

Universidade Federal de
Santa Catarina

Programa de Pós-
Graduação em
Engenharia Ambiental

www.pos.ufsc.br/poscal

Campus Universitário
Itacorubi

Florianópolis- SC

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-
Graduação em Engenharia Ambiental,
Departamento de Engenharia Sanitária e
Ambiental, do Centro Tecnológico da
Universidade Federal de Santa Catarina, como
requisito para obtenção do Título de Mestre
Profissional em Engenharia Ambiental

Orientador: Pablo Heleno Sezerino, Dr.

Florianópolis, 2016

Potencialidades dos *Wetlands* Construídos Empregados no Pós-tratamento de Esgotos: Experiências
Brasileiras
Rodrigo Fidelis de Souza Lima

Potencialidades dos *Wetlands*
Construídos Empregados no Pós-
tratamento de Esgotos:
Experiências Brasileiras

Rodrigo Fidelis de Souza Lima

Esta dissertação
consiste no Estado
da Arte da
tecnologia de
Wetlands
Construídos
aplicados no pós-
tratamento de
esgoto doméstico no
Brasil

Orientador:

Pablo Heleno
Sezerino, Dr.



Rodrigo Fidelis de Souza Lima

POTENCIALIDADES DOS *WETLANDS* CONSTRUÍDOS EMPREGADOS
NO PÓS-TRATAMENTO DE ESGOTOS: EXPERIÊNCIAS BRASILEIRAS

Dissertação submetida ao Programa de
Mestrado Profissional em Engenharia
Ambiental da Universidade Federal de Santa
Catarina para a obtenção do Grau de Mestre
em Engenharia Ambiental
Orientador: Prof. Dr. Pablo Heleno Sezerino

FLORIANÓPOLIS
2016

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Lima, Rodrigo Fidelis de Souza
POTENCIALIDADES DOS WETLANDS CONSTRUÍDOS EMPREGADOS NO
PÓS-TRATAMENTO DE ESGOTOS: EXPERIÊNCIAS BRASILEIRAS /
Rodrigo Fidelis de Souza Lima ; orientador, Pablo Heleno
Sezerino - Florianópolis, SC, 2016.
81 p.

Dissertação (mestrado profissional) - Universidade
Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico. Programa de
Pós-Graduação em Engenharia Ambiental.

Inclui referências

1. Engenharia Ambiental. 2. Águas Residuárias. 3.
Tratamento de Esgoto Sanitário. 4. Pós-Tratamento. 5.
Wetlands Construídos. I. Sezerino, Pablo Heleno. II.
Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós
Graduação em Engenharia Ambiental. III. Título.



“Potencialidades dos Wetlands Construídos Empregados no Pós-Tratamento de Esgotos: Experiências Brasileiras”

RODRIGO FIDELIS DE SOUZA LIMA

Dissertação submetida ao corpo docente do Curso de Mestrado Profissional em Engenharia Ambiental da Universidade Federal de Santa Catarina como parte dos requisitos necessários para obtenção do grau de

MESTRE PROFISSIONAL EM ENGENHARIA AMBIENTAL

na Área de Gestão Ambiental na Indústria.

Aprovado por:


Prof. Pablo Heleno Sezerino, Dr.
(Orientador)



Profª. Maria Eliza Nagel Hassemer, Drª.



Prof. Rodrigo de Almeida Mohedano, Dr.



Profª. Cláudia Lavina Martins, Drª.

Prof. Mauricio Luiz Sens, Dr.
(Coordenador)

FLORIANÓPOLIS, SC – BRASIL
JULHO/2016

Este trabalho é dedicado a Ângela, Gabi e aos meus queridos pais.

AGRADECIMENTOS

A Anginha, companheira de todos os dias e incentivadora incondicional; a Gabi linda e compreensiva dos momentos ausentes; a minha família e pais pelo apoio; ao professor Pablo Sezerino pela orientação; aos amigos da ESSE Engenharia e do Mestrado; ao membros da banca, professores Rodrigo Mohedano, Maria Elisa Hassemer e Cláudia Lavina Martins; a Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC, ao Instituto de Competências Empresariais; a FIAT Group.

RESUMO

Este trabalho tem como objetivo geral apresentar um estado da arte da tecnologia de *wetlands* construídos aplicados no pós-tratamento de esgoto doméstico no Brasil, identificando as diversas modalidades de sistemas alagados, os principais parâmetros de projetos aplicados e as eficiências obtidas pelos sistemas. Para isso, foi desenvolvida uma pesquisa bibliográfica exploratória a partir de publicações realizadas no Brasil, a partir do ano de 2000, e que apresentassem desempenho de tratamento que atendessem aos requisitos legais e ambientais. Com isto, a partir de um universo de 82 publicações pesquisadas, foram avaliadas 23 publicações e 29 unidades de *wetlands* construídos. De modo geral, as diversas modalidades de *wetlands* construídos demonstram eficiências de remoção significativamente para os constituintes dos esgotos sanitários, destacando a remoção de matéria orgânica e sólidos suspensos (48% das unidades avaliadas apresentaram remoções maiores que 80% para DQO, DBO e SS). Uma grande quantidade de espécies de macrófitas tem sido empregada nos sistemas de tratamento, destacando-se o emprego de *Typha* spp (34% dos trabalhos avaliados). Da mesma forma, diversos tipos de materiais são utilizados e testados para compor o maciço filtrante, destacando-se a brita e areia (28% dos trabalhos avaliados). As publicações exibidas e avaliadas apresentam, para os parâmetros de qualidade da água, reduções entre as concentrações afluentes e efluentes significativas, sendo equivalentes aos resultados esperados pelos autores e inseridos nas premissas de atendimento às legislações vigentes.

Palavras Chaves: Águas residuárias; Tratamento de esgoto sanitário. Pós-tratamento. *Wetlands* Construídos. Macrófitas

ABSTRACT

This work has as main objective to present the state of the art of wetlands technology built in post treatments of sewage in Brazil, identifying the different types of wetlands, the main applied parameters of projects and obtained efficiencies by the systems. To get this objective, a bibliographical research was made in brazilian publications developed from the year 2000, publications able to provide treatment performance that met the legal and environmental requirements. With this, from a universe of 82 selected publications, were evaluated 23 publications and 29 constructed wetland units. In general, the different types of constructed wetlands show removal efficiencies significantly to the constituents of sewage, highlighting the removal of suspended organic and solid matter (48% of the evaluated units had higher removals than 80% for COD, BOD and SS). A lot of macrophytes has been used in treatment systems, especially the use of *Typha* spp (34% of the assessed publications). Likewise, different types of materials are used and tested to compose the filter bed, highlighting the sand and gravel (28% of assessed publications). The consulted and evaluated publications feature for the water quality parameters, reductions between the affluent and significant concentrations of effluent, being equivalent to the results expected by the authors and entered the premises of compliance with current legislation.

Key Words: Wastewater. Treatment of domestic sewage . After treatment. Constructed wetlands. Macrophytes.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	15
2	OBJETIVOS.....	17
2.1	OBJETIVO GERAL.....	17
2.1	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	17
3	REVISÃO DA LITERATURA.....	19
3.1	PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS DOS ESGOTOS DOMÉSTICOS E SUAS RELAÇÕES COM A DEGRADAÇÃO DAS ÁGUAS SUPERFICIAIS.....	19
3.1.1	Sólidos Totais.....	19
3.1.2	Matéria Orgânica.....	21
3.1.3	Nitrogênio e Fósforo.....	21
3.1.4	Organismos Patogênicos.....	21
3.2	CONDIÇÕES E PADRÕES DE LANÇAMENTO DE EFLUENTES NO BRASIL.....	24
3.3	PROCESSOS E SISTEMAS DE TRATAMENTO DE ESGOTOS.....	27
3.4	<i>WETLANDS</i>	27
3.4.1	Os Sistemas Naturais.....	27
3.4.2	Os Sistemas Construídos.....	28
3.4.3	Tipos de <i>Wetlands</i> Construídos.....	31
3.4.3.1	<i>Wetland de fluxo superficial (WFS)</i>	31
3.4.3.2	<i>Wetland de fluxo subsuperficial</i>	32
3.4.4	Principais Elementos de <i>Wetlands</i> Construídos.....	34
3.4.4.1	<i>Macrófitas</i>	34
3.4.4.2	<i>Meio suporte</i>	36
3.4.4.3	<i>Microorganismos</i>	37
3.4.5	Processos de Tratamento de Águas Residuárias em <i>Wetlands</i> Construídos.....	37
3.4.5.1	<i>Depuração da Matéria Carbonácea</i>	38
3.4.5.2	<i>Retenção de Sólidos</i>	39
3.4.5.3	<i>Remoção de Nitrogênio (N) e Fósforo (P)</i>	39
4	METODOLOGIA.....	43
4.1	REVISÃO DA LITERATURA.....	44
4.2	IDENTIFICAÇÃO E SELEÇÃO DAS PUBLICAÇÕES RECENTES SOBRE <i>WETLANDS</i> CONSTRuíDOS NO BRASIL.....	44
4.3	ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	47
5	RESULTADOS.....	49
5.1	IDENTIFICAÇÃO DOS ARTIGOS.....	49
5.2	PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS DAS UNIDADES DO SISTEMA DE TRATAMENTO.....	50

5.3	DESEMPENHO DOS SISTEMAS DE TRATAMENTO DE ESGOTO POR <i>WETLANDS</i>	53
6	CONCLUSÃO	73
7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	75

1 INTRODUÇÃO

A demanda de água indispensável para o desenvolvimento das atividades humanas, tanto no processo de produção quanto no abastecimento público, vem aumentando significativamente ano após ano no Brasil. Não obstante, a qualidade de água para satisfazer esses diversos tipos de finalidades são cada vez mais escassas. Uma solução para a preservação dessas águas é o investimento em saneamento, principalmente quanto ao tratamento do esgoto sanitário.

Outrora os investimentos em saneamento básico no Brasil ocorreram pontualmente. Visão esta um pouco modificada a partir da década de 1980, quando foi atribuído que avanços nas áreas de abastecimento de água e de esgotamento sanitário resultariam no aumento da qualidade de vida e na diminuição das taxas de mortalidade. (SOARES, et al., 2002). Nesse período foi consolidado o Plano Nacional de Saneamento (PLANASA), que contribuiu para o incremento dos índices de atendimento por sistemas de abastecimento de água.

Mesmo assim, o país manteve baixos índices de cobertura e atendimento de coleta de tratamento de esgoto. Situação essa agravada pelo intenso crescimento populacional nos centros urbanos. Contribuindo para que a qualidade dos corpos hídricos fosse imensuravelmente afetada, inclusive extrapolando os territórios urbanos.

Por conseguinte, urge a necessidade de adoção de práticas que permitam a conciliação dos modos de produção às premissas da qualidade ambiental. É neste sentido, que o tratamento de águas residuárias passa a ser de fundamental importância para a conservação e melhoria da qualidade ambiental.

Cientes desta questão entidades públicas e/ou privadas vêm aumentando substancialmente os investimentos no saneamento. Também, nos últimos anos, alguns diplomas legais, em destaque para a Lei 11.445/2007 (BRASIL, 2007), que estabelece as diretrizes nacionais para o saneamento básico; e a Lei 9.433/1997 (BRASIL, 2007), referente à Política Nacional de Recursos Hídricos (PNRH) dentre outras, tentam garantir a sustentabilidade dos investimentos em saneamento.

Por este motivo, visando melhorar as condições sanitárias do Brasil, a partir de técnicas alternativas de pós-tratamento, os *wetlands* construídos se apresentam como uma alternativa a ser considerada. Estes sistemas são tecnologicamente avançados, de custo de construção

baixo e de fácil manutenção, comparativamente àqueles com alta energia induzida como os sistemas lodos ativada.

Apesar da evolução no Brasil da técnica de *wetlands* construídos, alguns conhecimentos ainda encontram-se incipientes e fragmentados. É neste sentido que esta pesquisa visa a compilação de resultados de unidades de *wetlands* construídos implantados e avaliados no Brasil, sendo então apresentadas as diversas modalidades, os principais parâmetros de projeto aplicados e as eficiências obtidas pelos sistemas.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Apresentar o estado da arte da tecnologia de *wetland* construído empregado no tratamento de esgotos sanitários, com foco nas experiências brasileiras, identificando os principais parâmetros de projeto e as respectivas eficiências.

2.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Os objetivos específicos desta pesquisa são:

1. Apresentar, a partir de referencial teórico os principais conceitos sobre tratamento de esgotos e *wetlands* construídos;
2. Selecionar e identificar as publicações relevantes sobre o tema;
3. Apresentar as principais características técnicas das unidades selecionadas,
4. Apresentar e avaliar as eficiências de tratamento dos sistemas selecionados.

3 REVISÃO DA LITERATURA

3.1 PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS DOS ESGOTOS DOMÉSTICOS E SUAS RELAÇÕES COM A DEGRADAÇÃO DAS ÁGUAS SUPERFICIAIS

Conforme registrado por von Sperling (2014), a composição dos efluentes sanitários varia de acordo com o uso ao qual a água foi submetida, sendo que 99,9% do esgoto doméstico é constituído de água. Entre os outros 0,1% estão inclusos sólidos orgânicos e inorgânicos que podem estar tanto na forma suspensa como na forma dissolvida. Ainda, segundo este mesmo autor, o esgoto sanitário é formado por esgoto doméstico, águas de infiltração e despejos industriais, sendo o esgoto doméstico proveniente das residências, do comércio e das órgãos públicos.

Da mesma forma a NBR 9648 (ABNT, 1986) classifica os esgotos sanitários como um despejo líquido constituído de esgotos doméstico e industrial, água de infiltração e a contribuição pluvial parasitária. Segundo a mesma norma, esgoto doméstico é o despejo líquido resultante do uso da água para higiene e necessidades fisiológicas humanas.

Por sua vez, a FUNASA (BRASIL, 2004) conceitua o esgoto doméstico como aquele que provém de edificações que dispõem de instalações de banheiro, lavanderias e cozinhas, compondo-se essencialmente da água de banho, excretas, papel higiênico, restos de comida, sabão, detergentes e águas de lavagem.

Desta forma, esgotos sanitários apresentam altas taxas de cargas poluentes que precisam ser removidas através de algum tipo de tratamento, antes do lançamento em um corpo d'água receptor. Dentre os principais parâmetros relativos a esgotos domésticos que merecem atenção estão os sólidos totais, os compostos orgânicos, o nitrogênio e o fósforo e organismos patogênicos.

3.1.1 Sólidos Totais

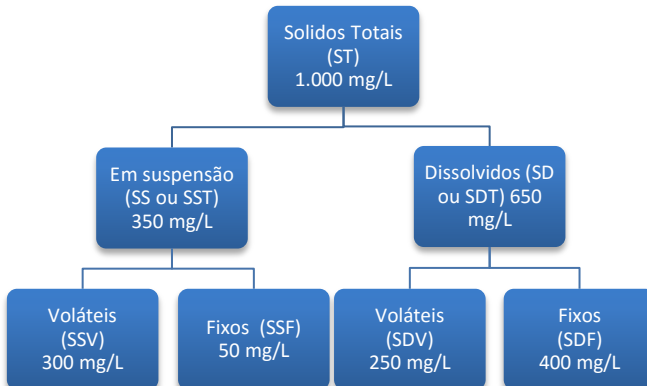
Embora representem uma pequena parcela constituinte do esgoto, os sólidos são de grande interesse nas pesquisas e projetos sanitários, pois, estes podem ser responsáveis por efeitos nocivos ao ambiente. Os sólidos agem sobre a vida aquática, aumentando a turbidez e assim impedindo a penetração da luz e induzindo o aquecimento da

água, proporcionando a diminuição de oxigênio dissolvido no meio e podendo ser composto por bactérias patogênicas.

A ANA (BRASIL, 2014) também expõe que os sólidos que se depositam nos leitos dos corpos d'água podem causar seu assoreamento, possibilitando aumento do risco de enchentes e danos à vida aquática. A FUNASA (BRASIL, 2004), por sua vez, define que o acúmulo de substâncias minerais e/ou orgânicas em um corpo d'água pode provocar a redução de sua profundidade e de seu volume útil.

