



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA  
"JULIO DE MESQUITA FILHO"  
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS E CIÊNCIAS EXATAS



Trabalho de Formatura

Curso de Graduação em ENGENHARIA AMBIENTAL

COMPARAÇÃO DE EFICIÊNCIAS DO USO DE SISTEMAS CONSTRUÍDOS DE  
ÁREAS ALAGADAS (CONSTRUCTED WETLAND SYSTEM – CWS), TIPOS  
ASCENDENTE E DESCENDENTE, PARA TRATAMENTO DE EFLUENTES

Daniel de Freitas Poli

Rio Claro (SP)

2010

DANIEL DE FREITAS POLI

**COMPARAÇÃO DE EFICIÊNCIAS DO USO DE  
SISTEMAS CONSTRUÍDOS DE ÁREAS  
ALAGADAS (CONSTRUCTED WETLAND  
SYSTEM - CWS), TIPOS ASCENDENTE E  
DESCENDENTE, PARA TRATAMENTO DE  
EFLUENTES**

*Trabalho de Formatura apresentado ao Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Campus de Rio Claro (SP), da Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, para obtenção do grau de Engenheiro Ambiental.”*

Orientadora: *Profa. Dra. Sâmia Maria Tauk-Tornisielo*

Co-orientador: *Dr. Enéas Salati Filho*

Rio Claro – SP

2010

628.2  
P766c

Poli, Daniel de Freitas

Comparação de eficiências do uso de sistemas construídos de áreas alagadas (constructed wetland system - cws), tipos ascendente e descendente, para tratamento de efluentes / Daniel de Freitas Poli. - Rio Claro : [s.n.], 2010

39 f. : il., figs., tabs., fots.

Trabalho de conclusão de curso (bacharelado - Engenharia Ambiental) - Universidade Estadual Paulista, Instituto de Geociências e Ciências Exatas

Orientador: Sâmia Maria Tauk Tornisielo

Co-Orientador: Enéas Salati Filho

1. Esgotos. 2. Tratamento de esgoto. 3. Efluente urbano. 4. Recurso hídrico. I. Título.

Ficha Catalográfica elaborada pela STATI - Biblioteca da UNESP  
Campus de Rio Claro/SP

DANIEL DE FREITAS POLI

**COMPARAÇÃO DE EFICIÊNCIAS DO USO DE  
SISTEMAS CONSTRUÍDOS DE ÁREAS  
ALAGADAS (CONSTRUCTED WETLAND  
SYSTEM - CWS), TIPOS ASCENDENTE E  
DESCENDENTE, PARA TRATAMENTO DE  
EFLUENTES**

*Trabalho de Formatura apresentado ao  
Instituto de Geociências e Ciências  
Exatas, Campus de Rio Claro (SP), da  
Universidade Estadual Paulista Júlio  
de Mesquita Filho, para obtenção do  
grau de Engenheiro Ambiental.*

Comissão Examinadora

***Prof. Dra. Sâmia Maria Tauk-Tornisielo*** (orientadora)

***Prof. Dr. André Gustavo Mazzini Bufon***

***Mestre João Marcelo Elias***

Rio Claro, 22 de Novembro de 2010



---

assinatura do(a) aluno(a)

---

assinatura do(a) orientador(a)

## **AGRADECIMENTOS**

A minha orientadora Prof<sup>ª</sup>.Dr<sup>ª</sup>. Sâmia Maria Tauk-Tornisielo pela paciência, confiança, orientação, ajuda prestada e espaço cedido junto ao CEA,

A Sara Cristina Galvão por, sempre solícita, auxiliar em diferentes ocasiões,

Ao Dr. Enéas Salati Filho pela co-orientação, experiência, materiais e equipe cedidos, sem os quais nossos esforços não sairiam do papel,

Ao Lucas Figueiras Cioni pelo companheirismo, ajuda na montagem do experimento, manutenção do mesmo, pelo auxílio no laboratório e discussões a respeito dos trabalhos realizados, apesar das dificuldades enfrentadas,

A Eleni Nadai Malagutti e a Francisca de Assis Mattioli Gonçalves pelo companheirismo, ensinamentos laboratoriais e, sobretudo pela paciência e tempo dedicados,

Ao SEMAE por ceder o espaço na ETE – Piracicamirim, mesmo com as reformas em andamento,

A Érica do Instituto Terramax pelo auxílio e dedicação,

A equipe do Instituto Terramax, que auxiliou na montagem e manutenção dos protótipos,

Ao pessoal da República Sete Anões com quem morei neste período de Faculdade de Engenharia em Rio Claro, pelos momentos de descontração ao longo desses anos,

A minha Família e namorada pelo permanente apoio e incentivo em todas fases de minha vida.

# COMPARAÇÃO DE EFICIÊNCIAS DO USO DE SISTEMAS CONSTRUÍDOS DE ÁREAS ALAGADAS (CONSTRUCTED WETLAND SYSTEM - CWS), TIPOS ASCENDENTE E DESCENDENTE, PARA TRATAMENTO DE EFLUENTES SANITÁRIOS

## RESUMO

A água é um elemento essencial para vida. O uso desse elemento para sustentação das comunidades o define como Recurso Hídrico. Este recurso hoje vem sendo mal utilizado e degradado por despejo de efluentes altamente contaminados. O empobrecimento de sua qualidade apresenta um risco para o abastecimento humano. A necessidade em se manejar este recurso, tratando os efluentes de forma correta necessita o constante aperfeiçoamento dos sistemas de tratamento. Outra necessidade está em se adequar os custos dos sistemas às demandas de comunidades com menor poder financeiro. O presente estudo pretendeu adequar e entender os sistemas de áreas alagadas, aperfeiçoando sua eficiência, em uma tentativa de colaborar com o enriquecimento desta tecnologia. A evidência prática, com protótipos em escala piloto, montados na ETE Piracicamirim, com efluente de esgotamento urbano, contribuíram para evidenciar os problemas operacionais e de projeto do sistema. A revisão bibliográfica mostrou que diversos estudos apresentaram eficiência para o tratamento. Ficou evidente, entretanto, a necessidade de melhora nas definições dos dimensionamentos, e respostas, do projeto. Além disso, a padronização de condições do sistema para o tratamento de efluentes específicos é um campo interessante, identificado, para contribuição em estudos futuros para a engenharia ambiental e de saneamento.

**Palavras-chave:** efluentes; efluente urbano; tratamento de esgoto; sistemas construídos de áreas alagadas; eficiência; recurso hídrico.

# **EFFICIENCIES COMPARISON OF THE USE CONSTRUCTED WETLAND SYSTEM - CWS, UPFLOW AND DOWNFLOW TYPES FOR SANITARY SEWAGE TREATMENT.**

## **ABSTRACT**

Water is an essential element for life. The use of this element, to support the community, defines it as water resource. This feature is being misused and degraded by the dumping of highly contaminated effluents. The impoverishment of its quality poses a risk to human consumption. The necessity to manage this resource, treating the wastewater properly, requires the constant improvement of treatment systems. Another need is to adjust the cost of systems to the demands of communities with less financial clout. This study aimed to adapt and understand the systems of wetlands, improving its efficiency, in an attempt to collaborate with the enrichment of this technology. The practical evidence, with lab-scale prototypes, assembled in ETE Piracicamirim with urban sewage effluent contributed to highlight the problems and operating system design. The bibliographic review showed that several studies had effectiveness for treatment. But it was evident the need for better understanding of dimensioning definitions that better attempted to the answers into the project. Moreover, standardization of system conditions for the specific wastewater treatment is an interesting field, identified, for future studies yet contribute to environmental engineering and sanitation.

