britada nº 4, 10% de brita nº 1 e 70% de areia média.





Obs: Todas as medidas em mm

**Figura 7.** Detalhes das medidas dos wetlands -  $V_{\text{útil}} = 1,19 \text{ m}^3/\text{un.}$

Fonte: César Neitzke

Na estrutura os leitos cultivados receberam reforço estrutural de barras de ferro fundido de 0,5 cm de espessura. O leito cultivado do segundo estágio também foi dotado de canos distribuidores de PVC (0,5 polegadas) perfurados com espaçamento de 10 cm. Na Tabela 4 podemos verificar o esquema de preenchimento do leito filtrante.

**Tabela 4.** Esquema de preenchimento do leito filtrante por unidade construída.

Substrato	Volume ( $\text{m}^3$ )	Altura (m)
Brita nº 4	0,19	0,13
Brita nº 1	0,10	0,07
Areia média	0,66	0,45



**Figura 8.** Visão estratificada montagem dos leitos cultivados.



**Figura 9.** Vista panorâmica da unidade piloto implantada na UNISC com detalhe dos leitos cultivados.

Os leitos cultivados construídos foram projetados para trabalhar em condições anaeróbias, aeróbias e anóxicas, o que favorece a remoção de nutrientes. O tempo de detenção hidráulica para os leitos foi de 32 horas.

Para o estabelecimento das macrófitas aquáticas nos leitos cultivados, utilizaram-se propágulos completos, tanto na configuração do Capim elefante como da Taboa. As mudas das espécies vegetais (macrófitas aquáticas emergentes) foram coletadas às margens de manancial hídrico, em pontos distintos, próximos ao aeroporto da cidade de Santa Cruz do Sul, RS, e escolhidas levando-se em consideração o sistema implantado. Foram utilizadas inicialmente o Capim elefante (*Pennisetum purpureum*) na primeira fase do projeto no

período de abril a agosto de 2007. O plantio ocorreu em abril, concomitante com a aplicação do esgoto. Foram plantadas 30 mudas (propágulos completos) por módulo, medindo em torno de 0,15 m. Poucas mudas morreram, as quais não foram retiradas do sistema, nem replantadas. Na segunda metade do mês de abril de 2007, quinzenalmente, por um período de quatro meses, foram coletadas amostras de efluente na entrada e saída dos leitos cultivados. A segunda fase do estudo desenvolveu-se entre os meses de setembro de 2007 a janeiro de 2008. Neste período foram plantadas nos leitos cultivados 30 mudas da macrófita aquática Espadana (*Zizaniopsis bonariensis*), com tamanho de 0,20m. Nesta fase as análises foram realizadas semanalmente. As amostras de efluente foram coletadas na entrada e saída dos leitos cultivados e submetidas ao monitoramento analítico no local de estudo empregando-se a sonda multiparâmetros IQ Sensor Net WTW. Os resultados foram utilizados no cálculo de eficiência na remoção de atributos do esgoto.

### **3.5 Ensaio de Tratamento**

Os ensaios de tratamento foram feitos considerando-se dois experimentos distintos com as duas espécies de macrófitas selecionadas e para tempos mínimos de cultivo de quatro meses. Quinzenalmente o controle analítico do efluente de entrada e saída dos leitos cultivados foi realizado na primeira etapa de estudos. A partir das melhorias de pontos de amostragem na unidade piloto evoluiu-se para um controle analítico semanal.

Os ensaios de tratamento do efluente foram realizados no Laboratório do Campus da UNISC. O efluente bruto foi coletado diretamente do tanque de equalização da ETE da Universidade, sendo armazenado no tanque pulmão da ETE piloto.

A aplicação do esgoto primário foi feita de forma contínua na superfície dos módulos, uma vez a cada dois dias, no turno da manhã. Considerando-se uma contribuição média de 130 litros diários de esgoto por habitante (NBR 7229/93) - da ABNT, simulou-se uma vazão média de 35 L h<sup>-1</sup>. O tempo de detenção hidráulico – TDH, do esgoto na unidade UASB foi de 38 horas.

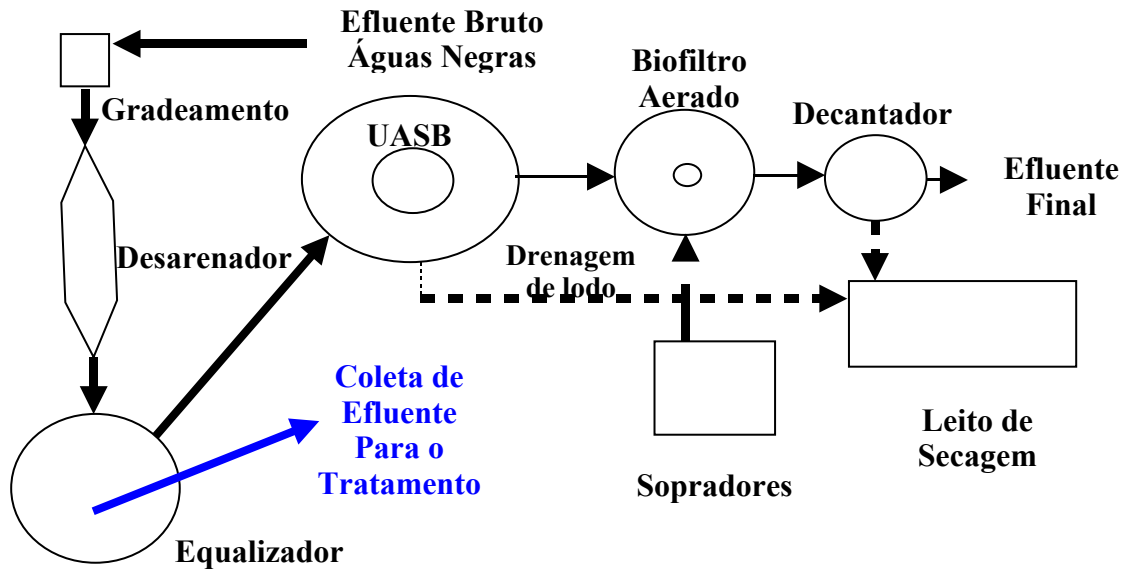
Os teores médios dos atributos do esgoto bruto foram utilizados em substituição aos teores verificados em cada uma das análises, em função das coletas de esgoto bruto e tratado terem sido realizadas no mesmo dia. Como o tempo de detenção médio da unidade integrada foi de 1,5 dias (desconsiderando-se as perdas de água por evapotranspiração e ganhos por precipitação pluvial nos leitos cultivados), o material de saída correspondia àquele aplicado 1,5 dias antes.

## **4 Resultados e Discussões**

### **4.1 Características Analíticas do Efluente Estudado e da Fonte Geradora**

A geração de efluentes no campus da UNISC associa-se ao uso intensivo dos sanitários, em especial dos mictórios. Este fato potencializa a geração de efluentes com carga

de compostos nitrogenados mais elevados do que a dos esgotos urbanos. Na Figura 10 está representada o fluxograma da ETE-UNISC, onde se observa o tanque equalizador onde foram coletados os efluentes para o tratamento com o sistema UASB + Leitos Cultivados (*Wetlands*)



**Figura 10.** Esquema geral da unidade de tratamento de efluentes da UNISC

A ETE-UNISC foi dimensionada para um equivalente populacional de aproximadamente 18.000 pessoas, sendo que as vazões médias ( $\text{m}^3 \text{dia}^{-1}$ ) registradas possuem oscilações entre 2 e  $10 \text{m}^3 \text{dia}^{-1}$ , o que acaba proporcionando tempos de detenção hidráulica entre 10 e 50 horas no tanque equalizador. Desta forma, pode-se considerar o início de atividade anaeróbia de forma mais expressiva nesta etapa.

