



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO ACADÊMICO DO AGRESTE
NÚCLEO DE TECNOLOGIA
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

**REVISÃO SISTEMÁTICA SOBRE O USO DE
MACRÓFITAS AQUÁTICAS NO TRATAMENTO DE
EFLUENTES**

ALUNA: Larissa Albuquerque Marques Silva

Caruaru, 2018.

LARISSA ALBUQUERQUE MARQUES SILVA

**REVISÃO SISTEMÁTICA SOBRE O USO DE
MACRÓFITAS AQUÁTICAS NO TRATAMENTO DE
EFLUENTES**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado à Coordenação do Curso de
Engenharia Civil do Centro Acadêmico de
Agreste da Universidade Federal de
Pernambuco – UFPE, em cumprimento às
exigências para obtenção do grau de
Bacharel em Engenharia Civil.

Área de Concentração: Saneamento
Ambiental

Orientadora: Professora Doutora Simone
Machado Santos

Caruaru, 2018.

Catálogo na fonte:
Bibliotecária – Simone Xavier CRB

S586r Silva, Larissa Albuquerque Marques.
 Revisão sistemática sobre o uso de macrófitas aquáticas no tratamento de
 efluentes. / Larissa Albuquerque Marques Silva. – 2018.
 47f. ; il. : 30 cm.

 Orientadora: Simone Machado Santos.
 Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) – Universidade Federal de Pernambuco,
 CAA, Engenharia Civil, 2018.
 Inclui Referências.

 1. Plantas de água doce. 2. Efluentes líquidos. 3. Biomassa. 4. Esgotos – Tratamento.
 5. Resíduos industriais. I. Santos, Simone Machado (Orientadora). II. Título.

620 CDD (23. ed.)

UFPE (CAA 103 - 2018)

LARISSA ALBUQUERQUE MARQUES SILVA

**REVISÃO SISTEMÁTICA SOBRE O USO DE
MACRÓFITAS AQUÁTICAS NO TRATAMENTO DE
EFLUENTES**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado à Coordenação do Curso de
Engenharia Civil do Centro Acadêmico de
Agreste da Universidade Federal de
Pernambuco – UFPE, em cumprimento às
exigências para obtenção do grau de
Bacharel em Engenharia Civil.

Área de Concentração: Saneamento
Ambiental

Caruaru, PE _____ de _____ de _____

Aprovado por:

Professora Doutora Simone Machado Santos – Orientadora

Professora Doutora Elizabeth Amaral Pastich Gonçalves

Professor Doutor Saulo de Tarso Marques Bezerra

Professor Doutor Elder Alpes de Vasconcelos – Coordenador da Disciplina

“Out of clutter, find simplicity. From discord, find harmony. In the middle of difficulty lies opportunity.”

Albert Einstein

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente à Deus, por ter me guiado até aqui e ter me concedido sabedoria e oportunidade para desenvolver este trabalho e concluir o curso de Engenharia Civil.

Agradeço à minha mãe, por sempre ter colocado a minha educação e a da minha irmã à frente de tudo desde o nosso nascimento. Agradeço à ela e ao meu pai, pela oportunidade de chegar até aqui, e por todo apoio e incentivo durante toda a minha vida. Essa conquista é deles.

Agradeço à minha irmã, pela amizade, pelo carinho e por toda cumplicidade que criamos durante nossa caminhada, por vibrar minhas conquistas muitas vezes mais do que eu mesma.

Agradeço ao meu namorado, por todo apoio que me deu durante toda a minha graduação, e por todo amor e carinho fazendo esta caminhada mais leve.

Agradeço ao meu avô e em memória à minha avó, João e Iraci, por terem dado oportunidade à minha família para que hoje estivéssemos aqui.

Agradeço à minha orientadora, Professora Simone Machado Santos, por todo suporte que me deu para que eu desenvolvesse esta pesquisa e também pelas oportunidades que me proporcionou.

Agradeço à todos os professores que contribuíram para a minha formação.

Agradeço às minhas amigas de curso, Rafaella Moura, Gisele Oliveira e Sabrina Simões, por todo companheirismo e amizade durante a vida acadêmica.

RESUMO

A necessidade de atender às exigências legais, para o lançamento de efluentes em corpos d'água, leva à busca de alternativas de tratamento de menores custos e que sejam capazes de respeitar aos limites padrões. Muitos estudos que propõem o emprego de macrófitas no tratamento de esgoto já foram realizados e apresentaram resultados satisfatórios, quanto à redução dos níveis de poluição do efluente. Nesse contexto, o presente trabalho objetiva realizar uma revisão sistemática sobre o uso de macrófitas aquáticas no tratamento de esgotos, abordando aspectos de qualidade do efluente tratado, bem como o manejo da biomassa gerada. Para a revisão sistemática, uma pesquisa de literatura foi realizada, em sua maioria, nas plataformas ScienceDirect e ResearchGate, onde foram analisados estudos nacionais e internacionais, de forma a obter uma maior representatividade de dados. As palavras-chaves utilizadas foram *tratamento de efluentes* e *macrófitas*, em português e *wastewater treatment* e *macrophytes*, em inglês. Na literatura internacional, foram encontrados 3892 artigos científicos e para a realização do trabalho foi retirada uma amostra dos 100 artigos mais relevantes para a revisão. Entretanto, na literatura nacional foram encontradas apenas oitenta pesquisas, sobretudo quando aplicados os filtros para o desenvolvimento da revisão, esse número então reduziu-se para 10 estudos. Os temas mais abordados nos artigos pesquisados foram: (i) tratamento de efluentes domésticos e não-domésticos e tratamento de efluentes em escala laboratorial, nas pesquisas nacionais; e (ii) tratamento de esgotos municipais e tratamento de efluentes industriais nas pesquisas internacionais. Os resultados mostraram que a utilização de macrófitas no tratamento de efluentes é tecnicamente viável, no que concerne à remoção de poluentes. No entanto, novos estudos deverão mostrar, com maior clareza, os custos do aproveitamento, tratamento e destino final da biomassa resultante, em escala real.

Palavras-Chave: Macrófitas aquáticas, tratamento de efluentes, remoção de nutrientes, metais pesados, biomassa.

ABSTRACT

The need to comply with legal requirements for the discharge of effluents into water bodies leads to a search for alternative treatments with lower costs that reaches the standard limits. Many studies that propose the use of macrophytes in wastewater treatment have already been carried out and have presented satisfactory results regarding the reduction of the effluent's pollution levels. In this context, the present studies aims to conduct a systematic review of the use of aquatic macrophytes in wastewater treatment, analysing the parameters of the treated effluent and studying the biomass generated. For the review, a search was conducted mostly on the platforms ScienceDirect and ResearchGate, where national and international studies were analysed, in order to obtain a greater representativeness of data. The keywords used were *tratamento de efluentes* and *macrófitas*, in Portuguese, and *wastewater treatment* and *macrophytes*, in English. In the international literature, 3892 scientific articles were found and a sample of the 100 most relevant articles were taken for the review and analysed. However, in the national literature only eighty studies were found, especially when the filters were applied for the development of the review, this number was reduced to 10 studies. The topics most addressed in the articles were: (i) treatment of domestic and non-domestic effluents and treatment of effluents in laboratory scale, in national studies; and (ii) treatment of municipal wastewater and treatment of industrial effluents in international studies. The results showed the technical viability of the use of macrophytes in wastewater treatment. However, new studies should better address the costs of the treatment, final destination and biomass management in large scale.

Keywords: Aquatic macrophytes, wastewater treatment, nutrient removal, heavy metals, biomass.

LISTA DE FIGURAS

Figura 01.	Número de citações por artigo nacional.....	22
Figura 02.	Número de citações por artigo internacional.....	23
Figura 03.	Número de artigos internacionais publicados por ano.....	24
Figura 04.	Quantidade de artigos internacionais publicados por continente..	24
Figura 05.	Espécies utilizadas nos estudos nacionais.....	26
Figura 06.	Espécies utilizadas nos estudos internacionais.....	28
Figura 07.	Características dos efluentes utilizados nos artigos internacionais.....	35

LISTA DE QUADROS

Quadro 01.	Metodologia da Revisão Sistemática.....	13
Quadro 02.	Quesitos para análise crítica.....	15
Quadro 03.	Resultado dos quesitos aplicados aos estudos nacionais.....	16
Quadro 04.	Estudos nacionais selecionados para a revisão sistemática.....	16
Quadro 05.	Resultado dos quesitos aplicados aos estudos internacionais...	18
Quadro 06.	Estudos internacionais selecionados para a revisão sistemática.....	19

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	11
2	OBJETIVOS.....	12
2.1	Objetivo Geral.....	12
2.2	Objetivos Específicos.....	12
3	METODOLOGIA.....	13
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	21
4.1	Características gerais dos estudos.....	21
4.2	Espécies utilizadas no tratamento.....	25
4.2.1	Espécies utilizadas nos estudos nacionais.....	26
4.2.2	Espécies utilizadas nos estudos internacionais.....	28
4.3	Parâmetros avaliados dos efluentes.....	30
4.3.1	Parâmetros avaliados nos estudos nacionais.....	30
4.3.2	Parâmetros avaliados nos estudos internacionais.....	33
4.4	Biomassa.....	36
4.4.1	Avaliação da biomassa nos estudos nacionais.....	37
4.4.2	Avaliação da biomassa nos estudos internacionais.....	38
4.5	Custos do processo.....	39
4.5.1	Custos relacionados aos estudos nacionais.....	40
4.5.2	Custos relacionados aos estudos internacionais.....	40
5	CONCLUSÃO.....	41
	REFERÊNCIAS.....	42

1 INTRODUÇÃO

A poluição dos recursos hídricos está intimamente relacionada à falta de saneamento adequado, onde efluentes são lançados diretamente em corpos hídricos, ocasionando não só problemas ambientais como também de saúde pública. Dentre os problemas ambientais, a redução dos níveis de oxigênio, decorrentes da concentração de poluição por carga orgânica, assim como a de proliferação de algas e plantas aquáticas (eutrofização), por conta da presença de nutrientes, são os mais comuns. A eutrofização tem como causa o acréscimo da concentração de nutrientes nos corpos d'água, sobretudo de nitrogênio (N) e fósforo (P), também contribuindo para a redução do oxigênio dissolvido e a perda da biodiversidade (ESTEVES, 2011).

Deste modo, é necessário estudar alternativas para o tratamento de esgotos sanitários através de processos tecnológicos, visando a remoção de poluentes e a preservação dos corpos d'água existentes.

Nesse contexto, o estudo do uso sustentável (cultivo e manejo) de macrófitas aquáticas para o tratamento de águas residuárias vem crescendo bastante e apresentando resultados satisfatórios. A introdução dessas plantas aquáticas auxiliam na remoção de nutrientes, como N e P, e outras substâncias, apresentando boa eficiência na remoção de Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO) e Demanda Química de Oxigênio (DQO) (TIMM, 2015).

O tratamento de águas residuárias utilizando macrófitas se torna ainda mais atrativo devido ao seu baixo custo de operação e manutenção (MOHEDANO, 2010). Porém, devido à capacidade fertilizante do N e do P, essas espécies vegetais terão o crescimento acelerado, gerando um elevado volume de resíduo (biomassa) proveniente das macrófitas que foram utilizadas.

Visando obter um processo sustentável, já existem estudos que avaliam formas de reaproveitamento da biomassa resultante, como na geração de biogás, na composição de rações animais e também na técnica da compostagem produzindo fertilizantes. Também há estudos que mostram a disposição da biomassa em aterros sanitários, mas em determinadas regiões, essa alternativa pode apresentar um custo bastante elevado, tornando o sistema economicamente desinteressante.

Diante do exposto, o presente trabalho visa realizar um estudo sistemático sobre o uso de macrófitas aquáticas no tratamento de esgotos, abordando aspectos de qualidade do efluente tratado, bem como o descarte da biomassa gerada.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Realizar uma revisão sistemática da literatura sobre a viabilidade do uso de macrófitas aquáticas no tratamento de águas residuárias.

2.2 Objetivos Específicos

- Identificar pesquisas relevantes que, através dos parâmetros obtidos, possam conduzir a revisão sistemática;
- Comparar estudos de casos relacionados ao uso de macrófitas aquáticas na remoção de diversos compostos em efluentes;
- Comparar estudos relacionados ao tratamento, aproveitamento e destino final da biomassa resultante do processo;

5 METODOLOGIA

O presente trabalho consiste em implementar uma revisão sistemática, a partir de pesquisas encontradas na literatura, acerca do uso de macrófitas aquáticas no tratamento de efluentes, através da análise dos parâmetros de remoção de poluição, além do manejo (tratamento, reaproveitamento e destino final) da biomassa resultante.

Segundo KHAN *et al.* (2003), uma revisão sistemática é definida por pesquisas fundamentadas, onde o conteúdo a ser estudado é bem estabelecido e os estudos relevantes são identificados, avaliando seus atributos e sintetizando suas conclusões através do desenvolvimento da metodologia associada.

Sucessivamente, KHAN *et al.* (2003) sugerem, para uma revisão sistemática eficaz, cinco passos que devem direcionar o estudo a ser realizado. O passo-a-passo está apresentado a seguir no Quadro 01.

