

Vantagens e desvantagens da utilização de Leitos Construídos para os processos de fitorremediação com foco na Educação Ambiental e tratamento de esgotos

Luana Kziozek

Universidade Estadual do Paraná, campus de União da Vitória

Contato: kluanak5@gmail.com

Carla Andreia Lorscheider

Universidade Estadual do Paraná, campus de União da Vitória

Contato: carla.lorscheider@unespar.edu.br

Resumo: O termo “wetlands” (áreas alagadas) refere-se a locais naturais alagados periódica ou permanentemente, que apresentam diversos serviços ambientais. Apresentam-se como alternativa os Leitos Construídos, desenvolvidos com intuito de acelerar, melhorar e direcionar processos de biorremediação. Sendo assim, objetiva-se observar as aplicações dos leitos construídos com fitorremediação e as vantagens e desvantagens de sua utilização na educação ambiental e tratamento de esgoto. Para isso, foi realizada uma revisão bibliográfica, com busca através do Google Acadêmico, utilizando as palavras-chave: "wetlands" "fitorremediação" "desvantagens" e "wetlands" "fitorremediação" "vantagens". Foram obtidos no total 131 trabalhos. Estes passaram por uma avaliação de qualidade, sendo assim analisados nesta revisão dois estudos de caso e quatro revisões bibliográficas que corresponderam aos filtros de seleção: serem artigos e apresentarem o sistema de leito construído com fitorremediação. Observou-se que os Leitos Construídos são utilizados na remediação de efluentes de esgoto domiciliar e industrial, tendo como objetivo principal a reciclagem de efluentes. Nota-se que as macrófitas são importantes componentes desses sistemas por seu papel fitorremediador, que promove a remoção de nutrientes excessivos do efluente passíveis de causar distúrbios ecológicos, como eutrofização, se não equilibrados. Das vantagens do sistema podem ser citadas seu uso para a educação ambiental em escolas de ensino regular, redução de nutrientes excedentes como nitrogênio e fósforo, baixo custo, fácil manutenção e fornecimento de área verde. Dentre as desvantagens do sistema podem ser citadas a impossibilidade de padronização do sistema quanto às porcentagens de remoção de nutrientes excedentes, a produção rápida de biomassa e a suscetibilidade do sistema às alterações climáticas e de toxicidade. Assim, os sistemas de Leitos Construídos são importantes na redução excesso de nutrientes presentes em efluentes de esgoto, entretanto se faz necessário um aprofundamento sobre a eficiência desses sistemas em diferentes condições de clima e relevo e do comportamento dos fitorremediadores utilizados nessas condições.

Palavras-chave: Tratamentos descentralizados; Serviços ecossistêmicos; Tratamento de efluentes.

Advantages and disadvantages of using Constructed Wetlands for phytoremediation processes with a focus on Environmental Education and sewage treatment

Abstract: The term “wetlands” refers to natural places that are periodically or permanently flooded, which provide various environmental services. Constructed Wetlands are presented as an alternative, developed with the aim of accelerating, improving and directing bioremediation processes. Therefore, the objective is to observe the applications of Constructed Wetlands with phytoremediation and the advantages and disadvantages of their use in environmental education and sewage treatment. To this end, a bibliographical review was carried out, with a search using Google Scholar, using the keywords: "wetlands"

"phytoremediation" "disadvantages" and "wetlands" "phytoremediation" "advantages". A total of 131 works were obtained. These underwent a quality assessment, thus analyzing two case studies and four bibliographic reviews in this review that corresponded to the selection filters: being articles and presenting the bed system built with phytoremediation. It was observed that the Constructed Wetlands are used in the remediation of domestic and industrial sewage effluents, with the main objective of recycling effluents. It is noted that macrophytes are important components of these systems due to their phytoremediation role, which promotes the removal of excessive nutrients from the effluent that could cause ecological disturbances, such as eutrophication, if not balanced. The advantages of the system include its use for environmental education in regular schools, reduction of excess nutrients such as nitrogen and phosphorus, low cost, easy maintenance and provision of green area. Among the disadvantages of the system are the impossibility of standardizing the system regarding the percentages of removal of excess nutrients, the rapid production of biomass and the system's susceptibility to climate and toxicity changes. Thus, Constructed Wetlands systems are important in reducing excess nutrients present in sewage effluents, however, it is necessary to delve deeper into the efficiency of these systems in different climate and relief conditions and the behavior of the phytoremediators used in these conditions.

Keywords: Decentralized treatments; ecosystem services; wastewater treatment.

Como citar este artigo:

KZIOZEK, L; LORSCHIEDER, C.A. Vantagens e desvantagens da utilização de Leitos Construídos para os processos de fitorremediação com foco na Educação Ambiental e tratamento de esgotos. **Luminária**, União da Vitória, v.26, n.01, p. 22 – 35, 2024.

INTRODUÇÃO

O termo “*wetlands*” se refere a ecossistemas naturais que ficam inundados de forma sazonal, periódica ou permanente durante o ano, como banhados, várzeas de rios, pântanos, brejos e manguezais. São importantes para a reciclagem de nutrientes, purificação de água, amortecimento contra erosões, atenuação de inundações e fornecem subsídios para a existência e permanência de uma rica biodiversidade (ANJOS, 2003). As relações bióticas e abióticas no ecossistema auxiliam na melhora da qualidade da água através de processos e relações, como filtração, transformações e precipitação química, transformação de poluentes e nutrientes pelo metabolismo de microrganismos e plantas, retenção de material particulado suspenso, predação e redução de organismos patogênicos (DOTRO, 2017; KANAUIA; KUMAR, 2014; SALATI, 2006; SEZERINO et al., 2018; ZINATO; GUIMARÃES, 2017).