A rede hidrosanitária construída para abastecimento da ETE não possui estações de recalque e todos os tanques sépticos e filtros anaeróbios anteriormente existentes foram isolados. Exclusivamente, os efluentes dos mictórios e vasos sanitários são drenados para esta rede.

A caracterização analítica dos efluentes foi iniciada a partir das determinações de padrões gerais apresentados na Tabela 5. As determinações dos efluentes do tanque equalizador foram restringidas posteriormente para o monitoramento do reservatório da unidade experimental em escala piloto no sentido de determinar a eficiência de redução dos parâmetros poluentes críticos.

**Tabela 5.** Dados de caracterização do efluente do tanque equalizador.

Parâmetro	Valores Medidos	Resolução Consema/RS 128/2006
-----------	-----------------	----------------------------------

DQO <sub>t</sub> (mg L <sup>-1</sup> )	169,39	≤ 400
DQO <sub>d</sub> (mg L <sup>-1</sup> )	73,59	-
DBO (mg L <sup>-1</sup> )	147,40	≤ 180
COT (mg L <sup>-1</sup> )	389,50	-
SST (mg L <sup>-1</sup> )	78,30	≤ 180
TURB (UT)	89,00	-
NH <sub>4</sub> -N (mg L <sup>-1</sup> )	56,45	≤ 20
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> (mg L <sup>-1</sup> )	70,70	-
NO <sub>3</sub> -N (mg L <sup>-1</sup> )	0,33	-
Fósforo Total * (mg L <sup>-1</sup> )	7,17	-
Coliformes Termotolerantes * (NMP/100 mL)	1,6 x 10 <sup>6</sup>	-
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mg L <sup>-1</sup> )	2,45	-
NTK (mg L <sup>-1</sup> )	52,1	≤ 20
Temperatura (°C)	15,6	≤ 40

\* Não há limites máximos estabelecidos pela legislação estadual para uma vazão máxima de lançamento de até 200 m<sup>3</sup>dia<sup>-1</sup>.

Conforme comparativo da carga do efluente bruto com os valores máximos permitidos pela Resolução Consema 128/2006, observou-se que os níveis mais controlados de lançamento se concentram na DQO, DBO<sub>5</sub>, nitrogênio total, nitrogênio amoniacal e sólidos suspensos. Assim sendo, foram consideradas para planta piloto otimizações de tratamento dos parâmetros anteriormente descritos, o que também se relacionou com a limitação das determinações da sonda multiparâmetros empregada, pois considera-se que limites para coliformes termotolerantes e fósforo total também devem merecer investigações de estudo.

A Tabela 3 permite reforçar a partir dos estudos iniciais, a principal característica de impacto dos efluentes do campus universitário estudado, ou seja, a emissão de nitrogênio amoniacal que se relaciona a ação eutrofizante. Conforme apresentado em Brasil et al (2007) a alta concentração de constituintes (eutrofização) no esgoto doméstico provocou secamento na ponta das folhas de *Zizaniopsis bonariensis*, no estudo de plantio e desenvolvimento fenológico da Espadana (*Zizaniopsis bonariensis*), utilizada no tratamento de esgoto doméstico em sistema alagado construído.

## 4.2 Ensaios de Tratamento

As condições operacionais dos ensaios de tratamento foram efetivamente caracterizadas após as determinações analíticas dos parâmetros poluentes apresentados na Tabela 3. A Tabela 6 apresenta um resumo dos valores de operação dos leitos cultivados.

**Tabela 6.** Cargas médias aplicadas no período experimental

<b>Parâmetros</b>	<b>Valores</b>
DQO ( $\text{g m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ )	91,45
DBO ( $\text{g m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ )	79,60
NTK ( $\text{g m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ )	28,13
$\text{NH}_4^+$ ( $\text{g m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ )	38,18

Os valores da Tabela 6 revelam cargas médias elevadas de aplicação quando comparados a outros dados da literatura. Mannarino *et al.* (2006) desenvolveu estudos com cargas de DQO entre 2,96 e 7,57  $\text{g m}^{-2} \cdot \text{dia}^{-1}$ , DBO entre 0,19 e 0,31  $\text{g m}^{-2} \cdot \text{dia}^{-1}$  e nitrogênio amoniacal entre 0,97 e 2,07  $\text{g N-NH}_4^+ \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{dia}^{-1}$ . A eficiência de remoção da carga poluente verificada neste trabalho foi de 10% para DQO, 17% para DBO e 17% para  $\text{N-NH}_4^+$  (TDH de 2 dias).

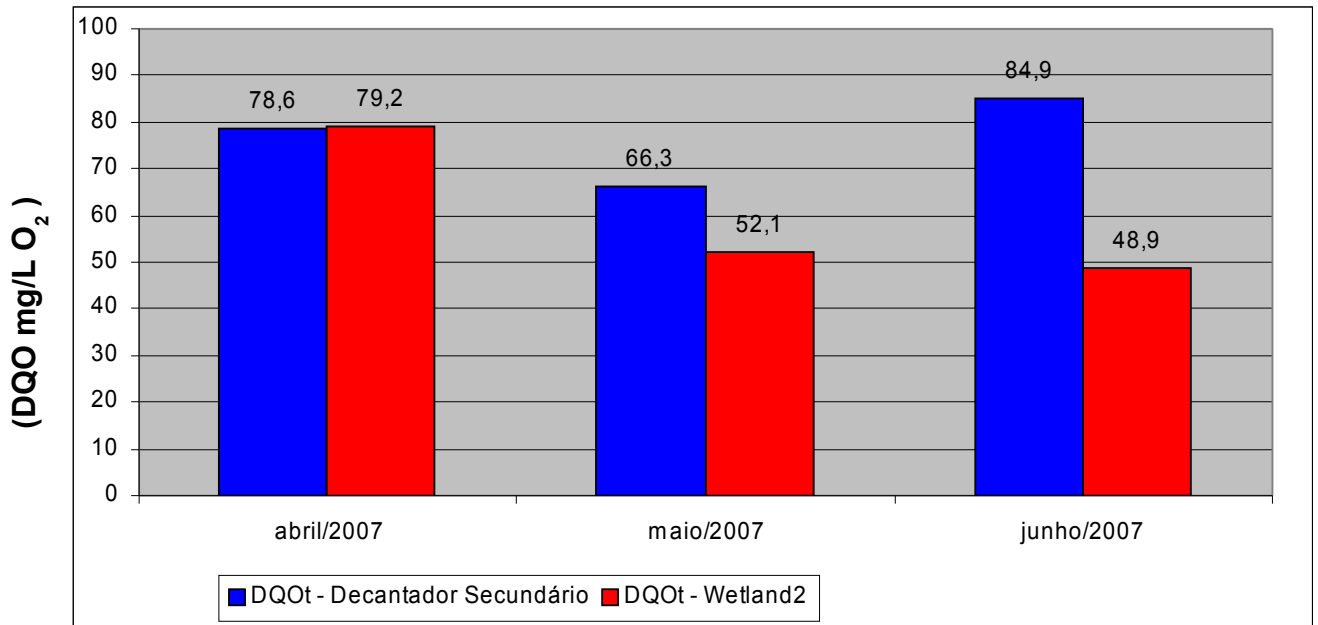
Nos próximos itens são apresentados os resultados de eficiência de tratamento para as macrófitas aquáticas selecionadas neste trabalho e de algumas observações em relação a biomassa.