Quadro 01. Metodologia da Revisão Sistemática.

Passo 1 Desenvolvendo questionamentos para uma revisão sistemática
Passo 2 Identificando pesquisas relevantes para o estudo
Passo 3 Avaliando a qualidade dos estudos
Passo 4 Resumindo os dados
Passo 5 Interpretando os resultados

Fonte: Khan (2003).

O processo descrito acima foi aplicado neste estudo e será discutido detalhadamente a seguir. Deve ser também conhecido que o termo *revisão* no presente trabalho será sempre classificado como uma *revisão sistemática* da literatura.

Passo 1: Desenvolvendo questionamentos para uma revisão

KHAN *et al.* (2003) afirmam que antes de iniciar a revisão, devem ser formulados questionamentos claros e estruturados afim de guiar o estudo a ser realizado. Desta forma, o primeiro passo consiste em estabelecer os inquéritos a serem avaliados na pesquisa, que devem conter uma intervenção, uma população e uma consequência.

Para o presente estudo foi então definida a seguinte questão para orientar a revisão sistemática:

“É viável o tratamento de efluentes utilizando macrófitas aquáticas?”

Onde,

- Abrangência: Tratamento de efluentes.
- Intervenção: O tratamento de esgoto utilizando macrófitas aquáticas comparado com outros tratamentos, como o processo biológico por exemplo.
- Consequência: O tratamento utilizando macrófitas gera a biomassa como resíduo final.

O estudo deve então envolver pesquisas que analisem o tratamento de efluentes utilizando macrófitas e que apontem ou considerem uma forma de tratamento/disposição para a biomassa produzida. A viabilidade da técnica deve ponderar a eficiência do tratamento e uma solução de baixo custo para o resíduo gerado.

Passo 2: Identificando pesquisas relevantes para o estudo

A seleção dos estudos a serem utilizados na revisão está intimamente relacionado com o desenvolvimento do trabalho. O segundo passo consiste em detectar o máximo de estudos contidos na literatura que possam contribuir para a revisão. Khan *et al.* (2003) propõe ainda que os critérios de seleção sejam claros e que sejam registrados afim de auxiliar em estudos posteriores.

Para esta revisão sistemática, inicialmente foram buscadas pesquisas através do Portal Periódicos-CAPES que, em sua maioria, direcionavam para as plataformas ScienceDirect e ResarchGate. Os termos utilizados para a pesquisa em português foram “*tratamento de efluentes*” e “*macrófitas*” e para a pesquisa em inglês foram “*wastewater treatment*” e “*macrophytes*”, resultando em oitenta pesquisas na literatura em português e 3.892 artigos na internacional, onde uma amostra de cem estudos mais relevantes, de acordo com a plataforma de pesquisa, da última foi selecionada para a posterior análise. Dessas, foram excluídas todas aquelas em que a biomassa não era um dos alvos de estudo, restando então apenas 14 para os estudos em português e 47 para os internacionais.

Em seguida, foram formuladas questões afim de obter uma análise dos estudos selecionados, de forma que essas constituíram os critérios de inclusão ou exclusão de uma pesquisa devido à sua relevância para o presente estudo. Os Quesitos (Q) a serem analisados em cada um dos estudos estão apresentados no Quadro 02 a seguir:

Quadro 02. Quesitos para análise crítica.

Q1 Os objetivos do estudo estão claramente expostos?
Q2 O processo de tratamento com macrófitas é descrito?
Q3 São apresentados e analisados os parâmetros obtidos com o tratamento?
Q4 São apresentados outros métodos de tratamento de efluentes?
Q5 É discutido sobre a biomassa?
Q6 O estudo apresenta o custo médio do tratamento?
Q7 São avaliadas as remoções de nitrogênio e fósforo?
Q8 São apresentadas as problemáticas do estudo em questão?

Fonte: Autor (2018).

As perguntas acima foram estão respondidas de forma que para “sim” deve ser retornado o valor “1”, e para “não” deve ser retornado o valor “0”. Cada pesquisa teve então um percentual agregado às respostas, onde estudos com o resultado entre 60% - 100% foram caracterizados como “Bom” e aqueles que obtiveram percentual abaixo de 60% foram caracterizados como “Ruim”.

Passo 3: Avaliando a qualidade dos estudos

Como mencionado acima, 14 estudos nacionais e 47 internacionais foram selecionados e conduzidos para a avaliação crítica prescrita no Passo 2. A maior parte das pesquisas, nacionais e internacionais, realizadas obtiveram pontuação percentual maior que 60%, onde aquelas que não alcançaram este valor, foram descartadas.

A avaliação das pesquisas nacionais quando aplicadas aos quesitos mencionados no segundo passo encontra-se no Quadros 03.

Quadro 03. Resultado dos quesitos aplicados aos estudos nacionais.

Pesquisa	Autor	Q1	Q2	Q3	Q4	Q5	Q6	Q7	Q8	Resultado	(%)
1	HENRY-SILVA <i>et al.</i> (2002)	1	0	0	0	1	0	0	1	3	38%
2	TAVARES (2004)	1	1	1	1	1	0	1	1	7	88%
3	POLISEL (2005)	1	1	1	1	0	0	1	1	6	75%
4	HENRY-SILVA <i>et al.</i> (2006)	1	0	0	0	1	0	0	1	3	38%
5	BIUDES (2007)	1	1	1	0	1	0	1	1	6	75%
6	CURIA (2010)	1	1	1	1	0	1	1	1	7	88%
7	LOPES <i>et al.</i> (2011)	1	1	1	0	0	0	1	0	4	50%
8	BRANDÃO <i>et al.</i> (2012)	1	1	1	0	0	0	0	1	4	50%
9	MARONEZE <i>et al.</i> (2014)	1	1	0	1	1	0	0	1	5	63%
10	GARCIA (2015)	1	1	1	1	0	0	1	1	6	75%
11	PENARIOL (2015)	1	1	1	1	1	0	0	0	5	63%
12	AFFONSECA (2016)	1	1	1	1	1	1	1	1	8	100%
13	SMANIOTTO (2016)	1	1	1	1	1	0	1	1	7	88%
14	MEDEIROS (2017)	1	1	1	1	1	0	1	0	6	75%

Fonte: Autor (2018).

Como vimos no Quadro 03, apenas dez pesquisas nacionais foram selecionadas para o desenvolvimento da revisão. O Quadro 04 enumera e detalha esses estudos quanto à sua caracterização, a espécie de macrófita utilizada e à solução para a biomassa do processo.

Quadro 04. Estudos nacionais selecionados para a revisão sistemática.

Pesquisa	Autor	Tipo de Publicação	Espécie	Manejo da Biomassa
1	TAVARES (2004)	Mestrado	<i>Lemna sp.</i>	Ração animal
2	POLISEL (2005)	Doutorado	<i>Eichhornia crassipes</i> e <i>Lemna sp.</i>	Alimentação de animais e compostagem
3	BIUDES (2007)	Doutorado	<i>Eichhornia crassipes</i>	Valor Nutritivo
4	CURIA (2010)	Doutorado	<i>Scirpus sp.</i> e <i>Typha sp.</i>	Fertilizante
5	MARONEZE <i>et al.</i> (2014)	Artigo	-	Ração animal e produção de bioetanol
6	PENARIOL (2015)	Mestrado	<i>Eichhornia crassipes</i>	Ração animal
7	GARCIA (2015)	Mestrado	<i>Landoltia punctata</i>	Ração animal e fonte de bioenergia
8	AFFONSECA (2016)	Mestrado	<i>Lemna minor</i>	Compostagem
9	SMANIOTTO (2016)	Mestrado	<i>Landoltia punctata</i>	Ração animal e produção de etanol
10	MEDEIROS (2017)	Doutorado	<i>Eichhornia crassipes</i> e <i>Lemna minor</i>	Ração animal

Fonte: Autor (2018).

Dentre os estudos nacionais, apenas um foi um artigo publicado, sendo todas as outras pesquisas teses de mestrado ou doutorado. O Quadro 05 apresenta os

resultados dos quesitos aplicados para as pesquisas internacionais, onde dos 47 estudos avaliados, 37 deles foram selecionados para o desenvolvimento do presente trabalho. Em seguida, o Quadro 06, similar aos Quadro 04 para as pesquisas nacionais, apresentam algumas características dos estudos internacionais que estarão presentes no desenvolvimento da revisão.

Diferentemente das pesquisas nacionais, como podemos ver no Quadro 06, para as internacionais, todos os selecionados foram artigos já publicados em revistas, sendo a sua maioria pertencente às plataformas ScienceDirect e ResearchGate.

Quanto à espécie utilizada no tratamento, na literatura nacional, teve destaque a espécie *Eichhornia crassipes*, e observou-se também que uma alternativa presente nos estudos para o resíduo do processo foi em rações de animais, principalmente análises que envolvem a espécie *Tilápia-do-Nilo*. Nos artigos internacionais, a espécie *Eichhornia crassipes* também teve destaque, mas o manejo dominante está associado à produção de energia.

Quadro 05. Resultado dos quesitos aplicados aos estudos internacionais.

Pesquisa	Autor	Q1	Q2	Q3	Q4	Q5	Q6	Q7	Q8	Resultado	(%)
1	REDDY <i>et al.</i> (1984)	1	1	1	0	1	0	1	1	6	75%
2	REDDY <i>et al.</i> (1985)	1	1	1	0	1	0	1	1	6	75%
3	ORON <i>et al.</i> (1987)	1	1	1	0	1	0	1	1	6	75%
4	ORON (1994)	1	1	1	0	1	1	1	1	7	88%
5	SINGHAL <i>et al.</i> (2003)	1	0	1	0	1	0	1	1	5	63%
6	KYAMBADDE <i>et al.</i> (2005)	1	1	1	0	0	0	1	0	4	50%
7	HADAD <i>et al.</i> (2006)	1	1	1	0	0	0	1	0	4	50%
8	MAINE <i>et al.</i> (2007)	1	1	1	0	0	0	1	0	4	50%
9	SOHSALAM <i>et al.</i> (2008)	1	1	1	0	0	0	1	0	4	50%
10	BINDU <i>et al.</i> (2009)	1	1	1	0	1	0	0	1	5	63%
11	CHEN <i>et al.</i> (2009)	1	1	1	0	1	0	0	1	5	63%
12	CHENG <i>et al.</i> (2009)	1	0	1	0	1	0	1	1	5	63%
13	MAINE <i>et al.</i> (2009)	1	1	1	0	0	0	1	0	4	50%
14	PIETROBELLI <i>et al.</i> (2009)	1	1	1	0	1	0	0	1	5	63%
15	POLOMSKI <i>et al.</i> (2009)	1	1	1	0	1	0	1	0	5	63%
16	GALLETTI <i>et al.</i> (2010)	1	1	1	0	1	0	0	1	5	63%
17	MALECKI-BROWN <i>et al.</i> (2010)	1	0	1	1	1	0	1	1	6	75%
18	MOHAN <i>et al.</i> (2010)	1	1	1	1	1	0	1	0	6	75%
19	PERBANGKHEM <i>et al.</i> (2010)	1	1	1	0	1	0	1	1	6	75%
20	SARMENTO <i>et al.</i> (2010)	1	1	1	0	1	0	1	0	5	63%
21	WU <i>et al.</i> (2010)	1	1	1	1	1	0	1	1	7	88%
22	CASELLES-OSORIO <i>et al.</i> (2011)	1	1	1	0	1	0	1	0	5	63%
23	DI LUCA <i>et al.</i> (2011)	1	1	1	0	1	0	1	0	5	63%
24	IDRIS <i>et al.</i> (2011)	1	1	1	0	1	0	1	1	6	75%
25	YAN <i>et al.</i> (2011)	0	1	1	1	1	0	0	1	5	63%
26	YILMAZ <i>et al.</i> (2011)	1	1	1	1	1	0	0	1	6	75%
27	ABOU-ELELA <i>et al.</i> (2012)	1	1	1	0	1	0	1	0	5	63%
28	SHILTON <i>et al.</i> (2012)	1	1	1	1	1	0	1	1	7	88%
29	BHATIA <i>et al.</i> (2013)	0	0	1	0	0	0	1	1	3	38%
30	DAWIDOWICZ <i>et al.</i> (2013)	1	1	1	0	1	0	0	1	5	63%
31	LETO <i>et al.</i> (2013)	1	1	1	0	1	0	1	0	5	63%
32	MANDER <i>et al.</i> (2013)	0	1	1	1	0	0	0	1	4	50%
33	RAI <i>et al.</i> (2013)	1	1	1	0	1	0	1	0	5	63%
34	BREZINOVÁ <i>et al.</i> (2014)	1	1	1	0	1	0	0	1	5	63%
35	MIRANDA <i>et al.</i> (2014)	1	1	1	0	1	0	0	1	5	63%
36	MURADOV <i>et al.</i> (2014)	1	1	1	0	1	0	1	1	6	75%
37	TERESHCHENKO <i>et al.</i> (2014)	1	1	1	0	1	0	0	1	5	63%
38	TURKER <i>et al.</i> (2014)	1	1	1	0	0	0	0	1	4	50%
39	BADEJO <i>et al.</i> (2015)	1	1	1	0	1	0	1	0	5	63%
40	KOUKI <i>et al.</i> (2015)	1	1	1	0	1	0	1	0	5	63%
41	SHAH <i>et al.</i> (2015)	1	1	1	0	1	0	1	1	6	75%
42	VALIPOUR <i>et al.</i> (2015)	0	1	1	0	1	1	1	0	5	63%
43	MAUCIERI <i>et al.</i> (2016)	1	1	1	0	1	0	1	1	6	75%
44	REHMAN <i>et al.</i> (2016)	1	1	0	0	0	0	1	0	3	38%
45	KINIDI <i>et al.</i> (2017)	1	1	1	1	1	0	1	1	7	88%
46	MAHAPATRA <i>et al.</i> (2017)	1	0	1	0	0	0	1	0	3	38%
47	REHMAN <i>et al.</i> (2017)	1	1	1	0	1	0	0	1	5	63%

Fonte: Autor (2018).