Wetlands Construídos (em inglês *Constructed Wetlands*, CW) são sistemas alagados artificiais, alternativos aos sistemas naturais de transformação da matéria e ciclagem de nutrientes, que tem por objetivos replicar e

otimizar esses processos, voltando-os a um objetivo específico. Por serem sistemas que captam o efluente antes deste ir para ambientes naturais e utilizarem-se de plantas aquáticas e microrganismos como remediadores da poluição na água, são considerados opções sustentáveis e ecologicamente corretas para o tratamento de águas residuais (LOPES, DUARTE, 2017). Adota-se neste trabalho o termo Leitos Construídos (LC), mas na literatura nacional são conhecidos por diversas expressões, como: “sistemas alagados construídos”, “leitos cultivados”, “filtros plantados com macrófitas”, “leitos com macrófitas”, “terras úmidas construídas”, “leitos plantados”, “filtros com macrófitas”, “*wetlands* construídos”, entre outros (VON SPERLING; SEZERINO, 2018).

No Brasil, os primeiros estudos sobre LC foram resultado de observações de planícies de inundações na Amazônia. A primeira tentativa de utilização de LC para purificação foi feita por Salati e Rodrigues (1982) com a construção de um lago artificial próximo ao córrego poluído do Rio Piracicamirim, em Piracicaba – SP (SALATI, 1984 apud SALATI, 2006). As experiências iniciais foram positivas, assim o trabalho foi continuado a partir de 1985 pela Construtora Ambiental LTDA

que posteriormente foi transformada no Instituto de Ecologia Aplicada, em Piracicaba-SP (SALATTI, 2003). A partir daí, novas tecnologias foram desenvolvidas para melhorar a eficiência e reduzir custos, assim como a busca por persuadir a comunidade científica brasileira, órgãos de controle ambiental e empresas privadas (SALATI JR; SALATI; SALATI, 1999).

Atualmente, no Brasil, os LC são empregados em tratamentos de efluentes industriais, agrícolas, domésticos ou pluviais. As três principais variantes desse sistema, empregados nacionalmente são os LC de escoamento horizontal subsuperficial (recebendo esgoto pré-tratado), LC de escoamento vertical (Sistema Francês, recebendo esgoto bruto) e LC de escoamento vertical (recebendo esgoto pré-tratado) (SEZERINO et al, 2018; VON SPERLING; SEZERINO, 2018).

Apesar de seu emprego ser bastante amplo, não existe ainda no Brasil uma proposta específica de norma reguladora e norteadora para dimensionamento. O que se segue é baseado em testes e referência bibliográfica, considerando vazão, concentração e tipo do efluente, macrófita utilizada e material filtrante utilizado. No caso de tratamento de esgoto, podem ser utilizadas normas de tratamentos de esgoto descentralizados, legisladas pelo município onde será desenvolvido o LC, já que os sistemas descentralizados também não possuem uma legislação nacional específica (SEZERINO et al, 2018).

Diante do exposto, o objetivo deste trabalho foi realizar um levantamento, na literatura nacional, das aplicações dos leitos construídos relacionados com a fitorremediação e vantagens e desvantagens de sua utilização nas áreas de tratamento aplicáveis.

METODOLOGIA

Foi realizada uma busca bibliográfica, com trabalhos publicados entre os anos de 2017 e 2021, um recorte de 5 anos, para delimitar a busca. Os dados foram coletados na base de dados, Google Acadêmico. Buscou-se qualquer tipo de trabalho como artigos, dissertações, teses, livros e documentos técnicos que abordavam as definições, utilização e objetivos, vantagens e

desvantagens dos LC relacionados com a fitorremediação. Foram utilizadas na busca as palavras-chave "wetlands" "fitorremediação" "desvantagens" (Grupo 1) onde foram encontrados 31 trabalhos. E as palavras-chave "wetlands" "fitorremediação" "vantagens" (Grupo 2), pelas quais foram obtidos 100 trabalhos. Estes foram documentados em uma planilha de excel através de seus dados referenciais, para melhor organização e desenvolvimento deste trabalho.

Dos 31 trabalhos obtidos com as palavras-chave do Grupo 1, optou-se por selecionar para revisão os trabalhos em forma de artigo, pela sua natureza científica, que abordassem a análise de LC com fitorremediadores e que estavam relacionados com tratamento de esgoto ou educação ambiental, publicados no período entre 2017 a 2020, resultando em 4 trabalhos, no ano de 2021 não houve artigos com o tema em específico abordado. Dos 100 trabalhos obtidos com as palavras-chave do Grupo 2 foram selecionados os artigos com os mesmos itens para a desvantagens, resultando em 15 trabalhos.

Após a leitura e estudo dos trabalhos, visando a coerência com relação às palavras-chave escolhidas e ao tema proposto, e leitura inicial dos artigos selecionados, foram escolhidos para análise dos dados 1 artigo da busca com as palavras-chave Grupo 1 e 5 artigos da busca com as palavras-chave Grupo 2, para o desenvolvimento dos subtítulos "organização dos dados" e "análises de vantagens e desvantagens" presentes nos resultados e discussões. A revisão bibliográfica seguiu as etapas da figura 1.

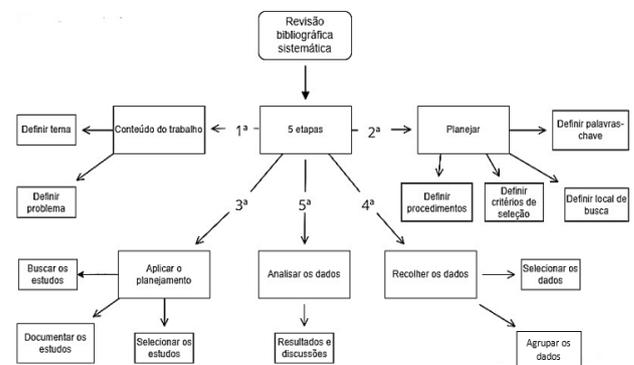


Figura 1. Etapas da revisão bibliográfica sistemática.