**Key-words:** sewage effluent, urban wastewater, constructed wetland systems, efficiency, water resource.

## Sumário

|   |           |
|---|-----------|
| <b>AGRADECIMENTOS</b> .....   | <b>3</b>  |
| <b>RESUMO</b> .....   | <b>4</b>  |
| <b>ABSTRACT</b> .....   | <b>5</b>  |
| <b>ÍNDICE DE FIGURAS</b> .....  | <b>8</b>  |
| <b>ÍNDICE DE TABELAS</b> .....  | <b>9</b>  |
| <b>1. INTRODUÇÃO</b> .....  | <b>10</b> |
| <b>2. OBJETIVOS</b> .....   | <b>12</b> |
| <b>2.1 Objetivo Geral</b> .....   | <b>12</b> |
| <b>3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....   | <b>13</b> |
| <b>3.1 Esgoto Sanitário</b> .....   | <b>13</b> |
| <b>3.2 Áreas Alagadas Naturais (<i>Wetlands</i>)</b> .....  | <b>14</b> |
| <b>3.3 Processo de Depuração Natural em Áreas Alagadas</b> .....  | <b>15</b> |
| <b>3.4 Sistemas de Áreas Alagadas Construídas</b> .....   | <b>17</b> |
| <b>3.5 Macrófitas Aquáticas Emergentes</b> .....  | <b>18</b> |
| <b>3.6 Mecanismos de Remoção</b> .....  | <b>19</b> |
| <b>3.7 Configurações de <i>Layout</i></b> .....   | <b>20</b> |
| <b>4. MATERIAL E MÉTODOS</b> .....  | <b>21</b> |
| <b>4.1 ETE Piracicamirim</b> .....  | <b>21</b> |
| <b>4.2 Materiais</b> .....  | <b>22</b> |
| 4.2.1 <i>Macroorganismos</i> .....  | 22        |
| 4.2.2 <i>Material para CWS, em escala piloto</i> .....  | 22        |
| 4.2.3 <i>Reagentes e Equipamentos, Vidraria usual de laboratório de Química e Microbiologia;</i> .....      | 22        |
| 4.2.4 <i>Efluente da Estação de Tratamento de Efluentes (ETE) -Piracicamirim – Semaes, Piracicaba</i> ..... | 22        |
| <b>4.3 Metodologia</b> .....  | <b>23</b> |
| 4.3.1 <i>Fase preliminar</i> .....  | 23        |
| 4.3.2 <i>Tratamento</i> .....   | 25        |
| 4.3.3 <i>Análise dos efluentes</i> .....  | 26        |
| 4.3.4 <i>Análise dos Resultados</i> .....   | 27        |
| <b>5. RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....  | <b>28</b> |
| <b>5.1 Mecanismos de Remoção na Configuração Ascendente e Descendente</b> ...                               | <b>28</b> |
| <b>5.2 Protótipo</b> .....  | <b>28</b> |

|     |  |    |
|-----|--|----|
| 5.3 | Discussão da Revisão Bibliográfica ..... | 29 |
| 6.  | CONCLUSÕES .....                         | 32 |
| 7.  | RECOMENDAÇÕES .....                      | 33 |
| 8.  | REFERÊNCIAS .....                        | 34 |

## ÍNDICE DE FIGURAS

|   |           |
|---|-----------|
| <b>Figura 1. Vista aérea da ETE – Piracicamirim.....</b>            | <b>21</b> |
| <b>Figura 2. Caixas de água utilizadas no sistema.....</b>          | <b>22</b> |
| <b>Figura 3. Visão geral do sistema montado.....</b>                | <b>24</b> |
| <b>Figura 4. Dutos de drenagem do fundo da caixa.....</b>           | <b>24</b> |
| <b>Figura 5. Layout das caixas na configuração descendente.....</b> | <b>25</b> |
| <b>Figura 6. Layout das caixas na configuração ascendente.....</b>  | <b>25</b> |

## ÍNDICE DE TABELAS

|  |           |
|--|-----------|
| <b>Tabela 1. Metodologia, equipamentos e referências utilizados para as análises dos parâmetros físicos, químicos e biológicos das amostras das águas.....</b> | <b>26</b> |
|--|-----------|

## 1. INTRODUÇÃO

A presença de água sobre a Terra, associada à temperatura global que permitiu sua ocorrência nos três estados físicos da matéria, possibilitou a aparição das primeiras formas de vida, há aproximadamente 3,5 bilhões de anos. A água é essencial para existência da vida na forma como é conhecida. Para o corpo humano, a carência deste líquido é sensivelmente danosa, sendo a falta de sua ingestão, a partir de 48 horas, de grande risco para a manutenção dos sistemas vitais (LEPARGNEUR, 2004).

Primordial à vida, esse recurso natural é imprescindível ao equilíbrio ecológico, bem como ao desenvolvimento da sociedade. Dada tamanha importância, seria um absurdo não tratar este recurso natural com a devida responsabilidade.

O termo “água” denomina a molécula que é constituída por dois elementos de hidrogênio e um de oxigênio. “Recurso Hídrico”, por sua vez, está associado ao uso determinado a esse elemento natural. Deve-se ressaltar, entretanto, que nem toda a água da Terra é, necessariamente, um recurso hídrico, na medida em que seu uso nem sempre tem viabilidade econômica (REBOUÇAS et al., 2006).

Nas últimas décadas, o exacerbado crescimento populacional mundial, conjuntamente com a rápida industrialização, desencadeou um aumento da poluição dos corpos hídricos como córregos, rios, lagos e represas, excluindo suas águas, na maior parte do ano, dos limites estabelecidos pela legislação quanto aos níveis de potabilidade (BORGES, 2005). O inadequado ou ausente tratamento dos resíduos gera um problema ambiental gradual, com inúmeros impactos negativos (CUNHA, 2006).

Os esgotos domésticos possuem compostos biodegradáveis, nutrientes e bactérias, entre outros (VON SPERLING, 2005). O escoamento superficial urbano contém todos os poluentes que se depositam na superfície do solo, os quais são arrastados para os cursos de águas superficiais pelo regime pluvial (COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL – CETESB, 1998).

Há necessidade de sistemas alternativos que possam minimizar os efeitos impactantes do desenvolvimento e crescimento da humanidade, solucionando os problemas sob os aspectos sociais, econômicos e ambientais. Os sistemas construídos de áreas alagadas, ou, *Constructed Wetland System* (CWSs), vêm sendo cada vez mais pesquisados e utilizados para tratamentos de águas, efluentes e esgotos, por possuírem tecnologia simples e de fácil operação. É uma técnica que possibilita a remoção de poluentes, por um método ecologicamente correto e economicamente viável (CHAGAS,

Colletti (2008) definiu CWS como um sistema natural baseado na associação entre macrófitas, microrganismos como fungos, bactérias e algas, interagindo dinamicamente entre si e com os elementos físico-químicos presentes no solo. Kadlec e Knight (1996) relataram que esses sistemas apresentam capacidade de remoção de poluentes. Além disso, a retirada de poluentes pode ser afetada por diversas circunstâncias, dentre elas o tipo de solo, substrato (matriz suporte) empregado, meteorologia, hidrologia, hidrodinâmica, flora e fauna e a operação e manejo do sistema.

Os bons resultados do tratamento da água e efluentes com CWS são intensificados com o uso de macrófitas, uma vez que estas recriam e realçam o equilíbrio de aeróbio/anaeróbio do solo, possibilitando a existência de todo tipo de bactérias (aeróbias, anaeróbias e facultativas), imprescindíveis para os processos que ocorrem nesses sistemas (SHUTES, 2001).

O resultado da análise de parâmetros biogeoquímicos, monitorados em outros CWSs, para o tratamento de esgoto, demonstraram que houve eficiência quanto à remoção da carga orgânica e de nutrientes. Há, porém, a necessidade de ciclos de funcionamento não muito longos, para se evitar a deficiência na oxigenação do efluente e do substrato, além de sua colmatação (NOGUEIRA, 2003).

Cunha (2006) analisou os benefícios trazidos por CWS na melhoria da qualidade das águas do Parque Ecológico do Tietê, em São Paulo. A estação construída com diversas espécies de macrófitas mostrou-se eficiente na remoção de sulfato (52%), DBO5 (41 – 64%), fósforo total (51 – 68%) e nitrogênio amoniacal (57 – 84%).

A falta de manejo no sistema foi um problema encontrado, acarretando o retorno de nutrientes assimilados pelas macrófitas para a coluna de água (N, P, Fe), com a decomposição das plantas e as condições de anaerobiose nos solos filtrantes. A presença de animais no parque contribuiu para o baixo desempenho do canal de macrófitas e dos solos filtrantes na remoção de cor, turbidez, ferro total e coliformes em alguns meses.

O uso de CWS é indicado para tratamento de efluentes de comunidades rurais (HAMMER, 1989), industriais e urbanas (SAKADEVAN; BAVOR, 1999), como também nas pisciculturas (BITAR, 2006). Segundo Kadlec e Knight (1996), o principal objetivo da utilização de sistemas construídos de áreas alagadas é a melhoria da qualidade da água, seguido por objetivos secundários, tais como: produção fotossintética, produção de energia, podendo também ser utilizados para recreação, comercial e educacionalmente.

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivo Geral**

Este trabalho teve como objetivo realizar um levantamento bibliográfico dos mecanismos presentes no sistema de tratamento de efluente sanitário por CWSs, nas configurações de fluxo vertical ascendente e fluxo vertical descendente e evidenciá-los em estudos na escala laboratorial. Esta é uma tecnologia alternativa chamada, do inglês, *Constructed Wetlands Systems (CWS)*, ou Sistemas Construídos de Áreas Alagadas.