Von Sperling (2014) destaca que grande parte dos contaminantes da água contribui para a carga de sólidos, sendo estes classificados de acordo com o seu tamanho e estado, as suas características químicas e a sua decantabilidade. Considerando as definições deste autor, no caso específico de esgotos, tendo como base o tamanho, adota-se os sólidos em suspensão, referente a porção de particulados, e os sólidos dissolvidos ou solúveis (Figura 01). Por sua vez, a classificação dos sólidos pelas características químicas apresenta-se na forma volátil, definida pela matéria orgânica e pela forma fixa, representada pela matéria não orgânica. A classificação dos sólidos pela sedimentabilidade define: sólidos sedimentáveis, aqueles com capacidade de sedimentar em um prazo de 1 hora; e não sedimentáveis, a fração restante dos sólidos.

Figura 01: Distribuição dos Sólidos do Esgoto Bruto.



Fonte: Adaptado de von Sperling (2014).

Por sua vez, Jordão e Pessôa (2005) classificam os sólidos pelas dimensões das partículas em suspensos (não filtráveis) e dissolvidos (filtráveis); por sedimentabilidade: sedimentáveis e não sedimentáveis;

Pela secagem a média temperatura: totais (resíduos totais), suspensos totais (não filtráveis totais) e dissolvidos totais (filtráveis totais); e por secagem a alta temperatura: fixos e voláteis.

3.1.2 Matéria Orgânica

Von Sperling (2014) define matéria orgânica como o principal problema de poluição para os corpos d'água, pois, o excesso deste parâmetro em um corpo d'água resulta no consumo de oxigênio dissolvido. Tal se deve as ações das bactérias decompositoras, que utilizam o oxigênio disponível no meio para a respiração. O decréscimo da concentração de oxigênio dissolvido tem diversas implicações do ponto de vista ambiental. Dentre estas destacam-se a maior mortalidade de espécies aquáticas. Outro fator importante relacionado ao excesso de matéria orgânica em ambientes aquáticos é a aumento de bactérias heterotróficas nas quais estão associadas, direta ou indiretamente, à inúmeras doenças.

Segundo Hammer (1979) a matéria orgânica é classificada em três categorias: carboidratos, proteínas e gorduras. Os carboidratos consistem em açúcares formados basicamente por carbono, hidrogênio e oxigênio. As proteínas constituem de cadeias de aminoácidos. As gorduras estão associadas a diversas substâncias.

Desta forma, considerando a multiplicidade de formas e compostos encontrados na matéria orgânica, há grandes dificuldades de determinação laboratorial. Por este motivo, em termos práticos, são adotados os métodos diretos e indiretos para determinação da matéria orgânica (VON SPERLING, 2014). Este mesmo autor, afirma que a Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO_5) e a Demanda Química de Oxigênio (DQO) são medidas indiretas da matéria orgânica e estabelecidos com parâmetros de qualidade das águas. A remoção da DBO retrata a quantidade de oxigênio necessária para estabilizar, através de processos bioquímicos, a matéria orgânica. Já a DQO corresponde a uma oxidação química. Para Jordão e Pessoa (2005), normalmente a DBO de esgotos domésticos varia entre 100 e 400 mg/l e a DQO varia entre 200 e 800 mg/l e se mantem entre 1,7 e 2,5 vezes o valor da DBO .

3.1.3 Nitrogênio e Fósforo

O nitrogênio e o fósforo são nutrientes essenciais para a atividade biológica, mas quando presentes em excesso causam grandes impactos aos mananciais de água, favorecendo o aumento de matéria

orgânica, provenientes das algas e bactérias, consumindo o oxigênio dissolvido e provocando condições anaeróbicas ao corpo d'água (VON SPERLING, 2014). Estas são consequências decorrentes do processo de eutrofização que, segundo Esteves (2011), é um fenômeno de transformação de corpos d'água associado ao aumento excessivo da produção de biomassa de produtores primários, geralmente causada pela elevada concentração de nitrogênio e fósforo. Ainda, segundo este autor, o fenômeno pode ser natural ou artificial, sendo um processo lento e contínuo, resultante do aporte de nutrientes. O aumento das concentrações de nitrogênio e fósforo são as principais causas da eutrofização, onde pode haver rápido desenvolvimento de algas e crescimento excessivo de plantas aquáticas, como cianobactérias.

Para Sezerino (2006) o nitrogênio presente nos esgotos é oriundo, principalmente, das proteínas dos alimentos e dos produtos da degradação excretados na forma de uréia. Dentre os distúrbios promovidos pelo excesso de nitrogênio nos corpos d'água, destacam-se: a queda dos níveis de oxigênio dissolvido, a proliferação de macrófitas e algas, a toxicidade aos organismos e riscos a saúde pública.

Nos esgotos, o nitrogênio é encontrado na forma de nitrogênio orgânico, de amônia (NH_3 e NH_4), nitrito (NO_2^-) e nitrato (NO_3^-). O nitrogênio orgânico está combinado sob forma de proteína, aminoácidos e uréia (JORDÃO e PESSOA, 2005). A amônia é derivada da reação entre a uréia com a água (hidrólise). Pelo processo de nitrificação a amônia é oxidada a nitrito e em seguida a nitrato (SAWYER et al., 2003).

O nitrogênio orgânico e a amônia são as formas predominantes de nitrogênio nos efluentes sanitários. Os dois em conjunto são denominados Nitrogênio Total Kjeldahl – NTK (VON SPERLING, 2014).

Segundo Jordão e Pessoa (2005) e Von Sperling (2014) a concentração de Nitrogênio Total Kjeldahl (NTK) é da ordem de 40 a 60 mgN/L, sendo aproximadamente 75% de nitrogênio amoniacal e 25% de nitrogênio orgânico.

Por sua vez, representando uma pequena parcela dos esgotos brutos estão os nitritos e os nitratos. Os nitritos são instáveis e se oxidam facilmente para a forma de nitratos. Raramente estes compostos excedem a 1,0 mg/L no esgoto (JORDÃO e PESSOA, 2005). Ainda, conforme estes autores, os nitratos são a forma final de uma estabilização e são consumidos por algas e outras plantas.

Consoante a Von Sperling (2014), outro nutriente de fundamental importância nos esgotos sanitários é o fósforo. De modo

positivo são essenciais para o crescimento dos microrganismos responsáveis pela estabilização da matéria orgânica. Entretanto pode ser também causador da degradação de corpos d'água, conduzindo ao fenômeno de eutrofização.

O fósforo se apresenta na forma orgânica ou inorgânica, sendo na forma orgânica combinada a matéria orgânica, em proteínas e aminoácidos (JORDÃO e PESSOA, 2005). Já na forma inorgânica é proveniente principalmente dos detergentes e outros produtos químicos e se dividem em ortofosfatos e polifosfatos (VON SPERLING, 2014). Os ortofosfatos são diretamente disponíveis para o metabolismo biológico e ocorre principalmente na forma de HPO_4^{3-} . Os polifosfatos são mais complexos e se transformam em ortofosfato pelo processo de hidrólise.

3.1.4 Organismos Patogênicos

Organismos patogênicos é o nome dado aos diversos microorganismos como os vírus, bactérias, protozoários e helmintos. Alguns destes microorganismos são responsáveis pela transmissão de diversas doenças e podem estar associadas ao lançamento de esgotos em um corpo d'água receptor (VON SPERLING, 2014).

A falta de sistemas de esgotamento eficientes, muitas vezes os dejetos humanos alcançam mananciais. A água desses mananciais quando utilizada para consumo, pode resultar no acesso desses microrganismos ao organismo de uma pessoa, causando-lhe doenças. Estima-se que 80 por cento de todas as moléstias e mais de um terço dos óbitos dos países em desenvolvimento sejam causados pelo consumo de água contaminada e, em média, até um décimo do tempo produtivo de cada pessoa se perde devido a doenças relacionadas com a água (BRASIL, 1997).

O Manual de Saneamento da FUNASA apresentada as principais doenças transmitidas pela água ao homem, por microorganismos patogênicos, destacando-se: Doenças de veiculação por ingestão: febre tifoide, cólera, disenteria bacilar, disenteria amebiana e hepatite infecciosa; Doenças veiculação pelo contato com a pele ou mucosas: esquistossomose, infecção dos olhos, ouvidos e garganta, doenças de pele e poliomielite. (BRASIL, 2004).

Devido à dificuldade na quantificação de todos os patógenos que podem estar presentes numa amostra de esgoto bruto, escolheu-se como indicador da qualidade sanitária os coliformes fecais. Os coliformes são formados por grupos de bactérias, que quando presentes nos corpos

d'água são os principais indicadores de contaminação fecal e responsáveis por doenças de veiculação hídrica (BASSOI e GUAZZELLI, 2004).

Estima-se que a concentração de coliformes fecais (CF) no esgoto bruto seja de 108 a 109 CF/100ml (JORDÃO e PESSOA, 2005). Por sua vez, von Sperling (2014) afirma que a quantidade de patógenos no esgoto de uma determinada localidade é bastante variável e depende de diversos fatores, tais como: condições socioeconômicas, condições sanitárias, região geográficas, dentre outros. Outros grupos de microorganismos podem ser utilizados como indicadores de contaminação como os coliformes totais e *Escherichia coli*, *Streptococcus fecalis* e ovos de helmintos.

Para Maier et al. (2000) a maior dificuldade encontrada para monitorar organismos patogênicos é a quantidade e variedade destes organismos, bem como, a dificuldade de isolamento e identificação. O indicador ideal é aquele que mede os riscos associados à ingestão de água ou alimentos contaminados.

Por fim, von Sperling (2014) discorre que em termos de tratamento de esgotos, a caracterização da origem fecal não é tão importante, uma vez que já se sabe que os esgotos contêm matéria e organismos fecais. Assim, os indicadores são utilizados para determinação da eficiência de remoção de patógenos no processo de tratamento de esgotos.

3.2 CONDIÇÕES E PADRÕES DE LANÇAMENTO DE EFLUENTES NO BRASIL

As principais legislações que dispõem sobre a qualidade das águas em âmbito nacional são as Resoluções CONAMA n°. 357 de 17/03/2005 e a sua complementação e alteração, CONAMA n°. 430 de 13/05/2011.

Ambas as legislações dividem as águas do território nacional em águas doces (salinidade $\leq 0,5$ ‰), águas salobras (salinidade entre 0,5 e 30 ‰) e águas salinas (salinidade > 30 ‰). As águas doces, salobras e salinas são classificadas, segundo a qualidade requerida para os seus usos preponderantes. Na tabela 01 estão resumidos os principais usos e a classificação das águas de acordo com a Resolução CONAMA 357/2005.

Tabela 01: Classificação da Água Doce segundo seus usos preponderantes, de acordo com a Resolução do CONAMA nº 357/2005.

Classificação	Classe	Usos Preponderantes
Água Doce	Especial	Águas destinadas ao abastecimento para consumo humano, com desinfecção; à preservação do equilíbrio natural das comunidades aquáticas; e à preservação dos ambientes aquáticos em unidades de conservação de proteção integral.
	01	Águas destinadas ao abastecimento para consumo humano, após tratamento simplificado; à proteção das comunidades aquáticas; à recreação de contato primário, tais como natação, esqui aquático e mergulho, conforme Resolução CONAMA nº 274/2000; à irrigação de hortaliças, plantas e de parques, jardins, campos de esporte e lazer, com os quais o público possa vir a ter contato direto; à aquicultura e à atividade de pesca.
	02	Águas destinadas ao abastecimento para consumo humano, após tratamento convencional; à proteção das comunidades aquáticas; à recreação de contato primário, tais como natação, esqui aquático e mergulho, conforme Resolução CONAMA nº 274/2000; à irrigação de hortaliças, plantas frutíferas e de parques e jardins, campos de esporte e lazer, com os quais o público possa vir a ter contato direto, à aquicultura e à atividade de pesca.
	03	Águas destinadas ao abastecimento para consumo humano, após tratamento convencional ou avançado; à irrigação de culturas arbóreas, cerealíferas e forrageiras; à pesca amadora; à recreação de contato secundário; à dessedentação de animais.
	04	Águas destinadas à navegação e à harmonia paisagística.

Fonte: Adaptado BRASIL (2005)

Cada uma destas classes pressupõe uma certa qualidade a ser mantida no corpo d'água, expressa em termos do padrão do corpo d'água receptor. Além destes, há padrões de lançamento gerais, estabelecidos principalmente por questões práticas. A relação entre os padrões, de forma geral, é:

I um efluente, além de satisfazer os padrões de lançamento, deve permitir também o cumprimento aos padrões do corpo para a sua respectiva classe.

II caso o atendimento aos padrões do corpo receptor seja demonstrado através de estudos ambientais, o poluidor pode solicitar ao órgão ambiental um relaxamento nos padrões de lançamento.

Vale destacar que a Resolução CONAMA nº 430/2011 em seu Artigo 11 veta o lançamento de efluentes ou disposição de resíduos domésticos, agropecuários, de aquicultura, industriais e de quaisquer outras fontes poluentes, mesmo que tratados, nas águas de classe especial.

Já em seu Artigo 21 define, para demais classes, que para o lançamento direto de efluentes oriundos de sistemas de tratamento de esgotos sanitários deverão obedecer as seguintes condições e padrões específicos:

a pH entre 5 e 9;

b temperatura: inferior a 40°C, sendo que a variação de temperatura do corpo receptor não deverá exceder a 3°C no limite da zona de mistura;

c materiais sedimentáveis: até 1 mL/L em teste de 1 hora em cone Imhoff. Para o lançamento em lagos e lagoas, cuja velocidade de circulação seja praticamente nula, os materiais sedimentáveis deverão estar virtualmente ausentes;

d Demanda Bioquímica de Oxigênio-DBO 5 dias, 20°C: máximo de 120 mg/L, sendo que este limite somente poderá ser ultrapassado no caso de efluente de sistema de tratamento com eficiência de remoção mínima de 60% de DBO, ou mediante estudo de autodepuração do corpo hídrico que comprove atendimento às metas do enquadramento do corpo receptor.

e substâncias solúveis em hexano (óleos e graxas) até 100 mg/L;

f ausência de materiais flutuantes.

Para os parâmetros nitrogênio amoniacal total e fósforo total a resolução não exige o padrão de lançamento para efluentes de sistemas de tratamento de esgotos sanitários.

3.3 PROCESSOS E SISTEMAS DE TRATAMENTO DE ESGOTO

Segundo Barros et al. (1995), o grau de remoção dos poluentes no tratamento de esgotos, de forma a adequar o lançamento dentro dos padrões vigentes, está associado ao conceito nível e eficiência do tratamento. Consoante, Von Sperling (2014) considera os seguintes níveis: preliminar, primário, secundário e terciário. Ainda, este mesmo autor, defini os métodos de tratamento, dividindo-se da seguinte forma:

I Operações físicas unitárias: métodos de tratamento que predominam a aplicação da força física;

II Processos químicos unitários: métodos nos quais a remoção de contaminantes ocorre pela adição de produtos químicos;

III Processos biológicos unitários: métodos nos quais a remoção de contaminantes ocorre por meio das atividades biológicas.

Para remoção dos principais poluentes dos esgotos domésticos Von Sperling (2014), cita as seguintes operações, processos e sistemas:

I Sólidos em suspensão: Gradeamento, remoção de areia, sedimentação e disposição no solo;

II Matéria orgânica biodegradável: lagoas de estabilização e variações; lodos ativados e variações, reatores aeróbicos com biofilmes, tratamento anaeróbio e disposição no solo;

III Nitrogênio: nitrificação e desnitrificação biológica. Lagoas de maturação e de alta taxa; disposição no solo e processos físico-químicos;

IV Fósforo: remoção biológica; lagoas de maturação e de alta taxa e processos físico-químicos.

Barros et al. (1995) afirmam que a escolha do processo de tratamento deve levar em conta os aspectos técnicos e os financeiros, conciliando de forma a atender da melhor maneira possível a realidade local. Desta maneira, para o tratamento de águas residuárias os *wetlands* construídos podem ser considerados como um método de tratamento que utiliza tecnologia simples, de fácil operação e custo baixo, podendo ser aplicado ao nível de tratamento secundário e terciário.

3.4 WETLANDS

3.4.1 Os sistemas Naturais

O termo *Wetlands* é empregado para designar áreas alagadas ou inundáveis. Estes ambientes nos quais se desenvolvem espécies vegetais adaptadas à saturação de água, apresentam-se com enorme diversidade biológica. Neles a água, os vegetais e o solo se interagem favorecendo a reciclagem de nutrientes obtida através de processos químicos, físicos e biológicos.