Para a análise dos resultados, foi elaborada uma tabela com as informações dos artigos selecionados (tabela 1). Dos artigos analisados, 2 são de estudos de caso e 4 são de revisão bibliográfica.

Após a escolha dos artigos foram analisados os objetivos e resultados de cada trabalho e os dados foram inseridos em uma tabela (Tabela 2) para análise e discussão como proposto na metodologia (Figura 1).

Nos artigos de estudo de caso foi utilizada e analisada apenas a macrófita aquática *Eichhornia crassipes*. Estes artigos são provenientes apenas da pesquisa com as palavras chave do Grupo 1, devido ao único artigo da pesquisa com as palavras do Grupo 2 ser uma revisão bibliográfica. Os artigos de revisão foram utilizados para comparar informações obtidas dos artigos de estudo de caso e para complementar informações.

Tabela 1. Informações sobre os artigos selecionados para a revisão bibliográfica.

Nome do artigo	Autores/ano	Acesso	Tipo
Avaliação da eficiência de wetlands na remoção de matéria orgânica presente em esgoto sanitário	Oliveira et al. (2018)	https://www.metodista.br/revis-tasizabela/index.php/bio/article/view/1601/952	Artigo de revisão
O tratamento de efluentes líquidos através de sistemas utilizando agentes de Fitorremediação: uma revisão sistemática	Lopes e Duarte (2017)	https://www.researchgate.net/publication/318218105	Artigo de revisão
Implantação de sistema biológico de tratamento de efluentes como ferramenta para a educação ambiental em escolas	Zimmermann et al. (2021)	https://periodicos.ifrs.edu.br/index.php/ViverIFRS/article/view/4673	Artigo estudo de caso
Uso sustentável de macrófitas no tratamento de efluentes: uma revisão sistemática	Silva (2019)	http://www.journals.ufpe.br/index.php/JEAP/article/view/2590	Artigo de revisão
Leitos húmidos construídos como alternativa aos sistemas de tratamento de Águas residuais convencionais – revisão	Macário et al. (2018)	https://repositorio.ipsantarem.pt/handle/10400.15/2578	Artigo de revisão
Balanço de fósforo e nitrogênio em leitos cultivados com <i>Eichhornia crassipes</i> (Mart.) Solms	Campos e Teixeira Filho (2019)	https://doi.org/10.1590/S1413-41522019133600	Artigo estudo de caso

Tabela 2. Resultados das análises dos objetivos e metodologias utilizados nos artigos selecionados para esta revisão.

Artigos desvantagens	Meta	Indicadores
Oliveira et al. (2018)	Analisar de forma comparativa a eficiência de wetlands que utilizam as macrófitas aquáticas denominadas Capim Vetiver (<i>Chrysopogon zizanioides</i>) e Taboa (<i>Typha sp.</i>) na remoção da matéria orgânica biodegradável, expressa em termos de Demanda Bioquímica de Oxigênio, presente nos esgotos sanitários.	Foram analisadas onze pesquisas conduzidas em situações ambientais semelhantes, comparadas entre si quanto a remoção da DBO dos efluentes de esgoto pelos LC.
Artigos vantagens	Meta	Indicadores
Lopes e Duarte (2017)	Realizar uma revisão sistemática sobre a fitorremediação aplicada no tratamento de efluentes líquidos e resíduos de efluentes.	Utilizaram-se da análise e discussão de onze pesquisas acadêmicas que abordaram o assunto.
Zimmermann et al. (2021)	Desenvolver um projeto de educação ambiental através de um LC.	Construíram em uma escola um LC com macrófitas aquáticas <i>Eichhornia crassipes</i> .
Macário et al. (2018)	Analisar, através de uma revisão, a utilização de Leitos Húmidos Construídos (LHC) como método de tratamento de águas residuais.	Sem metodologia especificada. Foram abordadas características das macrófitas e dos leitos.
Campos e Teixeira Filho (2019)	Avaliar a eficiência de retenção/remoção de fósforo total e nitrogênio total presentes em águas residuárias.	Foram analisados dois leitos de fluxo subsuperficial horizontal cultivados com <i>Eichhornia crassipes</i> , com diferença de 43 dias de cultivo entre eles, fixados a um meio suporte.
Silva (2019)	Realizar uma revisão sistemática sobre o uso de macrófitas aquáticas no tratamento de efluentes, abordando aspectos da eficiência de remoção e manejo da biomassa gerada.	Utilizaram-se de uma revisão sistemática com análise de 10 trabalhos nacionais e 34 internacionais.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Poluição ambiental

De acordo com o inciso III do art. 3º da Lei nº 6.938, de 31 de agosto de 1981, a

poluição é caracterizada como:

(...) degradação da qualidade ambiental resultante de atividades que direta ou indiretamente: a) prejudiquem a saúde, a segurança e o bem-estar da população; b)

criem condições adversas às atividades sociais e econômicas; c) afetem desfavoravelmente a biota; d) afetem as condições estéticas ou sanitárias do meio ambiente; e) lancem matérias ou energia em desacordo com os padrões ambientais estabelecidos.

Do ponto de vista ecológico, a poluição é qualquer alteração dos componentes e características do meio que cause perturbações aos ecossistemas. Pode ser dividida em 4 tipos: poluição atmosférica, poluição hídrica, poluição do solo e poluição sonora. A poluição hídrica é caracterizada como a incapacidade de autodepuração de efluentes em corpos d'água que, por consequência, causam alterações estéticas, comprometendo o fornecimento de água e alimento. Essa poluição é considerada uma consequência de atividades antrópicas como o descarte de efluentes industriais e domésticos sem um tratamento anterior. Os poluentes são denominados de agentes de poluição e podem ser de natureza térmica, sedimentar, química, radioativa ou biológica (BRILHANTE; CALDAS, 1999; PEREIRA; BRITO, 2012; SANTOS et al., 2012).