Objetivou estabelecer os mecanismos específicos, atuantes em cada uma das configurações, de diferentes fluxos propostos, frente aos processos de depuração do esgoto, propondo a melhor eficiência, para diferentes parâmetros, a partir de uma observação conceitual e científica.

Estabelecer a eficiência do CWS em escala piloto, com protótipos vegetados com arroz (*Oryza sativa*), em fluxo ascendente e descendente, oferecendo material experimental sobre o desempenho de ambos os sistemas, sob as mesmas condições.

Propor alternativas para tratamento de esgoto sanitário, analisando o uso de áreas alagadas construídas.

### 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1 Esgoto Sanitário

A condição de esgotamento sanitário e de saneamento em geral, sobretudo em países em desenvolvimento, como o Brasil, se encontra em situação precária. Hoje apenas parte da população é contemplada com alguma rede de coleta de esgoto. Segundo dados do IBGE (2008), apenas 55% dos municípios brasileiros apresentam rede coletora de esgoto. Deste percentual de municípios com coleta, apenas 51% passam por algum tipo de tratamento antes de serem despejados nos corpos receptores. Ou seja, apenas 26% dos municípios brasileiros possuem algum tipo de tratamento para seus efluentes, sendo o restante despejado *in natura* nos corpos hídricos.

Mesmo a parcela que passa por tratamento, em boa parte, é constatada a sua ineficiência, atendendo quando muito às exigências mínimas legais. Dentre os tipos de tratamento, o terciário está presente em apenas 2,65% dos municípios (IBGE, 2008). Este tipo de tratamento representa o polimento final, retirando boa parte dos nutrientes presentes no efluente, responsáveis importantes pela eutrofização.

Parte da explicação se dá pela histórica falta de investimento no setor de saneamento. Outro fator importante é o elevado preço de implantação de sistemas novos com alta tecnologia.

Os sistemas de áreas alagadas são uma ótima alternativa para o déficit de sistemas de tratamento de esgoto, tanto para tratamentos secundários como terciários. Além disso, por se tratarem de sistemas de baixo custo de implantação, manutenção e de não exigirem alto grau de qualificação dos operadores, estes se tornam sistemas potencialmente favoráveis a atender à demanda por saneamento.

Outro fator importante é a possibilidade de atender a pequenas comunidades, onde existe o maior déficit de saneamento, sem que se tenha que investir em estações caras a ritmos mais lentos.

Hoje, 81% dos municípios têm uma população de até 50 mil habitantes, e com isso maior dificuldade de altos investimentos em infraestrutura.

Analisando apenas a parcela dos pequenos municípios, os números pioram em relação ao total brasileiro, pois apenas 50% desses têm coleta de esgoto (IBGE, 2008).

Este número mostra a realidade das cidades com populações pequenas, que apesar de gerarem um menor volume de efluente urbano individualmente, correspondem a

mais de 80% das cidades, com um déficit de saneamento maior do que quando contabilizados os grandes centros urbanos também.

### **3.2 Áreas Alagadas Naturais (Wetlands)**

O conceito de Área Alagada Natural ainda não teve uma definição concreta e aceita por toda a comunidade científica. É de comum acordo que são áreas que permanecem encharcadas por um período de tempo, porém não foram definidas com clareza ainda quais condições hidráulicas, hidrogeológicas, ecológicas e temporais que definem o ecossistema de áreas alagadas (BRIX, 1993).

Outra questão pertinente à definição de um área alagada natural é sua ocorrência de forma perene ou intermitente. Os ciclos biogeoquímicos influenciam diretamente as características tanto qualitativas quanto quantitativas das características deste ecossistema (HAMMER; BASTIAN, 1989).

É fato que áreas alagadas não são locais que permanecem secos continuamente, porém, não significa que estas áreas precisem estar continuamente alagadas. Muitas regiões permanecem alagadas por um período chuvoso devido às condições de escoamento e drenagem da região, porém passam ao longo do ano por períodos muito secos (HAMMER; BASTIAN, 1989).

Essa dificuldade de separar locais que permanecem alagados por um período, de ecossistemas que se caracterizam pela condição hidráulica de afogamento do solo, determina alguns conceitos para o estudo de áreas alagadas. Seriam, esses, ecossistemas constituintes de um equilíbrio eco-dinâmico de interfaces transitórias entre os meios, terrestre e aquático.

Os ecossistemas de áreas alagadas podem, portanto, ser definidos como sistemas transitórios entre regiões de solo seco e regiões de águas mais profundas. Por conter solo encharcado ou pequena coluna de água, se formam ali organismos diferentes dos organismos bentônicos de águas profundas. Ao mesmo tempo, por oferecer condição hídrica saturada, não permite o desenvolvimento de determinados organismos, sobretudo plantas que não sejam adaptadas a tais condições.

Não existe uma definição exata, ou classificação, para as áreas alagadas. Constantemente os estudos esbarram em perguntas como, quão encharcada é a área, por quanto tempo esta permanece nesta condição, ou ainda, qual a altura da coluna d'água formada, entre outras, geralmente associadas às características físicas e temporais que

constituem o meio. Outro bom parâmetro utilizado para caracterizar esses ecossistemas está representado em suas comunidades.

As plantas que se desenvolvem nessas regiões têm características singulares, sendo prioritariamente hidrófitas, portanto adaptadas a ambientes com solo hidraulicamente saturados (HAMMER,1989). Ainda segundo esse autor, o departamento americano *U.S. Fish and Wildlife Service*, tentou classificar em 1979 as áreas alagadas utilizando-se de três condições mínimas para enquadramento, sendo necessária apenas uma delas para que o sistema fosse considerado de áreas alagadas:

- Áreas suporte, predominantemente, para hidrófitas, ao menos periodicamente.
- Áreas em que o solo permaneça, predominantemente, sem drenagem, e em tempo suficiente para que produza condições anaeróbias, limitando o crescimento de determinados tipos de plantas.
- Áreas em que o substrato não seja solo com capacidade de drenagem ou produtividade, como, por exemplo, rochas. Porém permaneça saturada ou coberta por uma rasa coluna de água por uma temporada de produtividade vegetal.

### **3.3 Processo de Depuração Natural em Áreas Alagadas**

Os ecossistemas de áreas alagadas são reconhecidamente vistos como ambientes receptores de carga orgânica variada. Essa condição unida à configuração hidrogeológica, hidrodinâmica, biológica e climática, permitiu o desenvolvimento de características de interessante potencial depurador. Essa constatação das condições naturais de transformação qualitativa do corpo hídrico, depurando cargas orgânicas com eficiências consideráveis, fomentou estudos sobre os processos atuantes neste sistema.

Os tratamentos sanitários são uma reprodução dos processos naturais atuantes nos ciclos biogeoquímicos, entretanto, de forma controlada e previsível, a fim de atender à demanda de eficiência necessária pela sociedade e o meio.

Embora os mecanismos sejam poucos conhecidos, a complexidade ecológica dos sistemas naturais de áreas alagadas é sabida. E embora seja constatada sua eficiência empiricamente, o dimensionamento de sistemas artificiais torna-se incerto, pois fatores ainda pouco estudados podem ser determinantes para o equilíbrio satisfatório dos projetos. A sustentabilidade e acurasse da capacidade dos processos é uma necessidade para o dimensionamento de sistemas para o uso na engenharia (LAUTENSCHLAGER, 2001).

Os sistemas de áreas alagadas são necessariamente um ambiente ecologicamente equilibrado, diferentemente do que antes se pensava: um ambiente sujo e ecologicamente pobre. Essas condições de equilíbrio e adaptação específica de suas espécies para essas determinadas características ambientais proporcionaram um meio interessante e notadamente eficaz na remoção de cargas poluentes de efluentes. As plantas que se desenvolvem nesses ecossistemas são talvez seu mais importante fator biótico, em conjunto com a microbiota, responsáveis pela condição de eficiência depurante.

Os processos de absorção, adsorção e decomposição da matéria orgânica se dá principalmente pelos microrganismos presentes na rizosfera e pelas ações físicas e químicas atuantes na filtragem do fluxo, pelo substrato pedológico. Os nutrientes resultantes dessa transformação são absorvidos e depositados, tal qual materiais em suspensão, devido às atividades metabólicas dos organismos vegetais. (REDDY et al., 1989 apud COLLETI, 2000).

Os sistemas de áreas alagadas funcionam como um sistema separador, por meio de ações físico-químicas, separando os poluentes, do soluto. A separação se dá por meio de mecanismos conhecidos pelos projetistas sanitários como, decantação, adsorção, filtração por barreira física, adesão catiônica, precipitação (COLLETI, 2000).