#### **4.2.1. Leitões Cultivados construídos com Capim elefante (*Pennisetum purpureum*)**

Os ensaios de tratamento da ETE/UNISC tiveram duração de dez meses, considerando-se a utilização de dois tipos de vegetais: Capim elefante e a Taboa.

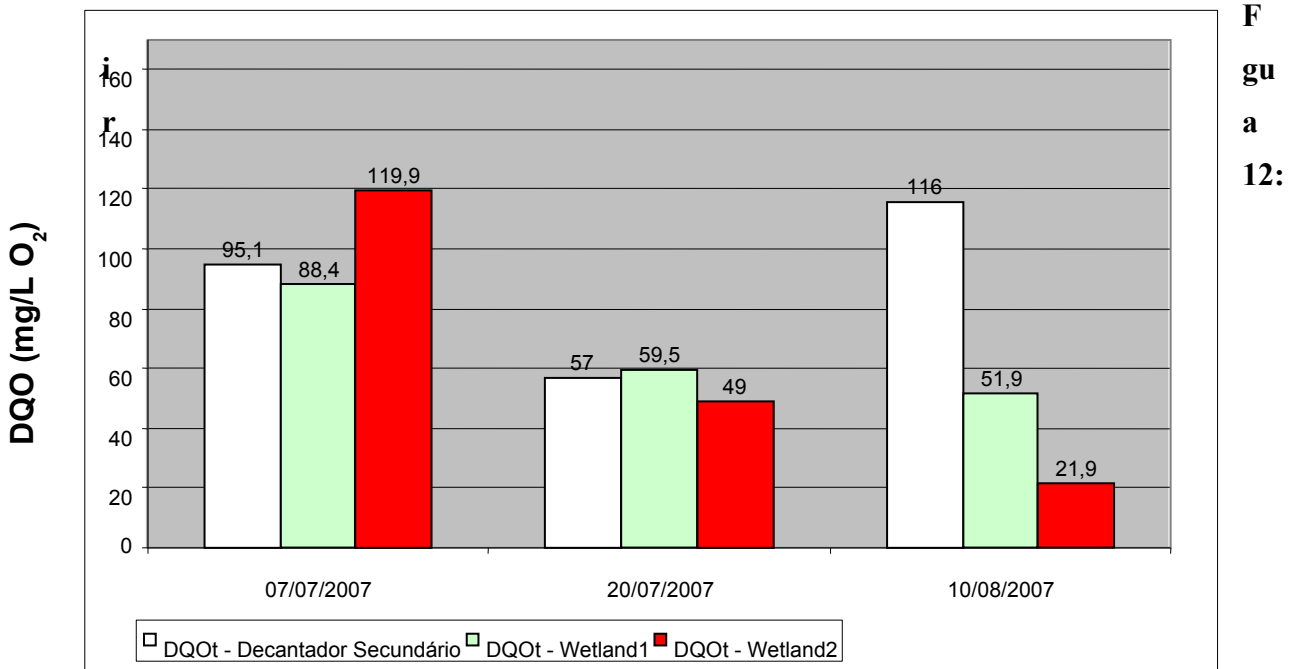
A primeira fase dos estudos, com utilização do Capim elefante, foi monitorada em termos das reduções de DQO, nitrogênio amoniacal e nitrato. Na fase inicial de monitoramento, dois pontos de amostragem foram adotados: saída do reator UASB e do segundo leito cultivado, dados apresentados na Figura 11.





**Figura 11:** Variação das concentrações de material carbonáceo nas etapas sequenciais de anaerobiose e fitorremediação com Capim elefante.

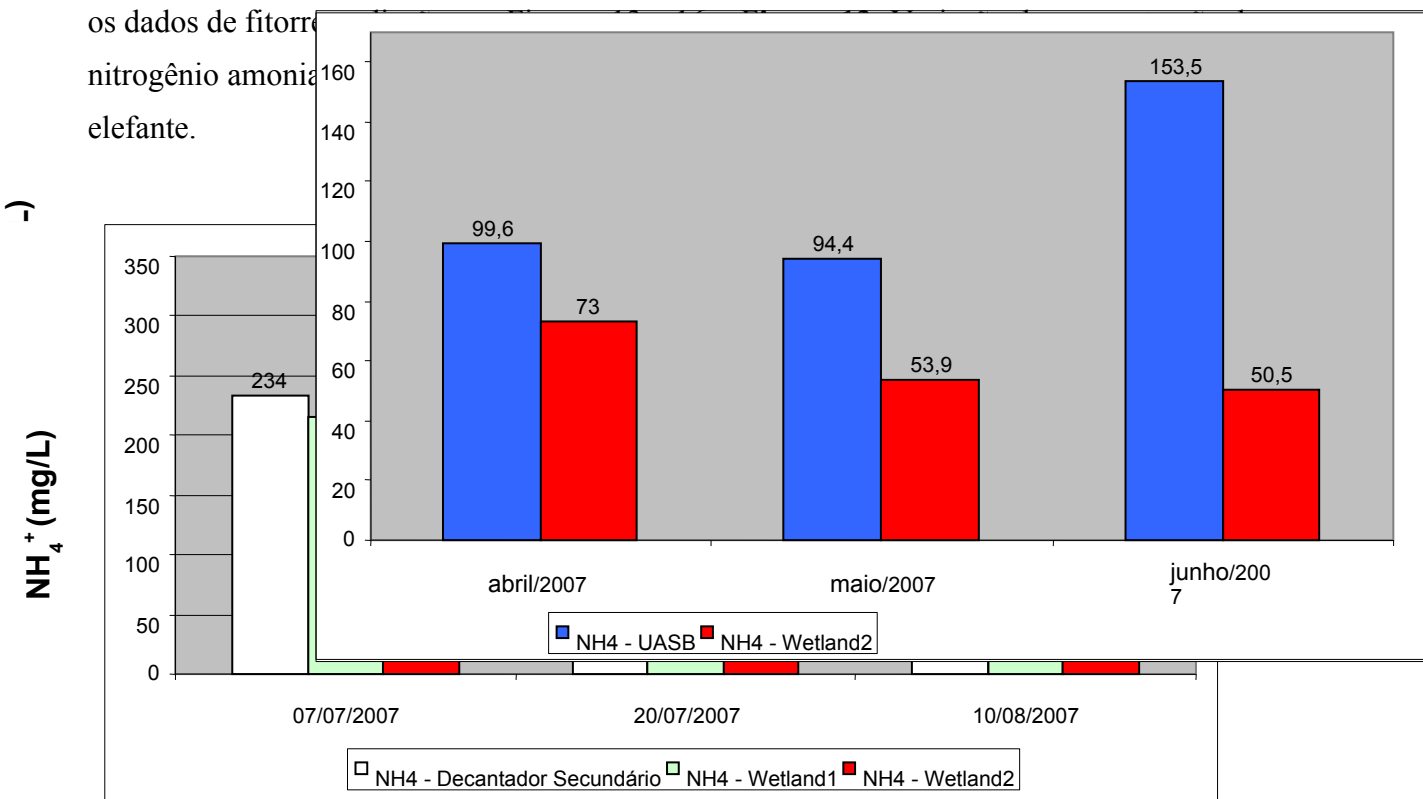
As limitações dos dois pontos estiveram atreladas com a ausência de válvulas suficientes para amostragem, caracterizando apenas as reduções de DQO por anaerobiose e o duplo estágio dos leitos cultivados. Em dois meses de funcionamento (26/04 a 26/06), registrou-se um crescimento da eficiência percentual de remoção de DQOt. Na melhor condição o percentual de remoção após fitorremediação foi de 43% (em relação ao valor do decantador secundário na amostra do mês de junho). Considerou-se a partida do sistema a partir do plantio do Capim elefante com propágulos completos. Resultados obtidos em estudos por Lin *et al* (2002) relatam estabilidade operacional em curto período de tempo, o que possibilita rápida partida do sistema, dependendo do modo de implantação das macrófitas aquáticas.