Efluentes como agentes de poluição

Os principais agentes de poluição dos ambientes hídricos são os efluentes de origem domiciliar e industrial, também denominados de esgoto. O esgoto é formado por águas residuais provenientes de residências, comércios e instituições, com abundância de carga orgânica, dada a presença de nutrientes, microrganismos, partes de organismos e excretas humanas (ABNT, 1986; PEREIRA; BRITO, 2012).

Estes efluentes, por serem ricos em fósforo e nitrogênio, ao serem lançados em corpos d'água, podem estimular a proliferação excessiva de algas, causando eutrofização (acúmulo de algas e matéria orgânica) e proliferação excessiva de microrganismos decompositores, causando hipóxia (baixa concentração de oxigênio no ambiente aquático). Geralmente esses dois fenômenos atuam em conjunto quando a floração de algas morre e esta matéria orgânica em decomposição estimula a reprodução e produção de energia por bactérias,

consumindo o oxigênio circundante. Como resultado, há morte de peixes e outros organismos, causando perda de biodiversidade (SANTOS et al., 2012).

Além desses problemas, o nitrogênio na forma de amônia pode causar problemas de toxicidade aos peixes e alterações no consumo de oxigênio dissolvido. Na forma de nitrato, o nitrogênio pode contaminar águas subterrâneas utilizadas para abastecimento e causar problemas à saúde (BASTOS; VON SPERLING, 2009).

Tratamento de efluentes

O tratamento de efluentes pode ser realizado através de sistemas de tratamentos centralizados ou descentralizados. Os sistemas de tratamento centralizados são constituídos por equipamentos que coletam e transportam águas residuárias de uma grande área urbana e periurbana, através de tubulações e bombas, para uma estação de tratamento, sendo está em uma localização próxima ao local de disposição final do efluente tratado. Para aplicação de sistemas centralizados, é necessário um alto investimento, para a construção, manutenção e operação do sistema, por serem implantados longe do local de descarte. Em localidades urbanas ou rurais isoladas e domicílios dispersos na área rural, há um grande déficit no acesso ao saneamento básico, justificado pela dificuldade de executar estas instalações e manter em funcionamento grandes extensões de redes para coleta de esgoto (BENASSI et al., 2018).

Em contrapartida, os tratamentos descentralizados são próximos a fonte geradora de esgoto, com intuito de aumentar a utilização do efluente. Por terem potencial de diminuir infraestruturas de coleta e transporte, e possibilitar o reúso da água, são menos custosos e ecologicamente corretos. Podem ser desenvolvidos para o recolhimento e tratamento de águas residuárias provenientes de domicílios individuais, pequenas comunidades, indústrias e instituições que não são conectados a um sistema de coleta central. São idealizados como soluções práticas para locais com inviabilidade de utilização de um sistema centralizado (OLIVEIRA JÚNIOR, 2013).

Os sistemas descentralizados podem ser dados como: filtro biológico, leitos construídos, reator anaeróbio compartimentado, sistema

combinado anaeróbio-aeróbio e sistema MBR (Membrane Bioreactor) (SUBTIL; SANCHEZ; CAVALHERO, 2016).

Remediação, biorremediação e fitorremediação

A remediação pode ser descrita como qualquer técnica utilizada para reduzir ou eliminar problemas ambientais existentes. Pode ser feita através de processos físicos, químicos ou biológicos (MALDONADO; WENDLING, 2009).

A remediação biológica ou biorremediação é uma tecnologia que se utiliza de processos biológicos naturais como forma de remover ou reduzir os poluentes. Pode ser aplicada para tratamento de águas subterrâneas e superficiais, na descontaminação de solos, aterros ou áreas de contenção, na degradação de herbicidas, na decomposição de substâncias orgânicas e inorgânicas, entre outros. É considerada uma tecnologia mais adequada e eficiente ecologicamente, do que as tecnologias químicas e/ou físicas, no tratamento de matéria orgânica de difícil degradação e metais tóxicos. Pode ser categorizada em remediação com vegetação ou com microrganismos (GAYLARDE et al.; 2005; TORTORA et al., 2005).

A remediação com vegetação ou fitorremediação é um processo de remediação que consiste em reduzir ou remover de forma total os contaminantes em ambientes terrestres e aquáticos, em sedimentos e ar poluído, através de plantas e seus associados (microrganismos). Permite a retirada tanto de matéria orgânica como de inorgânica em excesso nos ambientes. É um processo que não demanda energia elétrica, com bom custo benefício e esteticamente agradável, sendo muitas vezes aproveitado para o paisagismo (LAMEGO; VIDAL, 2007).

Os mecanismos de fitorremediação podem ser: a fitoextração, caracterizada pela extração e absorção dos contaminantes do meio e acúmulo destes nas partes aéreas, não ocorrendo degradação; a fitovolatização, que consiste na absorção do contaminante pela planta e transformação deste em compostos voláteis que são liberados na atmosfera; a

fitodegradação, que utiliza o metabolismo da planta e/ou dos microrganismos associados para a quebra e transformação dos contaminantes; a fitoestabilização, que limita a mobilidade e biodisponibilidade de poluentes em meios aquáticos e terrestres; e a rizofiltração, apresentada em plantas aquáticas que usam seu sistema radicular para reter os poluentes (MALDONADO; WENDLING, 2009; ROCHA, 2019)

A fitorremediação pode ser aplicada em conjunto com tratamentos descentralizados do tipo LC, para promover a adsorção de sólidos suspensos, metais e patógenos, além de servir de cobertura prevenindo a proliferação de algas e fornecendo abrigo para o crescimento de microrganismos (LAMEGO; VIDAL, 2007).

Leitos Construídos

Os sistemas LC são projetados de forma a utilizar processos naturais, porém sua utilização é mais controlada que no ambiente natural. Podem ser categorizados de acordo com três critérios: hidrologia (fluxo de água a céu aberto e fluxo de água subterrâneo); tipo de crescimento de macrófita (emergente, submerso, de flutuação livre) e caminho de fluxo (horizontal ou vertical). Os LC ainda podem ser combinados para potencializar vantagens específicas de cada sistema (BENASSI et al., 2018; SEZERINO et al., 2018). Pode-se observar na figura 2 um esquema geral da utilização dos critérios combinados.