Outros mecanismos que ocorrem nestes sistemas não são exatamente transformadores, porém servem como separadores de poluentes do fluido. A absorção de nutrientes, por meio dos sistemas radiculares das plantas, e o mecanismo de evapotranspiração, são meios de separação de ocorrência neste ecossistema que aumentam a eficiência do tratamento.

Além disso, os sistemas de áreas alagadas destacam-se pela capacidade de transformação, por meio dos microrganismos associados à rizosfera, e o transporte de oxigênio a ela, sendo assim um facilitador da oxidação química e biológica de contaminantes. Os compostos orgânicos transformados são facilmente absorvidos pela hidroflora e complexados nas estruturas das plantas. (SALATI, 2000)

A alta produtividade orgânica das plantas aumenta a eficiência do tratamento, e, apresentam-se como grande diferencial de tratamento, frente aos filtros biológicos convencionais. Por conta dessa dependência, no manejo das macrófitas, é necessário a correta e permanente manutenção da comunidade vegetal das áreas alagadas construídas, para o funcionamento ideal do sistema. (KADLEC; KNIGHT, 1996).

### 3.4 Sistemas de Áreas Alagadas Construídas

Os sistemas construídos de áreas alagadas são uma tentativa de reprodução dos sistemas naturais. O grande diferencial das áreas construídas é que se podem manipular os atores de seu ecossistema para proporcionar uma maior eficiência do tratamento. Sua eficiência tem sido estudada na tentativa de enriquecer a técnica e respaldá-la como método tecnológico de tratamento de efluentes.

A necessidade de se poder projetar este tipo de sistema para atender às demandas por tratamento de efluentes específicos é vital. É necessário que se entendam os mecanismos de atuação nas diferentes configurações, para que se possam inferir as eficiências na escala da engenharia, e por sua vez reproduzir o método para atender a real demanda por tratamento de águas poluídas.

Brix (1994) resumiu os tipos de sistemas para tratamento de efluentes por *CWSs* que utilizam macrófitas classificando-os em:

- a) Sistemas que utilizam macrófitas aquáticas flutuantes
- b) Sistemas que utilizam macrófitas aquáticas emergentes
- c) Sistemas que utilizam macrófitas aquáticas submersas
- d) Sistemas combinados

Dentre os tipos de sistemas citados foi selecionado, para enfoque neste trabalho, o sistema com plantas emergentes. Por representar um bom parâmetro de interface da coluna de água com o substrato, e, ainda apresentar alta eficiência de depuração e de crescimento optou-se por sua utilização. Assim foi estudado o uso de macrófitas emergentes, em especial no sistema com fluxo hídrico vertical ascendente e descendente.

Estes sistemas representam de uma forma bem clara, a interação que ocorre entre os dois meios, solo e coluna de água, durante os processos e reações de degradação do efluente. De fato há ainda a interação com o terceiro meio, o ar. As plantas emergentes têm sua folhagem principal em contato com o ar, parte de suas folhas em contato direto com a coluna de água e suas raízes fixadas ao solo.

A distribuição e a presença desses tipos de macrófitas são determinadas pela concentração dos nutrientes na água, pelo tipo de sedimento onde estão fixadas, pela profundidade da lâmina de água, pela presença ou não de correnteza, pela turbidez, pelo ataque de herbívoros e por atividades humanas (WOOD; McATAMNEY, 1996).

As plantas têm fundamental participação no tratamento dos efluentes, absorvendo elementos como o nitrogênio e o fósforo. Além disso, as plantas promovem a oxigenação do substrato através de suas raízes, contribuindo para o tratamento do esgoto com os processos que ali ocorrem.

Para Thomas et al. (1995) devem-se selecionar as macrófitas obedecendo aos seguintes critérios: (1) fácil propagação e crescimento rápido; (2) alta capacidade de absorção de poluentes; (3) tolerância a ambiente eutrofizado e (4) fácil colheita e manejo.

As raízes das macrófitas possuem também a capacidade de fixar os materiais sólidos em suspensão e por meio da excreção de algumas enzimas promoverem a desinfecção de até 80% dos coliformes termotolerantes. (EMBASA, 2008 apud COLLETI, 2008).

Diniz (2005) apud Salati (2000) pesquisando a eficiência das macrófitas: *E. crassipes*, *Pistia stratiotes* e *Typha* spp, observou a redução acentuada de nutrientes (nitrogênio e fósforo), demanda bioquímica do oxigênio (DBO) e coliformes, após a passagem dos efluentes por elas. Conseguiu-se a redução da concentração de coliformes termotolerantes em 59%, no período chuvoso e 98% em época de estiagem.

Almeida e Almeida (2005) apud Colleti (2008) avaliando a eficiência do sistema de tratamento do tipo “zona de raízes” com fluxo sub-superficial descendente, na remoção de coliformes de efluentes sanitários, observaram que o sistema atingiu eficiência em quase sua totalidade.

### **3.5 Macrófitas Aquáticas Emergentes**

Os sistemas de purificação hídrica que utilizam plantas, que se desenvolvem tendo o sistema radicular preso ao sedimento e o caule e as folhas parcialmente submersos, são sistemas construídos de áreas alagadas com macrófitas aquáticas emergentes. A profunda penetração do sistema radicular permite a exploração de um grande volume de sedimentos e maior transporte de oxigênio, por meio das raízes para o próprio substrato.

As macrófitas emergentes são morfologicamente adaptadas para se desenvolverem em sedimentos inundados, em decorrência dos grandes volumes de espaços internos, capazes de transportar oxigênio para o sistema radicular (ARMSTRONG et al., 1991). O oxigênio que é liberado do sistema radicular para a rizosfera cria condições de oxidação para o sedimento e sua microbiota aderida.

Os sistemas que utilizam macrófitas emergentes com fluxo vertical podem ser utilizados quando se requer maiores condutividade hidráulica e oxigenação no sistema radicular (SCHIERUP; BRIX, 1990). As informações dos sistemas que utilizam esta tecnologia indicam boa remoção de sólidos suspensos, DBO, amônia e fósforo. Uma alternância de funcionamento, permitindo uma drenagem total aumenta a oxigenação da rizosfera e do substrato (HILL; SAWHNEY, 1981 apud SALATI, 2000). Para tal, um período cíclico de funcionamento, seguido por um de recuperação favorece a manutenção das condições ótimas de tratamento.

A água a ser tratada deve ter um fluxo vertical em uma camada de solos sobre brita, no qual são cultivadas as plantas emergentes. Ao utilizar as plantas em um sistema de tratamento de esgoto para tratamento terciário (remoção de nutrientes), um dos grandes contribuintes para a eficiência desta remoção está associado ao estágio de desenvolvimento vegetal, e, portanto, sua conseqüente produtividade de biomassa.

O manejo das plantas em sistemas construídos de áreas alagadas, ou seja, a remoção de plantas em estágio avançado de desenvolvimento é necessária para a manutenção da eficiência de remoção dos nutrientes em condição de equilíbrio (TRIVEDY; GUDEKAR, 1985 apud SALATI, 2000).

### **3.6 Mecanismos de Remoção**

Processos biológicos de degradação de componentes orgânicos podem ocorrer quando estes são transformados por meio de ação de bactérias aeróbias e anaeróbias, dependendo da condição de oxigênio disponível. Normalmente os processos aeróbios de diminuição da Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO) se dão mais rapidamente (BRIX, 1990).

Os sistemas construídos de áreas alagadas são aqueles que incorporam diversos mecanismos de remoção de poluentes. Dentre esses mecanismos alguns são físicos, outros físico-químicos, outros puramente biológicos. Ao utilizar o solo e brita no substrato como meio filtrante, sólidos em suspensão entre outros poluentes são removidos pelos mecanismos físicos da sedimentação, complexação, filtração e adesão com o material utilizado. Neste processo é removida uma significativa quantidade de DBO, nutrientes e patógenos (BRIX, 1993).

O fato de atuar de forma facultativa permite que esses sistemas atuem com microbiota aeróbia e anaeróbia, buscando sempre o equilíbrio de suas comunidades, com a disponibilidade cíclica de oxigênio (períodos secos aumentam a oxigenação do

solo, e períodos de crescimento vegetativo disponibilizam oxigênio através das raízes das plantas).