Variação das concentrações de material carbonáceo nas etapas sequenciais de fitorremediação com Capim elefante.

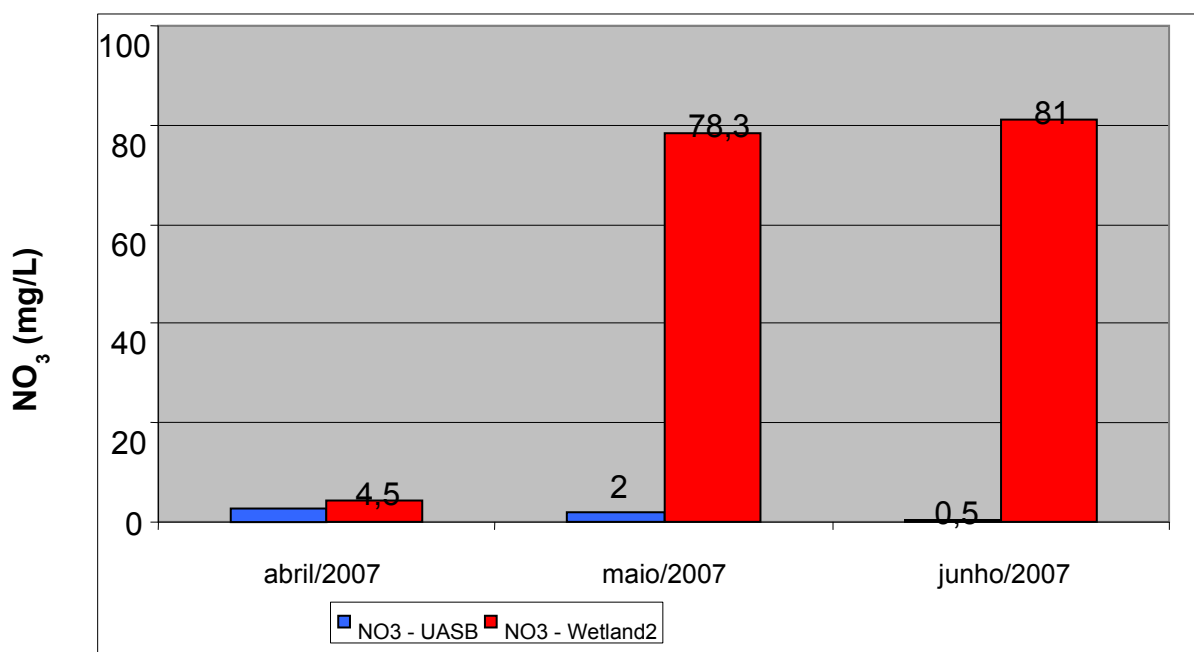
Durante os meses de julho e agosto observou-se maior eficiência na remoção de DQOt (Figura 12), apresentando valores de 81% a menos na etapa de fitorremediação entre o decantador secundário e o segundo leito cultivado (redução referente ao mês de agosto), enquanto que alguns relatos da literatura apresentam reduções de 60% (SOUZA, 2000). Segundo Melo *et al* (2005), utilizando o capim elefante em leitos alagados, observou 55% de remoção de DQOt.

No aspecto de remoção da carga poluente de nitrogênio NH<sub>4</sub><sup>+</sup> e NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, são observados os dados de fitorremediação de nitrogênio amoniacal com capim elefante.



**Figura 14:** Variação das concentrações de nitrogênio amoniacal nas etapas sequenciais de fitorremediação com Capim elefante.

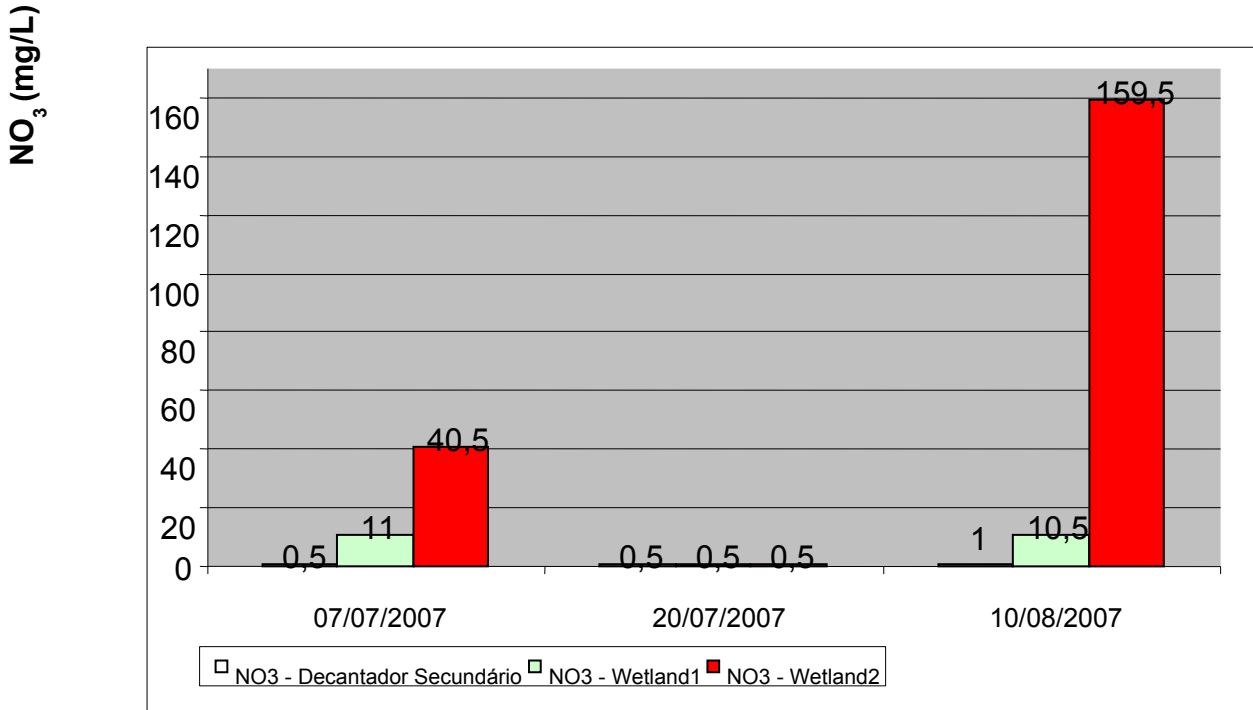
As reduções de nitrogênio amoniacal do mês de abril (UASB) para o mês de junho (segundo leito cultivado) ficaram em torno de 50% e estão atreladas com a oxidação da forma amoniacal para nitrato e com a dependência de troca com o sistema radicular das macrófitas aquáticas da forma de nitrogênio oxidada. Também pode ser considerado o mecanismo denitrificante, o que integraria o conjunto dos mecanismos possíveis para remoção de nitrogênio nos leitos cultivados. Em estudos sobre avaliação da remoção de nitrogênio orgânico e amoniacal em amostras de esgoto doméstico, submetido a pós-tratamento em tabuleiros tratados com Capim elefante (*Pennisetum purpureum*), Melo *et al* (2003) verificou uma remoção média total da ordem de 66% de nitrogênio orgânico e 78% para o nitrogênio amoniacal. Nestes estudos foi aplicado carga de  $\text{NH}_4\text{-N}$  de  $89,4 \text{ g m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$  em sistemas tipo tabuleiro com substrato de argila e areia.