Usualmente, as áreas alagadas são porções de terra que estão encharcadas e geralmente encontradas em depressões topográficas e em áreas com solos de baixa permeabilidade. Kadlec & Knight (1996) destacam que as *wetlands* naturais têm propriedades que as tornam únicas, por suas espécies vegetais aproveitarem a fonte abundante de água ao mesmo tempo superar a escassez periódica. Além disso, o autor destaca que os *wetlands* tem uma atividade biológica bastante elevada favorecendo a transformação de poluentes comuns em subprodutos inofensivos, ou nutrientes essenciais à vida. Estes nutrientes servem de suporte a organismos fotossintetizantes que convertem compostos inorgânicos em compostos orgânicos, utilizados como alimento para animais e microrganismos (SEZERINO, 2006).

3.4.2 Os Sistemas Construídos

Os sistemas de *wetlands* construídos (WCs) podem ser definidos como um sistema alagado, composto por: solo, plantas e microrganismos, eficientes no controle de poluição de águas residuárias. São, portanto, sistemas controlados que simulam e aceleram as condições naturais encontrados nos terrenos alagados naturais (ZANELLA, 2008). Segundo Kadlec & Knight (1996), o principal objetivo da utilização de sistemas de *wetlands* construídos é a melhoria da qualidade dos efluentes, podendo também participar da produção fotossintética e de energia, e serem utilizados para atividades de educação humana.

O tratamento de esgotos nestes ambientes se baseia na interação entre os componentes bióticos e abióticos, envolvendo fenômenos físicos, químicos e biológicos. O processo físico envolve a sedimentação e a filtração das partículas em suspensão. O processo químico do tratamento envolve a adsorção, aglutinação e a precipitação. E os processos biológicos, a partir dos microrganismos, responsáveis pela

nitificação em zonas aeróbias e desnitrificação em zonas anaeróbias (WENDLAND & CHIARAWATCHAI, 2006 apud ORMONDE, 2012).

O uso de alagados aplicados ao tratamento de esgotos já era utilizado pelos Astecas no passado (PHILIPPI e SEZERINO, 2004). Os primeiros indícios de pesquisas envolvendo a utilização de *wetlands* construídos para o tratamento de esgoto datam da década de 1950, na Alemanha. No Brasil, a primeira tentativa de utilização de WCs foi na década de 1980, por (Salati et al., 1982 apud Ormonde, 2012), que consistia num lago artificial com aguapés nas proximidades de um córrego altamente poluído.

A utilização e discussões sobre *wetlands* construídos têm se intensificado, assim possibilitando o desenvolvimento de pesquisas e experimentos conduzindo para um maior conhecimento e experiências sobre o assunto (HABERL, 2003). Os *wetlands* construídos podem ser utilizados para o tratamento de diversos tipos de efluentes, tais como esgotos domésticos a níveis secundários e terciários, efluentes industriais, águas pluviais e aterros sanitários (ORMONDE, 2012).

Dentre as vantagens dos WCs listam-se a baixa manutenção em comparação a outros sistemas de tratamento, a dispensa do uso de produtos químicos, além de ser esteticamente integrados a paisagem com baixo custo de implantação (SILVA, 2009). Algumas vantagens e desvantagens da utilização dos sistemas de *wetlands* construídos podem ser observadas no quadro 01.

Apesar de sua ampla utilização, muitos estudos estão sendo conduzidos a fim de identificar e aperfeiçoar o papel de cada elemento atuante no tratamento, destacando-se o tipo de fluxo empregado, o material filtrante, as macrófitas, os máximos carregamentos afluentes (tanto a nível hidráulico como orgânico), as cinéticas de depuração, a transferência de oxigênio, a estrutura e metabolismo do biofilme formado e a vida útil do sistema (SEZERINO, 2006).

Quadro 01: Vantagens e Desvantagens dos sistemas *wetlands* construídos.

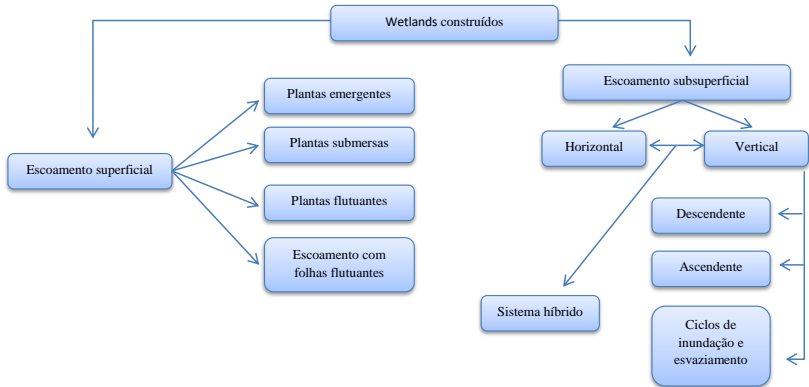
Vantagens	Desvantagens
Custo de construção relativamente baixo.	Podem causar problemas com mosquitos.
Fácil manutenção.	Necessidade de caracterizações precisas dos sólidos do efluente a ser tratado, do tipo de enchimento, do ciclo hidrológico e do regime de temperaturas.
Tolerância à flutuação no ciclo hidrológico e nas cargas de contaminantes.	Colmatação que ocorre com alguma frequência, havendo, portanto, a necessidade do controle da carga hidráulica e de sólidos para minimizar este problema.
Possibilidade de se obterem alguns benefícios adicionais, tais como a criação de espaços verdes, de habitats naturais e de áreas recreacionais ou educacionais.	Requer um período de início até a vegetação estar bem estabelecida.
Não requer produtos químicos ou equipamentos mecânicos.	Alguns compostos orgânicos removidos pelo sistema podem estar ligados aos sedimentos e se acumularem ao longo do tempo.
Redução da matéria orgânica e dos sólidos sedimentáveis.	Eficiências sazonais.
Possibilidade de um tratamento eficaz sem a necessidade de equipamentos complexos.	
Alta produção de biomassa que pode ser utilizada na produção de ração animal, energia e biofertilizante.	
Considerável redução de patógenos.	
Remoção satisfatória de matéria orgânica, sólidos suspensos, nitrogênio e fósforo.	

Fonte: Adaptado de Silva (2009).

3.4.3 Tipos de *Wetlands* Construídos

Os *Wetlands* Construídos são qualificados em função do fluxo às águas residuárias, sendo então denominados por *wetland* de escoamento superficial e *wetland* de escoamento subsuperficial, sendo este último desmembrado em fluxo vertical e fluxo horizontal. A figura 02 apresenta a classificação dos *wetlands* construídos.

Figura 02: Classificação dos *wetlands* construídos.



Fonte: Adaptado SEZERINO (2015).

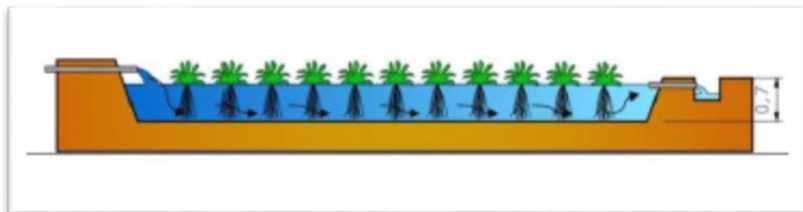
3.4.3.1 *Wetland de fluxo superficial (WFS)*

Nos *wetlands* de fluxo superficial, a água flui sobre a superfície do meio filtrante, por entre os caules e as folhas da vegetação (Figura 03) (MANNARINO, 2003).

Estes sistemas possuem como propriedades a variação do consumo de oxigênio em função da massa líquida, semelhantes às lagoas facultativas, sendo que na superfície prevalecem a presença de algas planctônicas ou filamentosas, ou macrófitas aquáticas. As zonas mais profundas tendem a ser dominadas por processos anaeróbios na ausência de luz (IWA, 2000).

As macrófitas empregadas em WFS podem ser do tipo emergente, flutuante livre, flutuante fixa, submersa livre e submersa fixa (ZANELLA, 2008).

Figura 03: Esquema de sistema de *Wetland* de Fluxo Superficial (WFS) com macrófitas flutuantes.



Fonte: Adaptado de Salati (2003).

Segundo levantamentos realizados por Kadlec & Knight (1996) estes sistemas podem alcançar 90% de remoção de DBO para águas residuárias domésticas, num período de 07 dias de detenção. Para eliminar os nutrientes em cerca de 90% é necessária uma retenção de 14 dias em *wetlands* de fluxo superficial.

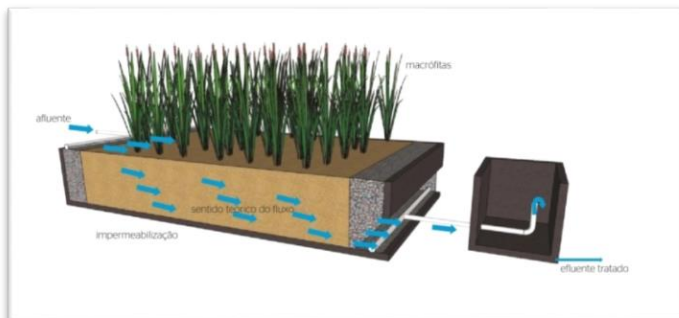
3.4.3.2 *Wetland* de fluxo subsuperficial

Nos *wetlands* de fluxo subsuperficial o líquido drena por gravidade horizontalmente ou verticalmente através do meio filtrante, entrando em contato com organismos que vivem em associação ao meio suporte e as raízes das plantas. O princípio básico é a formação de biofilme aderido a um meio suporte e as raízes das plantas, onde comunidades de microrganismos aeróbios e anaeróbios irão depurar os constituintes dos esgotos.

➤ *Wetland* de fluxo horizontal subsuperficial (WFHS)

Nos WFHS o efluente é disposto na zona de entrada (parte inicial do leito) e percola até a zona de saída (parte final do leito) impulsionada por uma declividade de fundo. A figura 04 ilustra um WFHS.

Figura 04: Desenho esquemático de um WFHS.



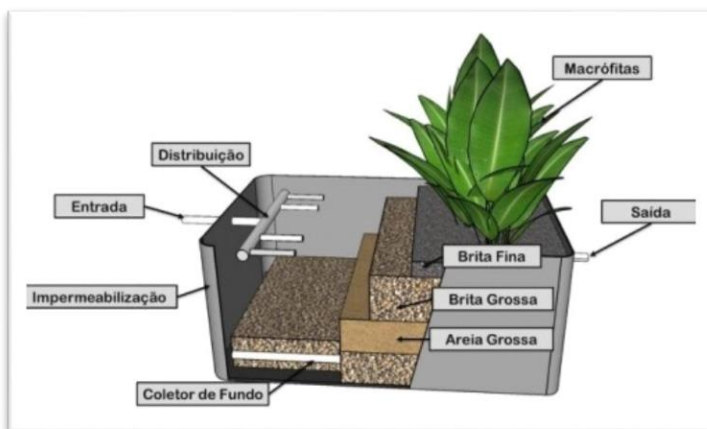
Fonte: Adaptado de Sezerino et al. (2015).

➤ *Wetland* de fluxo vertical (WFV)

São filtros de escoamento vertical intermitente preenchido por material que dará base aos vegetais. O nível de água permanece abaixo do meio suporte impossibilitando o contato com animais e pessoas, além de evitar a proliferação de insetos e o mau cheiro.

Este sistema em semelhanças aos *wetlands* de fluxo horizontal, as macrófitas são plantadas diretamente no material de recheio, sendo o efluente disposto intermitentemente sob a superfície do módulo inundando-o e percolando verticalmente (Figura 05) (SEZERINO, 2006).

Figura 05: Desenho esquemático de um WFV.



Fonte: Adaptado de Andrade (2015).

A maior vantagem do WFV consiste na distribuição de esgoto bruto numa área maior de entrada e o uso de volume de filtro mais eficiente, resultando em uma necessidade de área muito menor.

3.4.4 Principais Elementos de *Wetlands* Construídos

3.4.4.1 *Macrófitas*

Macrófitas aquáticas é a denominação para caracterizar vegetais que habitam desde brejos até ambientes verdadeiramente aquáticos, sendo esta terminologia baseada no contexto ecológico (OLIJNYK, 2008). Em áreas alagadas naturais são encontradas diversas variedades de macrófitas que poderão ser potencialmente utilizadas nos sistemas de *wetlands* construídos.

Na escolha das macrófitas deve-se dar preferência às espécies nativas locais (ZANELLA, 2008) e que suportam o estresse hídrico. Os espécimes ainda deverão deter alta taxa fotossintética; alta capacidade de transporte de oxigênio; capacidade de assimilação de poluentes; serem resistentes a pragas e doenças e sistema radicular bem desenvolvido (SILVA, 2009).

O tratamento de esgoto por meio das plantas está associado ao seu relacionamento com os microrganismos das raízes, os quais degradam moléculas orgânicas, enquanto as plantas absorvem os produtos da decomposição (ORMONDE, 2012). O quadro 02 apresenta resumidamente o papel das macrófitas em sistemas *wetlands* construídos.

Quadro 02: Papel das macrófitas nos *wetlands* construídos,

Propriedade das macrófitas	Ação de auxílio no tratamento de esgotos
Parte aérea (tecidos)	Atenuação da luminosidade = redução do crescimento de fitoplâncton
	Redução da velocidade do vento = redução da resuspensão de material sólido
	Potencial estético - embelezamento paisagístico
	Armazenamento de nutrientes
Tecidos da planta em contato com o esgoto	Promoção da filtração
	Redução da velocidade do vento = aumento da taxa de sedimentação e evita a resuspensão de sólidos
	Dispõem grande área para aderência de microrganismos
	Liberação de oxigênio devido a fotossíntese = aumento na taxa de degradação aeróbica da matéria orgânica
	Retirada de nutriente
Raízes e rizomas em contato com o solo	Prevenção contra erosão
	Prevenção contra a colmatação em unidades de fluxo vertical
	Liberação de oxigênio = auxílio na degradação aeróbia da matéria orgânica e na nitrificação
	Retiradas de nutriente

Fonte: Adaptado de Olijnyk (2008).

As espécies de macrófitas mais frequentemente utilizadas segundo Silva (2009) são:

I Emergentes: taboa (*Typha spp.*), junco (*Juncus spp.*), caniço (*Phragmites spp.*), Bunho (*Carex spp.*), lírio dos pântanos (*Iris spp.*);

II Flutuantes: jacinto d'água (*Eichhornia crassipes*), lentilha d'água (*Lemna*), rede de água (*Hidodictyon*),

III Submersas: elódea (*Elodea conadensis*, *Elodea nutalli*), erva d'água (*Egéria densa*), *Hydrilla Verticillata*, *Cabomba caroliniana*

Cooper et al.(1996) apud Sezerino (2006), destacam que as raízes das plantas atingem entre 0,3m a 0,9m de profundidade no maciço filtrante. Hobson (1990) e Leclerc et al. (1999) apud Olijnyk (2008), destacam que uma diminuição no nível de esgoto dentro do filtro favorece o desenvolvimento das raízes.

Em suma, a escolha das plantas que irão compor o *wetland* dependerá do que se almeja, se é para uma máxima eficiência de tratamento, interesse paisagístico ou produção de biomassa, sendo que um necessariamente não exclui o outro.

3.4.4.2 Meio suporte

Os meios suportes utilizados podem variar de brita a solos com baixo teor de argila e devem apresentar alta permeabilidade, alta capacidade de troca catiônica e alta atividade microbológica. Pode se utilizar também materiais de enchimento alternativos, tais como fibra de casca de coco (ALMEIDA et. al, 2007); escória de aciaria (subproduto do processo da fabricação do aço) (AVELAR, 2008); caco de telha (MONTEIRO, 2009) e bambu (ZANELLA, 2008).

As características químicas do meio suporte podem exercer um papel importante na adsorção de compostos inorgânicos, tais como a amônia (NH_3) e ortofosfato (P-PO^{3-}_4). Ainda, este deve ser capaz de manter ao longo do tempo boa condutividade hidráulica. O regime hidráulico é expresso através das propriedades das partículas sólidas do material filtrante. Partículas com formas arredondadas como areias e pedregulhos são consideradas ideais para a composição de sistemas de filtração (SEZERINO & PHILIPPI, 2003).