Quadro 06. Estudos internacionais selecionados para a revisão sistemática.

Pesquisa	Autor	Tipo de Publicação	Espécie	Manejo da Biomassa
1	REDDY <i>et al.</i> (1984)	Artigo	<i>Eichhornia crassipes</i>	Energia, ração animal, fibras e compostos orgânicos
2	REDDY <i>et al.</i> (1985)	Artigo	<i>Eichhornia crassipes</i> , <i>Pistia stratiote</i> , <i>Hydrocotyle umbellata</i> , <i>Lemna minor</i> , <i>Spirodela polyrhiza</i> , <i>Azolla caroliniana</i> , <i>Salvinia rotundifolia</i> , <i>Egeria densa</i>	Energia, ração animal, fibras e compostos orgânicos
3	ORON <i>et al.</i> (1986)	Artigo	<i>Lemna gibba</i>	Proteína
4	ORON (1994)	Artigo	<i>Lemna gibba</i>	Fertilizante e ração animal
5	SINGHAL <i>et al.</i> (2003)	Artigo	<i>Eichhornia crassipes</i> , <i>Vallisneria spiralis</i>	Produção de biogás
6	CHENG <i>et al.</i> (2008)	Artigo	<i>Spirodela punctata</i> , <i>Lemna gibba</i> , <i>Lemna minor</i>	Ração animal e produção de etanol
7	BINDU <i>et al.</i> (2009)	Artigo	<i>Colocasia esculenta</i>	-
8	CHEN <i>et al.</i> (2009)	Artigo	<i>Ipomoea aquatica</i>	-
9	PERBANGKHEM <i>et al.</i> (2009)	Artigo	<i>Cyperus papyrus</i>	Fonte de energia
10	PIETROBELLI <i>et al.</i> (2009)	Artigo	<i>Egeria densa</i>	-
11	POLOMSKI <i>et al.</i> (2009)	Artigo	<i>Eichhornia crassipes</i> , <i>Pistia stratiotes</i>	-
12	GALLETTI <i>et al.</i> (2010)	Artigo	<i>Phragmites australis</i>	-
13	MALECKI-BROWN <i>et al.</i> (2010)	Artigo	<i>Typha domingensis</i> , <i>Schoenoplectus californicus</i>	-
14	MOHAN <i>et al.</i> (2010)	Artigo	<i>Eichhornia crassipes</i>	-
15	SARMENTO <i>et al.</i> (2010)	Artigo	<i>Cyperus sp.</i>	-
16	WU <i>et al.</i> (2010)	Artigo	<i>Alternanthera philoxeroides</i> , <i>Spirodela polyrhiza</i>	Fertilizante
17	CASELLES-OSORIO <i>et al.</i> (2011)	Artigo	<i>Eriochloa aristata</i> , <i>Eleocharis mutata</i>	-
18	DI LUCA <i>et al.</i> (2011)	Artigo	<i>Typha domingensis</i>	-
19	IDRIS <i>et al.</i> (2011)	Artigo	<i>Arundo donax</i> , <i>Phragmites australis</i>	Fonte de energia
20	YAN <i>et al.</i> (2011)	Artigo	<i>Canna indica</i> , <i>Juncus minimus</i> , <i>Cyperus alternifolius</i>	-
21	YILMAZ <i>et al.</i> (2011)	Artigo	<i>Lemna gibba</i> , <i>Lemna minor</i>	Fertilizante e ração animal
22	ABOU-ELELA <i>et al.</i> (2012)	Artigo	<i>Canna</i> , <i>Phragmites australis</i> , <i>Cyperus papyrus</i>	-
23	SHILTON <i>et al.</i> (2012)	Artigo	<i>Eichhornia crassipes</i> , <i>Lemna minor</i>	Ração animal, culturas terrestres
24	DAWIDOWICZ <i>et al.</i> (2013)	Artigo	<i>Lemna minor</i>	-
25	LETO <i>et al.</i> (2013)	Artigo	<i>Cyperus alternifolius</i> , <i>Typha latifolia</i>	-
26	RAI <i>et al.</i> (2013)	Artigo	<i>Typha latifolia</i> , <i>Phragmites australis</i> , <i>Colocasia esculenta</i> , <i>Polygonum hydropiper</i> , <i>Alternanthera sessilis</i> , <i>Pistia stratiotes</i>	-
27	BREZINOVÁ <i>et al.</i> (2014)	Artigo	<i>Phalaris arundinacea</i> , <i>Phragmites australis</i>	-
28	MIRANDA <i>et al.</i> (2014)	Artigo	<i>Landoltia punctata</i> , <i>Elodea canadensis</i> , <i>Marsilea quadrifolia</i>	Produção de petroquímicos
29	MURADOV <i>et al.</i> (2014)	Artigo	<i>Landoltia punctata</i> , <i>Azolla filiculoides</i>	Produção de petroquímicos
30	TERESHCHENKO <i>et al.</i> (2014)	Artigo	<i>Eichhornia crassipes</i>	Vermicompostagem
31	BADEJO <i>et al.</i> (2015)	Artigo	<i>Phragmites karka</i> , <i>Vetiveria nigriflora</i>	-
32	KOUKI <i>et al.</i> (2015)	Artigo	<i>Arundo donax</i> , <i>Phragmites communis</i> , <i>Typha latifolia</i>	-
33	SHAH <i>et al.</i> (2015)	Artigo	<i>Eichhornia crassipes</i> , <i>Lemna minor</i> , <i>Pistia stratiotes</i>	Fertilizante, fabricação de papel, ração animal, compostagem, produção de biogás,....
34	VALIPOUR <i>et al.</i> (2015)	Artigo	<i>Eichhornia crassipes</i>	-
35	MAUCIERI <i>et al.</i> (2016)	Artigo	<i>Phragmites australis</i>	Produção de energia
36	KIDINI <i>et al.</i> (2017)	Artigo	-	Produção de energia, fertilizante e produção de papel
37	REHMAN <i>et al.</i> (2017)	Artigo	<i>Typha latifolia</i> , <i>Phragmites australis</i>	-

Fonte: Autor (2018).

Passo 4: Resumindo os dados

O quarto passo da metodologia deve analisar criticamente os estudos que foram selecionados, apontando as diferentes problemáticas encontradas pelos autores e os também os dados qualitativos apresentados.

Como descrito no “Passo 3”, apenas 10 estudos nacionais e 47 internacionais foram selecionados para o desenvolvimento da revisão. Dos estudos nacionais pode-se afirmar que muitos referem-se ao tratamento de efluentes oriundos de banhados, e apenas duas pesquisas referem-se ao tratamento de esgoto, sendo um realizado em escala real e o segundo em escala piloto. Já os internacionais possuem uma atenção maior para estudos que envolvem o tratamento de esgotos domésticos.

Na literatura internacional, como mencionado anteriormente, embora um grande número de artigos tenham sido retomados, assim como na literatura nacional, poucos são relevantes, ou seja, que avaliam o tratamento de efluentes utilizando macrófitas e mencionam ou executam alguma forma de manejo para a biomassa resultante do processo.

Passo 5: Interpretando os resultados

O último passo da revisão sistemática proposta por KHAN *et al.* (2003) consiste em avaliar os principais pontos da pesquisa que foram identificados ao longo do estudo. É também aconselhado propor novos estudos que possam oferecer uma melhor avaliação de pontos que ainda não estão bem desenvolvidos na literatura.

O presente trabalho tem como objetivo principal estudar a viabilidade do tratamento de efluentes utilizando macrófitas aquáticas. A partir da revisão sistemática, é possível afirmar que a literatura comporta estudos que envolvem os parâmetros de efluentes não tratados e daqueles foram submetidos ao processo.

As problemáticas encontradas para o desenvolvimento da pesquisa estão relacionadas à escassez de estudos na literatura que contemplem o manejo da biomassa resultante do processo de forma que possua dados comprobatórios e processos em escala real, e também aos custos associados ao processo em escala real, desde o tratamento do esgoto à disposição do resíduo final.

6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Esta sessão do trabalho tem o objetivo de analisar de forma mais detalhada as pesquisas que foram selecionadas através do método proposto por KHAN *et al.* (2003) e descrito anteriormente. Desta forma, a síntese será desenvolvida a partir de tópicos que foram pertinentes durante a avaliação dos estudos e que serão descritos e discutidos nos itens abaixo.

6.1 Características gerais

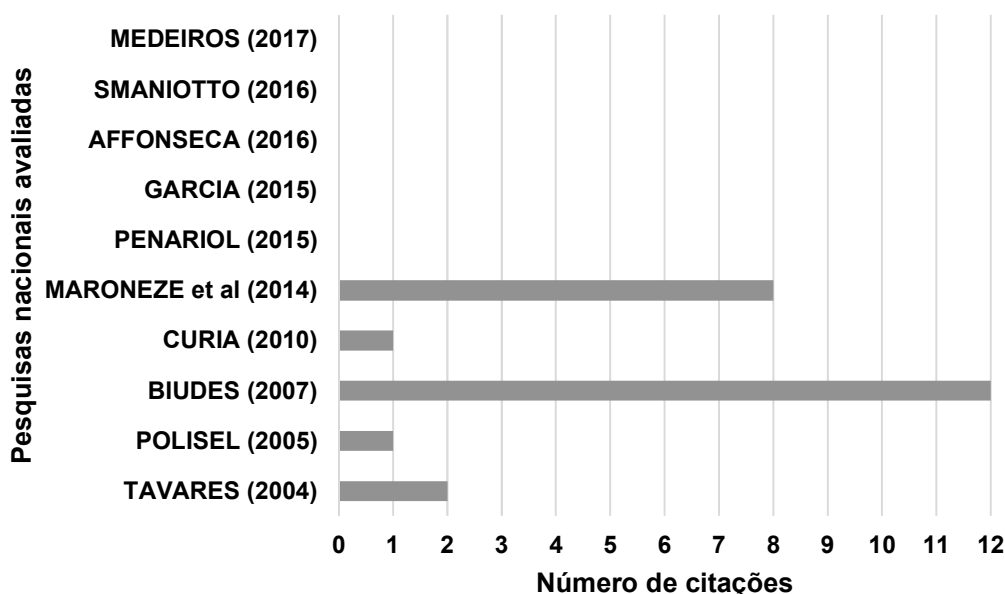
Este tópico irá discutir, de forma geral, características dos estudos selecionados que possam indicar a relevância dos mesmos no contexto do presente trabalho, como o ano em que foram publicados e a existência de citações em outros projetos, e também a análise dos países em que essas pesquisas foram desenvolvidas.

A amostra total coletada, composta pelas pesquisas nacionais e internacionais, possui um universo de 47 estudos a serem discutidos. Dessa forma, os trabalhos nacionais possuem uma representatividade de aproximadamente 25%, o que equivale a 12 pesquisas, pois na literatura internacional foram encontrados dois estudos brasileiros que foram também selecionados para a revisão.

Contudo, mesmo apresentando uma elevada representatividade no tamanho da amostra, a maior parte dos estudos brasileiros não possuem citações em outras pesquisas. Isso pode ser explicado por os trabalhos nacionais serem: a) em sua maioria, retornados pela plataforma de pesquisa em teses e dissertações, ou seja, não foram pesquisas publicadas em revistas, diminuindo assim a visibilidade dos mesmos; b) não apresentarem dados tão significativos em seu desenvolvimento em comparação com as pesquisas internacionais selecionadas; c) o idioma, pois os artigos internacionais estão em inglês.

Na Figura 01, pode-se perceber que apenas 50% das pesquisas nacionais já foram mencionadas em outros estudos, destacando-se a tese realizada por BIUDES (2007) que, até o momento, possui 12 citações e aborda a avaliação do tratamento de efluentes utilizando macrófitas com foco para remoção de Nitrogênio e Fósforo, e também a possibilidade da utilização do resíduo final do processo na alimentação de peixes da espécie tilápia-do-nilo.

Figura 01. Número de citações por artigo nacional.