**Figura 15:** Variação das concentrações de nitrato nas etapas sequenciais de anaerobiose e fitorremediação com Capim elefante.

De uma forma mais específica pode ser afirmado que os aumentos de concentração de  $\text{NO}_3$  são devidos a nitrificação na fração aeróbia mais expressiva do segundo leito cultivado, pois neste estágio o fluxo é descendente, proporcionando a oxidação do íon amônio.

No entanto, as reduções de íon amônio não são proporcionais ao aumento de íon nitrato nos leitos cultivados. Isto significa que mecanismos de absorção radicular e denitrificação ocorrem paralelamente.



**Figura 16:** variação das concentrações de nitrato nas etapas sequenciais de fitorremediação com Capim elefante



**Figura 17.** Capim elefante adaptado em sistema de leitos cultivados ETE/UNISC

O Capim elefante apresentou bom desenvolvimento inicial nos dois leitos cultivados, destacando-se no segundo leito, onde o substrato se caracteriza por estar com umidade e não alagado (Figuras 17).

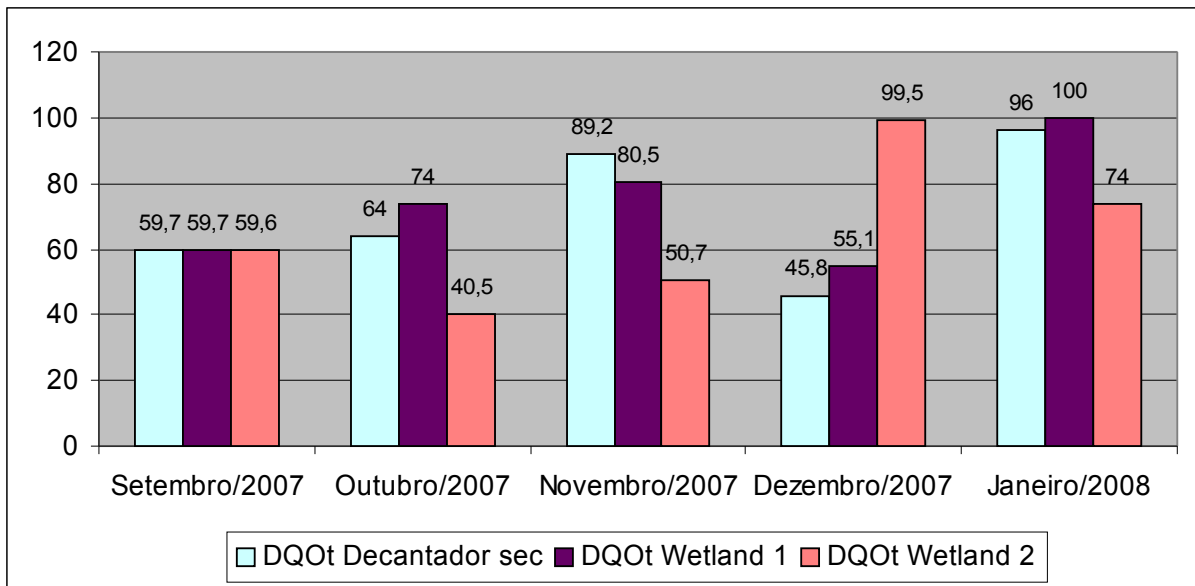


**Figura 18.** Capim elefante com danos foliares devido a baixas temperaturas

Devido às baixas temperaturas do mês de julho, a parte vegetativa desta fase sofreu danos com perda total (Figura 18). Este capim desenvolve-se em terrenos úmidos e secos, não sendo comum encontrá-lo em terrenos alagadiços. Devido a perda do Capim elefante, não foi possível realizar a quantificação da massa seca nesta fase, também não foram realizadas medidas das raízes.

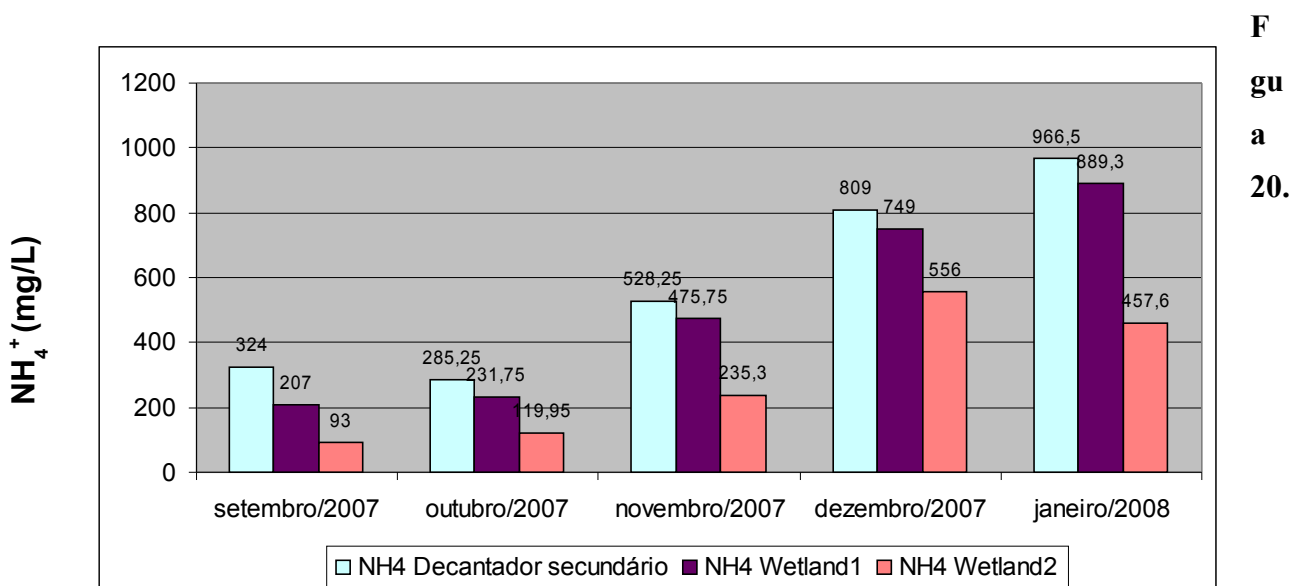
#### **4.2.2. Leitões Cultivados construídos com Espadana (*Zizaniopsis bonariensis*)**

A utilização da Espadana nos leitões cultivados construídos estabelece a segunda fase de testes com a unidade de saneamento (Figuras 19-21).