Os principais parâmetros em projeto para os materiais utilizados como meio suporte em *wetlands* construídos, destacadas por Philipi & Sezerino (2003), são:

- I. porosidade (n) = 0,42 - para solos coesivos; 0,35 a 0,40 – para areias e 0,25 – para cascalhos;
- II. diâmetro efetivo (d_{10}) = 0,20 a 0,5mm - para areias e cascalho;
- III. coeficiente de uniformidade (U) < 5 unidades (recomendado 3,5 unidades);
- IV. condutividade hidráulica (KS) = 10^{-4} m/s;

Para Monteiro (2009), a entrada e saída do sistema necessitam de material suporte com granulometria maiores que as demais regiões, pois isto, favorecerá a melhor distribuição do afluente e evita a colmatação do meio.

Conforme vários autores como Cooper (2009), Kadlec & Knight (1996), De Paoli e Von Sperling, (2013) e Sezerino (2006), os principais mecanismos que contribuem na colmatação são a deposição de sólidos nos filtros e o excesso de produção de biomassa devido ao crescimento de microrganismos.

3.4.4.3 Microrganismos

Os microrganismos dos WCs são os principais responsáveis pela degradação dos poluentes. Segundo Sezerino (2006) “a degradação via microrganismos ocorre devido à necessidade destes em obter energia e fonte de carbono para seu metabolismo e reprodução”. Dentre estes destacam-se: algas, fungos, protozoários e bactérias (SILVA, 2009).

Dos diversos microrganismos que habitam os filtros plantados, as bactérias são as mais representativas, responsáveis pelos processos de decomposição da matéria orgânica, de nitrificação e desnitrificação (OLIJNYK, 2008). Os protozoários são normalmente maiores que as bactérias e frequentemente tendem a absorvê-las como fonte de energia.

3.4.5 Processos de Tratamento de Águas Residuárias em *Wetlands* Construídos

Um *wetland* construído permite para o tratamento de águas residuárias o desenvolvimento dos processos de sedimentação, filtração, digestão, oxidação, redução, adsorção e precipitação. Estes processos ocorrem sequencialmente com o movimento das águas residuárias através dos sistemas. Seus poluentes e compostos vão sendo aderidos ao meio filtrante ou às plantas e microrganismos presentes no sistema (USEPA, 2000).

Segundo Sezerino (2006) a depuração dos esgotos nos WCs dá-se tanto em condições aeróbias como em condições anaeróbias. Porém, mesmo em diferentes configurações têm-se inúmeros mecanismos ocorrendo simultaneamente. O quadro 03 apresenta os principais mecanismos envolvidos na depuração e transformação dos constituintes dos esgotos.

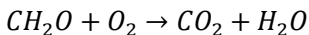
Quadro 03: Mecanismos predominantes na remoção de poluentes em WCs.

Constituintes dos Esgotos	Mecanismos de Remoção
Sólidos Suspensos	Sedimentação
	Filtração
Material Orgânico Solúvel	Degradação microbiológica - aeróbia
	Degradação microbiológica - anaeróbia
Nitrogênio	Amonificação seguido de nitrificação e desnitrificação microbiana
	Retirada pela planta
	Adsorção
	Volatilização da Amônia
Fósforo	Adsorção
	Retirada pela planta

Fonte: Cooper et al. (1996) apud Sezerino (2006).

3.4.5.1 Depuração da Matéria Carbonácea

Segundo Sezerino (2006) em *wetlands* construídos, a remoção da DBO carbonácea obedece a uma cinética de degradação de primeira ordem, onde a taxa de remoção é diretamente proporcional a sua concentração no meio. A degradação aeróbia é governada pelas bactérias aeróbias que estão aderidas ao material filtrante e raízes das macrófitas, de acordo com a equação (01).



Equação 01

Por sua vez, a depuração anaeróbica é intercedida por bactérias facultativas ou anaeróbias obrigatórias sucedendo de duas etapas: a primeira pela conversão da matéria orgânica com geração de ácidos e álcoois; e a segunda, promovida por bactérias formadoras de metano, ocorre com a contínua conversão da matéria orgânica para a síntese de

novas células, à metano e à dióxido de carbono, resumido na equação (2) (PHILIPPI E SEZERINO, 2004).

Materia orgânica + bactéria → álcool, ácidos e novas células → bactérias → CH₄, H₂S, NH₃, CO₂, H₂O, novas células Equação 02

3.4.5.2 Retenção de Sólidos

Os sólidos presentes nas águas residuárias podem estar associados, com exceção dos gases, a todos os contaminantes ali presentes. A presença de sólidos na água poderá interferir na entrada de luz e exercer uma demanda de oxigênio dissolvido no corpo receptor (VON SPERLING, 2014).

Alguns sólidos em suspensão em *wetlands* são facilmente degradados e outros se tornam parte do meio filtrante, podendo colmatar o meio e conseqüentemente diminuir a sua condutividade hidráulica (USDA NRCS, 2002).

Segundo Olijnyk (2008) em sistemas de fluxo subsuperficial os sólidos suspensos que não foram removidos nas unidades primárias de tratamento, são retidos por filtração e sedimentação. Estas, filtração e sedimentação, estão relacionadas às baixas velocidades de percolação dos esgotos nos filtros, associadas com a presença de macrófitas e o material de recheio. À medida que o esgoto é disposto no *wetland* e percola no leito, a condutividade hidráulica tende a ser reduzida até que ocorra a completa colmatação do mesmo.

Portanto é necessário que se leve em consideração a quantidade de sólidos suspensos que serão aplicados no sistema. No entanto não está relatada a vida útil das unidades, ou seja, por quanto tempo o filtro estará operando sem a presença da colmatação (SEZERINO, 2006).

3.4.5.3 Remoção de Nitrogênio (N) e Fósforo (P)

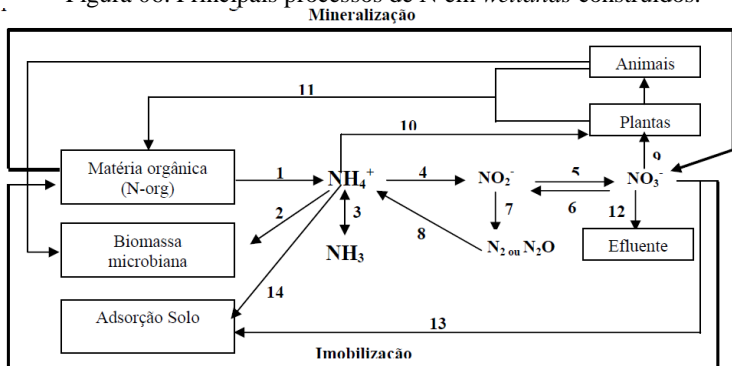
O nitrogênio orgânico presente em *wetlands* é geralmente associado aos materiais particulados, que por sua vez podem ser constituídos por algas, matéria orgânica e detritos das plantas mortas, as quais poderão ocasionar o processo de reintrodução de nitrogênio (N) ao meio (USDA NRCS, 2002). A maioria dos processos de transformação do N é realizada por microrganismos do meio suporte, sendo os mais importantes os fungos e as bactérias (SILVA, 2009).

Sezerino (2006) avalia que o maior mecanismo de remoção de nitrogênio orgânico em WCs é a sequência dos processos de amonificação, nitrificação e desnitrificação. Para este processo este mesmo autor afirma que:

o nitrogênio orgânico é mineralizado à amônia através da hidrólise e degradação bacteriana; a amônia é oxidada a nitrato por meio de bactérias nitrificantes em zonas aeróbias; por fim, os nitratos são convertidos a nitrogênio gasoso em ambientes anóxicos e anaeróbios. O oxigênio requerido para a nitrificação é suprido por convecção e difusão atmosférica e pelas plantas. Porém, o nitrogênio também é requerido pelas macrófitas e, portanto, incorporado em sua biomassa. Outros mecanismos como a volatilização e a adsorção são verificados, porém, em menor importância quando comparados com a nitrificação / desnitrificação.

Os principais processos de transformação do Nitrogênio (N) em WCs podem ser resumidos conforme figura 05.

Figura 06: Principais processos de N em *wetlands* construídos.



Legenda

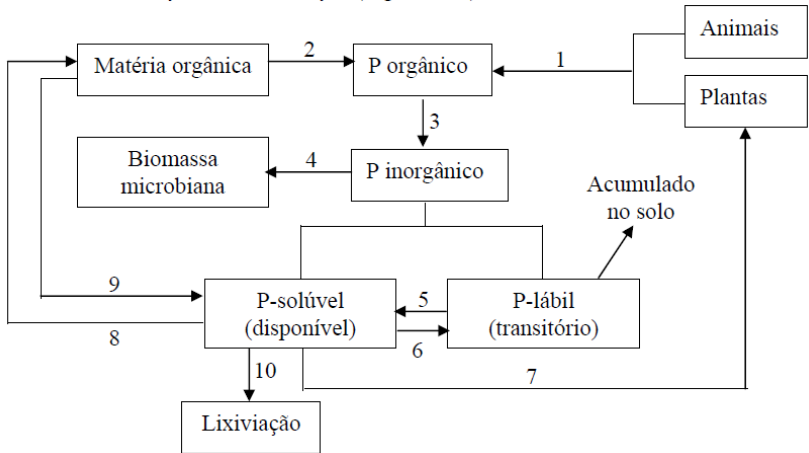
- | | |
|---|---|
| 1 - Amonificação | 9 e 10 - Absorção pelas plantas |
| 2 - Imobilização (assimilação microbiana) | 11 - Decomposição e complexação |
| 3 - Equilíbrio químico (dependente do pH) | 12 - Lixiviação |
| 4 e 5 - Nitrificação | 13 e 14 - Adsorção nas partículas do solo |
| 4 e 7 - ANAMMOX | |
| 6 e 7 - Desnitrificação | |
| 8 - Fixação biológica do N ₂ | |

Fonte: Adaptado de Cassini (2006) e Vymazal (2006) apud Silva (2009)

A remoção do nitrogênio em *wetlands* construídos varia entre 40 a 50% com remoção de carga na faixa de 250 a 630 g/m²/ano, dependendo do fluxo do sistema e da carga afluyente (VYMAZAL, 2007 apud. ZANELLA, 2008).

Por sua vez, o fósforo (P), é encontrado em solução, em partículas ou em tecidos de organismos aquáticos. Para Silva (2009), os processos de transformação dos compostos em *wetlands* estão relacionados à incorporação de matéria orgânica, liberação de fósforo solúvel a partir de ácidos orgânicos produzidos pela decomposição da matéria orgânica, adsorção, precipitação e absorção pela planta, imobilização microbiana, lixiviação e mineralização (Figura 07).

Figura 07: Processos de Transformação de P em solos de *wetlands* construídos



Legenda

- | | |
|-----------------------------|---|
| 1 e 2 – Decomposição | 7 – Absorção pelas plantas |
| 3 – Mineralização | 8 – Incorporação na MO |
| 4 – Imobilização microbiana | 9 – Ácidos orgânicos produzidos liberam P solúvel |
| 5 – Solubilização/desorção | 10 – Lixiviação |
| 6 – Adsorção e precipitação | |

Fonte: Adaptado de Cassini (2006) apud Silva (2009)

Sezerino (2006), por sua vez, destaca que as principais formas de retenção são a adsorção e a precipitação junto ao material filtrante, sendo que estes mecanismos serão diretamente proporcionais à presença de minerais como o ferro (Fe), alumínio (Al), cálcio (Ca) e magnésio

(Mg). Estas reações são controladas pela interação do pH e potencial redox com os minerais presentes, sendo que: em meio suporte ácido, o fósforo pode ser fixado por alumínio ou ferro; em meio suporte alcalino, o fósforo pode ser fixado por cálcio ou magnésio.

Desta forma, a composição do meio suporte é muito importante no que diz respeito à remoção de fósforo. Materiais ricos em ferro, alumínio, carbonato de cálcio e argilas podem ser empregadas para melhor remoção de fósforo (KADLEC & KNIGHT, 1996). Em conformidade aos levantamentos de Vymazal (2005) a remoção pode variar entre 40% a 60%

4 METODOLOGIA

A base metodológica desta pesquisa teve como referencial os trabalhos publicados a partir do ano de 2000. Para isso, esta investigação foi estruturada em três fases distintas (Figura 08), a saber:

4.1 REVISÃO DA LITERATURA

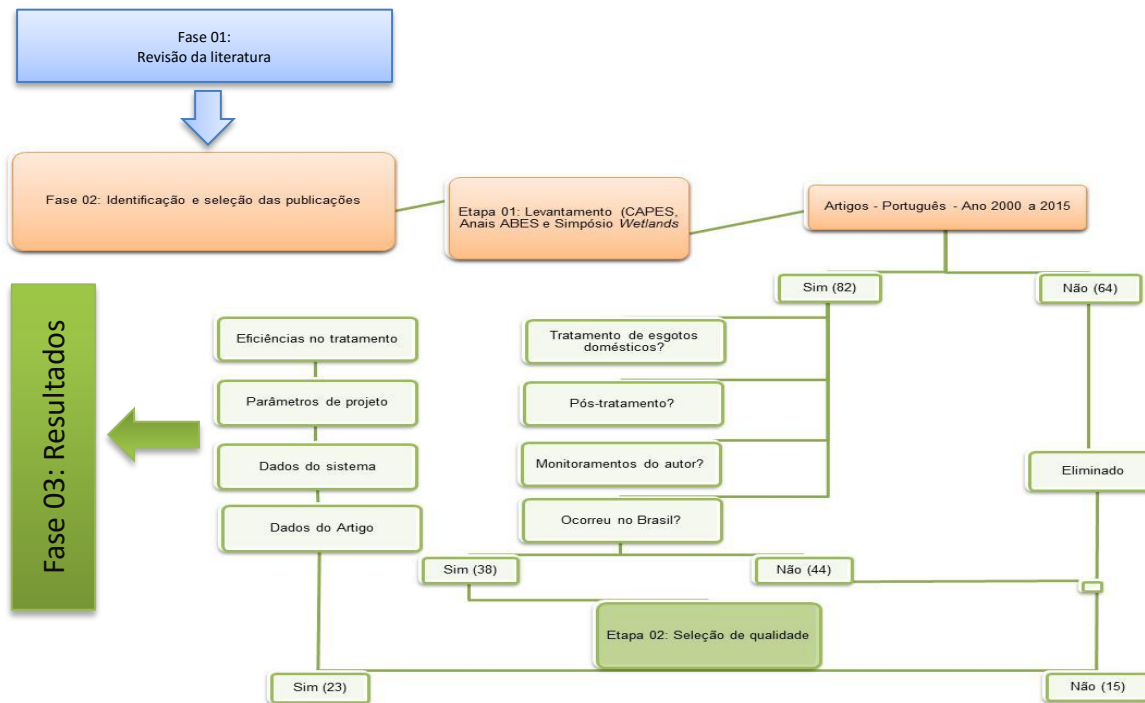
A fundamentação teórica se apresenta de essencial importância para melhores contextualizações e conceituações das bases de estudos. Neste sentido, o item revisão da literatura teve como objetivo a promoção e consolidação das principais bases teóricas sobre o assunto. Para isso, utilizou-se de buscas na literatura pertinente a partir de pesquisas bibliográficas, buscando sempre identificar e apresentar as opiniões dos autores já consagrados nos estudos da engenharia ambiental e sanitária, especialmente as publicações sobre tratamento de esgoto e *wetlands* construídos.

4.2 IDENTIFICAÇÃO E SELEÇÃO DAS PUBLICAÇÕES RECENTES SOBRE WETLANDS CONSTRUÍDOS NO BRASIL

Nesta fase dos trabalhos foi realizado um levantamento de publicações no sistema de busca de periódicos da CAPES, anais de eventos da ABES e do Grupo *Wetlands* Brasil, para identificação e seleção de trabalhos cujos temas fossem de encontro a esta investigação. Utilizou-se de palavras chaves estrategicamente para: a fase do tratamento (pós-tratamento de esgoto e tratamento terciário), ao tipo de sistema (*wetlands* construídos, alagados construídos, zona de raízes), ao tipo de escoamento e fluxo (*wetlands* de fluxo horizontal, *wetland* de fluxo horizontal subsuperficial e *wetland* de fluxo vertical), e quanto aos parâmetros de projeto (macrófitas aquáticas, tempo de detenção hidráulica, meio suporte). Vale destacar que a terminologia “lagoas de macrófitas” não foi alvo da pesquisa, pois de modo geral os estudos que adotam esta denominação estão associados ao campo de conhecimento da biologia.

Para refinamento da seleção foram adotados os seguintes critérios: publicações em forma de artigo; escritos na língua portuguesa e de data posterior ao ano de 2000. Ao final desta etapa foram encontrados 82 artigos científicos.