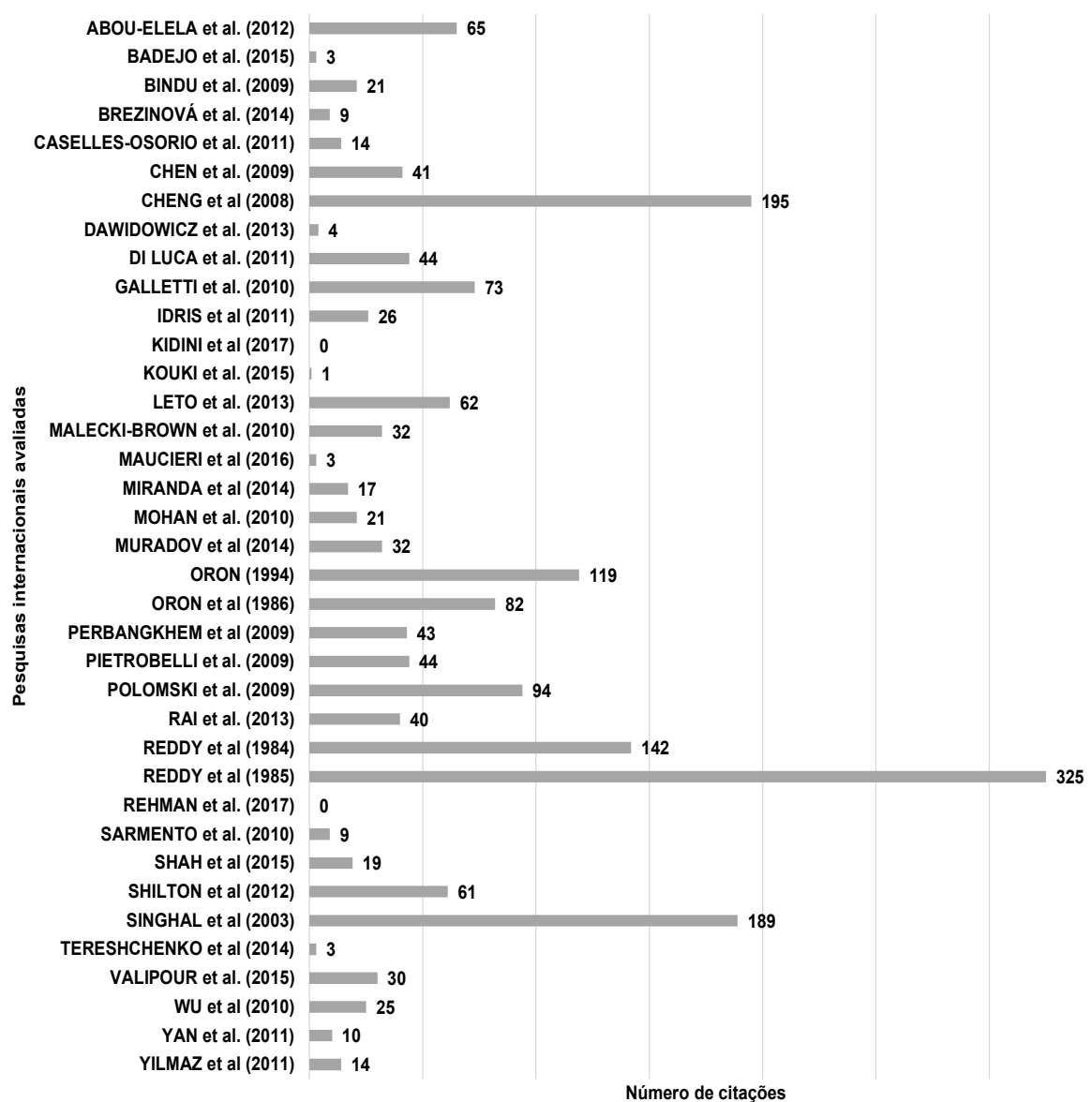


Fonte: Autor (2018).

O segundo estudo nacional mais citado foi realizado por MARONEZE *et al.* (2014), sendo este a única pesquisa no formato de artigo dentre a pesquisa nacional, possuindo 8 citações. Este estudo teve como objetivo a análise de diferentes processos, incluindo o tratamento utilizando macrófitas aquáticas, na remoção de Fósforo presente em efluentes industriais.

Como apresentado na Figura 03, diferentemente dos estudos nacionais, as pesquisas internacionais possuem publicações bem mais antigas, onde o estudo realizado por REDDY *et al.* (1985) avaliaram o potencial da espécie *Eichhornia crassipes* na remoção de nutrientes de esgoto doméstico e também a produção da biomassa do processo. Esse estudo, além de ser o segundo mais antigo contido na amostra, é também o mais citado dentre as pesquisas internacionais, possuindo um total de 325 citações como mostra a Figura 02.

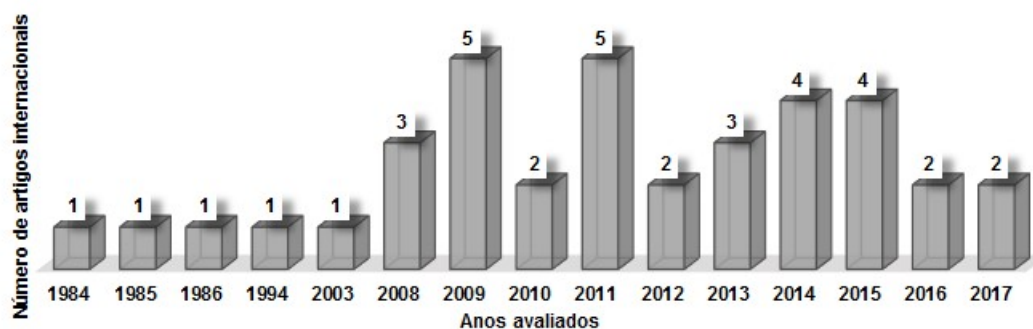
Figura 02. Número de citações por artigo internacional.



Fonte: Autor (2018).

Analizando toda a amostra, nacional e internacional, os anos de 2009 e 2011 foram os que apresentaram o maior número de estudos sobre o tema, 5 pesquisas cada ano.

Figura 03. Número de artigos internacionais publicados por ano.

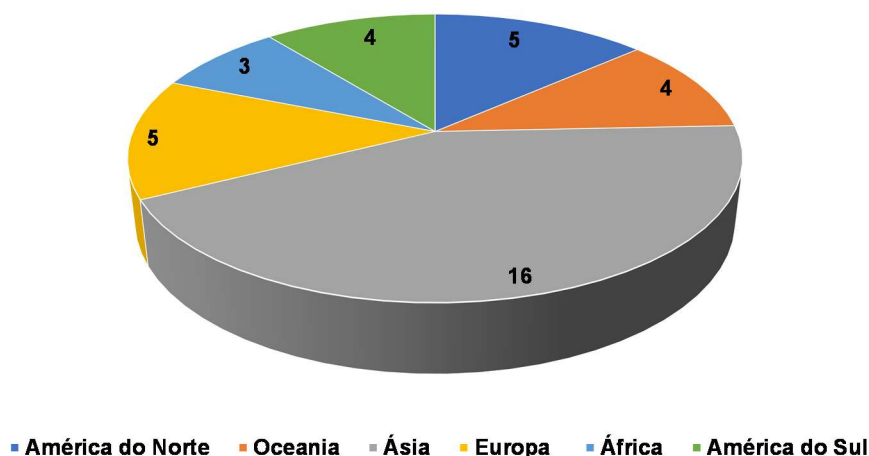


Fonte: Autor (2018).

Dentre os internacionais, todos os estudos são artigos e já foram publicados em revistas, o que pode explicar o número significativo de citações, tendo apenas dois entre os 37 que não possui nenhuma citação até o momento.

Os artigos internacionais concentram-se na América do Norte, mais especificamente nos Estados Unidos, na Ásia, na Europa, apresentando um menor número nos outros continentes. A Figura 04 aponta os números referente a cada um mencionado acima, com destaque para o continente Asiático, que apresentou, aproximadamente, 43% dentre os internacionais, sendo 5 artigos desenvolvidos na Índia.

Figura 04. Quantidade de artigos internacionais publicados por continente.



Fonte: Autor (2018).

Quanto aos países, a amostra foi bastante diversa, apresentando em sua maioria países subdesenvolvidos, mas também foram apontados países desenvolvidos, como Estados Unidos e Austrália.

Em relação ao efluente tratado durante o processo utilizando macrófitas aquáticas, a maior parte dos estudos tem como foco o tratamento de efluentes doméstico real ou de efluentes sintéticos de características semelhantes. Em menor quantidade, foram encontrados estudos sobre o tratamento de efluentes industriais ou de efluentes sintéticos de características semelhantes aos industriais.

Tem também destaque dentre os estudos nacionais, o tratamento de efluentes provenientes de aquiculturas, pois a criação de peixes em tanques e viveiros requer um manejo adequado que traduz-se na manutenção da qualidade da água presente. Assim, as macrófitas podem se apresentar como biofiltros capazes de manter as concentrações de materiais orgânicos em níveis adequados e, conseqüentemente, influenciando na qualidade da água e dos organismos existentes (PENARIOL 2015).

Os estudos, ainda quando utilizam de efluentes provenientes de alguma atividade econômica, foram todos realizados em escala laboratorial, dificultando assim a determinação da viabilidade para sistemas reais em maior escala.

6.2 Espécies utilizadas no tratamento

De acordo com o posicionamento das macrófitas aquáticas no corpo d'água, o sistema de tratamento de efluentes pode ser caracterizado em submerso, enraizado, integrado e flutuante. O último é constituído por plantas que não são fixas ao substrato e as espécies mais adequadas para o processo são *Eichhornia crassipes*, *Azolla filiculoides* e do gênero *Lemna spp.* (TAVARES, 2014).

As espécies flutuantes podem ser consideradas mais produtivas que as enraizadas na remoção de nutrientes. Isso pode ser explicado por que as últimas atuam nos sedimentos, já as flutuantes atuam diretamente no corpo d'água. Quando comparadas às outras macrófitas aquáticas, as flutuantes também se mostram mais resistentes às baixas temperaturas, altos níveis de nutrientes, pragas e doenças (IQBAL, 1999).

A escolha da espécie a ser utilizada no tratamento de efluentes, visando a viabilidade técnica e econômica do sistema, tem como característica principal a busca por macrófitas que possuam disponibilidade no local em que o processo será desenvolvido.

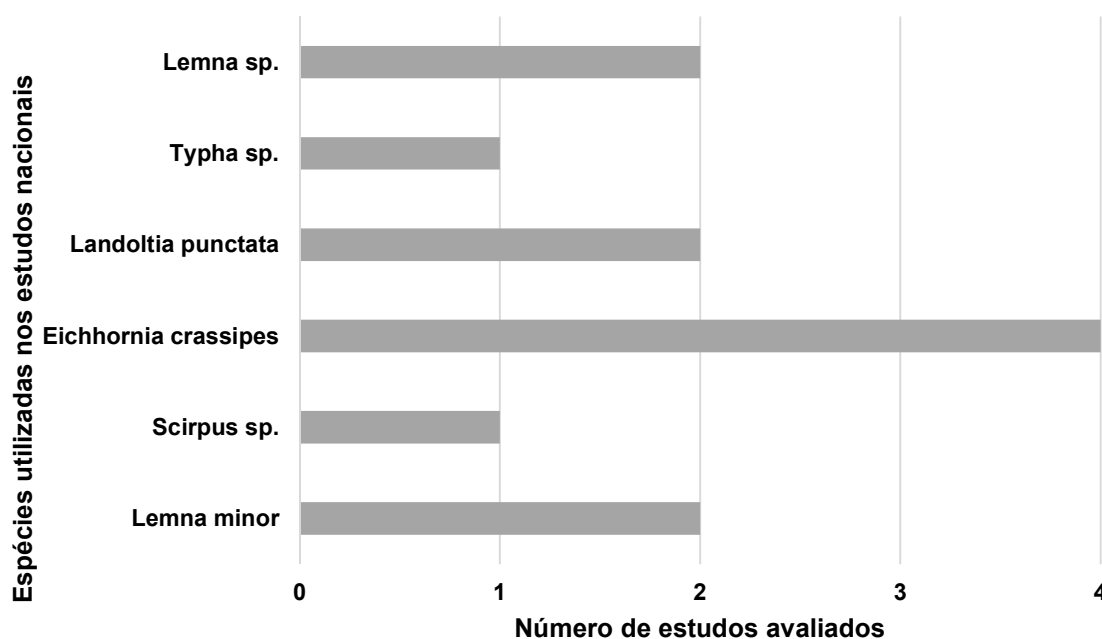
Contudo, estudos apontam que diferentes espécies possuem comportamentos distintos quando colocadas em diferentes efluentes, temperaturas e outros fatores

físicos do ambiente. Como já mencionado no presente trabalho, a grande problemática deste tratamento é a elevada geração de resíduos, onde diferentes espécies também possuem diferentes taxas de crescimento e, consequentemente, de geração de biomassa ao final do processo.

6.2.1 Espécies utilizadas nos estudos nacionais

A Figura 05 apresenta as diferentes espécies e gêneros que foram utilizadas para a execução dos estudos nacionais, com destaque para a espécie *Eichhornia crassipes* que esteve presente em 40% dos mesmos.

Figura 05. Espécies utilizadas nos estudos nacionais.



Fonte: Autor (2018).

Segundo DELLAROSSA *et al.* (2001), a espécie *Eichhornia crassipes* possui alta capacidade de remoção de nitrogênio, tanto na forma de amônia quanto na forma de nitrato, apresentando bom desempenho e crescimento em climas mais quentes, e também em estações mais frias, como no inverno, onde é protegida pela temperatura mais elevada geralmente apresentada pelo efluente.