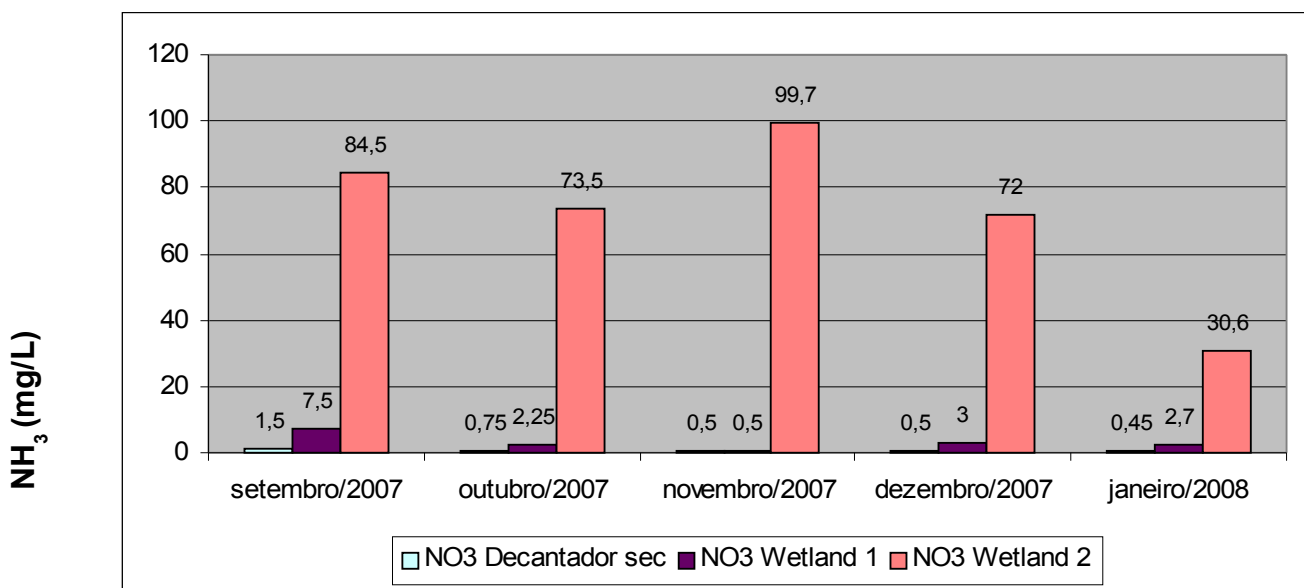
**Figura 19.** Variação das concentrações de material carbonáceo nas etapas de fitorremediação com Espadana.

A partir de setembro de 2007, e, portanto em período sazonal mais adequado para o crescimento vegetal, foram observados os mesmos pontos de amostragem considerados no sistema com Capim elefante. Com relação às reduções de DQO são observados reduções na seqüência das etapas de decantação e fitorremediação. A exceção ocorre para os meses de setembro, provavelmente devido ao não desenvolvimento do sistema radicular. Já para outubro não se tem explicação para o crescimento da DQOt, configurando-se como anormalidade.



**Figura 20.** Variação das concentrações de nitrogênio amoniacal nas etapas de fitorremediação com Espadana.

Os maiores valores de DQO e nitrogênio amoniacal observados são atribuídos a problemas operacionais da ETE-UNISC, pois ocorreram desvios do abastecimento da ETE e o tempo de detenção hidráulico no tanque equalizador promoveu anaerobiose em maior atividade. Em estudos anteriores publicados por Voese (2008), o desempenho do sistema integrado UASB + Leitos cultivados demonstrou a elevação dos valores de nitrogênio amoniacal a partir de novembro de 2007 para  $500 \text{ mg L}^{-1} \text{ NH}_4^+$  e  $799 \text{ mg L}^{-1} \text{ NH}_4$  em dezembro de 2007.



**Figura 21.** Variação das concentrações de nitrato nas etapas de fitorremediação com Espadana.

Também deve ser considerado que nos períodos de dezembro e janeiro ocorre diminuição de pessoas no campus central devido ao período de férias, dado este que pode ter afetado o parâmetro de  $\text{NH}_4^+$  e estar relacionado com a redução de nitrato, sendo que podemos observar o valor elevado do nitrato no mês de novembro de 2007.

Efetivamente, as reduções de carga de nitrogênio nos efluentes tratados devem considerar as diferenças de conversão de  $\text{NH}_4^+$  para  $\text{NO}_3^-$ , pois a fração não convertida

oxidativamente foi absorvida pelas plantas ou denitrificada. Nestes casos, as reduções médias foram de 50% com o uso da Espadana e 30% com o Capim elefante. Deve ser ressaltado que as comparações de desempenhos das espécies, requer períodos mais prolongados que possam atenuar as variações climáticas..

Na Figura 21 destaca-se o valor do nitrato do mês de novembro para o mês de janeiro de 2008. Sua redução pode estar relacionada novamente ao fato do baixo número de pessoas no campus, bem como estar relacionado ao corte das macrófitas aquáticas no início do mês de janeiro. Registrou-se nos meses de dezembro e janeiro temperaturas na média dos 27°C. As elevadas temperaturas locais promovem uma aceleração na absorção de nutrientes pela vegetação e nas reações de nitrificação, denitrificação e volatilização da amônia livre (Moehlum, 1998), processos que ocorrem no interior dos leitos cultivados .

A macrófita utilizada na segunda fase Espadana (*Zizaniopsis bonariensis*) apresentou bom desenvolvimento, destacando-se no primeiro leito cultivado que possui fluxo ascendente propiciando superfície alagada. A quantificação da massa seca foi realizada no final da segunda fase (10/01/08), onde realizou-se a remoção da biomassa com corte raso (altura=0,10m) de toda a vegetação (Figura 22). Esse processo resultou uma produção de biomassa de 0,245 Kg de matéria seca no primeiro leito cultivado e 0,222 Kg no segundo leito cultivado, para os 1,68 m<sup>2</sup> de área superficial de cada leito.



**Figura 22.** Leitos cultivados com Espadana (*Zizaniopsis bonariensis*) antes e após poda .

**Tabela 7.** Profundidade máxima atingida pelas raízes da Espadana durante o período de operação dos leitos cultivados.

Posição no Leito	Comprimento das Raízes (m)	
	Wetland 1	Wetland 2
Início	0,27	0,26
Meio	0,30	0,24
Fim	0,26	0,25
Média	0,28	0,25



A tabela 7 demonstra a profundidade de raízes da espécie Espadana (*Zizaniopsis bonariensis*) obtida nesta pesquisa no primeiro leito cultivado (0,30 m) confirmou o valor reportado por Reed *et al.* (1995) como máximo para a espécie.

## 5 Considerações Finais

As caracterizações analíticas dos efluentes geradas no campus universitário permitiram observar que o parâmetro mais crítico quanto à carga poluente está relacionado com o nitrogênio amoniacal. Valores de  $54 \text{ mg L}^{-1} \text{ NH}_4^+$  revelam superioridade ao limite de  $20 \text{ mg L}^{-1}$  estabelecido na resolução do CONSEMA 128/06. As cargas amoniacais subiram a valores superiores a  $400 \text{ mg L}^{-1}$  nos períodos de férias escolares e também devido as paradas operacionais da ETE. Isto configura que o efluente tem forte contribuição do uso dos mictórios, tornando-os diferenciados quanto ao perfil dos esgotos urbanos.