Figura 08: Fluxograma metodológico da pesquisa



Consoante a isto e de posse destes documentos foram realizadas leituras parciais, focando-se especialmente no resumo e metodologia dos trabalhos. Foram preenchidas fichas que abarcavam as seguintes questões:

- I. “Refere-se ao tratamento de esgotos sanitários domésticos ou similares?”;
- II. “O sistema *wetland* construídos é responsável pelo pós-tratamento de esgoto?”;
- III. “A pesquisa foi baseada em experimentos/monitoramentos realizados pelo autor?”;
- IV. “O experimento ocorreu no Brasil?”.

Com bases nos resultados foram incluídos e/ou excluídos os trabalhos. Para aqueles que obtiveram resposta positiva para as 04 questões constituíram a amostra da próxima etapa, a análise da qualidade. Esta avaliou se a publicação trazia ao leitor clareza quanto aos resultados, principalmente no que se refere aos parâmetros de projeto e resultados de eficiências obtidas.

Por fim, foram selecionadas 23 obras publicadas e realizadas leituras na íntegra para tabulação dos dados. Os resultados foram armazenados em planilha Excel contendo os seguintes itens:

- I. dados dos artigos (autor, título, ano, estado, cidade, nomenclatura do sistema);
- II. dados dos sistemas (unidades de tratamento de esgoto, tipo de fluxo e escoamento);
- III. parâmetros de projetos (vazão, tipos de vegetação, meio suporte, tempo de detenção hidráulica);
- IV. resultados de eficiência (DBO, DQO, SS, NTK, NH₃, NH₄⁺, NO₃⁻, Pt, P-PO₄).

A figura 09 ilustra a planilha utilizada para tabulação.

4.3 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Realizou-se uma análise dos resultados alcançados nas diversas modalidades de *wetlands* construídos, apresentando as principais características técnicas das unidades, avaliando os parâmetros de projetos adotados e as eficiências na remoção das concentrações de poluentes e nutrientes obtidas pelos sistemas.

É importante destacar que em muitos trabalhos os autores publicaram resultados referentes a mais de um experimento. Isto é, os artigos acadêmicos elucidavam uma análise comparativa do desempenho de várias unidades com diferentes características técnicas responsáveis pelo tratamento de um mesmo afluente. Em outros, os autores analisavam os resultados de *wetlands* com características semelhantes, mas responsáveis pelo pós-tratamento de diferentes afluentes.

Sendo assim, caso o artigo apresentasse a primeira situação, eram reunidos dados apenas de uma unidade de pós-tratamento. Em contrapartida, se a pesquisa enquadrasse na segunda situação, eram coletadas as informações de todos os sistemas. Em alguns casos, para um mesmo autor e uma mesma publicação foram apresentadas mais de uma informação. Assim, como resultado final desta pesquisa foram apresentados 29 *wetlands* construídos.

5 RESULTADOS

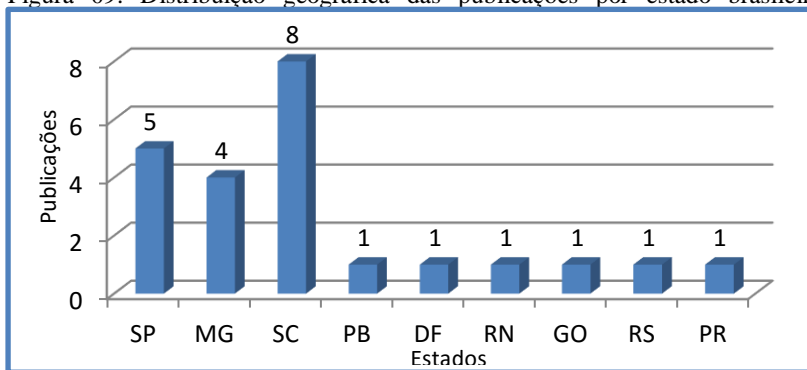
Foram selecionados os resultados de 15 trabalhos científicos em periódicos junto a base de dados da CAPES, além de 08 artigos publicados em anais de eventos da ABES e do Grupo Wetlands Brasil, totalizando 23 publicações. Todos estes artigos abordam o tratamento de esgotos por *wetland* construído no Brasil. Para isso, este item foi subdividido em 3 tópicos, que são: identificação dos artigos, apresentação das principais características das unidades do sistema de tratamento e apresentação dos resultados referentes às eficiências no tratamento de esgotos.

5.1 IDENTIFICAÇÃO DOS ARTIGOS

Conforme anteriormente salientado os artigos selecionados referem-se a trabalhos científicos relevantes sobre o tema, publicados a partir do ano de 2000. Entretanto, dentre os estudos avaliados, o mais antigo refere-se ao ano de 2003 e o mais novo publicado em 2015. Destaca especial para este último ano, pois foram avaliados 8 artigos.

No que se refere à localização das publicações, as mesmas estão distribuídas em 9 Estados, localizados nas regiões Sul, Sudeste, Centro-Oeste e Nordeste do Brasil. Destaca-se o Estado de Santa Catarina (Sul) com 8 trabalhos sobre o tema. A figura 09 ilustra a distribuição geográfica dos estudos.

Figura 09: Distribuição geográfica das publicações por estado brasileiro



Quanto aos autores participantes das publicações foi identificado um total de 66 autores, sendo que destes destacam-se Sezerino com 7 participações e Phillipi com 5. Cita-se ainda outros autores que

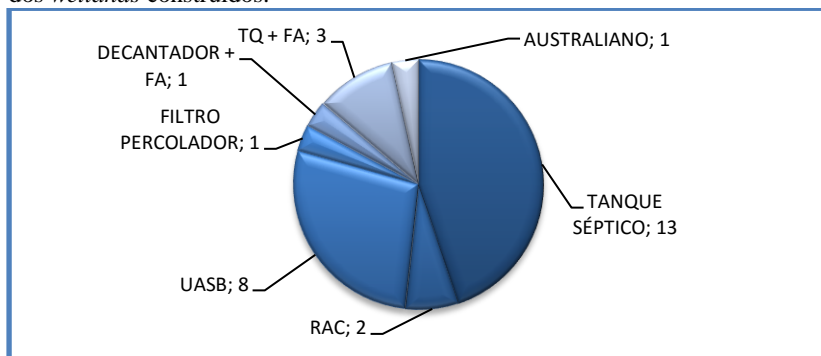
contribuíram com os resultados nas diversas publicações, tais como: Lapolli, von Sperling, Bento, Bastos, Hoffmann.

Em função da diversidade de combinações dos sistemas de tratamento de efluentes a partir do uso de macrófitas não há uma padronização das denominações. Este fato foi constatado nos artigos, sendo possível encontrar nomenclaturas, tais como: Alagados Construídos, Leitos Cultivados, Zona de Raízes e *Wetlands* Construídos.

5.2 PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS DAS UNIDADES DO SISTEMA DE TRATAMENTO

Seguindo as premissas estabelecidas na metodologia, foram avaliadas 29 unidades de *wetlands* construídos. Por se tratar de unidades de pós-tratamento de esgotos estes sempre precedem um processo de tratamento já consagrado. Assim, das 29 estações 13 unidades são compostas por Tanque Séptico (TQ), 08 por Reator Anaeróbio de Fluxo Ascendente (UASB), 02 por Reator Anaeróbio Compartimentado (RAC), 03 por Tanque Séptico seguindo de Filtro Anaeróbio Ascendente (FA), 01 Decantador seguindo de Filtro Anaeróbio Ascendente (FA), 01 Filtro Percolador e 01 sistema Australiano (lagoa anaeróbia seguida por lagoa facultativa), conforme destacado na figura 10.

Figura 10: Tipos de unidades de tratamento de esgotos instalados a montante dos *wetlands* construídos.

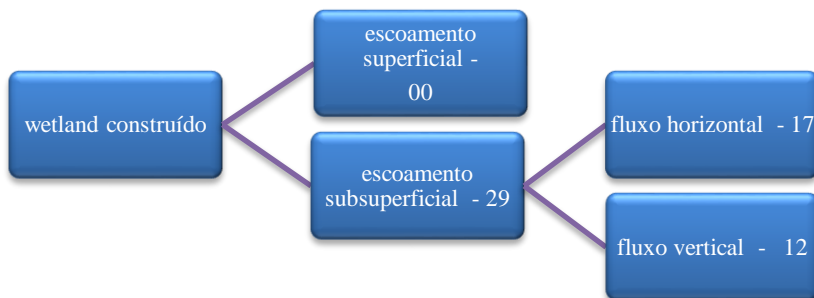


Tanque Séptico (TQ), Reator Anaeróbio de Fluxo Ascendente (UASB), Reator Anaeróbio Compartimentado (RAC), Tanque Séptico seguindo de Filtro Anaeróbio Ascendente (FA), Decantador seguindo de Filtro Anaeróbio Ascendente (FA), Australiano (lagoa anaeróbia seguida por lagoa facultativa)

Conforme exposto anteriormente, os *wetlands* construídos podem ser classificados em dois grandes grupos: de escoamento

superficial e de escoamento subsuperficial. Este último pode ser de fluxo horizontal ou de fluxo vertical. A figura 11 apresenta o resultado dos tipos de *Wetlands* identificados na pesquisa.

Figura 11: Tipos de *Wetlands* Construídos.



Observa-se que dentre todos os estudos não houve ocorrência dos *wetlands* de escoamento superficial. Este tipo de unidade está associado aos experimentos ou estações de tratamento que se denominam como lagoas de macrófitas e, muitas das vezes, são objetos de estudos das ciências biológicas. Em contra partida, os *wetlands* de escoamento subsuperficial são amplamente inserido dos estudos da engenharia sanitária ambiental.

Grande parte dos trabalhos desenvolvidos no Brasil aplica os *wetlands* em unidades pilotos. Por este motivo, as unidades, de modo geral, apresentam baixas vazões de projeto. Da mesma forma, as ETEs avaliadas são responsáveis pelo tratamento de pequenas quantidades de águas residuárias.

Considerando as ETEs avaliadas e suas contribuições afluentes, na grande maioria as vazões não ultrapassam a 5,0 m³/d. O quadro 04 abaixo ilustra as vazões classificadas em classes.

Quadro 04: Vazões dos sistemas de *wetlands* construídos.

Classes de Vazão (m ³ /d)	Núm. de sistemas (unid.)	Porcentagem (%)
< 1,0	4	14
1,1 - 5,0	7	24
5,1 - 15,0	5	17
> 15,1	1	3
Sem Informação	12	41
TOTAL	29	100

Outro parâmetro de projeto importante para a composição dos *wetlands* construídos é o tempo de detenção hidráulica (TDH). Segundo Giafferis (2011), o tempo de detenção hidráulica é o tempo médio esperado no qual uma molécula de água fluirá de uma extremidade do alagado à outra. Nas publicações em análise, os tempos de detenção hidráulica variam entre 1,1 (COSTA, 2011) e 10,1 dias (SOUSA et al.). Dentre os tempos de detenção hidráulicos intermediários destacam-se Calijuri et al. (2009) e Dias et al. (2011), ambos com 5,3 dias de detenção. Apesar de ser um parâmetro importante para o dimensionamento das unidades, 48% dos autores não apresentaram o tempo de detenção hidráulico.

Outro ponto de fundamental relevância relaciona-se a escolha das macrófitas que são empregadas nos *wetlands* construídos. Sezerino et al. (2015), afirmam que a escolha está relacionada à tolerância da planta quanto ao ambiente, seu potencial de crescimento e a presença dessas plantas nas áreas onde o sistema de tratamento será implantado.

Dentre os 29 sistemas de tratamento avaliados se destacaram o uso de *Zizania Bonariensis* e *Typha spp.*. Outras espécies citadas são: *Cyperus Papiro Nano*, *Juncus spp.*, *Orizo Sativa L.*, *Zantedeschia Aethiopica*, *Brachiaria*, *Iris Pseudocorus l.* *Pennisetum purpureum Schumach.* O quadro 05 apresenta as espécies utilizadas para cada sistema. Vale destacar que para compilação da pesquisa foi selecionada apenas uma espécie de macrófita por unidade de tratamento, mesmo que o pesquisador tenha utilizado mais de uma no alagado. Diante deste cenário, foi selecionada apenas a principal espécie plantada.

Quadro 05: Espécies de macrófitas utilizadas

Nome Científico	Nome Popular	Num de Sistemas (unid)	Porcentagem (%)	Autores
Typha spp.	Taboa	10	34	VALETIM (2003), MAZZOLA et al.(2004), SEZERINO et al.(2005), RODRIGUES et al.(2015), DIAS et al.(2011), MONTEIRO et al. (2013), PITALUGA et al. (2009), COSTA (2011), PELISSARI et al. (2011), ROSA et al. (2015)
Juncus spp.	Juncos	1	3	SOUSA et al.(2004)
Orizo Sativa L.	Arroz	1	3	SILVA (2007)
Zantedeschia Aethiopica	Copo de Leite	1	3	ZANELLA (2008)
Brachiaria spp.	Braquiária	1	3	CALIJURI et al.(2009)
Iris Pseudocorus L.	Iris Amarela	1	3	GIAFFERIS (2011)
Pennisetum Purpureum Schumach	Capim Elefante	2	7	REINALDO et al. (2012), MACHADO et al. (2009)
Cyperus Papiros Nano	Papiro	4	14	TREIN et al.(2015), SEZERINO et al.(2015), MOURÃO et al. (2015)
Zinopsis Bonariensis	Espanada	7	24	ROUSSO et al.(2015), SEZERINO et al.(2015), PHILLIPI et al.(2006)
Cynodon Dactylon Pers	Tifon 95	1	3	MAJANTE et al. (2015)
Total		29	100	

A mesma versatilidade pode ser aplicada aos materiais utilizados como meio suporte. O meio suporte funciona como base para as plantas e proporciona superfície para adesão de biofilme, funcionando como área ativa no tratamento dos efluentes.

Como meio suporte clássico, além de pedra brita também é utilizado solo com baixo teor de argila. Neste sentido, as publicações apresentam em maior frequência o uso de brita e brita associada a areia. Estes casos representam 52% da pesquisa. Outros materiais utilizados pelos pesquisadores são cascalho, solo, bambu, saibro, casca de arroz e argila, conforme destacado no quadro 06.

Quadro 06: Meio suporte utilizado nos *wetlands* em estudo.

Meio Suporte	Num. de Sistemas (unid.)	Porcentagem (%)	Autores
Brita	7	24	VALETIM (2003), MAZZOLA et al. (2004), CALIJURI et al. (2009), REINALDO et al. (2012), DIAS et al. (2011), COSTA (2011), MAJANTE et al. (2015)
Areia + Cascalho	1	3	SOUSA et al. (2004)
Latossolo + Areia	1	3	SILVA (2007)
Bambu	1	3	ZANELLA (2008)
Brita + Areia	8	28	GIAFFERIS (2011), TREIN et al.(2015), SEZERINO et al. (2015), RODRIGUES et al. (2015), MONTEIRO et al. (2013), PITALUGA et al. (2009), PELISSARI et al. (2011)
Brita + Areia+ Solo	1	3	ROSA et al. (2015)
Areia + Saibro + Casca de arroz	1	3	ROUSSO et al. (2015)
Areia + Saibro + Argila + Casca de arroz	2	7	SEZERINO et al. (2015),
Areia	1	3	SEZERINO et al. (2005)
Areia + Argila + Casca de arroz	4	14	PHILLIPI et al. (2015)
Cerâmica	1	3	MOURÃO et al. (2015)
Não informado	1	3	MACHADRO et al. (2009)
Total	29	100	

5.3 DESEMPENHO DOS SISTEMAS DE TRATAMENTO DE ESGOTO POR *WETLANDS*

Como registrado por Salati et al. (2000), os sistemas de *wetlands* construídos têm sido usados nos tratamentos secundário e terciário de águas residuárias e promovido efluentes finais de boa qualidade, tornando possível o seu lançamento em corpos d'água naturais, ou permitindo a sua reutilização para fins não considerados nobres.

Tal afirmativa, de modo geral, confirma com a verificação dos resultados publicados no Brasil nos últimos anos. Todavia, a partir da análise foi possível perceber uma variação de comportamento nos *wetlands* construídos para alguns parâmetros. Destaca-se a remoção de matéria orgânica, nos quais obtiveram os melhores resultados. Já para a remoção de nitrogênio as variações foram mais acentuadas e os resultados menos expressivos. Evidencia-se, também, a diferença dos parâmetros analisados nas publicações, não havendo uma similaridade dos resultados, dificultando a análise comparativa entre todos os sistemas. O quadro 07 ilustra os resultados para os sistemas analisados.