“O nitrogênio é removido por nitrificação-desnitrificação” (GERSBERG et al., 1983; REDDY et al., 1989 apud COLETTI, 2008). A amônia é oxidada para nitrato por bactérias nitrificantes em zonas aeróbicas, e nitratos são convertidos para gás nitrogênio (N<sub>2</sub>) por bactérias nitrificantes em zonas de anoxia. O oxigênio formado pelo processo de nitrificação é lançado diretamente para a atmosfera por meio da água, sedimentos da superfície ou pelas raízes das plantas; o nitrogênio é incorporado pela biomassa. A remoção do fósforo é uma consequência da adsorção e reações de precipitação com alumínio (Al), ferro (Fe), cálcio (Ca) e minerais no sedimento (RICHARDSON; NICHOLS, 1985). Os períodos alternados de seca e chuva aumentam a fixação do fósforo nos sedimentos (BAYLEY, 1985; SAH; MIKKELSEN, 1986). “Os patógenos são removidos por sedimentação ou filtração e, por irradiação ultravioleta no ecossistema (LANCE; GERBA; MELNICK, 1976; GERSBERG et al., 1987; WATSON et al., 1989).”

### **3.7 Configurações de *Layout***

Um sistema desenvolvido no Brasil por Salati (1987) propõe uma configuração de substrato específica que proporciona uma melhor filtração dos poluentes com fluxo vertical e utilização de macrófitas emergentes. Uma variação foi proposta por Salati Filho et al., (1996), configurando o fluxo vertical em ascendente para atender os efluentes com carga poluidora muito alta. A comparação de eficiência, entre as duas configurações para um mesmo efluente em paralelo, porém, ainda não foi feita, e, portanto apesar de eficientes, não se pode concluir sobre qual dos dois sistemas tem o melhor desempenho.

## 4. MATERIAL E MÉTODOS

As amostras foram analisadas nos laboratórios de Microbiologia e Química do Centro de Estudos Ambientais da Universidade Estadual Paulista – UNESP – Campus de Rio Claro. Os protótipos do experimento foram montados na Estação de Tratamento de Esgoto Sanitário – Piracicamirim, Piracicaba, gerida pelo SEMAE, Prefeitura Municipal de Piracicaba, SP.

### 4.1 ETE Piracicamirim

A Estação de Tratamento de Esgoto (ETE) Piracicamirim está localizada em Piracicaba – SP e é gerida pelo SEMAE (Figura 1).

A ETE está configurada conforme segue:

- Sistema de Gradeamento mecanizado, seguido por caixa de areia.
- 3 Módulos de Reatores Anaeróbios de 2772 m<sup>3</sup> cada.
- Lagoa aerada de 8624 m<sup>3</sup>.
- 3 Módulos de decantadores de 845 m<sup>3</sup> cada.
- Calha Parshall e canal em cascata.



**Figura 1.** Vista aérea da ETE – Piracicamirim, Município de Piracicaba, SP (PASSIG et al., 1999).

## 4.2 Materiais

### 4.2.1 *Macrorganismos*

O arroz foi usado nos protótipos à semelhança do que foi realizado no CWS, no município de Analândia com verba do Fundo Nacional do Meio Ambiente (1990 – 1995).

### 4.2.2 *Material para CWS, em escala piloto*

Reservatórios de água de plástico de 500 L (Figura 2); tubulações de distribuição; registros; tubos e conexões de plástico; brita; solo; vermiculita.



**Figura 2.** Caixas de água utilizadas no sistema.

4.2.3 *Reagentes e Equipamentos, Vidraria usual de laboratório de Química e Microbiologia;*

Reagentes específicos para os ensaios; Autoclave vertical Fabe modelo 103; Homogenizador; Espectrofotômetro DR/2000 HACH; Condutivímetro Digimed CD-2P; Espectrofotômetro de absorção atômica; Reator de DQO; Termômetro digital.

4.2.4 *Efluente da Estação de Tratamento de Efluentes (ETE) -Piracicamirim – Semaes, Piracicaba*

Foram efetuadas amostragens em dois pontos. Sendo localizados:

- 1) Efluente bruto, provindo do reator primário da ETE Piracicamirim;
- 2) Efluente tratado, após passar pelos sistemas CWS.

O abastecimento do sistema com o efluente bruto se deu em fluxo contínuo, com ciclos de recuperação das caixas, em repouso, de 11 dias.

### **4.3 Metodologia**

#### *4.3.1 Fase preliminar*

Realizaram-se alguns ensaios preliminares para definição da vazão, do TDH (Tempo de Detenção Hidráulica), e do tipo de efluente a ser usado o qual é gerado na ETE Piracicamirim, localizada no município de Piracicaba, SP. Alguns parâmetros, físicos, químicos, físico-químicos e biológicos foram determinados para caracterização dos efluentes produzidos por esta ETE.

#### **1ª Etapa – Montagem dos reatores para simulação dos CWSs**

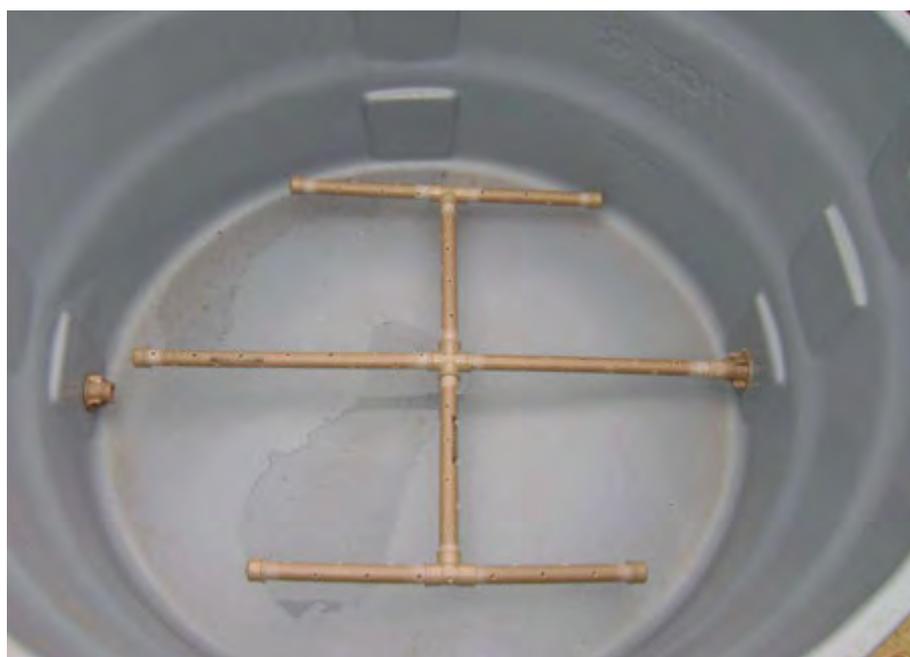
Os protótipos de CWS foram construídos em espaço cedido pelo SEMAE, na ETE Piracicamirim, em Piracicaba – SP (Figura 3). Foram elaborados em caixas plásticas de 500 L usando conexões, mangueiras, registros, plásticos e metálicos, brita, solo e vermiculita (Figura 4). A brita de granulometria média (pedregulho). O solo utilizado foi do tipo latossolo vermelho-amarelo, predominante na área de estudo. O solo foi misturado com vermiculita e bagacilho de cana-de-açúcar, na proporção de 3% e 7% do volume total de solo, respectivamente.

Foram utilizados três réplicas para cada configuração de tratamento, sendo elas, três do tipo descendente (Figura 5) e outras três do tipo ascendente (Figura 6), totalizando seis caixas protótipos para o estudo.

Os protótipos foram abastecidos simultaneamente com o efluente sanitário, com uma taxa constante de vazão de 2,0 m<sup>3</sup>/dia (0,012 L/s), sendo que o desempenho do sistema foi avaliado, quantificando-se os parâmetros microbiológicos, físicos, físico-químicos e químicos. O efluente que resultou do CWS foi controlado para se avaliar o atendimento a legislação vigente através da Resolução CONAMA 357 (BRASIL, 2005).



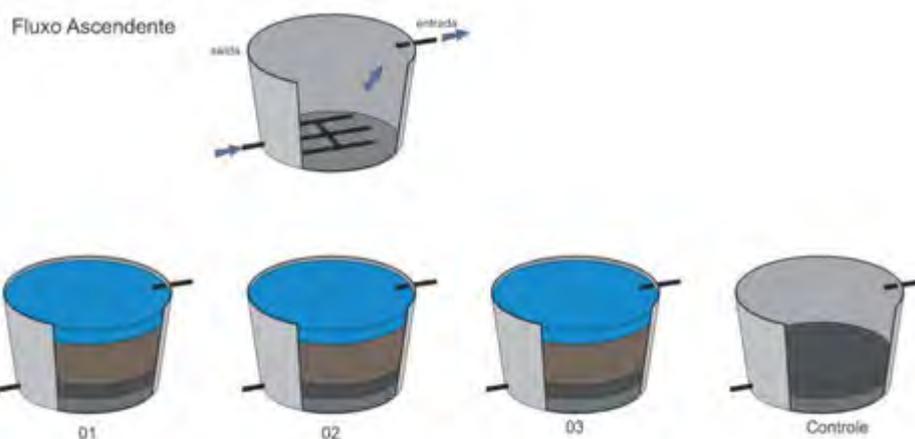
**Figura 3.** Visão geral do sistema montado.