Em uma avaliação para o tratamento de efluentes de viveiros de aquicultura, MEDEIROS (2017) estudou o comportamento e a performance de duas espécies, *Eichhornia crassipes* e *Lemna minor* durante um período de 7 dias. Embora ambas as

espécies tenham alcançado reduções nos níveis de Nitrogênio total e Fósforo total e dissolvido, o desempenho não foi o esperado, visto que os níveis de Nitrogênio orgânico aumentaram consideravelmente (77,2 a 504,2%) e também a quantidade de nutrientes presentes na biomassa final não superaram os valores iniciais, dificultando ainda mais o processo de reaproveitamento deste resíduo.

Por outro lado, PENARIOL (2015) avaliou a mesma espécie, *Eichhornia crassipes*, durante 6 meses e também com efluentes de aquicultura, onde três diferentes tanques foram construídos para as análises do tratamento com macrófitas, com perifíton e com a combinação destes. De forma geral, foi apontado como adequado o tratamento utilizando macrófitas e indicado para utilizá-las como biofiltro, visando a remoção de nutrientes em excesso para minimizar os efeitos negativos na produção dos animais presentes e bem como na manutenção da qualidade da água. Desta forma, o desempenho da espécie na primeira situação pode não ter sido satisfatório como esperado devido ao curto tempo do experimento.

As diferentes espécies de macrófitas reagem de diferentes formas quando submetidas a ambientes com condicionantes climáticos distintos. IQBAL (1999) descreve que a faixa ideal de temperatura para o crescimento do gênero *lemna* está entre 7°C e 25°C a 35°C, variando para cada espécie. Temperaturas elevadas podem ocasionar estresse devido ao calor e, conseqüentemente, pode haver uma contração na produtividade das plantas. Outro condicionante apontado é o regime de chuvas, onde é necessário haver a precipitação, pois a limpeza das superfícies, que irão absorver os nutrientes, acelera o processo. Porém, um regime muito intenso pode diminuir a luminosidade, ocasionando efeitos negativos para o processo.

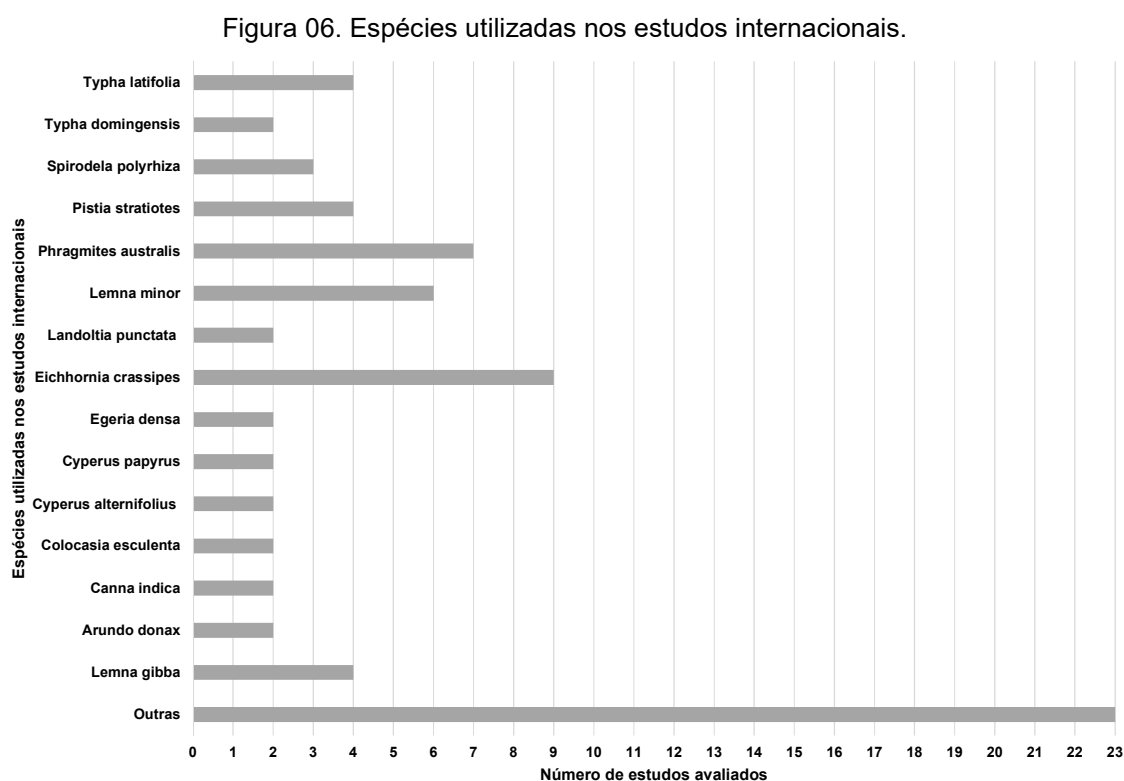
A espécie *Landoltia punctata* foi estudada por SMANIOTTO (2016) por apresentar um bom desempenho na acumulação de amido. O experimento consistiu no uso da macrófita para o tratamento de esgoto doméstico, onde foi avaliado o crescimento da biomassa e o comportamento da espécie no tratamento. Durante todo o procedimento foram registrados dados climáticos que pudessem interferir no experimento e o autor relata que alguns tanques podem ter sofrido variações devido a mudança da incidência solar. Contudo, de forma geral, os resultados podem ser considerados promissores a partir da análise de remoção de DQO, DBO, Sólidos Totais, Nitrogênio Total, Fósforo Total e Amônia.

Apesar de muitos estudos indicarem resultados promissores no uso de *Eichhornia crassipes* e *Lemna minor* para o tratamento de efluentes e estas serem

geralmente as mais utilizadas, POLISEL (2005) aponta que essas espécies, mesmo alcançando bons resultados na eficiência de remoção de nutrientes, apresentaram durante o seu experimento muitos problemas operacionais e aumento de custos do processo relacionado à aplicação, com isso, o autor aconselha que estas não devem ser utilizadas em lagoas para o tratamento de esgoto.

6.2.2 Espécies utilizadas nos estudos internacionais

Dentre os artigos internacionais selecionados, como mostra a Figura 06, a espécie *Eichhornia crassipes* também teve destaque, seguida pelas espécies *Lemna minor* e *Lemna gibba*.



Fonte: Autor (2018).

REDDY *et al.* (1985) avaliaram o comportamento de oito espécies de macrófitas aquáticas na remoção de nutrientes a partir de um efluente sintético. Os procedimentos foram realizados durante o verão e o inverno de forma a qualificá-las quando submetidas à diferentes ambientes climáticos. Para a remoção de Nitrogênio, durante o verão, a ordem seguindo o melhor desempenho foi *Eichhornia crassipes*, *Pistia stratiotes*, *Hydrocotyle umbellata*, *Lemna minor*, *Salvinia rotundifolia*, *Spirodela*

polyrhiza e *Egeria densa*. Durante o inverno, a melhor performance foi da espécie *Hydrocotyle umbellata*, seguida por *Eichhornia crassipes*, *Lemna minor*, *Pistia stratiotes*, *Spirodela polyrhiza*, *Salvinia rotundifolia* e *Egeria densa*. Para a remoção de Fósforo, durante o verão as melhores taxas foram das espécies *Eichhornia crassipes* e *Egeria densa*, e durante o inverno, as melhores foram de *Hydrocotyle umbellata* e *Lemna minor*. De modo geral, as remoções foram mais significativas durante o verão do que no inverno.

Segundo ORON (1994), a partir de uma análise preliminar dos experimentos, foi constatado que a espécie *Lemna gibba* era preferencial para o tratamento de esgoto doméstico frente às espécies *Wolffia arrhiza* e *Spirodela polyrrhiza*. Esse estudo inicial avaliou parâmetros físicos como a taxa de crescimento das plantas, a remoção de Nitrogênio alcançada, o teor de proteína no resíduo final, e também características gerais como a cor das plantas, o tamanho de suas folhas e comprimento das raízes.

CHENG *et al.* (2008) estudaram a viabilidade da implantação de um sistema utilizando *Spirodela punctata*, *Lemna gibba* e *Lemna minor* no tratamento de efluentes oriundos de criação de porcos, onde o sistema deveria substituir um antigo que estava apresentando efeitos negativos, dentre eles contaminação de águas superficiais e subterrâneas, odor e outros. Essas espécies foram escolhidas a partir de duas etapas, a primeira delas consistiu em submeter diferentes espécies a um efluente sintético com características que se aproximavam do efluente real a ser tratado, aproximadamente mil plantas foram coletadas e dentre esta amostra 41 delas apresentaram um rápido crescimento, onde pelo menos uma a cada 4 analisadas eram do gênero *Lemnaceae*. Foram então selecionadas 8 espécies que apresentaram os melhores resultados diante do efluente sintético e em seguida, a segunda etapa consistiu na avaliação dessas espécies no efluente real, onde as três citadas anteriormente obtiveram um melhor desempenho na remoção de nutrientes e na taxa de crescimento.

O estudo realizado por YILMAZ *et al.* (2011) investigou o comportamento das espécies *Lemna gibba* e *Lemna minor* na remoção de metais pesados (chumbo, níquel, manganês e cobre), e listou algumas vantagens desse gênero, tais como a alta taxa de produção, a facilidade na colheita manual, o alto teor de proteína e o baixo teor de fibras. Como desvantagem, os referidos autores destacam a característica de crescimento apenas quando estão localizadas na camada superior dos sistemas e

que, como solução, indicam a utilização de diferentes espécies combinadas, o que favorece o tratamento, além de melhorar a qualidade do efluente.

6.3 Parâmetros avaliados dos efluentes

Os parâmetros avaliados no efluente final possuem uma estreita relação com o tipo/origem de efluente tratado. Nos estudos que abordaram o tratamento de efluentes industriais, na maioria das vezes, teve como objetivo a remoção de metais pesados. Os trabalhos sobre o tratamento de efluentes domésticos tiveram como foco a análise de parâmetros físico-químicos e biológicos tais como pH, turbidez e sólidos suspensos, além da remoção de carga orgânica (DBO e DQO, e nutrientes, nitrogênio e fósforo).

6.3.1 Parâmetros avaliados nos estudos nacionais

Dentre os estudos nacionais, 2 deles se referiram à efluentes industriais, os outros focaram as pesquisas em efluentes domésticos, de carcinicultura (criação de crustáceos), de aquicultura (criação de peixes e mariscos) e de suinocultura (criação de porcos). No universo dos artigos internacionais, 3 estudos utilizaram efluentes de suinocultura e aquicultura, e todos os outros se referiram a efluentes industriais ou domésticos.

Dentre as 2 pesquisas que utilizam efluente industrial no tratamento, a primeira delas desenvolvida por CURIA (2010) que opera com os efluentes gerados por uma indústria metal-mecânica e expande o trabalho em escala piloto e industrial. O principal objetivo é alcançar níveis de remoções que permitam o reuso da água para fins não potáveis, como irrigação apenas paisagística, lavagem de equipamentos da fábrica, descarga de vaso sanitário e outros. As espécies utilizadas foram *Scirpus sp.* e *Typha sp.* de forma individual cada uma e foram monitorados os parâmetros físico-químicos e biológicos. Os resultados médios das remoções atingidas pelo sistema em escala piloto e industrial, foram: (piloto-industrial) 73%-49%, 61%-42%, 56%-46%, 54%-49%, 57%-46% e 66%-69% de Fósforo total, NTK, $\text{NH}_4\text{-N}$, DQO, DBO e Sólidos Suspensos, respectivamente. Foram também avaliadas as remoções de metais pesados como Alumínio, Cromo Total, Ferro Total, Sódio, Vanádio e Zinco, onde todos alcançaram os valores limites padrões para o lançamento em corpos d'água.

A outra pesquisa selecionada que trata também de efluente industrial foi desenvolvida através de uma revisão e que tem como objetivo estudar diferentes formas de tratamento que sejam capazes de remover o Fósforo presente e permitir o reuso do elemento. Segundo MARONEZE *et al.* (2014), os processos mais indicados para esse tratamento seriam diferentes formas de precipitação do elemento, remoção por adsorção, remoção biológica, remoção utilizando microalgas, remoção utilizando macrófitas e fertirrigação. O sistema utilizando macrófitas então é atraente devido ao seu baixo custo e às diferentes formas em que o produto final pode ser destinado, como fertilizantes e produção de bioetanol, a grande dificuldade do sistema se dá no manejo, devido ao elevado crescimento das plantas, e na adaptação ao clima, pois, como dito anteriormente, baixas temperaturas tendem a diminuir este crescimento.