Quanto à remoção da matéria orgânica, observam-se, de um modo geral, resultados satisfatórios, pois, das 17 unidades avaliadas 11 apresentaram resultados com remoção de DBO_5 maior do que 70%. Destaca-se o *wetland* construído de Silva (2007) que obteve eficiências relativas de 99% com concentrações afluente de 150 mg/L e efluente de 01 mg/L. Antagonicamente a unidade de Zanella (2008) apresentou o menor valor, sendo 26%, concentração afluente de 155 mg/L concentração efluente de 115 mg/L.

Para Zanella (2008) a baixa eficiência encontrada nesta unidade de pesquisa pode estar relacionada à variação dos valores de concentração de DBO_5 do esgoto bruto, nos quais foram gerados em uma instituição de ensino. Outra explicação das baixas eficiências encontradas neste sistema vincula-se provavelmente a características dos anéis de bambu como meio suporte para as plantas.

Todos os sistemas os *wetlands de escoamento subsuperficial horizontal* são compatíveis aos critérios estabelecidos pela Resolução CONAMA nº 430/2011, no que se refere a DBO_5 (Figura 12). Entretanto, apenas as unidade de estudadas por Giafferis (2011), Zanella (2008) e Rosa et al. (2015) demonstraram eficiências menores do que 60% de remoção nas concentrações.

Quadro 07: Principais resultados obtidos quanto à eficiência no tratamento por *wetlands*.

Parâmetro	Tipo de WC	Eficiências (%)	Autores	Contagem	Média	Mediana
DBO ₅	WFV	Máximo: 99	SILVA (2007)	17	69,13	73
	WFHS	Mínimo: 26	ZANELLA (2008)			
DQO	WFHS	Máximo: 98	PHILLIPI et al. (2015)	25	71,27	76
	WFHS	Mínimo: 40	ZANELLA (2008)			
SS	WFV	Máximo: 98	SILVA (2007)	19	63,71	67
	WFHS	Mínimo: -1	ROUSSO et al. (2015)			
NTK	WFV	Máximo: 94	SILVA (2007)	9	45,8	49
	WFHS	Mínimo: 5	REINALDO et al. (2012)			
NH ₄	WFHS	Máximo: 90	ROUSSO et al. (2015)	15	52,6	51
	WFV	Mínimo: 16	TREIN et al. (2015)			
NH ₃	WFHS	Máximo: 66	DIAS et al. (2011)	9	26,06	17
	WFHS	Mínimo: -16	VALETIM (2003)			
NO ₃	WFV	Máximo: 64	MAZZOLA et al. (2004)	5	33,26	47
	WFHS	Mínimo: -30	PELISSARI et al. (2011)			
Pt	WFV	Máximo: 99	SILVA (2007)	10	33,14	26,5
	WFHS	Mínimo: 01	ZANELLA (2008)			
P-PO ₄	WFHS	Máximo: 98	ROUSSO et al. (2015)	10	65,16	71
	WFHS	Mínimo: 00	SEZERINO et al. (2005)			

Figura 12: Concentrações efluentes obtidas quanto à remoção de DBO_5 e quanto ao atendimento a CONAMA n.º 430/2011 nos *wetlands* de escoamento subsuperficial horizontal.

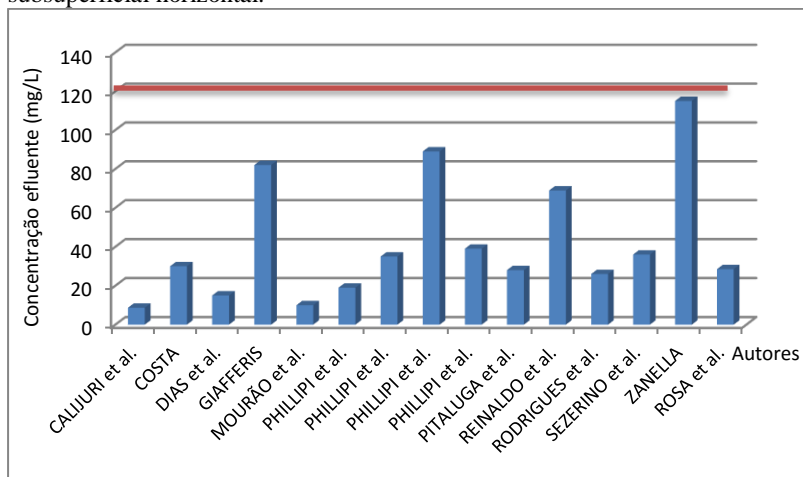
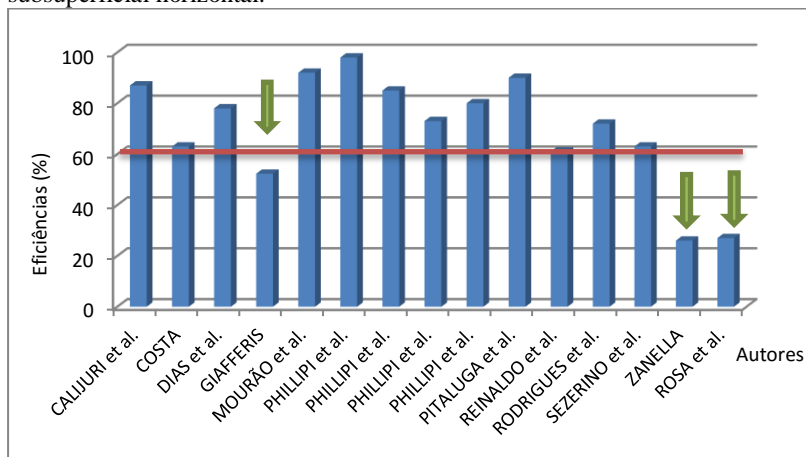


Figura 13: Eficiências obtidas quanto à remoção de DBO_5 e quanto ao atendimento a CONAMA n.º 430/2011 nos *wetlands* de escoamento subsuperficial horizontal.



Por sua vez, as três unidades de fluxo vertical que apresentaram resultados referente ao parâmetro DBO_5 , todas enquadram nas premissas da legislação, sendo as concentrações efluentes menores que 120 mg/L e

eficiências de remoção acima de 60%. As figuras 14 e 15 ilustram as condições de lançamento dos WFV.

Figura 14: Concentrações efluentes obtidas quanto à remoção de DBO_5 e quanto ao atendimento a CONAMA n.º 430/2011 nos *wetlands* de escoamento subsuperficial vertical.

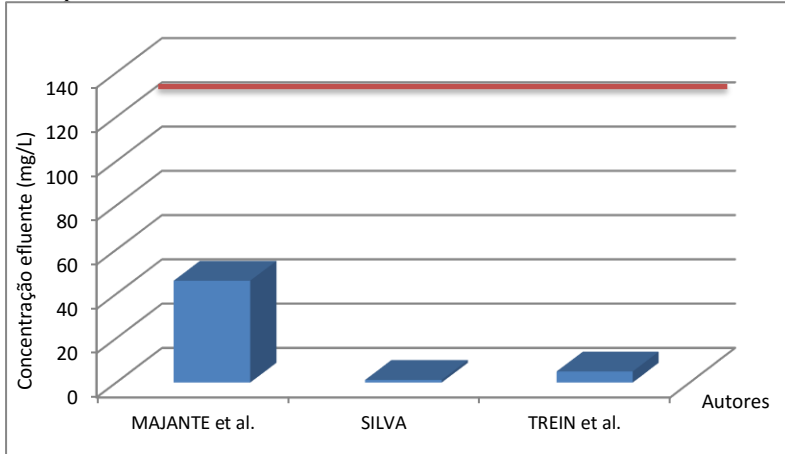
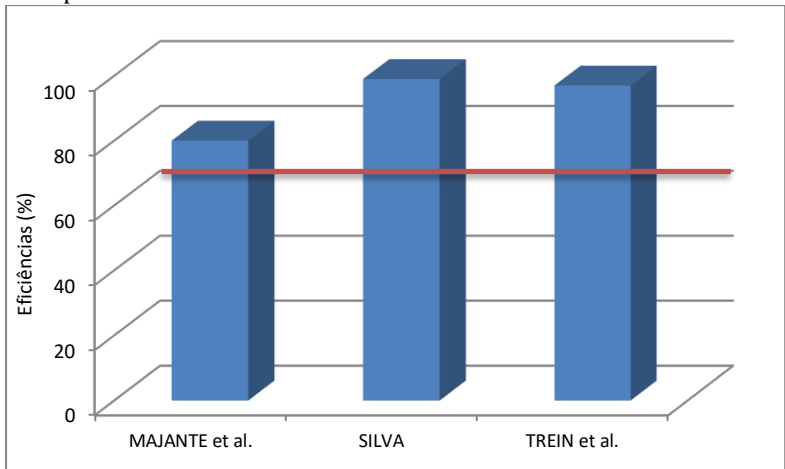


Figura 15: Eficiências obtidas quanto à remoção de DBO_5 e quanto ao atendimento a CONAMA n.º 430/2011 nos *wetlands* de escoamento subsuperficial vertical.



Assim, como para a DBO_5 , houve uma variação significativa em relação aos valores encontrados para a DQO entre os WCs analisados. O sistema que apresentou a maior eficiência foi o de Phillipi et al. (2006) como 98% de remoção de DQO (Conc. Afluente = 1.005 mg/L – Conc. Efluente = 19 mg/L) instalado no município de Agronômica – SC. E mais uma vez, o sistema monitorado por Zanella (2008) apresentou os níveis mais baixo de remoção de DQO.

Phillipi et al. (2006) justificam que dentre os experimentos realizados, o de Agronômica apresentou o menor valor, pois neste sistema houve a contribuição de águas residuárias agroindustriais. Nos demais experimentos destes autores localizados nos municípios de Videira, Tubarão e São Joaquim, os valores obtidos na remoção de DQO foram de 69%, 82%, 86%, respectivamente.

De modo geral as eficiências obtidas nos sistemas avaliados, no que se refere à remoção de DQO, apresentam bons resultados, sendo que 17 das 25 ETEs obtiveram valores acima de 70% de remoção deste parâmetro. Tal fato confirmam as descrições de autores já consagrados na literatura científica, em que as eficiências nas remoções de DQO estão acima dos 70%. Dentre estes autores apontam-se: Kadlec & Knight (1996); Wendland & Chiarawatchai (2006); Salati.(2003); Olijnyk, 2008; Sezerino & Philippi, 2003; dentre outros.

Da mesma forma que para os parâmetros relativos à matéria orgânica, para aqueles que denotam os sólidos suspensos, os WCs forneceram um efluente com concentrações bastante reduzidas. Com destaque aos estudos de Silva (2007), que apresenta em um *wetland* de fluxo vertical 98% de remoção de sólidos suspensos. Por sua vez, a unidade de Rouso et al. (2015) composta por escoamento subsuperficial horizontal, macrófitas *Zinopsis Bonariensis* e meio filtrante de areia, saibro e casca de arroz apresentam, contrariamente ao esperado, um aumento nas concentrações de sólidos (Conc. Afluente = 77 mg/L – Conc. Efluente = 78 mg/L). Para os autores, tal situação justifica-se por provável carreamento inesperado de argila sobre o WC, como também pelo reflexo do longo período de operação do sistema. Entretanto, as eficiências de remoção de sólidos se mostraram satisfatórias, sendo superior a 65%. Esta situação reflete a mesma encontrada nos relatos de Calijuri et al. (2009); Phillipi et al. (2006); Sezerino et al. (2005, 2015); Zanella (2008).

Comumente, os autores declaram que a remoção de sólidos é proporcionada pela retenção dos sólidos no meio suporte através dos processos de filtração e sedimentação. As raízes das macrófitas também exercem papel fundamental através da filtração e adsorção.

Outros aspectos apontados pelas publicações referem-se à remoção de nutrientes nos sistema dos *wetlands* construídos. Ao que se refere ao nitrogênio foram encontrados avaliações de quatro diferentes formas, sendo: nitrogênio total Kjeldahl (NTK), nitrogênio amoniacal (NH_3), nitrogênio amoniacal ionizado (NH_4^+) e nitrato (NO_3^-).

Os resultados de NTK apresentaram-se pouco significativos, pois apenas 09 estudos expõem amostras deste parâmetro. Entretanto, os resultados demonstraram condicentes a outras publicações sobre o tema. Olyjnyk et al. (2007); Kadlec e Knight (1996); Souza et al. (2000), em suas pesquisas, identificaram uma remoção de NTK maior que 70%.

Assim, quanto a remoção de NTK o valor máximo foi de 94% (Conc. Afluente = 45 mg/L – Conc. Efluente = 03 mg/L), alcançado por Silva (2007), e o valor mínimo de 5% (Conc. Afluente = 59 mg/L – Conc. Efluente = 56 mg/L), obtido por Reinaldo et al. (2012). Em relação a todos as ocorrências a média foi de 55,6%, a mediana de 71,5% e o desvio padrão de 37,1.

Já com maior representatividade no universo pesquisado, com 15 referencias, o nitrogênio amoniacal ionizado (NH_4^+) apresentou valores que variaram entre 90% a 16%, Rouso et al. (2015) e Sezerino et al. (2005), respectivamente. Os primeiros autores inferem-se que a remoção pode estar relacionada principalmente à adsorção no material filtrante, ou por assimilação das plantas, visto a ausência de ambiente favorável à nitrificação que foram encontradas durante o experimento. Já Sezerino et al. (2005) ponderam que as baixas remoções não devem ser consideradas como uma deficiência, e sim uma potencialidade para o reúso do efluente na agricultura ou aquicultura.

Para o nitrogênio amoniacal (NH_3), Dias et al. (2011) em um *wetland* fluxo horizontal amostraram boa remoção no efluente final do sistema, sendo concentração afluente de 46 mg/L e efluente de 16 mg/L. Estes autores divulgaram remoção de NH_3 da ordem de 66%. Por sua vez, Valetim (2003) não obteve sucesso. Os monitoramentos realizados identificaram um aumento nos teores de nitrogênio amoniacal. Assim, dentre os 9 (nove) estudos que divulgaram resultados para este parâmetro, este foi o que apresentou acréscimo nas concentrações no efluente do WC.

Conforme exposto por Valetim (2003), o oxigênio liberado pelas macrófitas não foi suficiente para oxidar o nitrogênio-amoniacal (NH_3), e que ocorreu hidrólise do material particulado, gerando este tipo de nitrogênio. Esta questão pode também justificar outros experimentos, tais com de Mazzola et al. (2004), Zanella (2008) e Giafferis (2011), os

quais apontaram pouca remoção nas concentrações de seus sistemas, não ultrapassando a 17%.

Finalizando as forma de nitrogênio e dentro dessa ótica, o nitrato não foi amplamente qualificado pelos autores, obtendo-se valor máximo de remoção das concentrações de 64% com Mazzola et al. (2004). Para estes autores o comportamento poderia ser atribuído ao processo de desnitrificação, onde todo oxigênio fornecido pela drenagem do sistema teria sido consumido pelas bactérias facultativas nas primeiras horas, estabelecendo-se uma condição anóxica. Posteriormente, as bactérias facultativas, na ausência de oxigênio, utilizam o nitrato como principal acceptor de elétron, liberando para o meio e, conseqüentemente, para a atmosfera, nitrogênio na forma de gás.

Alguns autores citam que a combinação de WC de diferentes fluxos (sistemas híbridos) é considerada a melhor opção para promover a completa remoção de nitrogênio até a sua forma atmosférica (ROUSSEAU, 2005; NORVEE et al., 2005; TUSZYŃSKA & OBARSKAPEMPKOWIAK, 2008 apud MANNARINO, 2003).

Vale destacar que dentre os monitoramentos das diversas formas de nitrogênio não houve uma padronização dos resultados. Assim, WFHS ou WFV ora se mostraram com boa capacidade de remoção, ora com baixos resultados, ou até mesmo com acréscimo de nitrogênio na concentração do efluente final.

Além disso, avaliando os resultados de remoção das concentrações de nutrientes foram compiladas as informações referentes ao fósforo total (Pt) e ortofosfato reativo (P-PO³⁻⁴). Segundo Quege et al. (2013), nos *wetlands* construídos os principais mecanismos para remoção de fósforo são a sedimentação e a precipitação, uma vez que o meio suporte têm baixa capacidade de adsorção e a exportação do fósforo do sistema ocorre devido à absorção pela vegetação.