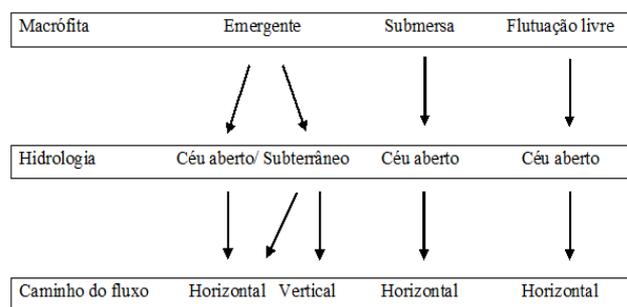


Figura 2. Esquema geral com os três critérios da estrutura de LCs.

Fonte: adaptado de Vymazal, 2010.

Os LC possuem três componentes essenciais:

a. As macrófitas, que são vegetais que flutuam ou

permanecem total ou parcialmente submersas, sendo estas visíveis a olho nu e podendo habitar águas doces ou salobras. As macrófitas desempenham o papel de disponibilizar superfície para aderência de microrganismos; prevenir atulhamento de material filtrante; liberar oxigênio para o material filtrante; retirar e armazenar nutrientes; e embelezar a paisagem (SALATTI, 2003).

- b. A microbiota, comumente composta por bactérias e fungos, que permanecem aderidos ao material de suporte ou raízes de macrófitas, formando um biofilme. Os microrganismos desenvolvem os processos de mineralização e decomposição da matéria orgânica; as bactérias retiram o excesso de nitrogênio orgânico do efluente; protozoários e micrometazoários consomem matéria orgânica particulada, controlam o crescimento de fungos e bactérias e auxiliam na desinfecção do efluente (BENASSI et al., 2018).
- c. O material suporte ou filtrante, que atua tanto como meio para estabelecimento das macrófitas como também um filtro, que retém sólidos suspensos, mantém bom fluxo do efluente e promove a adsorção de compostos inorgânicos. Pode auxiliar a também na fixação de microrganismos (VON SPERLING; SEZERINO, 2018).

Podem ainda ser considerados como componentes essenciais, mas nesse caso externos, os pré-tratamentos, como fossas sépticas e digestores anaeróbios, que retêm os sólidos em suspensão para não sobrecarregar os LC (VON SPERLING; SEZERINO, 2018).

Os LC eram inicialmente usados apenas no tratamento de águas residuais domiciliares, porém, nas últimas décadas, com a utilização de LC híbridos, os efluentes industriais também passaram a ser tratados por esse sistema. Exemplos de efluentes passíveis de serem tratados são: esgoto, efluentes industriais petroquímicos, efluentes ácidos de minas com baixo teor de matéria orgânica, efluentes lixiviados de aterros sanitários, águas residuais de processamento de carnes, efluentes de fábricas de papel e celulose, de cervejarias, de curtumes e

de lagares de azeite (LA VARGA et al., 2020).

Outras aplicações para os LC são a possibilidade de recreação e ecoturismo na região da instalação, permitindo que sejam feitos estudos e *tours* educacionais. Serve como *habitat* para a vida selvagem e pode promover a melhora na economia da localidade (DIMURO, 2014).

Salatti (2003) descreve que de acordo com efluente a ser tratado e a macrófita utilizada, os LC podem ser classificados em:

- a. LC com plantas flutuantes, que utilizam plantas aquáticas de diversas espécies, sendo a mais utilizada *Eichhornia crassipes* (aguapé) por sua alta resistência e grande capacidade de crescimento. Essas plantas são utilizadas em projetos de canais geralmente rasos, como forma de tratamento de secundário, para redução da Demanda Química de Oxigênio (DQO) e Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO), e de tratamento terciário, para remoção de nutrientes como fósforo e nitrogênio (SALATTI, 2003). Abaixo, na figura 3, um exemplo da estrutura com plantas flutuantes.



Figura 3. Representação de uma LC com macrófitas flutuantes.

Fonte: MACÁRIO et al, 2018.

- b. LC com plantas emergentes, que utilizam plantas com folhas e caule parcialmente submersos e sistema radicular preso ao sedimento. As espécies mais utilizadas são: *Phragmites australis* (junco), *Typha latifolia* (gardenia) e *Scirpus lacustris* (bunho). Os três esquemas básicos para utilização dessas plantas em LC são os sistemas com fluxo superficial, sistemas com fluxo sub-superficial horizontal e os sistemas com emergentes com fluxo vertical (SALATTI, 2003). Abaixo, na figura 4, um exemplo da estrutura com plantas emergentes.

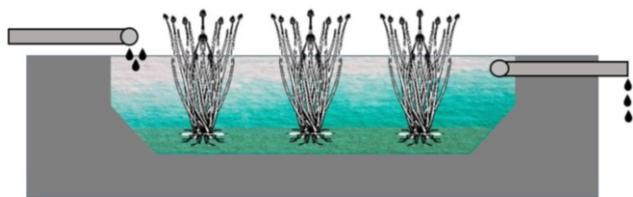


Figura 4. Representação de uma LC com macrófitas emergentes.

Fonte: MACÁRIO et al, 2018.

- a. LC com macrófitas fixas submersas, que utilizam plantas que ficam totalmente submersas, sendo utilizadas no polimento de efluentes após tratamento secundário. As espécies mais utilizadas são: *Isoetes caustris*, *Lobelia dortmanna* (Lobélia da Água) e *Egéria sp.*, mais produtivas em águas oligotróficas, e *Elodea canadensis* (Elódea-comum), mais produtiva em águas eutróficas (SALATTI, 2003). Abaixo, na figura 5, um exemplo da estrutura com plantas fixas submersas.