TAVARES (2004) desenvolveu um estudo que tinha como objetivo otimizar a suinocultura de Santa Catarina. Desta forma, o experimento foi dividido em duas etapas, onde a primeira consistia na análise das eficiências de remoções dos poluentes presentes no efluente utilizando macrófitas do gênero *Lemna sp.*, e a segunda tinha como objetivo avaliar o uso da biomassa resultante como alimento para peixes da espécie tilápia nilóticas, esta última fase será abordada no próximo item do presente trabalho. Avaliando as remoções de carga poluente, foram então testadas diferentes concentrações de DQO, num intervalo de tempo de 21 dias, para que fosse estudada a influência dessas concentrações nos diferentes parâmetros avaliados. Desta forma, conclui-se que a eficiência de remoção de DBO, Sólidos Suspensos e Totais, e Ortofosfato foi maior para menores concentrações (400 e 550 mg/L). Porém, a taxa de crescimento das plantas teve um melhor resultado para a maior concentração (1000 mg/L), desta forma a concentração que obteve um melhor resultado geral foi para o valor de 700 mg/L, que alcançou uma remoção de DBO de 63,3%.

A pesquisa que utilizou efluente de carcinicultura para o tratamento utilizando macrófitas foi desenvolvida por BIUDES (2007), onde o efluente era proveniente do cultivo de camarões da espécie *Macrobrachium rosenbergii* e foram utilizadas macrófitas da espécie *Eichhornia crassipes*. O estudo aconteceu durante um período de 270 dias, onde as análises eram realizadas a cada 30 dias, essas consistiam na determinação da eficiência de remoção de Nitrogênio e Fósforo, e também na pesagem do resíduo das plantas gerado no sistema. De acordo com a produtividade alcançada, o autor aconselha a utilização dessa espécie para sistemas de tratamento

de efluentes da cultura avaliada, desde que aconteça a manutenção periódica da biomassa para que a espécie alcance a produtividade ótima. A melhor eficiência de remoção para Nitrogênio e Fósforo foi então atingida aos 90 dias do experimento.

A pesquisa realizada por MEDEIROS (2017) utilizou o efluente de um sistema de aquicultura onde eram realizados os cultivos das espécies *Colossoma macropomum* e *Macrobrachium amazonicum*. O experimento foi realizado com o uso das macrófitas *Eichhornia crassipes* e *Lemna minor*, onde estas atuaram de forma individual por um período de sete dias, e foram aplicadas à três diferentes tanques, o primeiro deles possuía apenas efluente da criação de *Colossoma macropomum*, o segundo apenas *Macrobrachium amazonicum*, e o terceiro era o efluente do policultivo das duas espécies citadas. De forma geral, os melhores valores de OD (Oxigênio Dissolvido), pH e Sólidos Suspensos foram indicados pela espécie *Lemna minor*, e a transparência do efluente foi otimizada com o uso da espécie *Eichhornia crassipes*. Na avaliação das remoções de Nitrogênio e Fósforo foi percebido que as maiores taxas de concentração desses elementos estava retida nos sedimentos, onde na avaliação do Fósforo no início do tratamento as concentrações dos elementos eram de, aproximadamente, 79% para os tanques que utilizavam a espécie *Eichhornia crassipes* e 98% para a espécie *Lemna minor*, onde ao final dos sete dias os resultados foram: para a *Eichhornia crassipes* 65% estava presente nos sedimentos e 19% na biomassa da espécie, e a remoção alcançada do elemento no efluente foi de 63%; para a espécie *Lemna minor*, 64% estava presente nos sedimentos e apenas 1% na biomassa da espécie, e a remoção alcançada do elemento no efluente foi de 64%, estando os valores de remoções bem próximos para as duas espécies.

Para a avaliação do Nitrogênio, o comportamento das espécies foi similar às remoções de Fósforo do efluente, onde as concentrações dos elementos ao final do experimento nas macrófitas eram menores que o relatado no início do tratamento. O autor então sugere que a não absorção dos nutrientes pelas espécies pode ser consequência, no caso dos tanques que utilizaram *Lemna minor*, devido a competição com o fitoplâncton o que levou a redução da biomassa dificultando a absorção dos elementos. No caso da segunda espécie, a região abrangida por essa era bem maior, o que não permitia a passagem da luz para o interior do tanque e assim dificultava o desenvolvimento do fitoplâncton, o seu desempenho então não foi esperado e relata como única explicação a possibilidade da espécie ter assimilado nutrientes antes do tratamento e durante ter utilizado destes elementos para crescer, pois foi constatado

o aumento da biomassa ao final do plano e diminuição dos nutrientes presentes da biomassa resultante.

É importante ressaltar que a similaridade dos resultados de experimentos que utilizam de diferentes espécies pode ser explicada pelo número de replicações dos experimentos, pois um número inferior ao necessário leva à uma baixa confiança nos resultados obtidos (SMART *et al.*, 1998 *apud* MEDEIROS, 2017).

Dentre os estudos que utilizaram como efluente para o desenvolvimento da pesquisas efluentes domésticos e sanitários, os que apresentaram os melhores resultados quanto às eficiências de remoção de nutrientes foram os estudos desenvolvidos por AFFONSECA (2016) e GARCIA (2015). Segundo AFFONSECA (2016), o resultado das análises dos parâmetros do efluente tratado foi satisfatório, visto que em escala real a remoção de fósforo total chegou à uma eficiência média de 77%, amônia apresentou 75% de remoção, DBO de 89%, seguido por DQO de 80% e Sólidos Suspensos Totais (SST) de 85%.

O estudo desenvolvido por GARCIA (2015) consistiu no tratamento de efluentes sanitários em escala piloto utilizando a espécie *Landoltia punctata*. O resultado obtido a partir da análise das eficiências de remoções dos nutrientes foi considerado satisfatório e promissor, onde o autor destaca ser um processo de fácil operação e baixo custo. Dessa forma, as melhores eficiências alcançadas para Nitrogênio Total, Fósforo Total, DQO e DBO, foram 74,67%, 66,18%, 88,12% e 91,14%, respectivamente. Contudo, em relação aos sólidos totais, o tratamento não foi tão eficaz como esperado, apresentando a maior taxa de remoção em aproximadamente 48,90%. Durante o experimento foram também monitoradas algumas variáveis climáticas como a temperatura, esta teve seus valores máximos e mínimos em 34,5°C e 10,5°C, o que estava satisfatório para o crescimento das plantas.

6.3.2 Parâmetros avaliados nos estudos internacionais

O trabalho em que se obteve maior eficiência na remoção de carga orgânica e nutrientes de esgotos domésticos foi realizado por IDRIS *et al.* (2011), na Austrália. Neste trabalho, apresentou-se um sistema de tratamento para efluentes de aquicultura, no intuito de se avaliar a possibilidade de reuso em cultivos de alimentos. No referido trabalho, foram utilizadas as espécies *Arundo donax* e *Phragmites australis*. A eficiência de remoção de DBO, sólidos suspensos totais, fósforo total,

nitrogênio total, amônia e *Escherichia coli* foram, respectivamente: (i) 94%, 67%, 96%, 97%, 99,6% e 100% (para *Arundo donax*); e (ii) 95%, 87%, 95%, 98%, 99,7% e 100% (para *Phragmites australis*). O trabalho conclui que, embora as eficiências das macrófitas avaliadas tenham sido similares, o uso da espécie *A. Donax* é mais vantajoso devido ao melhor desempenho energético da biomassa resultante.

O trabalho em que se obteve a maior eficiência na remoção de Cromo foi realizado por BADEJO *et al.* (2015) e apresentou também resultados satisfatórios na remoção de outros metais pesados. Este trabalho foi realizado na Nigéria e apresentou um sistema de tratamento piloto de sistemas alagados construídos com o objetivo de tratar efluentes industriais, utilizando em consórcio as espécies *Phragmites karka*, *Vetiveria nigriflora* e *Canna lilies*. As eficiência de remoção de Chumbo, Magnésio e Cromo foram 15,4%, 79,7% e 97,9%, respectivamente.

Dentre os estudos internacionais selecionados, apenas 3 deles utilizaram efluente proveniente da criação alguma cultura. A primeira pesquisa foi desenvolvida por CHENG *et al.* (2008) que utilizou o efluente de suinocultura. CHENG *et al.* (2008) utilizou três espécies durante seu experimento, todas o gênero *Lemnaceae*, que foram: *Spirodela punctata*, *Lemna minor* e *Lemna gibba*. O objetivo do estudo era a análise das remoções de Nitrogênio e Fósforo do efluente e o crescimento das plantas durante o tratamento. O tratamento foi realizado em escala de laboratório onde foi possível controlar as variáveis externas, foi também apontado que as espécies apresentavam uma melhor taxa de crescimento durante o outono e a primavera, seguido pelo verão, e durante o inverno elas apresentavam as eficiências mais baixas. Como resultado da remoção de nutrientes, foi constatado que as espécies tiveram comportamento semelhantes, onde as taxas de remoção foram de aproximadamente 1,3 g/m²/dia para Nitrogênio e 0,18 g/m²/dia para o Fósforo.

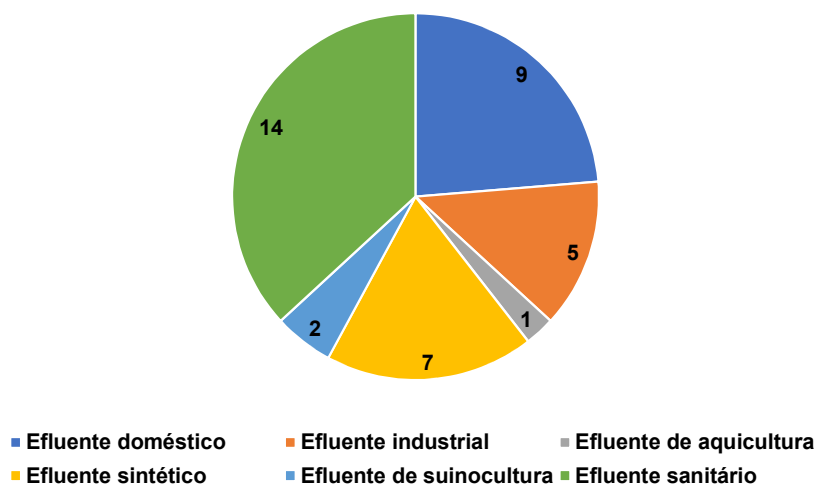
Dentre os artigos que utilizaram efluentes industriais, o estudo proposto por SINGHAL *et al.* (2003) utilizou as espécies *Eichhornia crassipes* e *Vallisneria spiralis*. O efluente era então diluído e durante o tratamento os metais pesados contidos nele eram removidos através da ação das plantas presentes. O foco principal do estudo era a avaliação da biomassa resultante e não foram apresentados dados das eficiências de remoção alcançadas.

Dentre os artigos que utilizaram efluente sintético para o tratamento, o estudo selecionado que apresentou o maior número de citações foi realizado por REDDY *et al.* (1985), onde foi utilizado um efluente sintético afim de simular características de

um esgoto sanitário. O tratamento avaliou a performance de oito espécies diferentes, são elas: *Eichhornia crassipes*, *Pistia stratiote*, *Hydrocotyle umbellata*, *Lemna minor*, *Spirodela polyrhiza*, *Azolla caroliniana*, *Salvinia rotundifolia* e *Egeria densa*. O autor afirma que, de acordo com os resultados, as plantas obtiveram um comportamento melhor no verão do que no inverno, o que já era esperado. A pesquisa analisou apenas as remoções de Nitrogênio e Fósforo do efluente, onde quanto ao elemento Nitrogênio, durante o verão, o melhor resultado alcançado foi pela espécie *Eichhornia crassipes*, seguido pelas espécies *Pistia stratiote*, *Salvinia rotundifolia*, *Spirodela polyrhiza* e *Egeria densa*. Para as remoções de Fósforo, as espécies *Eichhornia crassipes* e *Egeria densa* apresentaram as melhores eficiências durante o verão e durante o inverno as espécies *Hydrocotyle umbellata* e *Lemna minor* foram as primeiras. A melhor eficiência de remoção de Fósforo foi alcançada no verão com uma taxa de 93% alcançada pela espécie *Eichhornia crassipes*.

Os outros estudos utilizaram efluentes domésticos ou sanitários, onde os sanitários estiveram em maior número, como podemos ver na Figura 07.

Figura 07. Características dos efluentes utilizados nos artigos internacionais.



Fonte: Autor (2018).

Um dos artigos que utilizou efluente sanitário no tratamento, avaliou a remoção de DBO, DQO e de metais pesados presentes no efluente, como cobre, chumbo, manganês e níquel. Esse estudo foi proposto por YILMAZ *et al.* (2011) e utilizou as espécies *Lemna gibba* e *Lemna minor*, de forma individual e conjunta. Para a remoção de nutrientes foi afirmado que quando estavam atuando em conjunto, as espécies se mostraram mais eficientes e os padrões nacionais da Turquia para as concentrações

de DBO e DQO foram atingidos. Quanto à remoção de metais pesados no efluente, a espécie *Lemna gibba* apresentou os melhores resultados, com as seguintes eficiências de remoção: 57%, 60%, 60% e 62%, para cobre, chumbo, níquel e manganês, respectivamente.