Quege et al. (2011) citam ainda Brix (1987), Brix, Arias e Johansen (2003), Mayorca (2007), Ash e Truong (2003), os quais revelaram altas taxas de remoção de fósforo, variando entre 11% a 98% de diminuição das concentrações. Avaliando os dados de Valetim (2003); Mazzola et al. (2004); Souza et al. (2007); Silva (2007); Giafferis (2011); Reinaldo et al. (2012); Zanella (2008); e Mourão et al. (2015); Dias et al. (2011) e Rosa et al. (2015), identificou-se, para fósforo total (Pt), grandes discrepâncias, sendo o valor mínimo encontrado de 1% e máximo de 99,6%

Para Zanella (2008) o motivo pelo qual o *wetland* construído apresentou uma baixa remoção (Conc. Afluente = 08 mg/L – Conc.

Efluente = 07 mg/L) se dá pela interferência do conjunto meio-suporte x vegetação. Conforme já citado este autor utilizou-se de bambu como meio suporte e macrófitas *Zantedeschia Aethiopica* (copo de leite). Em outros experimentos o mesmo autor identificou melhores remoção de Pt para meio suporte composto por brita.

Por outro lado, Silva (2007) obteve uma remoção no sistema de 99,6% (Conc. Afluente = 09 mg/L – Conc. Efluente = 0,3 mg/L). Tal fato foi relevado em função da acidez do meio suporte (solo + areia) no qual têm capacidade de acumular maior quantidade de ânions do que cátions. Adicionalmente, os processos de imobilização microbiana e adsorção pelas plantas contribuíram para a redução da concentração de fósforo.

Quanto as dados referentes a remoção das concentrações de (P-PO₄³⁻) maior similaridade são encontradas. A semelhança de Pt a maior remoção obtida foi próxima a totalidade, atingindo a percentagem de 98%, com concentração final de 01 mg/L (ROUSSO et al., 2015).

Conforme exposto por Tanner; Sukias; Upsdell (1999) apud Rouso et al. (2015), espera-se que a remoção de fósforo diminua ao longo da operação do sistemas, pois a adsorção responsável pela remoção de fósforo é passível de saturação.

Já Sezerino et al. (2005) em suas verificações constataram nenhuma alteração de ortofosfatos reativo entre afluente e efluente no módulo de filtro plantado com macrófitas de escoamento subsuperficial com fluxo horizontal. Outros resultados coletados, tais como: Rodrigues et al. (2015); Phillipi et al. (2006) e Sezerino et al. (2015); obtiveram eficiências maiores do que 60% para P-PO₄³⁻.

Os quadros 09, 10, 11, 12, 13, 14 apresentam o resumo dos resultados dos desempenhos dos *wetlands* quanto à remoção de concentrações e suas eficiências por modalidade.

Quadro 09: Resultados obtidos quanto às concentrações e remoções de BDO₅, DQO e SS nos *wetlands* de escoamento subsuperficial de fluxo horizontal

Modalidade	Autores	Q (m ³ /d)	DBO ₅			DQO			SS		
			Afluente (mg/L)	Efluente (mg/L)	Eficiência (%)	Afluente (mg/L)	Efluente (mg/L)	Eficiência (%)	Afluente (mg/L)	Efluente (mg/L)	Eficiência (%)
Wetland Subsuperficial Horizontal (WFHS)	CALIJURI et al.	0,04	66	9	87	-	-	-	50	17	67
	COSTA	0,31	80	30	63	166	46	72	46	7	85
	DIAS et al.	0,04	71	15	78	-	-	-	-	-	-
	GIAFFERIS	17,28	172	82	52	245	90	63	499	430	14
	MOURÃO et al.	-	126	10	92	238	28	88	-	-	-
	PHILLIPI et al.	-	979	19	98	1.005	19	98	224	104	53
	PHILLIPI et al.	-	232	35	85	485	87	82	640	84	87
	PHILLIPI et al.	-	330	89	73	371	117	69	-	-	-
	PHILLIPI et al.	-	201	39	80	476	68	86	50	22	56
	PITALUGA et al.	0,02	260	28	90	611	132	78	-	-	-
	REINALDO et al.	0,04	180	69	61	391	109	72	430	172	60
	RODRIGUES et al.	0,20	114	26	72	-	-	-	-	-	-
	ROUSSO et al.	0,07	-	-	-	880	109	88	77	78	-1
	SEZERINO et al.	0,07	99	36	63	180	43	76	73	13	81
	VALETIM	0,03	-	-	-	135	54	60	55	20	64
	ZANELLA	0,03	155	115	26	130	78	40	110	35	68
ROSA et al.	0,29	39	29	27	116	55	53	-	-	-	

Quadro 10: Resultados obtidos quanto às concentrações remoções de BDO₅ DQO e SS nos *wetlands* de escoamento subsuperficial de fluxo vertical

Modalidade	Autores	Q (m ³ /d)	DBO ₅			DQO			SS		
			Afluente (mg/L)	Efluente (mg/L)	Eficiência (%)	Afluente (mg/L)	Efluente (mg/L)	Eficiência (%)	Afluente (mg/L)	Efluente (mg/L)	Eficiência (%)
Wetland Subsuperficial Vertical (WFFV)	MACHADO et al.	-	-	-	-	89	17	81	-	-	-
	MAJANTE et al.	-	229	46	80	561	245	56	218	61	72
	MAZZOLA et al.	0,19	-	-	-	145	39	73	33	17	49
	MONTEIRO et al.	0,35	-	-	-	457	99,00	78	-	-	-
	PELISSARI et al.	0,35	-	-	-	479	112	77	71	29	59
	SEZERINO et al.	-	-	-	-	505	88	83	86	17	80
	SEZERINO et al.	-	-	-	-	367	64	83	115	11	90
	SEZERINO et al.	-	-	-	-	396	105	73	-	-	-
	SEZERINO et al.	-	-	-	-	678	76	89	451	82	82
	SILVA	0,002	150	1	99	-	-	-	114	2	98
	SOUSA et al.	-	-	-	-	225	49	78	-	-	-
	TREIN et al.	0,51	198	5	97	250	18	93	50	3	94

Quadro 11: Resultados obtidos quanto às concentrações e remoções de NTK, NH_4^+ e NH_3^+ nos *wetlands* de escoamento subsuperficial de fluxo horizontal

Modalidade	Autores	Q (m^3/d)	NTK			NH_4^+			NH_3^+		
			Afluente (mg/L)	Efluente (mg/L)	Eficiência (%)	Afluente (mg/L)	Efluente (mg/L)	Eficiência (%)	Afluente (mg/L)	Efluente (mg/L)	Eficiência (%)
Wetland Subsuperficial Horizontal (WFHS)	CALIJURI et al.	0,04	44	13	71	-	-	-	-	-	-
	COSTA	0,31	34	30	12	-	-	-	30	26	13
	DIAS et al.	0,04	58	13	78	-	-	-	46	16	66
	GIAFFERIS	17,28	42	37	13	-	-	-	29	28	4
	MOURÃO et al.	-	-	-	-	-	-	-	5	3	44
	PHILLIPI et al.	-	-	-	-	49	16	67	-	-	-
	PHILLIPI et al.	-	-	-	-	18	11	39	-	-	-
	PHILLIPI et al.	-	-	-	-	34	15	56	-	-	-
	PHILLIPI et al.	-	-	-	-	39	21	46	-	-	-
	PITALUGA et al.	0,02	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	REINALDO et al.	0,04	59	56	5	-	-	-	-	-	-
	RODRIGUES et al.	0,20	-	-	-	47	2	81	-	-	-
	ROUSSO et al.	0,07	-	-	-	58	6	90	-	-	-
	SEZERINO et al.	0,07	-	-	-	19	16	16	-	-	-
	VALETIM	0,03	-	-	-	-	-	-	19	22	-16
ZANELLA	0,03	-	-	-	-	-	-	101	95	6	
ROSA et al.	0,29	7	6	18	-	-	-	-	-	-	

Quadro 12: Resultados obtidos quanto às concentrações e remoções de NTK, NH_4^+ e NH_3^+ nos *wetlands* de escoamento subsuperficial de fluxo vertical

Modalidade	Autores	Q (m ³ /d)	NTK			NH ₄ ⁺			NH ₃ ⁺		
			Afluente (mg/L)	Efluente (mg/L)	Eficiência (%)	Afluente (mg/L)	Efluente (mg/L)	Eficiência (%)	Afluente (mg/L)	Efluente (mg/L)	Eficiência (%)
Wetland Subsuperficial Vertical (WFV)	MACHADO et al.	-	-	-	-	285	143	50	-	-	-
	MAJANTE et al.	-	40	20	50	34	16	53	-	-	-
	MAZZOLA et al.	0,19	-	-	-	-	-	-	34	28	17
	MONTEIRO et al.	0,35	-	-	-	-	-	-	50	21	58
	PELISSARI et al.	0,35	-	-	-	50	23	54	-	-	-
	SEZERINO et al.	-	-	-	-	93	72	23	-	-	-
	SEZERINO et al.	-	-	-	-	58	48	17	-	-	-
	SEZERINO et al.	-	-	-	-	56	25	55	-	-	-
	SEZERINO et al.	-	-	-	-	28	14	50	-	-	-
	SILVA	0,002	45	3	94	-	-	-	32	2	95
	SOUSA et al.	-	62	17	72	-	-	-	-	-	-
	TREIN et al.	0,51	-	-	-	50	3	94	-	-	-

Quadro 13: Resultados obtidos quanto às concentrações e remoções de NO_3^- , P_i e P-PO_4^{3-} nos *wetlands* de escoamento subsuperficial de fluxo horizontal

Modalidade	Autores	Q (m^3/d)	NO_3			Pt			P- PO_4		
			Afluente (mg/L)	Efluente (mg/L)	Eficiência (%)	Afluente (mg/L)	Efluente (mg/L)	Eficiência (%)	Afluente (mg/L)	Efluente (mg/L)	Eficiência (%)
Wetland Subsuperficial Horizontal (WFHS)	CALIJURI et al.	0,04	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	COSTA	0,31	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	DIAS et al.	0,04	-	-	-	10	6	38	-	-	-
	GIAFFERIS	17,28	3	2	30	13	13	7	-	-	-
	MOURÃO et al.	-	-	-	-	1	0	86	-	-	-
	PHILLIPI et al.	-	-	-	-	-	-	-	29	6	79
	PHILLIPI et al.	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	PHILLIPI et al.	-	-	-	-	-	-	-	27	5	81
	PHILLIPI et al.	-	-	-	-	-	-	-	19	9	53
	PITALUGA et al.	0,02	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	REINALDO et al.	0,04	11	6	47	26	14	45	-	-	-
	RODRIGUES et al.	0,20	-	-	-	-	-	-	15	2	81
	ROUSSO et al.	0,07	-	-	-	-	-	-	38	1	98
	SEZERINO et al.	0,07	-	-	-	-	-	-	3	3	0
	VALETIM	0,03	1	0	55	3	3	6	-	-	-
ZANELLA	0,03	-	-	-	8	7	1	-	-	-	
ROSA et al.	0,29	-	-	-	2	1	11	-	-	-	

Quadro 14: Resultados obtidos quanto às concentrações e remoções de NO_3^- , P_i e P-PO_4^{3-} nos *wetlands* de escoamento subsuperficial de fluxo vertical

Modalidade	Autores	Q (m^3/d)	NO_3			Pt			PO_4		
			Afluente (mg/L)	Efluente (mg/L)	Eficiência (%)	Afluente (mg/L)	Efluente (mg/L)	Eficiência (%)	Afluente (mg/L)	Efluente (mg/L)	Eficiência (%)
Wetland Subsuperficial Vertical (WFV)	MACHADO et al.	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	MAJANTE et al.	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	MAZZOLA et al.	0,19	1	0	64	11	9	15	-	-	-
	MONTEIRO et al.	0,35	-	-	-	-	-	-	23	6	72
	PELISSARI et al.	0,35	2	3	-30	-	-	-	-	-	-
	SEZERINO et al.	-	-	-	-	-	-	-	36	13	63
	SEZERINO et al.	-	-	-	-	-	-	-	19	9	53
	SEZERINO et al.	-	-	-	-	-	-	-	27	11	59
	SEZERINO et al.	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	SILVA	0,002	0	0	47	9	0	100	-	-	-
	SOUSA et al.	-	-	-	-	8	4	52	-	-	-
	TREIN et al.	0,51	-	-	-	-	-	-	140	10	93

6 CONCLUSÃO

Através da compilação dos dados de diversas publicações que tratam sobre o uso de *wetlands* construídos no Brasil para o tratamento de esgoto sanitário, foi possível identificar as principais características e o quanto estas unidades são eficientes na remoção das concentrações de poluentes e nutrientes.

Percebe-se que não há uma uniformização dos principais parâmetros de projeto e operação adotados, tampouco uma predominância nas formas de escoamento utilizada. Isto pode ser justificado em função que os sistemas avaliados são unidades experimentais e por este motivo a adoção critérios diferenciados se torne de fundamental importância para melhor conhecimento da tecnologia.

Em todos os casos estudados, os monitoramentos foram realizados em sistemas de menor porte, precedidos por unidades de tratamento com processos já consagrados, e que tratam os esgotos de pequenos estabelecimentos e ou pequenas comunidades.

Os *wetlands* construídos referem-se a um tipo de tratamento biológico dos esgotos, sendo assim, suscetíveis a intempéries ambientais e do ciclo de vida biológico. Para mais, as variações de métodos, tais como: o tempo de detenção hidráulica; o tipo de escoamento; as espécies de macrófitas utilizadas; o material do meio suporte; dentre outros critérios, podem interferir nos resultados finais.

Uma grande quantidade de espécies de macrófitas tem sido empregada nos sistema de tratamento. Da mesma forma que diversos tipos de materiais são utilizados e testados para meio suporte. Há ainda, as forma de escoamento e fluxos que podem contribuir para a otimização dos sistemas em vista aos objetivos finais de tratamento.

As publicações exibidas e avaliadas apresentam para os parâmetros de qualidade da água variações significativas nos resultados. Mas em todos os casos, as reduções das concentrações de poluentes e nutrientes equivaleram-se aos resultados esperados pelos autores e atendem a legislação vigente.

Para DBO₅ atingiu-se eficiência máxima de 99% e média entre os estudos de 70,9% de remoção. De forma análoga a DQO alcançou máximo desempenho de 98% de remoção e média de 72,3%. Os sistemas de pós-tratamento foram responsáveis, em média, por cerca de 62% da remoção dos sólidos em suspensão, com resultados que variaram entre 98% e 14%.

O nitrogênio total Kjeldahl (NTK) apresentou eficiência máxima de 94%. Já o nitrogênio amoniacal (NH₃⁺) o maior valor foi de 66% e média de 26,6%. Contribuiu excessivamente para queda desta média, o fato de um dos resultados apresentar acréscimo das concentrações no efluente.

O nitrogênio amoniacal ionizado (NH_4^+) com 15 referências, obteve média de 52,6 %, sendo o valor máximo de 90% e mínimo de 16%. O nitrato (NO_3^-), elucidado por apenas 5 autores, foi o parâmetro com maior desvio padrão e também o que obteve a menor máxima, com 64% de remoção das concentrações.

Em relação aos parâmetros fósforo total (Pt) e ortofosfato reativo (P-PO_4^{3-}), ambos os parâmetros não apresentaram uniformidade nos resultados, inclusive com um sistema que apresentou acréscimo deste composto. Em síntese as amostras de Pt e P-PO_4^{3-} obtiveram média de 33,1% e 65,2%.

Destaca-se, finalmente, as recentes publicações que apontam a utilização de *wetlands* construídos para vazões afluentes mais significativas, conforme apresentado por Trein et al. (2015). Estes autores reportam o uso de WC verticais para comunidade de 100 habitantes, com desempenho de tratamento de até 93% de remoção de DQO, 97% de remoção de DBO, 94% de remoção de SS, 93% de remoção de N-NH_4^+ e 93% de remoção de P-PO_4^{3-} .

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA, R.A.; Oliveira, L.F.C.; KLIEMANN, H. J. Eficiência de espécies vegetais na purificação de esgoto sanitário. **Pesquisa Agropecuária Tropical (Agricultural Research in the Tropics)**, v. 37, n. 1, p. 1-9, 2007.