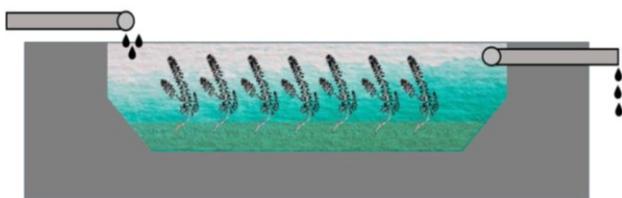


Figura 5. Representação de uma LC com macrófitas fixas submersas.

Fonte: MACÁRIO et al, 2018.

Análises de vantagens e desvantagens

As macrófitas exercem diversos papéis ecológicos. Dentre estes podem ser citados: a manutenção de ambientes alagados, abrigo e fonte alimentar, captação de carbono e ciclagem de nutrientes. Sua utilização em LC auxilia na remoção de nutrientes em excesso como nitrogênio e fósforo, metais pesados, boa eficiência na remoção de Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO) e Demanda Química de Oxigênio (DQO) (SILVA et al., 2019).

As vantagens e desvantagens da utilização de LC com fitorremediação foram condensadas na tabela 3, a seguir, e melhor discutidas no decorrer deste tópico.

Tabela 3. Vantagens e desvantagens do uso de LC com fitorremediação.

Vantagens	Desvantagens
Utilização para educação ambiental (ZIMMERMANN et al., 2021).	Não é possível a padronização dos resultados (CAMPOS; TEIXEIRA FILHO, 2019).
Secundária - uso do excesso de biomassa gerado para produção de energia, artesanato e alimento para animais (CAMPOS; TEIXEIRA FILHO, 2019; SILVA et al. 2019).	Resíduo em biomassa pelo crescimento acelerado da macrófita (SILVA et al., 2019).
Baixo custo e fácil manutenção (OLIVEIRA et al., 2018).	Demanda elevada de área para construção (OLIVEIRA et al., 2018).
Fornecimento de área verde, recreativa e educacional (OLIVEIRA et al., 2018).	Possíveis problemas com pragas na superfície (OLIVEIRA et al., 2018).
Geração de renda a partir da biomassa residual (OLIVEIRA et al., 2018).	Eficiência pode ser comprometida por volume elevado de precipitação ou poluentes tóxicos (OLIVEIRA et al., 2018).

Zimmermann et al. (2021) desenvolveram um LC para o tratamento de efluentes de esgoto de uma escola rural, com a macrófita *Eichhornia crassipes*, comumente utilizada em sistemas de fitorremediação no Brasil. Fato confirmado por Macário et al. (2018) que descreve que apesar de *E. crassipes* ter um crescimento em alguns casos descontrolado em ambientes naturais, tornando um

problema ambiental, em ambientes controlados ela é um excelente agente de despoluição.

O trabalho de Zimmermann et al. (2021) foi pensado com o intuito de desenvolver a educação ambiental dos alunos, de auxiliar na sustentabilidade do ambiente escolar e a auxiliar na preservação da água e de ambientes aquáticos nos quais os efluentes desaguam. A aplicação voltada à educação foi positiva, permitiu aproximar as atividades científicas à realidade dos estudantes e promoveu a intenção de desenvolvimento de atividades interdisciplinares, através de análise de resultados do sistema. Sendo o foco deste trabalho apenas a educação ambiental e intervenção como atividade prática dos alunos, não foram explicitados dados com relação ao tratamento do efluente pela macrófita.

Campos e Teixeira Filho (2019) também utilizaram em seu LC, para o tratamento de esgoto de uma universidade, a espécie *E. crassipes*. Em contrapartida ao estudo anterior, o objetivo deste trabalho foi avaliar o tratamento do efluente quanto a eficiência de retenção/remoção de fósforo total e nitrogênio total Kjeldahl (NTK) presentes nos efluentes residuais utilizando-se de dois leitos de fluxo superficial horizontal, com 43 dias de diferença de cultivo entre os leitos. O LC neste caso serve como um tratamento terciário, já que a retirada de sólidos grosseiros foi feita em um tanque de desarenação e o tratamento secundário feito em reatores anaeróbios compartimentados (RACs).

Campos e Teixeira Filho (2019) observaram que obtiveram maior taxa de remoção de fósforo e nitrogênio, se comparado o estudo com outros de sua referência, devendo-se ou ao fato de existirem diversos tipos de manejo da macrófita ou de neste trabalho ter sido feita a fixação da planta em meio de suporte ao invés de cultivo flutuante no espelho d'água. Outro ponto descrito foi o de que a remoção de nutrientes entre os dois LC foi diferente, sendo o leito plantado 43 dias antes o mais eficiente na remoção de nitrogênio e fósforo, o que se acredita ser devido à maior demanda de nutrientes no início do desenvolvimento da *E. crassipes* ou pelas condições hidráulicas dos leitos propiciarem a formação de caminhos preferenciais dos nutrientes.

As observações anteriormente citadas

demonstram que a remoção de fósforo e nitrogênio pela macrófita *E. crassipes* é eficiente, porém não se pode criar um LC que obtenha valores padronizados de remoção. Em caso de interesse de reprodução do sistema citado, será necessário fazer sempre adaptações e testes levando em conta local, clima, exigência de manutenção, estágio de desenvolvimento da macrófita e movimento do esgoto dentro do meio suporte. Pode considerar-se que isto é uma desvantagem, já que não se pode desenvolver um padrão para todos os lugares onde o sistema necessite ser implantado. Além de os testes acabarem por representar um custo maior até o desenvolvimento de um sistema adaptado corretamente (CAMPOS; TEIXEIRA FILHO, 2019).