Outro estudo que também avaliou o comportamento de macrófitas em efluente sanitário foi proposto por SHAH *et al.* (2015) utilizando as espécies *Eichhornia crassipes*, *Lemna minor*, *Pistia stratiotes*. Foram então avaliadas as remoções de nutrientes e de DBO e DQO de cada espécie atuando de forma individual, e também foram estudadas as faixas ótimas de pH e temperatura para o crescimento das plantas, onde foi percebido que para um pH entre 6 e 9 e para temperaturas entre 15 e 38 °C, as macrófitas apresentavam uma melhor performance. Esse alto valor de temperatura entra em contradição com alguns estudos que afirmam que para temperaturas acima de 35 °C, as espécies não possuem um bom desenvolvimento no tratamento, isso pode ser devido à forma de manejo adotada pelo autor ou também por questões de umidade que as plantas estão submetidas. Quanto aos resultados médios de eficiência de remoção de DBO, DQO, Nitrogênio e Fósforo, para a espécie *Eichhornia crassipes* temos 50,61%, 46,38%, 40,34% e 18,76%, respectivamente. Para *Lemna minor* e *Pistia stratiotes*, 33,43%, 26,37%, 17,59% e 15,25%, respectivamente.

6.4 Biomassa

Como apontado em todas as pesquisas selecionadas para o desenvolvimento dessa revisão, a problemática do processo está no elevado crescimento e reprodução das macrófitas, gerando grandes volumes de resíduos. No que se refere ao manejo da biomassa, inicialmente na investigação das 80 pesquisas nacionais encontradas na literatura, a grande parte delas não apresentam dados ou se quer retomam a biomassa ao longo dos estudos. Nos trabalhos selecionados, apenas pouco mais da metade apresentam dados referentes à biomassa.

Segundo PERBANGKHEM *et al.* (2009), as vantagens associadas ao uso de macrófitas aquáticas no tratamento de efluentes, como a absorção dos nutrientes presentes na água e a capacidade de oxigenar o meio, podem ser complementadas por processos que podem tornar o método mais eficiente. Esses processos estão relacionados ao destino final do resíduo (biomassa) gerado.

Por outro lado, as macrófitas apresentam um elevado teor proteico em sua massa seca resultante, podendo assim originar novos produtos que passam a ter valor econômico no mercado, viabilizando também economicamente o tratamento. A biomassa pode então ser aproveitada em rações de animais, na fabricação de papel, na produção de combustíveis, entre outros.

De uma forma geral, observou-se que a maioria dos estudos buscam mensurar as taxas de crescimento das diferentes espécies utilizadas no processo e apresentam formas de reutilizar o resíduo, como em fertilizantes, produção de biogás, ração para animais, e outros. Alguns poucos analisaram e obtiveram resultados para esse reuso, apresentando dados para comprovar a efetividade dos produtos.

6.4.1 Avaliação da biomassa nos estudos nacionais

O grande marco no tratamento de efluentes utilizando macrófitas está na composição da biomassa seca das diferentes espécies. Para a *Lemna gibba*, LANDESMAN *et al.* (2002) *apud* MARONEZE *et al.* (2014) afirmam que essa espécie apresenta uma composição bastante satisfatória para serem utilizadas como matéria-prima de rações animais e na produção do bioetanol, essa composição aproximada detalhada apresenta os seguintes componentes: proteína, 41,7%; carboidratos, 17,6%; minerais, 16,2%; e lipídeos, 4,4%.

Uma outra alternativa também promissora está no uso da biomassa para a alimentação de alevinos de tilápias-do-nilo. Um estudo proposto por TAVARES (2014) analisou a utilização da biomassa de macrófitas do gênero *Lemna sp.*, onde o sistema foi composto por 3 diferentes cenários, o primeiro deles utilizou apenas ração comercial na alimentação, o segundo apenas a biomassa da planta e o terceiro utilizou um composto formado por 50% de ração comercial e 50% do resíduo. O experimento teve duração de 50 dias e observou-se que a inclusão da biomassa em um nível de até 50% apresenta bons resultados no ganho de peso dos peixes e uma redução nos custos de produção em até 35%.

SMANIOTTO (2016) utilizou a espécie *Landoltia punctata* para avaliar a produção da biomassa resultante do tratamento de efluentes domésticos e quantificou o amido e a proteína bruta acumulada nas plantas devido ao processo com propósito de analisar a viabilidade do uso deste resíduo como rações, devido a proteína, ou na produção de etanol, devido ao amido e hemicelulose presentes. Quanto à taxa de

crescimento das plantas, foi obtido um valor considerado promissor de 5,29 g/m²/dia, que representa 19,3 toneladas/hectare/ano. O autor então constatou que devido à elevada quantidade de nutrientes presente no efluente, os valores de amido presente na biomassa apresentaram valores com pouca variação e em média de 3,2±0,9% em biomassa seca, destacando-se com 4,7% em biomassa seca o maior teor obtido, devido aos baixos valores percentuais, o autor não aconselha a produção de etanol a partir desse tratamento. Contudo, diferentemente do amido e como já esperado, os teores de proteína bruta se mostraram elevados, apresentando uma média de 41,85±0,68% em biomassa seca.

6.4.2 Avaliação da biomassa nos estudos internacionais

Segundo CHENG *et al.* (2008), as espécies *Spirodela punctata*, *Lemna gibba*, *Lemna minor* apresentam um teor proteico variando entre 15 a 45%, o que reflete em uma ótima opção para o reuso da biomassa em rações para animais. É também alvo de estudo essas espécies como fonte de matéria-prima para a produção de amido e combustível, como a geração de etanol.

MIRANDA *et al.* (2014) utilizou as espécies *Landoltia punctata*, *Elodea canadensis* e *Marsilea quadrifolia* em seu estudo e identificou as três macrófitas como espécies que apresentam um crescimento elevado durante o tratamento de efluentes. O autor afirma que além de serem utilizadas na produção de biogás e componentes biosólidos, foi realizada a pirólise dessas plantas que gerou inúmeros petroquímicos no estado líquido, incluindo alcanos que podem ser utilizados na produção de diesel ou como um componente do biodiesel.

Outro estudo proposto por TERESHCHENKO *et al.* (2014) avalia a utilização da biomassa da espécie *Eichhornia crassipes* em vermicompostagem, que é uma variação da compostagem que utiliza minhocas e outros microrganismos para degradar a matéria orgânica. Nessa pesquisa, as macrófitas foram utilizadas no tratamento para remover também metais pesados, porém, observou-se que após um período de aproximadamente 35 dias, os níveis de metais pesados nas plantas eram reduzidos drasticamente. Foram então analisados os processos utilizando a biomassa com níveis consideráveis de metais pesados e quando esperados o período de 35 dias. De forma geral, todas as amostras apresentaram resultados promissores, promovendo o aumento de peso das minhocas e dos microrganismos presentes e

também mostraram um número maior de indivíduos, o que resulta na aceleração do processo de vermicompostagem.

Avaliando a produção de biogás, PERBANGKHEM *et al.* (2009) utilizaram a espécie *Cyperus papyrus* em um experimento com duração de dois meses e em ambiente com clima tropical e incidência solar para promover o crescimento acelerado das plantas, que chegou a 0,04/dia. O resíduo apresentou um peso seco de médio de 2,59 kg/m² e uma captação de energia da ordem de 4,4 a 6,1% do total incidido sobre as mesmas, o que são valores consideráveis quando comparados com outras espécies. Foram também avaliadas quanto à capacidade energética, onde as folhas apresentam os valores mais elevados, aproximadamente 17,2 MJ/kg, seguidas pela estrutura acima da superfície, com 16,8 MJ/kg, e por último estão os caules que apresentaram 16,2 MJ/kg. O autor também destaca que o período ótimo para a retirada das plantas foi entre 41 e 50 dias após o início do tratamento e o manejo adequado das macrófitas proporciona uma taxa de crescimento adequado sempre.

Em uma pesquisa realizada na Austrália, MURADOV *et al.* (2014) apresentaram uma comparação à respeito do manejo da biomassa resultantes de três diferentes espécies, lentilha d'água, *Azolla green* e *Azolla red*. Após o tratamento do efluente, foi realizada uma pirólise com a biomassa de cada uma das macrófitas. Como resultado, obteve-se a decomposição do material em produtos sólidos, líquidos e gasosos, que podem ser utilizados na geração de combustíveis e na indústria petroquímica. Os resultados ainda mostraram que cada espécie, mesmo que de forma sucinta, apresentou um melhor resultado para um diferente estado físico: a lentilha d'água possui um melhor aproveitamento na conversão para óleos, a *Azolla green* para produtos sólidos, como o biocarvão, e a *Azolla red* para os componentes gasosos.

6.5 Custos do processo

Para a determinação da viabilidade econômica de um processo é preciso não só analisar os benefícios trazidos por este, mas também comparar com os recursos necessários para a implantação do sistema. Dentre os 47 estudos selecionados, apenas 3 deles apresentaram alguma composição de custo do tratamento utilizando macrófitas aquáticas, onde 2 foram estudos nacionais e 1 internacional.

6.5.1 Custos relacionados aos estudos nacionais

Durante o seu estudo, AFFONSECA (2016) avaliou três diferentes cenários, onde o primeiro deles foi o tratamento utilizando *Lemnas* em uma Estação de Tratamento de Esgoto (ETE) já existente, a segunda utilizou o sistema de remoção química dos nutrientes também em uma ETE já existente, e a última consistiu em implantar uma nova ETE. Dentre os cenários mencionados, o que apresenta uma melhor viabilidade econômica foi o primeiro, apresentando um valor mensal de, aproximadamente, R\$ 4.500,00 para mão de obra e um investimento inicial, em torno de R\$ 375.000,00. Os outros cenários ficaram com valores da ordem de milhões de reais.

CURIA (2010) afirma que a maior dificuldade na determinação da viabilidade do reuso de águas para fins não potáveis é alcançar um custo que possa competir com o valor da água fornecida por concessionárias. Durante sua análise foi concluído que esse processo pode proporcionar uma redução de custos relacionados ao consumo de água potável, onde essa redução é em média de 18% e apresentou uma eficiência máxima de 44% na redução do consumo total. A autora constatou que o período de retorno do investimento é de, aproximadamente, 4,5 anos. Contudo, a espécie utilizada, o efluente a ser tratado e a região em que o sistema está localizado podem alterar bastante esses valores. GHISI *et al.* (2007) *apud* CURIA (2010) relatam que em seu estudo avaliando o reuso de águas cinzas e de águas da chuva, o tempo de retorno encontrado foi de 28 anos, o que inviabiliza o processo. Entretanto, em um outro estudo utilizando o mesmo efluente, GONÇALVES *et al.* (2005) *apud* CURIA (2010) afirmam que para um sistema de consumo de águas de dois hotéis, o tempo de retorno foi de 4,5 a 8,5 anos, o que ainda torna o sistema razoável.

6.5.2 Custos relacionados aos estudos internacionais

O único estudo selecionado que avalia os custos do processo dentre os artigos internacionais foi proposto por ORON (1994). A espécie estudada foi a *Lemna gibba* e o autor afirma que o rendimento anual do resíduo seco é de, aproximadamente, 55 toneladas por hectare, apresentando um teor de 30% de proteína em sua composição, onde o valor da biomassa poderia chegar a US\$ 0,20/kg. Porém, este estudo é de 1994, logo esse valor monetário não pode ser determinante.

7 CONCLUSÃO

A revisão sistemática da literatura apontou que, do ponto de vista da tecnologia, a utilização de macrófitas no tratamento de efluentes, domésticos e industriais, é bastante viável. Na otimização do processo, devem ser considerados: a tipologia do efluente a ser tratado, a espécie mais adequada à remoção do poluente-alvo do tratamento, as condições que planta estará submetida, as diferentes taxas de crescimento das espécies, entre outros.

Na revisão, a maioria dos trabalhos que contemplaram o manejo da biomassa resultante foi realizada em escala de laboratório; além de que, poucas pesquisas contemplaram os custos do tratamento da biomassa resultante. No entanto, os custos do tratamento e destino final adequados da biomassa resultante devem ser considerados como etapa de mesma importância que o próprio tratamento do efluente, pois esses serão determinantes na viabilidade real do uso de macrófitas.