ANDRADE, Helisson Henrique Borsato de. **Avaliação do desempenho de sistemas de zona de raízes (*wetlands* construídas) em escala piloto aplicados ao tratamento de efluente sintético**. 2015. 87 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2015.

AVELAR, J. C. **Avaliação da escória de Aciaria (ld) como leito cultivado e leito filtrante no pós-tratamento de efluente de reator UASB compartimentado**. 2008. Tese de Doutorado. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2008.

BARROS, R. T. V.; CASTRO, A. A.; COSTA, A. M. L. M.; CHERNICHARO, C. A. L.; VON SPERLING, E.; MÖLLER, L. M.; HELLER, L.; CASSEB, M. M. S.; VON SPERLING, M. **Saneamento**. Belo Horizonte: Escola de Engenharia da UFMG, 1995. (Manual de saneamento e proteção ambiental para os municípios – volume 2).

BASSOI, L. J; GUAZELLI, M. R.. Controle Ambiental da água. **PHILIPPI Jr, A.; ROMÉRO, M. de A.; BRUNA, GC Curso de gestão ambiental. Barueri: Manole**, p. 53-99, 2004.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente, dos Recursos Hídricos e da Amazônia Legal. **A Caminho da Agenda 21 Brasileira: Princípios e Ações 1992/97**. Brasília, 1997.

_____. **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. Alterado pela Resolução CONAMA 397/2008. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/conama>>. Acesso em: 01 agosto. 2016.

_____. **Resolução nº 430, de 13 de maio de 2011**. Dispõe sobre as condições de lançamento de efluentes, complementa e altera a Resolução nº 357, de 17 de março de 2005, do Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA. 9 p.

Disponível

em:http://www.legislacao.mutua.com.br/pdf/diversos_normativos/conama/2011_CONAMA_RES_430.pdf. Acesso em: 01 agosto. 2016.

_____. Fundação Nacional de Saúde. Manual de Saneamento. Brasília, 2004.

_____. Agência Nacional de Águas. Ministério do Meio Ambiente (Org.). **Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil**: informe 2014. Brasília: ANA, 2010. 76 p.

_____. Lei Federal nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997. **Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, regulamenta o inciso XIX do art. 21 da Constituição Federal, e altera o art. 1º da Lei nº 8.001, de 13 de março de 1990, que modificou a Lei nº 7.990, de 28 de dezembro de 1989**. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/LEIS/L9433.htm>. Acesso em 12 jan 2016.

_____. Lei nº. 11.445 de 5 de Janeiro de 2007. **Estabelece diretrizes nacionais para o saneamento básico; altera as Leis nos 6.766, de 19 de dezembro de 1979, 8.036, de 11 de maio de 1990, 8.666, de 21 de junho de 1993, 8.987, de 13 de fevereiro de 1995; revoga a Lei no 6.528, de 11 de maio de 1978; e dá outras providências**. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2007/lei/111445.htm>. Acesso em 12 jan 2016.

CALIJURI, M. L.; BASTOS, R. K. X. B; MAGALHÃES, T. B.; CAPELETE, B. C.; DIAS, E. H. O. Tratamento de esgotos sanitários em sistemas reatores UASB/*wetlands* construídas de fluxo horizontal: eficiência e estabilidade de remoção de matéria orgânica, sólidos, nutrientes e coliformes. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 14, n. 3, p. 421-430, 2009.

COOPER, P. **What can we learn from old wetlands? Lessons that have been learned and some that may have been forgotten over the past 20 years**. *Desalination* 247 (2009).

COSTA, J.F.; DE PAOLI, A. C.; VON SPERLING, M. Desempenho de *wetlands* de fluxo horizontal subsuperficial vegetadas e não vegetadas atuando como pós-tratamento de efluente sanitário de reator uasb. In: **26 Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental**, 2011, Porto Alegre.

DE PAOLI, André Cordeiro; VON SPERLING, Marcos. Avaliação das condições hidrodinâmicas de *wetlands* de escoamento horizontal subsuperficial (unidades plantada e não plantada). **Revista Eletrônica de Gestão e Tecnologias Ambientais**, v. 1, n. 2, p. 213-222, 2013.

DIAS, E. H. O.; MAGALHÃES, T. B.; CALIJURI, M. L.; BASTOS, R. K. X. Coeficientes de remoção de parâmetros químicos em *wetlands* construídas em escala piloto. In: **26 Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental**, 2011, Porto Alegre.

GIAFFERIS, Giselda Passos. **Avaliação do potencial de reuso agrícola do efluente de uma estação de tratamento de esgoto com alagados construídos**. Tese de Doutorado. Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho. 2011.

HAMMER, Donald A. **Constructed wetlands for wastewater treatment: municipal, industrial and agricultural**. CRC Press, 1989.

HAMMER, Mark J. **Sistemas de abastecimento de água e esgotos**. Livros técnicos e científicos, Rio de Janeiro, 1979.

HABERL, R.; GREGO, S.; LANGERGRABER, G.; KADLEC, R. H.; CICALINI, A. R.; DIAS, S. M.; NOVAIS, J. M., GERTH, A.; THOMAS, H. HEBNER, A. **Constructed Wetlands for the Treatment of Organic Pollutants**- J Soils & Sediments 3 (2) 109 – 124, 2003.

IMHOFF, K. R. **Desenvolvimento das Estações de Tratamento de Esgotos**. Manual de tratamento de águas residuárias, São Paulo, cap, v. 2. 1986.

IWA – International Water Association. **Constructed Wetlands for Pollution Control: Processes, Performance, Design and Operation. Scientific and Technical Report No. 8**. London, England: IWA Publishing, 2000. 156 p

JORDÃO, Eduardo P. e PESSÔA, Constantino A. **Tratamento de Esgotos Domésticos**. 4ª Edição. Rio de Janeiro: ABES, 932p. 2005.

KADLEC, R. H.; KNIGHT, R. L. **Treatment wetlands**. CRC. Boca Raton, FL, 1996.

MACEDO, Carla Fernandes; SIPAUBA-TAVARES, Lucia H. Eutrofização e qualidade da água na piscicultura: consequências e recomendações. **Bol. Inst. Pesca**, v. 36, n. 2, p. 149-163, 2010.

MACHADO, E. L.; LOPEZ, D. A. R.; BENVENU, L. M.; ZERWES, F. V.; FREITAS, N, C. W.F. Tratamento de efluente de campus universitário via sistema de baixo custo com leitos cultivados (*wetland*). In: **25 Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental**, 2013, Recife.

MAJANTE, E.S.; ANDRADE, C. F.; VON SPERLING, M.; MARTINS, L. J.; MARTINS, P. T. Avaliação do desempenho de unidades plantada e não plantada de *wetlands* construídas de escoamento vertical no tratamento de esgoto doméstico. In: **28 Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental**, 2015, Rio de Janeiro.

MANNARINO, C. F. **Uso de *wetland* sub-superficial no tratamento de efluente de estação de tratamento de chorume por lodos ativados**. 106 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) - Universidade do Estado do Rio de Janeiro, 2003.

MAZZOLA, M. ROSTON, D. M.; VALENTIM, M. A. A. Uso de leitos cultivados de fluxo vertical por batelada no pós-tratamento de efluente de reator anaeróbio compartimentado. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 9, n. 2, p. 276-283, 2005.

METCALF; EDDY (1991). **Wastewater engineering treatment, disposal and reuse**. 3. ed. New York: McGraw-Hill. 1334p.

MONTEIRO, R.C.M. **Viabilidade técnica do emprego de “*wetlands*” para o tratamento de água cinza para o reúso não potável**. 84 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) - Escola Politécnica da Cidade de São Paulo, SP, 2009.

MONTEIRO, V.R.C.; SEZERINO, P. H.; SUNTTI, C.; SCARATTI, D.; PHILLIPI, L. S. Sistema híbrido de *wetlands* construídos para tratamento de efluente de tanque séptico. In: **27 Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental**, 2013, Goiânia.

MOURÃO, J.R.; SILVA, M.A.V.; ARRUDA, D. S.; RIBEIRO, L. C. L. J.; PIRES, M. S. G. Avaliação da eficiência de *wetlands* construídas, em escala de laboratório, no pós-tratamento de efluentes domésticos. In: **2º Simpósio Brasileiro sobre Wetlands Construídos, 2015**, Curitiba, PR.

NBR, ABNT. 9648. **Estudo de concepção de sistemas de esgoto sanitário**. Rio de Janeiro, 1986.

OLIJNYK, Débora Parcias. **Avaliação da nitrificação e desnitrificação de esgoto doméstico empregando filtros plantados com macrófitas (*wetlands*) de fluxos vertical e horizontal - sistemas híbridos**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, 2008.

ORMONDE, Vanusa Soares da Silva. **Avaliação de 'Wetlands' Construídos no Pós-Tratamento de Efluente de Lagoa de Maturação**. 89 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Edificações e Ambiental) - Universidade Federal de Mato Grosso, Cuiabá, MT, 2012.

PELLISSARI, C.; FURTADO, D. F. C.; SEZERINO, P. H.; BENTO, A. P.; PHILLIPI, L. S. Filtros plantados com macrófitas de fluxo vertical (*wetlands* construídos) empregados no tratamento complementar de efluentes de tanque séptico: início de operação. **In: 26 Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2011**, Porto Alegre.

PITALUGA, D.P.S.; ALMEIDA, R. A.; REIS, R. P. A.; MARTINS, L. L. Tratamento de esgoto doméstico por zona de raízes precedida de tanque séptico: eficiência do sistema e potencialidade de reuso do efluente **In: 25 Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2013**, Recife.

PHILIPPI, L. S. e SEZERINO, H. P. **Aplicação de sistemas tipo *wetlands* no tratamento de águas residuárias: utilização de filtros plantados com macrófitas**. 1ª ed. Florianópolis/SC. Ed. do Autor 2004. 144p

PHILIPPI, L. S.; SEZERINO, P. H.; PANCERI, B. OLIJNYK, D. P.; KOSSATZ, B. Root zone system to treat wastewater in rural areas in south of Brazil. **In: Proceedings of the 10th International Conference on Wetland Systems for Water Pollution Control**. 2006. p. 23-29.

QUEGE, K. E.; ALMEIDA, R. A.; UCKER, F. E. Utilização de plantas de bambu no tratamento de esgoto sanitário pelo sistema de alagados construídos. **Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental**, v. 10, n. 10, p. 2069-2080, 2013.

REINALDO, G. P. B.; BATISTA, R. O.; SILVA, P. C. M.; FILHO, L. C. A. L.; NETO, M. F.; SANTOS, D. B. Desempenho de sistema decanto-digestor com filtro biológico seguido por alagado construído e reator solar no tratamento de esgoto doméstico. **Revista Ambiente & Água**, v. 7, n. 2, p. 62, 2012.

RODRIGUES, E. B.; DOS SANTOS, M. A. A.; LAPOLLI, F. R.. Zona de raízes: experiência vivenciada numa escola rural no município de Campos Novos/SC. **Revista Engenharia e Construção Civil (ISSN 2358-0259)**, v. 2, n. 2, 2015.

ROSA, A.; CARVALHO, L. Z.; RIETOW, J. C.; MOHOR, G. S.; ANDREOLI, F. N. *Wetlands* construídas como pós tratamento de efluentes domésticos: estudo de caso de um hotel campestre de pequeno porte. In: **28 Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental**, 2015, Rio de Janeiro.

ROUSSO, B.Z.; PELISSARI, C.; SEZERINO, P. H. Desempenho de um *wetland* construído horizontal empregado no tratamento de esgoto doméstico ao longo de 20 anos de operação. In: **2º Simpósio Brasileiro sobre Wetlands Construídos, 2015**, Curitiba, PR.

SALATI, ENEIDA. **Utilização de sistemas de *wetlands* construídas para tratamento de águas**. Biológico, São Paulo, v.65, n.1/2, 2003.

SALATI, E. F.; MANFRINATO, E. S.; SALATI, E. Secondary and Tertiary Treatment of Urban Sewage Utilizing the HDS System with Upflow Transport. In: **Proc. 7th Internat. Conf. Wetland Systems for Water Pollution Control**. 2000. p. 971-977.

SANTOS, R. N.; ELIEL, R. A.; ELIEL, O. **A ciência e o novo estado do conhecimento: a contribuição da Ciência da Informação**. Enc. Bibli. R. Eletr. Bibliocon. Ci. Inf., n. 22, p. 16-29, 2006.

SAWYER, Clair N.; MCCARTY, Perry L.; PARKIN, Gene F. **Chemistry for environmental engineering and science**. 2003.

SEZERINO, P. H. e PHILIPPI, L. S. Utilização de um sistema experimental por meio de "*wetland*" construída no tratamento de esgotos domésticos pós tanque séptico. **IX Simpósio Luso-Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental 2000**. Anais. Porto Seguro, Bahia, Brasil. 2000.

SEZERINO, Pablo Heleno. **Utilização de biofiltros com macrófitas (Vertical Constructed Wetlands) como pós-tratamento de lagoas de estabilização aplicadas aos dejetos de suínos**. 123 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, 2002.

SEZERINO, P. H. e PHILIPPI, L. S. Filtro plantado com macrófitas (*wetlands*) como tratamento de esgotos em unidades residenciais – Critérios para Dimensionamento. In: **22º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental**, Joinville, 1-30. 2003.

SEZERINO, Pablo Heleno et al. **Potencialidade dos filtros plantados com macrófitas (constructed wetlands) no pós-tratamento de lagoas de estabilização sob condições de clima subtropical**. 171 f. Tese (Doutorado em Engenharia Ambiental) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, 2006.

SEZERINO, P. H.; BENTO, A. P.; LOBO, M. A.; LAPOLLI, F. R.; PHILIPPI, L. S. Sistemas naturais aplicados ao tratamento descentralizado de esgotos: uso combinado de lagoas de estabilização e filtros plantados com macrófitas (*wetlands*). In: **23 Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental**. Campo Grande. 2005.

SEZERINO, P. H.; SANTOS, M. O.; PELISSARI, C.; CELIS, G. S.; PHILLIPI, L. S. Wetlands construídos horizontais aplicados no tratamento descentralizado de esgotos. **2 Simpósio Brasileiro sobre Wetlands Construídos**, Curitiba, Paraná, 2015.

SILVA, Selma Cristina da. **"Wetlands construídos" de fluxo vertical com meio suporte de solo natural modificado no tratamento de esgotos domésticos**. 2007. 231 f. Tese (Doutorado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos)-Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2009.

SOARES, S.R.A.; BERNARDES, R.S.; CORDEIRO NETTO, O.M. Relações entre saneamento, saúde pública e meio ambiente: elementos para formulação de um modelo de planejamento em saneamento. **Cadernos de Saúde Pública**, Rio de Janeiro, v. 18, p. 1713-1724, 2002.

SOUSA, J. T.; HAANDEL, A. V; LIMA, E. P. C.; HENRIQUE, I. N. Utilização de *wetland* construído no pós-tratamento de esgotos domésticos pré-tratados em reator UASB. **Eng. Sanitária Ambiental**, v. 9, n. 4, p. 285-290, 2004.

TREIN, C. M.; PELISSARI, C.; HOFFMAN; H.; PLATZER, C. J.; SEZERINO, P. H. Tratamento descentralizado de esgotos de empreendimentos comercial e residencial empregando a ecotecnologia dos *wetlands* construídos. **Ambiente Construído**, v. 15, n. 4, p. 351-367.

UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE, NATIONAL RESOURCES CONSERVATION SERVICE - USDA NRCS. **Constructed wetlands**. National Engineering Handbook, 2002.

UNITED STATE ENVIRONMENTAL PROTECT AGENCY. **Manual constructed wetlands for municipal wastewater treatment**. Cincinnati, Ohio, 2000.

VALENTIM, Marcelus Alexander Acorinte. **Desempenho de leitos cultivados ("constructed wetland") para tratamento de esgoto: contribuições para concepção e operação**. 2003. 210 f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) - Faculdade de Engenharia Agrícola da Universidade Estadual de Campinas. Campinas, SP. 2003.

VON SPERLING, Marcos. **Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos**. Editora UFMG, 2014.

VYMAZAL, Jan. Horizontal sub-surface flow and hybrid constructed *wetlands* systems for wastewater treatment. **Ecological Engineering** 25 (2005) 478–490. 13p

ZANELLA, Luciano. **Plantas ornamentais no pós-tratamento de efluentes sanitários: Wetlands-construídos utilizando brita e bambu como suporte**. 2008. 189 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP, 2008.