Silva et al. (2019) apresenta como desvantagem dos LCs com fitorremediação o crescimento acelerado da macrófita, pela grande quantidade de nitrogênio e fósforo nos efluentes, que por consequência gera um novo resíduo, a biomassa. No entanto, Campos e Teixeira Filho (2019) assim como Silva et al. (2019) dispõem que há vantagens secundárias justamente por essa produção excedente de biomassa. Como por exemplo o pecíolo da macrófita *E. crassipes* pode ser utilizado no artesanato; toda a planta pode ser utilizada na produção de biogás e biocombustível, assim como também está pode servir como alimento para animais, entre outras finalidades (CAMPOS; TEIXEIRA FILHO, 2019).

Macário et al. (2018) e Oliveira et al. (2018) apresentam algumas espécies de macrófitas, suas aplicações, vantagens e desvantagens de sua utilização, sendo as principais selecionadas e melhor descritas pelos autores, organizadas na tabela 4.

Oliveira et al. (2018) dispõem um quadro de vantagens e desvantagens da utilização de LCs para o tratamento de esgoto. Dentre as vantagens citadas estão o baixo custo e fácil manutenção, o fornecimento de área verde, recreativa e educacional e que a biomassa gerada pode ser utilizada para geração de renda. Dentre as desvantagens considera a demanda de área para a construção, possíveis problemas com pragas na superfície, eficiência pode ser comprometida por grandes chuvas e chuvas sucessivas e poluentes tóxicos podem reduzir a eficiência do tratamento.

Tabela 4. Principais espécies de macrófitas analisadas por Macário et al. (2018) e Oliveira et al. (2018), quanto as aplicações, vantagens e desvantagens.

Macrófita (autor que a cita)	Aplicações	Vantagens	Desvantagens
<i>Typha</i> sp. (OLIVEIRA et al., 2018)	Planta aquática emergente aplicável em LC de fluxo horizontal, vertical ou híbrido.	Cultivo fácil; Alta capacidade de extração de nutrientes, principalmente nitrogênio; capaz de remover metais pesados; controla erosão de leitos pela fitoestabilização; tolerante a salinidade e pH entre 4,8 e 8,7; biomassa pode ser usada no artesanato.	Sua eficiência varia de acordo com a saturação de fundo, sentido de fluxo, drenagem e quantidade da biomassa produzida.
<i>Chrysopogon zizanioides</i> (OLIVEIRA et al., 2018)	Planta aquática emergente aplicável em LC de fluxo horizontal e vertical.	Suporta variações de temperaturas, concentrações de nutrientes, metais pesados, alta salinidade, disponibilidade hídrica e diferentes níveis de pH.	Apresenta intolerância ao sombreamento, que a longo prazo pode levar a morte da espécie.
<i>Eichhornia crassipes</i> (MACÁRIO et al., 2018)	Planta aquática de flutuação livre aplicável em LC de fluxo horizontal.	Reduz a carência bioquímica de oxigênio (CBO), a taxa de coliformes e a turvação das águas; retira do efluente fenóis e metais pesados; reduz quantidades de ozoto e fósforo;	Pode estimular a proliferação de mosquitos.
<i>Lemna</i> sp. (MACÁRIO et al., 2018)	Planta aquática de flutuação livre aplicável a LC de fluxo horizontal.	Capacidade de sobreviver a temperaturas mais baixas (de 1 a 3°C); evita proliferação de algas e previne a proliferação de mosquitos; produção de proteína.	Pode provocar condições anaeróbicas por limitar as trocas gasosas do sistema com a atmosfera.
<i>Elodea nuttalli</i> (MACÁRIO et al., 2018)	Planta aquática submersa aplicável a LC de fluxo horizontal.	Adapta-se bem ao tratamento secundário ou terciário de água residual doméstica; reduz a carência bioquímica de oxigênio (CBO), remove azoto total e amoniacal e fósforo; crescimento constante durante todo o ano em regiões de clima temperado; obtenção de uma água residual de elevada qualidade com um tempo de retenção hidráulico reduzido.	Não foram descritas.
<i>Phragmites australis</i> (MACÁRIO et al., 2018)	Planta aquática emergente aplicável a LC de fluxo subsuperficial horizontal.	Eficientes na remoção de azoto.	Requer um tempo de retenção hidráulico (TRH) equilibrado, pois se demasiado baixo pode levar a um tratamento insuficiente e se elevado haverá necessidade de leitos de grandes dimensões.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O tratamento convencional de efluentes, apesar de ser efetivo, é muitas vezes custoso e não acessível a determinadas regiões ou para o interessado. Quando isso acontece, o efluente é possivelmente lançado diretamente em cursos d'água, sem o devido tratamento prévio, comprometendo a qualidade da água e a vida dependente dela.

Os LC são considerados sistemas alternativos sustentáveis de tratamento com baixo custo e de alta eficiência. Apesar de, em alguns casos, não eliminarem por completo os contaminantes do efluente, tornam possível o seu lançamento em ambientes não controlados pela redução de carga de nutrientes excedentes. Isso auxilia na preservação dos organismos que vivem no ambiente, já que a carga de nutrientes se torna adequada para isso, não interferindo no seu equilíbrio.

Porém, para a implantação de um LC são necessários testes, considerando época de cultivo e manejo, tipo de planta, localização, tipo de fixação da macrófita e movimento do esgoto no meio, o que pode ser uma desvantagem considerando custos de testes que podem dar errado.

Os LC possibilitam também diversos estudos interdisciplinares. Podem ser aplicados em estudos de botânica (como alterações fotossintéticas que alteram o desenvolvimento da remediação, as espécies adequadas para determinada região...); estudos de bioquímica (resíduos transformados, resíduos consequentes, demanda química de oxigênio (DQO), DQO solúvel, sólidos suspensos totais (SST), turbidez, nitrogênio, fósforo, potássio e sódio total, condutividade elétrica, potencial redox (Eh), potencial hidrogeniônico (pH,); ecologia (relações ecológicas que possibilitam a biorremediação); Microbiologia (coliformes totais e fecais); Engenharia (planejamento e desenvolvimento dos LC). Estes estudos são importantes para adequar e maximizar os efeitos positivos dos LC às diversas demandas e regiões a que são ou podem vir a ser aplicados.