Portanto, essa revisão destacou os seguintes pontos que podem ser estudados posteriormente e que irão auxiliar em pesquisas futuras à respeito do tema em questão:

- Poucos estudos nacionais referem-se ao tratamento de efluentes oriundos de Estação de Tratamento de Efluentes (ETE) em escala real, a maior parte está relacionada com efluentes de tanques para o desenvolvimento de culturas ou com efluentes que apresentam metais pesados;
- Necessidade do desenvolvimento de pesquisas que avaliem o manejo da biomassa obtida no tratamento, visto que usualmente são apenas realizadas análises em laboratório;
- Poucas pesquisas contemplam os custos devidos ao processo do tratamento, o que dificulta a análise da viabilidade econômica do mesmo;

REFERÊNCIAS

- ABOU-ELELA, S. I.; HELLAL, M. S. **Municipal wastewater treatment using vertical flow constructed wetlands planted with Canna, Phragmites and Cyprus.** Ecological Engineering, 47: 209–213, 2012.
- AFFONSECA, M. E. P. **Avaliação da viabilidade e aplicabilidade de macrófitas aquáticas para polimento de efluentes de estações de tratamento de esgoto doméstico: estudo em escala real.** Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agronômicas. Botucatu, SP, 2016.
- AGNIESZKA, E.; LAWNICZAK, M.; ACHTENBERG, K. **On the use of macrophytes to maintain functionality of overgrown lowland lakes.** Ecological Engineering, 113: 52-60, 2018.
- BADEJO, A. A.; SRIDHAR, M. K. C.; COKER, A. O.; NDAMBUKI, J. M.; KUPOLATI, W. K. **Phytoremediation of Water Using Phragmites karka and Vetiveria nigriflora in Constructed Wetland.** International Journal of Phytoremediation, 17:9, 847-852, 2015.
- BINDU, T.; SUMI, M. M.; RAMASAMY, E. V. **Decontamination of water polluted by heavy metals with Taro (Colocasia esculenta) cultured in a hydroponic NFT system.** Environmentalist, 30:35–44, 2010.
- BIUDES, J. F. V. **Uso de wetlands construídas no tratamento de efluentes de carcinicultura.** Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista, Centro de Aquicultura, 2007.
- BREZINOVÁ, T.; VYMAZAL, J. **Competition of Phragmites australis and Phalaris arundinacea in constructed wetlands with horizontal subsurface flow – does it affect BOD₅, COD and TSS removal?** Ecological Engineering, 73: 53–57, 2014.
- CASELLES-OSORIO, A.; VILLAFANE, P.; CABALLERO, V.; MANZANO, Y. **Efficiency of Mesocosm-Scale Constructed Wetland Systems for Treatment of Sanitary Wastewater Under Tropical Conditions.** Water Air Soil Pollut, 220:161–171, 2011.
- CHEN, J.; WANG, K.; CHEN, H.; LU, C.; HUANG, L.; LI, H.; PENG, T.; CHANG, S. **Phytoremediation of Cr(III) by Ipomoea aquatica (water spinach) from water in the presence of EDTA and chloride: Effects of Cr speciation.** Bioresource Technology, 101: 3033–3039, 2010.

-
- CHENG, J. J.; STOMP, A. **Growing Duckweed to Recover Nutrients from Wastewaters and for Production of Fuel Ethanol and Animal Feed.** *Clean*, 37(1), 17-26, 2009.
- CURIA, A. C. **Banhados construídos como sistema terciário para reúso da água industrial em uma empresa metal-mecânica.** Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, 2010.
- DAWIDOWICZ, P.; OZIMEK, T. **Cladoceran Moina branchiate can not reduce suspended solids in Lemna System macrophyte wastewater treatment plant.** *Ecological Engineering*, 58: 262–265, 2013.
- DELLAROSSA, V.; CÉSPEDES, J.; ZAROR, C. **Eichhornia crassipes-based tertiary treatment of Kraft pulp mill effluents in Chilean Central Region.** *Hydrobiologia*, v. 443: 187-191, 2001.
- DI LUCA, G. A.; MAINE, M. A.; MUFARREGE, M. M.; HADAD, H. R.; SÁNCHEZ, G. C.; BONETTO, C. A. **Metal retention and distribution in the sediment of a constructed wetland for industrial wastewater treatment.** *Ecological Engineering*, 37: 1267–1275, 2011.
- ESTEVES, F. de A. **Fundamentos de limnologia.** 3. ed. Rio de Janeiro: Interciência, 826 p, 2011.
- GALLETTI, A.; VERLICCHI, P.; RANIERI, E. **Removal and accumulation of Cu, Ni and Zn in horizontal subsurface flow constructed wetlands: Contribution of vegetation and filling medium.** *Science of the Total Environment*, 408: 5097–5105, 2010.
- GARCIA, D. C. de O. **Avaliação de lagoas de lemnáceas no polimento de esgoto doméstico e produção de biomassa.** Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. Área de conhecimento: Recursos Hídricos e Tecnologias Ambientais, 2015.
- IDRIS, S. M.; JONES, P. L.; SALZMAN, S. A.; CROATTO, G.; ALLINSON G.. **Evaluation of the giant reed (Arundo donax) in horizontal subsurface flow wetlands for the treatment of recirculating aquaculture system effluent.** *Environ Sci Pollut Res*, 19:1159–1170, 2011.
- IQBAL, S. **Duckweed aquaculture, potentials, possibilities and limitations for combined wastewater treatment and animal feed production in developing countries.** Switzerland: SANDEC, 91 p, 1999.

-
- KHAN, K. S., KUNZ, R., KLEIJNEN, J. & ANTES, G. **Five steps to conducting a systematic review**. Journal of the Royal Society of Medicine, 96(3):118-121, 2003.
- KIDINI, L.; SALLEH, S. **Phytoremediation of Nitrogen as green chemistry for wastewater treatment system**. International Journal of Chemical Engineering, 2017.
- KOUKI, S.; SAIDI, N.; M'HIRI, F.; HAFIANE, A. **A Comparative Study of Nutrients, Cadmium, and Chromium Bioremoval Efficiencies of Three Emergent Macrophytes From a MetalContaminated Wastewater**. Clean – Soil, Air, Water, 43 (11), 1531–1537, 2015.
- LETO, C.; TUTTOLOMONDO, T.; BELLA, S. L.; LEONE, R.; LICATA, M. **Effects of plant species in a horizontal subsurface flow constructed wetland – phytoremediation of treated urban wastewater with *Cyperus alternifolius* L. and *Typha latifolia* L. in the West of Sicily (Italy)**. Ecological Engineering, 61: 282–291, 2013.
- MALECKI-BROWN, L. M.; WHITE, J. R.; BRIX, H. **Alum application to improve water quality in a municipal wastewater treatment wetland: Effects on macrophyte growth and nutrient uptake**. Chemosphere, 79: 186–192, 2010.
- MAUCIERI, C.; CAVALLARO, V.; CARUSO, C.; BORIN, M.; MILANI, M., BARBERA, A. C. **Sorghum biomass production for energy purpose using treated urban wastewater and diferente fertilization in a mediterranean environment**. Agriculture, 6(4), 67, 2016.
- MARONEZE, M. M.; ZEPKA, L. Q.; VIEIRA, J. G.; QUEIROZ, M. I.; JACOB-LOPES, E. **A tecnologia de remoção de fósforo: gerenciamento do elemento em resíduos industriais**. Rev. Ambient. Água, v.9 no.3 Taubaté July/Sept, 2014.
- MEDEIROS, M. V. **Policultivo de tambaqui e camarão-da-amazônia: características limnológicas, avaliação do impacto ambiental e tratamento do efluente**. Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista, Centro de Aquicultura, 2017.
- MIRANDA, A. F.; MURADOV, N.; GUJAR, A.; STEVENSON, T.; NUGEGODA, D.; BALL, A. S.; MOURADOV, A. **Application of Aquatic Plants for the Treatment of Selenium-Rich Mining Wastewater and Production of Renewable Fuels and Petrochemicals**. Journal of Sustainable Bioenergy Systems, 4, 97-112, 2014.
- MOHAN, S. V.; MOHANAKRISHNA, G.; CHIRANJEEVI P.; PERI D.; SARMA, P. N. **Ecologically engineered system (EES) designed to integrate floating, emergent and submerged macrophytes for the treatment of domestic sewage and acid rich**

-
- fermented-distillery wastewater: Evaluation of long term performance.** Bioresource Technology, 101: 3363–3370, 2010.
- MOHEDANO, R. A. **Uso de macrófitas lemnáceas (*Landoltia punctata*) no polimento e valorização do efluente de suinocultura e na fixação de carbono.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) - Universidade Federal de Santa Catarina, 2012.
- MURADOV, N.; TAHA, M.; MIRANDA, A. F.; KADALI, K.; GUJAR, A.; ROCHFORT, S.; STEVENSON, T.; BALL, A. S.; MOURADOV, A. **Dual application of duckweed and azolla plants for wastewater treatment and renewable fuels and petrochemicals production.** Biotechnology for Biofuels, 7:30, 2014.
- NJOGU, P.; KINYUA, R.; MUTHONI, P.; NEMOTO, Y. **Biogas production using water hyacinth (*Eichhornia Crassipes*) for electricity generation in Kenya.** Energy and Power Engineering, v. 7, no. 5, pp. 209–216, 2015.
- ORON, G. **Duckweed culture for wastewater renovation and biomass production.** Agricultural Water Management, 26: 27-40, 1994.
- ORON, G.; PORATH, D. **Performance of the Duckweed species *Lemna gibba* on municipal wastewater for effluent renovation and protein production.** Biotechnology and Bioengineering, v. XXIX, Pp. 258-268, 1987.
- PENARIOL, I. C. **Parâmetros bióticos e abióticos em tanques de piscicultura tratados com macrófita aquática e perifiton.** Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual Paulista, 2015.
- PERBANGKHEM, T.; POLPRASERT, C. **Biomass production of papyrus (*Cyperus papyrus*) in constructed wetland treating low-strength domestic wastewater.** Bioresource Technology, 101: 833-835, 2010.
- PIETROBELLI, J. M. T. de A.; MÓDENES, A. N.; FAGUNDES-KLEN, M. R.; ESPINOZA-QUIÑONES, F. R. **Cadmium, Copper and Zinc Biosorption Study by Non-Living *Egeria densa* Biomass.** Water Air Soil Pollut, 2009.
- POLISEL, K. C. **Desempenho de lagoas de maturação utilizando macrófitas aquáticas e chicaneamento.** Tese (doutorado) – Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos, 2005.
- POLOMSKI, R. F.; TAYLOR, M. D.; BIELENBERG, D. G.; BRIDGES, W. C.; KLAINE, S. J.; WHITWELL, T. **Nitrogen and Phosphorus Remediation by Three Floating Aquatic Macrophytes in Greenhouse-Based Laboratory-Scale Subsurface Constructed Wetlands.** Water Air Soil Pollut 197: 223-232, 2009.

-
- RAI, U. N.; TRIPATHI, R. D.; SINGH, N. K.; UPADHYAY, A. K.; DWIVEDI, S.; SHUKLA, M. K.; MALLICK, S.; SINGH, S. N.; NAUTIYAL, C. S. **Constructed wetland as an ecotechnological tool for pollution treatment for conservation of Ganga river.** Bioresource Technology, 148: 535–541, 2013.
- REDDY, K. R.; BUSK, W. F. **Nutrient removal potential of selected aquatic macrophytes.** Journal of Environmental Quality, 1985.
- REDDY, K. R.; SUTTON, D. L. **Waterhyacinths for water wuality improvement and biomass production.** Journal of Environmental Quality, 1984.
- REHMAN, F.; PERVEZ, A.; MAHMOOD, Q.; NAWAB, B. **Wastewater remediation by optimum dissolve oxygen enhanced by macrophytes in constructed wetlands.** Ecological Engineering, 102: 112–126, 2017.
- SARMENTO, A. P.; BORGES, A. C.; MATOS, A. T. **Evaluation of Vertical-Flow Constructed Wetlands for Swine Wastewater Treatment.** Conference: 12th International Conference on Wetland Systems for Water Pollution Control, 2010.
- SHAH M.; HASHMI H. N.; GHUMMAN A. R.; ZEESHAN M. **Performance assessment of aquatic macrophytes for treatment of municipal wastewater.** J. S. Afr. Inst. Civ. Eng., 57(3), Art. #1011, 8 pages, 2015.
- SHILTON, A. N.; POWELL, N.; GUIEYSSE, B. **Plant based phosphorus recovery from wastewater via algae and macrophytes.** Curremt Opinion in Biotechnology, 23: 884-889, 2012.
- SINGHAL, V.; RAI, J. P. N. **Biogas production from water hyacinth and channel grass used for phytoremediation of industrial effluents.** Bioresource Technology, 86: 221-225, 2003.
- SMANIOTTO, F. **Enriquecimento de amido de biomassa produzida em lagoa de lemna utilizando a espécie Landoltia punctata.** Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Ilha Solteira, 2016.
- TAVARES, F. de A. **Eficiência da *Lemna sp* no tratamento de efluentes de suinocultura e sua utilização como fonte alternativa de alimento para tilápias.** Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Aquicultura, Florianópolis, 2004.
- TERESHCHENKO, Natalya N.; AKIMOVA, Elena E.; PISARCHUK, Anna D.; YUNUSOVA, Tatyana V.; MINAEVA, Oksana M. **Utilizing heavy metal-laden water hyacinth biomass in vermicomposting.** Environ Sci Pollut Res, 2014.

TIMM, J. M. **Estudo de casos de wetlands construídos descentralizados na região do Vale do Sinos e Serra Gaúcha.** Dissertação (mestrado) – Universidade do Vale do Rio dos Sinos, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. São Leopoldo, RS, 2015.

VALIPOUR, A.; RAMAN, V. K.; AHN, Y. H. **Effectiveness of Domestic Wastewater Treatment Using a Bio-Hedge Water Hyacinth Wetland System.** *Water*, 7: 329-347, 2015.

WU, Y.; KERR, P. G.; HU, Z.; YANG, L. **Eco-restoration: Simultaneous nutriente removal from soil and water in a complex residential-cropland area.** *Environmental Pollution*, 158: 2472-2477, 2010.

YAN, R.; YANG, F.; WU, Y.; HU, Z.; NATH, B.; YANG, L.; FANG, Y. **Cadmium and mercury removal from non-point source wastewater by a hybrid bioreactor.** *Bioresource Technology*, 102: 9927–9932, 2011.

YILMAZ, D. D.; AKBULUT, H. **Effect of circulation on wastewater treatment by *Lemna gibba* and *Lemna minor* (floating aquatic macrophytes).** *International Journal of Phytoremediation*, 13: 970-984, 2011.