As configurações de fluxo alternado dos leitos cultivados construídos permitiram reduções das cargas poluentes em termos de DQO,  $\text{NH}_4^+$  e  $\text{NO}_3^-$  dos efluentes tipo águas negras do campus universitário estudado. Duas relações da variação das concentrações de nitrogênio amoniacal e nitrato devem ser considerados: a primeira de oxidação do amônio para nitrato, com valores de 50% para o Capim elefante e Espadana e a segunda dos processos combinados de absorção radicular e denitrificação. Neste caso foram observados valores de 31% de redução da carga poluente de nitrogênio para o Capim elefante e 50% para Espadana.

Apesar da obtenção de eficiência de redução da carga poluente em termos de DQO e nitrogênio amoniacal, comparáveis a literatura, os valores absolutos de redução de nitrogênio amoniacal ainda necessitam de ajustes. Isto implica na diminuição da carga volumétrica de 54

cm para no máximo 20 cm. Já os valores de DQO foram reduzidos em percentuais satisfatórios (até 81%) estando também em termos de valores absolutos já adequados a legislação.

A macrófita aquática Espadana, demonstrou maior adaptação ao sistema, destacando-se no primeiro leito cultivado de fluxo ascendente, caracterizado por superfície encharcada.

A fase Capim elefante configura inovação na aplicação desta espécie em leitos cultivados, a qual demonstrou eficiência de redução da carga poluente, porém necessita ser aplicada em período sazonal adequado a temperaturas médias acima de 15 °C. .

O reuso dos efluentes finais para fertirrigação podem ser reconsiderados com a realização deste trabalho, porque as determinações das cargas de nitrogênio amoniacal e nitrato, revelam quantitativamente este potencial. Também considera-se o potencial nutricional das espécies utilizadas na alimentação animal.

## 6 Referências

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas, NBR 13969: Tanque sépticos, unidades de tratamento complementar e disposição final dos efluentes líquidos - Projeto, construção e operação. Rio de Janeiro, 1997.

APHA; AWWA; WPCF. *Standard Methods for the Examination of Water and Wasterwater*. 19<sup>th</sup> ed. Washington D.C.: American Public Health Association, 1995. 1134p.

BRANCO, S. M. Hidrobiologia Aplicada à Engenharia Ambiental. 3. ed. São Paulo: CETESB/ASCETESB, 1986.

\_\_\_\_\_. Água, Meio Ambiente e Saúde. In: REBOUÇAS, A. da C.; BRAGA, B.; TUNDISI, J. G. Águas Doces no Brasil - Capital Ecológico, Uso e Conservação. São Paulo: Escrituras, 1999. p.227-291.

BRASIL, M. S. *et al* . Plantio e desempenho fenológico da espadana(*Thypha sp.*) utilizada no tratamento de esgoto doméstico em sistema alagado construído. Engenharia Sanitaria e Ambiental . Vol. 12 nº 03, 2007.

BRIX, H. *Functions of macrophytes in constructed wetlands*. Water Science Technology, n.4, v.29, pp.71-78, 1994.

\_\_\_\_\_. *Do macrophytes play a role in constructed treatment wetlands?* Water Science Technology, v.35, n.5, pp.11-17, 1997.

CAMPOS, J. R. Tratamento de Esgotos Sanitários por Processo Anaeróbico e Disposição Controlada no Solo. ABES. 466p. Rio de Janeiro, 1999.

CONAMA - CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE (Brasil). Resolução nº 274, de 29 de novembro de 2000. Definição para avaliação da qualidade ambiental das águas. *Diário Oficial da União*. Brasília, DF, 08 jan. 2001.

CONAMA - CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE (Brasil). Resolução nº 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 União*, Brasília, DF, ano 142, n. 53, 18 mar. 2005. Seção 1, p. 58-63.

CONSEMA – Conselho Estadual do Meio Ambiente. Resolução n.357. *Diário Oficial da União*. Brasília, 2005. p.1-23.

COOPER, P.F., JOB, G.D., GREEN, M.B. E SHUTES, R.B.E. Reed Beds and Constructed Wetlands for Wastewater Treatment. Swindon: WRc plc. 1996, 184p.

COWARDIN, L. M. Classificaion of Wetlands and Deewater Habitats of de United States, U.S. Fish & Wldlife Service Pub. FWS/OBS-79/31, Washington, 1979, 103 p.

CUNNINGHAM, S. D. Anderson, T. A., Schwab, P. An Hsu, F. C., Phytoremediation of soil contaminated with organic pollutants *Adv. Agron.* (56) p.55 (1996).

D'AMBROSIO, O. Paraísos Artificiais. Disponível em: <<http://www.unesp.br/jornal>> Acesso em: 20 set. 2006.

DI BERNARDO, L. Métodos e Técnicas de Tratamento de Água. 496p. ABES, 1993.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA, Centro Nacional de Pesquisa em Aves e Suínos. Manejo de dejetos de suínos. Concordia, 2003. 31 p. (Boletim Informativo de Pesquisa, 11)

ESTEVES, F. A. **Fundamentos de Limnologia**. 2 ed. Rio de Janeiro, 1998. 333-334 p.

DINARDI, A. L. *et al.* Fitorremediação. Centro Superior de Educação Tecnológica (CESET) – UNICAMP Curso de Tecnologia em Saneamento Ambiental , 2003.

FONSECA, C.P; Galvão, L.M; PEREIRA, D.F; PHILOMENO,M.G. As macrófitas aquáticas do Paraná, 2004. Disponível em: <http://www.semarh.df.gov.br/site/cap04/03.html>. Acesso em março/2008.

GAMBREL, R. P.; and W. H. Patrick, 1978. *Chemical and microbiological properties of anaerobic soils and sediments, in lant Life Anaerobic Environmets, D.D. Hook and R.M.M. Crawford, eds., Ann Arbor Sci. Pub. Inc.; Ann Arbor, Mich., pp. 375-423.*

GOPAL,B. *Natural and constructed wetlands for wastewater treatment: potentials ans problems. Wat.Sci.Teach.* v.40,n.3,p. 27-35, 1999.

GOSELINK, J. G. ; MITSCH, W. J. *Wetlands. 2nd ed. Unided States. Van Nostrand Reinhold is a division of Internacional Thomson Publishing, 1993.*

GREEN, M.B.; GRIFFIN, P.; SEABRIDGE, J.K.; DHOBIE, D. Removal of bacteria in subsurface flow wetlands. *Water Sci. Tech.*,Vol.35, n°5, 1997. p. 109-116.

HAGENDORF, U.; DIEL, Klaus; FEUERPFEIL, I.; HUMMEL, A.; SZEWZYK, R. Retention of microbiological organisms in constructed wetlands. *Anais da 7<sup>th</sup> International*

Conference on Wetland Systems for Water Pollution Control. Florida, 2000. p. 391-397.  
HTTP:// www.viewimagem.com. Acesso em Dez. 2007.

HESPANHOL, I. Potencial de reúso de água no Brasil: agricultura, indústria, municípios, recarga de aquíferos. São Paulo, 2001. Separata de: Resumo de trabalhos técnicos III ENCONTRO DAS ÁGUAS, Chile, 2001.