**Figura 4.** Dutos de drenagem do fundo da caixa.



**Figura 5.** Layout das caixas na configuração descendente (SALATI FILHO E., Comunicação Pessoal).



**Figura 6.** Layout das caixas na configuração ascendente (SALATI FILHO E., Comunicação Pessoal).

## 2ª Etapa – Cultivo do arroz para cobertura dos reatores

O arroz foi cultivado no próprio sistema de CWS, com água potável. Os experimentos foram realizados com arroz, devido a sua robustez associada ao seu grande crescimento vegetativo.

### 4.3.2 Tratamento

A princípio, o efluente bruto foi tratado através de 06 (seis) reservatórios a uma vazão de 2,0 m<sup>3</sup>/dia, divididos e montados da seguinte maneira:

- 1) 03 (três) caixas contendo arroz + agregado + solo na configuração ascendente;
- 2) 03 (três) caixas contendo arroz + agregado + solo na configuração descendente.

#### 4.3.3 Análise dos efluentes

As metodologias utilizadas nas análises das variáveis físicas, químicas, físico-químicas e biológicas do efluente estão apresentadas na Tabela 1. Coliformes totais e *Escherichia coli* (*E. coli*) foram determinados com os kits Colilert (IDEXX Laboratories Inc. Westbrook, ME).

As coletas foram realizadas na saída de cada protótipo, após passar pelo sistema de tratamento e no tanque usado para acúmulo e distribuição do efluente de esgoto sanitário. Elas foram realizadas sempre no mesmo horário, e para armazenamento das amostras foram usadas garrafas de polietileno de 1 L, guardadas em caixas térmicas para posterior análise laboratoriais.

**Tabela 1.** Metodologia, equipamentos e referências utilizados para as análises dos parâmetros físicos, químicos e biológicos das amostras das águas.

| Variáveis  | Métodos                                     | Referências e equipamentos |
|--|---|----------------------------|
| Temperatura da água                                | Método automatizado - leitura direta        | Termistor – Horiba         |
| pH   | Método automatizado - leitura direta        | Potenciométrica – Horiba   |
| Oxigênio dissolvido                                | Método automatizado - leitura direta        | Oxímetro – Horiba          |
| Condutividade                                      | Método automatizado - leitura direta        | Condutivímetro – Horiba    |
| Sólidos totais dissolvidos                         | Método automatizado - leitura direta        | Horiba                     |
| Nitrito e Nitrato                                  | Espectrofotométrica Colorimétrica           | MACKERETH et al. (1978)    |
| Amônia   | Espectrofotométrica colorimétrica           | KOROLEF (1976)             |
| Nitrogênio total                                   | Espectrofotométrica-colorimétrica           | GOLTERMAN et al. (1978)    |
| Fósforo total                                      | Espectrofotométrica-colorimétrica           | APHA (1998)                |
| DQO  | Espectrofotométrica colorimétrica/Dicromato | APHA (1998)                |
| Sulfeto e Sulfato                                  | Espectrofotométrica-atômica                 | absorção<br>APHA (1998)    |
| Demanda bioquímica de oxigênio (DBO <sub>5</sub> ) | Incubação/Winkler                           | APHA (1998)                |

#### 4.3.4 *Análise dos Resultados*

Após a quantificação dos parâmetros microbiológicos, físicos, químicos das amostras dos efluentes, os dados foram arquivados em um banco de dados na planilha do programa de computador Excel para posterior análise.

## **5. RESULTADOS E DISCUSSÃO**

### **5.1 Mecanismos de Remoção na Configuração Ascendente e Descendente**

Na configuração descendente, os mecanismos aeróbios e oxidantes devem ocorrer com maior eficiência. A interface direta de troca gasosa da coluna de água com a atmosfera permite uma melhor oxigenação do que o solo saturado. Na configuração ascendente, os mecanismos anaeróbios e de filtração devem prevalecer além do desempenho hidráulico ser favorecido pelo gradiente favorável de granulometria do meio suporte, e, a maior pressão do fluxo de entrada.

### **5.2 Protótipo**

Com o período de um mês após o início da passagem de água limpa percebeu-se a estabilidade no desenvolvimento das plantas, atingindo, estas, aproximadamente 15 cm de altura. Deu-se início então na passagem de esgoto sanitário proveniente da saída da ETE Piracicamirim.

Na primeira coleta alguns problemas operacionais já foram prontamente evidenciados. Houve dificuldade em se manter a vazão anteriormente regulada, inclusive criando com isso problemas em se manter a coluna de água estável no reservatório de distribuição. A influência das condições climáticas, frente à pequena vazão, mostrou a dificuldade em se equilibrar sistemas em escala piloto ao ar livre.

O maior problema creditou-se ao grande aporte de sólidos suspensos nos registros e tubulações, criando com isso uma barreira física, desregulando a vazão e causando o transbordamento da caixa de distribuição. Tal transbordo gerou a necessidade de se fechar o sistema, perdendo com isso a confiabilidade da análise de suas eficiências.

Watson e Hobson (1989) alertaram para o não uso de válvulas regulatórias para a vazão, pois estas exigiriam a necessidade diária de regulação de seus registros, propondo por tanto o uso de vertedouros. O controle diário se tornou impraticável.

Outro problema verificado foi a presença costumeira de animais herbívoros (capivaras), dentro das dependências da ETE–Piracicamirim. Estes consumiram quase que a totalidade do arroz plantado, além de compactarem o substrato das caixas ao caminharem sobre elas. Tal compactação contribuiu para a diminuição da drenagem das caixas, sobretudo das caixas de fluxo descendentes, que funcionavam com menor pressão de coluna de água.

O consumo das plantas pelas capivaras evidenciou outra condicionante; a macrófita é contribuinte essencial no tratamento do efluente por CWS, estando sua ausência associada à baixa eficiência do tratamento. Além de não promover a oxigenação e estruturação da drenagem do solo, através de seu sistema radicular de raízes, não absorve os nutrientes produzidos pela decomposição do efluente.

Depois de regulada novamente a vazão e esperado os períodos de maturação, obteve-se três coletas sucessivas para análise dos parâmetros previstos, em laboratório. Alguns parâmetros apresentaram eficiência, porém outros, pouca mudança pode ser observada. Tal ineficiência foi associada às dificuldades operacionais do sistema e contribuição negativa da ausência de macrófitas.

Devido aos problemas enfrentados com os protótipos e com isso a não confiabilidade dos resultados, decidiu-se então descartar os resultados obtidos, como evidência científica, e usá-los apenas como constatação empírica de uma tendência do sistema.

### **5.3 Discussão da Revisão Bibliográfica**

Constatando os vários incidentes durante a montagem, a manutenção e o monitoramento do sistema construído de área alagada deste trabalho, e com isso, analisando a viabilidade de novos começos, quanto ao tempo disponível para a conclusão deste presente estudo: tornou-se necessário um novo redirecionamento para atender aos objetivos propostos.

Outros sistemas operando com configurações semelhantes às usadas neste estudo foram evidenciados. Porém em nenhum estudo pode-se observar uma comparação direta das duas configurações em paralelo, com o mesmo efluente, para se concluir, com maior confiabilidade, a maior eficiência para cada determinado parâmetro.

Conforme dito anteriormente, o modelo de fluxo vertical ascendente foi proposto por SALATI (2000) para o tratamento de altas cargas poluentes. Além do trabalho apresentado por esse autor nenhum outro estudo equivalente foi evidenciado.

Watson e Danzig (1993) já trataram de comparar modelos com fluxo horizontal com de fluxo vertical descendente. Quanto à resposta das configurações de fluxo vertical foi constatada uma maior eficiência nos processos nitrificantes, em relação ao fluxo horizontal. Ficou evidente, porém, as dificuldades hidráulicas em se manter uma vazão consistente e confiável, com ótima distribuição do fluxo hídrico do efluente.

Diversos fatores, como o crescimento microbiano, a variação de pressão na distribuição e o entupimento dos poros do substrato, foram determinantes para os problemas hidráulicos enfrentados no sistema. Embora no começo do estudo a capacidade de tratamento tenha ocorrido otimamente, a partir de duas semanas de funcionamento a eficiência do sistema caiu consideravelmente. A diminuição foi creditada aos problemas hidráulicos.

Sousa et al. (2004) concluíram que o sucesso dos sistemas construídos de áreas alagadas, usados no pós-tratamento de efluente de um reator UASB, perdia eficiência à medida que o aumentava o tempo de operação. Os problemas hidráulicos e de manejo e operação dos sistemas foram os principais causadores de baixo aproveitamento, e determinantes para as falhas na planta piloto deste estudo.

Estudo de Salati (2000) com configurações semelhantes, por sistema de Despoluição Hídrica por Solos – DHS, ascendente e descendente em sequência apresentou eficiência considerável. De acordo com esse estudo, o sistema de solos filtrantes de fluxo ascendente apresentou resultados satisfatórios para a maioria dos parâmetros analisados, principalmente coliformes totais e *E. coli*, obtendo eficiências e 73,64 e 83,41%, respectivamente. Parâmetros como nitrogênio total e amônia tiveram eficiências negativas (-2,40 e -12,52%, respectivamente).

O sistema construído de áreas alagadas de fluxo descendente também apresentou resultados satisfatórios para a maioria dos parâmetros analisados, porém menores do que o anterior (fluxo ascendente). Destaque novamente para *E. coli* e coliformes totais (83,9 e 89,22%, respectivamente), e para eficiência positiva na remoção de nitrogênio total e amônia (6,17 e 10,77%, respectivamente). Há de se observar, porém que a concentração de  $DBO_5$  aumentou de 20,9 mg/L na entrada para 25,13 mg/L na saída, um aumento de 20,23%. Outra concentração que apresentou aumento nos dados de entrada e de saída foi a de C – Orgânico, que passou de 3,56 mg/L para 4,22 mg/L, aumento de 18,53%.

Essas constatações de Salati (2000) mostraram que os sistemas combinados, com diferentes configurações em sequência, apresentam-se como complementares uns aos outros. Com isto abre-se campo para aperfeiçoamento da engenharia do tratamento, de uma forma mais completa, quando assim elaborados.

Os sistemas construídos de áreas alagadas para tratamento de esgoto como método alternativo é uma tecnologia com muito campo ainda a ser estudado. Trata-se de um sistema em que muitos fatores determinantes em seus processos são desconhecidos, e,

sobretudo a interação entre eles. A necessidade de se obter resultados consistentes que permitam a previsibilidade do sistema mostra que ainda é desejável estudos no campo da operacionalização do sistema para uso na engenharia e a melhor quantificação de suas potencialidades.

Os sistemas no campo da ciência apresentaram resultados satisfatórios, porém a necessidade de previsibilidade de uma estação de tratamento para implantação em comunidades demonstra que tal tecnologia ainda precisa de muitas definições de engenharia, quanto aos dimensionamentos e respostas dos efluentes a serem tratados.

Os problemas hidráulicos identificados mostraram uma necessidade de adequação e domínio das variáveis de projeto, anterior à análise de eficiência das diferentes configurações. A vulnerabilidade do sistema, susceptível às condições do acaso, permite que não se possa ter confiabilidade nos resultados.

Outro fator importante que merece ser evidenciado é a preocupação com a influência de animais invasores ao sistema. Exige-se, para um bom funcionamento, um controle rigoroso, a critério preventivo, para que esta influência não seja danosa ao manejo do projeto.

Em contrapartida, ao avaliar a literatura pode-se inferir a potencialidade do sistema, que uma vez com os mecanismos dominados, abrirá caminho para seu uso seguro e atrativo, do ponto de vista da engenharia, e do saneamento para comunidades.

## 6. CONCLUSÕES

Com o levantamento bibliográfico dos mecanismos presentes no sistema de tratamento de efluente sanitário por CWS, nas configurações de fluxo vertical ascendente e fluxo vertical descendente, concluiu-se que o sistema proposto apresenta mecanismos similares aos sistemas de tratamento de esgoto convencional. Além disso, simula condições de equilíbrio ecológico de áreas alagadas naturais.

Através da bibliografia consultada pôde-se constatar a eficiência de tratamento de efluentes com alta carga orgânica através de áreas alagadas construídas.

Encontraram-se sistemas com configurações similares ao proposto, porém estudados com algumas variações.

Este sistema similar, utilizando CWS em fluxo vertical, ascendente e descendente sequencialmente, apresentou eficiência satisfatória. Concluiu-se que a eficiência do sistema, quando bem operado, é positiva.

Foi possível concluir, também através da bibliografia, que os mecanismos atuantes em áreas alagadas construídas são principalmente físicos, físico-químicos e biológicos.

Já o projeto prático para esse estudo, em escala piloto, não obteve o sucesso esperado, esbarrando em problemas operacionais. Conclui-se que a necessidade de um maior controle de projeto e de operacionalização é necessária.

Com isso não foi possível concluir sobre o aspecto comparativo de eficiência no tratamento de esgoto, por áreas alagadas construídas, em configurações de fluxo vertical ascendente e descendente, sob as mesmas condições.

Embora o sistema tenha enfrentado problemas operacionais que comprometeram sua eficiência, não se podem descartar as áreas alagadas construídas como método alternativo para tratamento de esgoto sanitário.

Conclui-se que há necessidade de aperfeiçoamento do projeto e da operação do sistema, sobretudo em escala piloto, para com isso, contribuir com o enriquecimento teórico e prático desta tecnologia.

## **7. RECOMENDAÇÕES**

A partir dos trabalhos realizados, desde a concepção deste projeto, na elaboração das idéias, até a operação dos protótipos, diversas possibilidades e campos de estudos surgiram no intuito de contribuir para esta tecnologia. As dificuldades identificadas ao término deste estudo, porém abrem a oportunidade, e necessidade, de um melhor entendimento dos mecanismos hidráulicos de funcionamento deste sistema.

São recomendados estudos hidráulicos, com diferentes configurações de substrato, vazões e macrófitas, para melhor aperfeiçoar a drenagem e confiabilidade no sistema. Estudos direcionados a analisar a perda de carga no sistema, e os mecanismos hidráulicos envolvidos, serão de grande contribuição para os projetos de trabalhos futuros.

## 8. REFERÊNCIAS

APHA-AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION. *Standard methods for the examination of water and wastewater*. 20 ed. Washington: American Public Health Association, AWWA, WPCF, 1998. 1569p.

ARMSTRONG, W., ARMSTRONG, J., BECKETT, P.M.; JUSTIN, S.H.F.W. Convective gas-flows in wetland plant aeration. In: *Plant Life Under Oxygen Deprivation*. M.B. JACKSON, D.D. DAVIES, and J. LAMBERS, (Eds). SPB Academic Publishing bv, The Hague, The Netherlands, 1991. 283p.

BAYLEY, S.E. The effect of natural hydroperiod fluctuations on freshwater wetlands receiving added nutrients, in *Ecological Considerations in Wetlands Treatment of Municipal Wastewaters*. GODFREY, P.J.; KAYNOR, E.R.; PELCZARSKI, S. and BENFORADO, J. (Eds.) Van Nostrand Reinhold, New York, 1985. 180p.

BITAR, A.L. **Utilização de protótipos para simulação de sistema construído de áreas alagadas (constructed wetland) para tratamento de efluentes de pesque-pague**. 2006. 125f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Ciências Biológicas) – Instituto de Biociências, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 2006.

BRASIL Ministério do Meio Ambiente - Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA – Resoluções CONAMA nº 357. 5 ed. Brasília, DF.SEMA, 2005. 23p.

BRIX, H. Gas exchange through the soil-atmosphere interphase and through dead culms of *phragmites australis* in a constructed reed bed receiving domestic sewage, *Water Resource*, 1990. 259p.

BRIX, H. Wastewater Treatment in Constructed Wetlands: System Design, Removal Processes, and Treatment Performance. Chapter 2, IN *Constructed Wetlands for Water Quality Improvement*. MOSHIRI, G.A. (Ed). Boca Raton: Lewis Publishers, 1993. 632p.

BRIX, H. Function of macrophytes in constructed wetlands. *Water Science and Technology*, 1994. 78p. BRIX, H.; SCHIERUP, H. H. Soil oxygenation in constructed reed beds: the role of

macrophyte and soil-atmosphere interface oxygen transport. In: *Constructed Wetlands in Water Pollution Control*. P. F. Cooper and B. C. Findlater, (Eds). *Advances in Water Pollution Control*, Pergamon Press, Oxford, 1990. 53p.

BORGES, A.K.P. **Despoluição de águas superficiais e efluentes de piscicultura através de sistemas construídos de áreas alagadas (Constructed Wetland)**. 2005. 140f. Tese (Doutorado em Microbiologia Aplicada). Instituto de Biociências, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 2005.