HUSSAR, G.J. Avaliação do desempenho de leitos cultivados no tratamento de águas residuárias de suinocultura. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola, área de concentração Água e Solo) – Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade de Campinas. Campinas 2001.

IRGANG, B.E. & GASTAL JR., C.V.S. *Macrófitas Aquáticas da Planície Costeira do RS*. Porto Alegre: Ed. dos Autores, 1996. 290p.

IWA (2000). *Constructed Wetlands for Pollution Control; Processes, Design and Operation*. Scientific and Technical Report No. 8. London, England: IWA Publishing. 156p.

JOLY, A. B. *Botânica: Introdução à taxionomia vegetal*. 10. ed. São Paulo: Companhia Editora Nacional, 1991.

LAUTENSCHLAGER, S.R. Modelagem e desempenho de Wetlands Construídos. 2001. Dissertação (Mestrado em Engenharia/Engenharia Hidráulica e Sanitária) Escola politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2001.

Lei nº 6.938, de 31 de agosto de 1981. Política Nacional de Meio Ambiente (PNMA). Disponível em [http://www.dji.com.br/leis\\_ordinarias/1981-006938-pnma/politica\\_nacional\\_do\\_meio\\_ambiente.htm](http://www.dji.com.br/leis_ordinarias/1981-006938-pnma/politica_nacional_do_meio_ambiente.htm). Acesso em novembro/2007.

Lei nº 9.433/97. Política Nacional de Recursos Hídricos (PNRH). Disponível em <http://www.mma.gov.br/port/srh/politica/legislacao/corpo.html>. Acesso em novembro/2007.

LIN, Y.F. et al. *Performance of a constructed wetland treating intensive shrimp aquaculture wastewater under high hydraulic loading rate*. Environmental Pollution, v.134, pp.411-421, 2002.

LISBOA, F. F; JUNIOR, C.V.Gastal. Levantamento das macrófitas aquáticas na beira do lago guaíba no município de guaíba, rs/brasil. Caderno de Pesquisa Sér. Bio., Santa Cruz do Sul, Vol. 15, No. 1, Jan./Jun. 2003, pp. 17-27

LORENZI, H. **Botânica Sistemática: Guia ilustrado para identificação das famílias de Angiospermas da flora brasileira, baseado em AGO II.** Nova Odessa, SP : Instituto Plantarum, 2005. 161 p.

LORENZI, H. **Plantas Daninhas do Brasil.** 3<sup>a</sup> ed. Nova Odessa, SP : Instituto Plantarum, 2000. 356 p.

MALAVOLTA, E. et al. **Avaliação do estado nutricional de plantas:** princípios e aplicações. 2.ed. Piracicaba: Potafós, 1989. 319 p.

MANNARINO, C.F. *et al.* Wetlands para Tratamento de Lixiviados de Aterros sanitários – experiências no aterro sanitário de pirai e no aterro metropolitano de gramacho (rj). Revista Engenharia Sanitária Ambiental. Vol.11 - Nº 2 - abr/jun 2006, p 108-112.

MARSCHNER, H. **Mineral nutrition of higher plants.** San Diego: Academic Press, 1990. 674 p.

MARQUES, D. da M. *et al.* Terras Úmidas Construídas de Fluxo Subsuperficial. In: CAMPOS, J. R. Tratamento de Esgotos Sanitários por Processo Anaeróbio e Disposição Controlada no Solo. Rio de Janeiro: ABES/PROSAB, 1999. p. 409 - 435.

MELO, J. L. S. *et al.* Avaliação da Remoção de Nitrogênio Orgânico e Amoniacal em Amostras de Esgoto Doméstico submetido a pós-tratamento em Tabuleiros Irrigados. Departamento de Engenharia Química, C.T. PPGEQ, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal/RN 2003.

MELO, H.N. S. et al. Salinização no pós-tratamento de esgotos por disposição controlada no solo. PROSAB-UFRN. Núcleo Tecnológico – Natal/RN, 2005.

METCALF & EDDY, *Wastewater engineering: treatment, disposal, reuse.* 4 ed. McGraw-Hill. 2003, 1819 p.

MOEHLUM, T. *Wetlands for Treatment of Landfill Leachates in Cold Climates. In: Constructed Wetlands for the Treatment of Landfill Leachates.* MULAMOOTTIL, G.; McBEAN, E.A.; ROVERS, F. (Org.) Boca Raton, Florida: Lewis Publishers, p.33 – 46. 1998.

PELCZAR JR., J.M.; CHAN, E.C.S.; KRIEG, N.R. *Microbiologia.* Vol. I. São Paulo: McGraw-Hill, 1981.

PUTZKE, Jair. **Biodiversidade: O Maior Espetáculo da Terra: nível fundamental e médio.** 3 v. Porto Alegre: Ed. Do Autor, 2006.

REED, S.C., MIDDEBROOKS, E.J., CRITES, R.W. *Natural systems for waste management and treatment.* 308p. McGraw-Hill, New York, 1988

\_\_\_\_\_. *Natural systems for management and treatment.* New York: McGraw-Hill, Inc. 435p. 1995.

Resolução CONSEMA N° 128/2006. Disponível em [www.sema.rs.gov.br/sema/html/pdf/Resolucao128Efluentes.pdf](http://www.sema.rs.gov.br/sema/html/pdf/Resolucao128Efluentes.pdf). Acesso em novembro 2007.

RODRIGUES, N.S. Aguapé uma alternativa no tratamento de esgotos. *Pau-Brasil.*v.5, p. 9 (1985).

SALATI JR., E.; SALATI, E.; SALATI, E. *Wetland projects developed in Brazil.* *Water Sci. Tech.,*Vol.40, n°3, 1999. p. 19-25.

SEZERINO, P.H. (2002). Utilização de biofiltros com macrófitas (Vertical Constructed Wetlands) como pós-tratamento de Lagoas de Estabilização aplicadas aos dejetos suínos. Dissertação de Mestrado em Engenharia Ambiental, Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina, 123p.

SMITH, L. B.; WASSHAUSEN, D. C. & KLEIN, R. M. 1982. Gramíneas. *Flora Ilustrada Catarinense.* Publicação do Herbário Barbosa Rodrigues. 472 p.

SOUZA, J.T.; LEITE, V.D. Tratamento e utilização de esgotos domésticos na agricultura, 2 ed, Campina Grande: EDUEP, 2000, 135p.

SHUVAL, H. et al. *Development of a Risk Assessment Approach for Evaluating Wastewater Reuse Standards for Agriculture. Water Science and Technology*, Oxford. v.35, n.11-12, p. 15-20, 1997.

TANNER, C.C. *Plants as ecosystem engineers in subsurface-flow treatment wetlands. Water Science Technology*, v.44, n.11-12, pp.9-17, 2001.

URBANIC-BERCIC, O. *Investigation into the Use of Constructed Reedbeds for Municipal Waste Dump Leachate Treatment. Water Science & Technology*, Great Britain, v. 29, p. 289-294, 1994.

VALENTIM, M.A.A. Uso de leitos cultivados no tratamento de efluente de tanque séptico modificado. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola/Água e Solo) – Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, 1999.

VOESE, Adalberto. Proposição de Unidade de Tratamento de Esgoto Domiciliar de Baixo Custo. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Ambiental) – UNISC - Universidade de Santa Cruz do Sul, 2008.



# Livros Grátis

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

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

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

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

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