CHAGAS, T.W.G. **Sistemas construídos de áreas alagadas: levantamento bibliográfico sobre legislação e padrões de qualidade da água**. 2008. 102f. Monografia (Especialista em Sustentabilidade Ambiental), Centro de Estudos Ambientais, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 2008.

COLLETTI, M.P.B. **Sistemas construídos de áreas alagadas: levantamento bibliográfico sobre eficiência de redução das variáveis químicas e físicas da água**. 2008. 76f. Monografia (Especialista em Sustentabilidade Ambiental), Centro de Estudos Ambientais, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 2008.

COMPANHIA DE TECNOLOGIA E SANEAMENTO AMBIENTAL – CETESB. *Qualidade das Águas Interiores do Estado de São Paulo*. São Paulo, 1998. 267p.

CUNHA, C.A.G. **Análise da eficiência de um sistema combinado de alagados construídos na melhoria da qualidade das águas**. 2006. 174f. Dissertação (Mestrado em Ciências da Engenharia Ambiental) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2006.

GERSBERG, R.M.; ELKINS, B.V.; GOLDMAN, C.R. Nitrogen removal in artificial wetlands, *Water Resource*, 1983; 1009p.

GERSBERG, R.M.; LYON, S.R.; BRENNER, R.; ELKINS, B.V. Fate of viruses in artificial wetlands, *Applied Environment Microbiology*, 1987. 731p.

GOLTERMAN, H.L.; CLYMO, R.S.; OHNSTAND, M.A. *Methods for physical and chemical analysis of fresh waters*. Oxford: Blackwell Scientific Publications, 1978. 213p.

HAMMER, D.A. *Constructed wetlands for wastewater treatment: municipal, industrial and agricultural*. Chelsea: Lewis, 1989. 350p.

HAMMER, D.A.; BASTIAN, R.K. *Wetlands Ecosystems: Natural Water Purifiers?* Michigan: Lewis Publishers, INC. Cap. 2, p. 5-19, 1989 IN HAMMER, D.A. *Constructed wetlands for wastewater treatment: municipal, industrial and agricultural*. Chelsea: Lewis, 1989. 350p.

HILL, D.E.; SAWHNEY, B. L. Removal of phosphorus from wastewater by soil under aerobic and anaerobic conditions, *J. Environmental Quality*, 1981. 401p.

IBGE, Diretoria de Pesquisas, Coordenação de População e Indicadores Sociais, *Pesquisa Nacional de Saneamento Básico*, 2008.

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

KOROLEF, F. Determination of nutrients. In: GRASSHOFF, K. (Ed). *Methods of seawater analysis*. Verlag: Chemie Weinheim, 1976. 181p.

LANCE, J.C.; GERBA, C.P.; MELNICK, J.L. Virus movement in soil columns flooded with secondary sewage effluent, *Applied Environment Microbiology*, 1976. 520p.

LAUTENSCHLAGER, S. R. **Modelagem do desempenho de wetlands construídas**. 2001. 90f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2001.

LEPARGNEUR, H. A água: qualidade de vida. O desafio do século. O mundo da Saúde. São Paulo, v.28, n.4, 2004. 372p.

MACKERETH, F.J.H.; HERON, J.; TALLING, J.F. *Water analysis: some revised methods for limnologists*. London: Freshwater Biological Association, Scientific Publication, n. 36, 1978. 121p.

NOGUEIRA, S.F. **Balanco de nutrientes e avaliação de parâmetros biogeoquímicos em áreas alagadas construídas para o tratamento de esgoto.** 2003. 120f. Dissertação (Mestrado em Ciências – área de concentração: Energia Nuclear na Agricultura), Centro de Energia Nuclear na Agricultura, CENA/USP, Piracicaba, 2003.

PASSIG, F. H.; VILLELA, L.C.H.; FERREIRA, O.P. ETE – Piracicamirim – Nova concepção de sistema de tratamento de esgotos sanitários – Partida, Operação e Monitoramento de Desempenho. Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, Rio de Janeiro, 1999. 574p.

REBOUÇAS, A.C; BRAGA, B.; TUNDISI, J.G. Águas doces no Brasil: capital ecológico, uso e conservação. São Paulo: Escrituras, 2006. 36p.

RICHARDSON, C.J.; NICHOLS, D.S. Ecological analysis of wastewater management criteria in wetland ecosystems, in Ecological Considerations in Wetlands Treatment of Municipal Wastewaters. GODFREY, P.J.; KAYNOR, E.R.; PELCZARSKI, S. and BENFORADO, J. (Eds.) Van Nostrand Reinhold, New York, 1985. 351p.

SAH, R.N.; MIKKELSEN, D.S. Transformations of inorganic phosphorus during flooding and draining cycles of soil, Soil Science Am. Journal, 1986. 62p.

SALATI, E. Edaphic-Phytodepuration: A new approach to wastewater treatment. In: Aquatic Plants for Water Treatment and Resource Recovery. (Eds) K.R. REDDY and W.H. SMITH. Magnolia Publishing Inc. Orlando, Florida, 1987.

SALATI, E. Utilização de Sistemas de *Wetlands* Construídas para Tratamento de Águas. Relatório técnico para Programa de Pós Graduação em Ciências da Engenharia Ambiental da EESC. São Carlos, 2000. 36p.

SALATI FILHO, E. Avaliação da Eficiência do Sistema de Wetlands Construídos na Estação Piloto de Tratamento Terciário de Esgoto Doméstico no município de Porangaba – SP, 2000. 23p.

SALATI FILHO. E.; MANFRINATO, E. S.; SALATI, E. Secondary and Terciary Treatment of Urban Sewage Utilizing the HDS System With Upflow Transport. In: International Conference on Wetland Systems for Water Pollution Control, 5. Viena, Austria. Proceeding. Viena, Austria, IAWO, 1996. p. VI/3-1-VI/3-6.

SAKADEVAN, K.; BAVOR, H.J. Nutrient removal mechanisms in constructed wetlands and sustainable water management. *Water Science and Technology*, Richmond, 1999. 128p.

SCHIERUP, H.-H., BRIX, H.; LORENZEN, B. Wastewater treatment in constructed reed beds in Denmark - State of the art. In: *Constructed Wetlands in Water Pollution Control*, P. F. Cooper and B. C. Findlater, (Eds). *Advances in Water Pollution Control*, Pergamon Press, Oxford, 1990. 495p.

SHUTES, R.B.E. Artificial wetlands and water quality improvement. *Environment International*, London, n.26, 2001. 447p.

SOUSA, J.T.; VAN HAANDEL, A.C.; COSENTINO, P.R.S.; GUIMARÃES, A.V.V. Pós-tratamento de Efluente de Reator UASB Utilizando Sistemas “Wetlands” Construídos. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. 2000. 91p.

THOMAS, P.R.; GLOVER, P.; KALAROOPAN, T. An evaluation of pollutant removal from secondary treated sewage effluent using a constructed “wetland” system. *Water Science Technology*, London, 1995. 93p.

VON SPERLING, M. Princípios do tratamento biológico de águas residuárias. v.1 Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos. 3.ed., DESA-UFMG, Minas Gerais, 2005. 127p.

WATSON, J.T.; DANZIG, A.J. Pilot-Scale Nitrification Studies Using Vertical-Flow and Shallow Horizontal-Flow Constructed Wetland Cells, Chapter 31 in *Constructed Wetlands for Water Quality Improvement*. MOSHIRI, G.A. (Ed.). Lewis Publishers, Boca Raton, FL, 1993. 301p.

WATSON, J.T.; HOBSON, J.A. Hydraulic Design Considerations and Control Structures for Constructed Wetlands for Wastewater Treatment, Chapter 30 in *Constructed wetlands for Wastewater Treatment, Municipal, Industrial and Agricultural*. HAMMER, D.A. (ed.) Lewis Publishers, Chelsea, MI, 1989. 379p.

WATSON, J.T.; REED, S.C.; KADLEC, R.H.; KNIGHT, R.L.; WHITEHOUSE, A.E. Performance expectations and loading rates for constructed wetlands, in Constructed wetlands for Wastewater Treatment, Municipal, Industrial and Agricultural. HAMMER, D.A. Ed. Lewis Publishers, Chelsea, MI, 1989. 319p.

WOOD, R.B.; McATAMNEY, C.F. Constructed wetlands for wastewater treatment: the use of laterite in the bed medium in phosphorus and heavy metal removal. *Hidrobiologia*, 1996. 331p.

Rio Claro, 03 de Dezembro de 2010

---

**Daniel de Freitas Poli**

**Interessado**



---

**Profa. Dra. Sâmia Maria Tauk Tornisielo**

**Orientadora**

---