REFERÊNCIAS

ABNT, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9648**: Estudo de concepção de sistemas de esgoto sanitário. Rio de Janeiro, 1986.

ANJOS, J.A.S.A. Avaliação da eficiência de uma zona alagadiça (wetland) no controle da poluição por metais pesados: O caso da Plumbum em Santo Amaro da Purificação/BA. Tese de doutorado – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, p. 328, 2003.

BASTOS, F.S.; VON SPERLING, M. Nutrientes de esgoto sanitário: utilização e remoção. Rio de Janeiro: ABES, 2009.

BENASSI, R.F. et al. **Manual de sistemas de wetlands construídas para o tratamento de esgotos sanitários**. Santo André: Editora Copiart, 2018.

BRASIL. **Lei nº 6.938, de 31 de agosto de 1981**. Dispõe sobre a Política Nacional do Meio Ambiente, seus fins e mecanismos de formulação e aplicação, e dá outras providências. Presidência da República, Casa Civil, Subchefia para Assuntos Jurídicos, 1981. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/16938.htm. Acesso: 23 maio 2022.

BRASIL. Ministério da Saúde. Fundação Nacional de Saúde. **Cartilha Wetlands construídos aplicados no tratamento de esgoto sanitário**: recomendações para implantação e boas práticas de operação e manutenção. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 2018.

BRILHANTE, O.M.; CALDAS, L.Q.A. **Gestão e avaliação de risco em saúde ambiental**. Rio de Janeiro: Editora FIOCRUZ, 1999.

CAMPOS, J. M.I; TEIXEIRA, J. Balanço de fósforo e nitrogênio em leitos cultivados com *Eichhornia crassipes* (Mart.) Solms. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, v. 24, p. 1-11, 2019.

DIMURO, J.L. et al. A financial and environmental analysis of constructed wetlands for industrial wastewater treatment. **Journal of Industrial Ecology**, v. 18, n. 5, p. 631-640, 2014.

DOTRO, G. et al. **Treatment wetlands**. IWA publishing, 2017.

GAYLARDE, C.C. et al. Biorremediação. **Biociência & Desenvolvimento**, v. 34, p. 36-43, 2005.

HERZOG, C.P. Soluções baseadas na Natureza para um novo paradigma no tratamento de esgoto em áreas urbanizadas. **Parcerias Estratégicas**, v. 25, n. 50, p. 133-158, 2021.

KANAUJIA, A.; KUMAR, A. Wetlands: Significance, Threats and their Conservation. **GREEN Quarterly Newsletter-Directorate of Environment**, p. 3-22, 2014.

LA VARGA, D. de et al. Constructed wetlands for industrial wastewater treatment and removal of nutrients. In: Waste Management: Concepts, Methodologies, Tools, and Applications. IGI global, 2020. p. 559-587.

LAMEGO, F.; VIDAL, R. Fitorremediação: plantas como agentes de despoluição? Pesticidas: Revista de Ecotoxicologia e Meio Ambiente. Curitiba, v. 17, p. 9-18, 2007.

LOPES, A.E.; DUARTE, N. F. O tratamento de efluentes líquidos através de sistemas utilizando agentes de fitorremediação: uma revisão sistemática. **Revista Gestão & Sustentabilidade Ambiental**, v. 6, n. 1, p. 432-441, 2017.

MACÁRIO, M. et al. Leitos húmidos construídos como alternativa aos sistemas de tratamento de águas residuais convencionais: revisão. **Revista da UIIPS**, v. 6, n. 3, p. 83-97, 2018.

MALDONADO, A.C.D.; WENDLING, B. Manejo de ecossistemas aquáticos contaminados por metais pesados. **Agropecuária Técnica**, v. 30, n. 1, p. 33-36, 2009.

OLIVEIRA, L.P. et al. Avaliação da eficiência de wetlands na remoção de matéria orgânica presente em esgoto sanitário. **NBC-Periódico Científico do Núcleo de Biociências**, v. 8, n. 15, 2018.

OLIVEIRA JÚNIOR, J.L. Tratamento descentralizado de águas residuárias domésticas: uma estratégia de inclusão social. In: LIRA, W.S., e CÂNDIDO, G.A., orgs. Gestão sustentável dos recursos naturais: uma abordagem participativa. Campina Grande: EDUEPB, 2013.

ROCHA, A.P.A. da. **Remediação da água contaminada a partir do uso de macrófitas aquáticas no Brasil: uma Revisão Sistemática**. Monografia (Graduação em Licenciatura em Ciências Biológicas). Universidade Federal do Rio de Janeiro, Volta Redonda, 2019.

RODRIGUES, P.T.A.; ORLANDELLI, R.C. Plantas como Ferramentas para a Remediação Ambiental: uma Revisão da Literatura. **Uniciências**, v. 22, n. 1, p. 38-44, 2018.

SANTOS, S. dos et al. Poluição aquática. In: ROSA, FRACETO e MOSCHINI-CARLOS (Orgs.). Meio Ambiente e Sustentabilidade. Porto Alegre: Bookman, 2012.

SALATI, E.; RODRIGUES, N.S. De poluente a nutriente, a descoberta do aguapé. **Revista Brasileira da Tecnologia**, v.13, n. 3, p. 37-42, 1982.

SALATI JR, E; SALATI, E.; SALATI, E. Wetland projects developed in Brazil. **Water science and technology**, v. 40, n. 3, p. 19-25, 1999.

SALATI, E. **Controle de qualidade de água através de sistemas de wetlands construídos**. Rio de Janeiro: Fundação Brasileira para o Desenvolvimento Sustentável, 2006.

SALATTI, E. Utilização de *Wetlands* Construídas para tratamento de águas. **Biológico**, São Paulo, v. 65, n.1/2, p.113-116, 2003.

SEZERINO, P.H. et al. **Cartilha Wetlands construídos aplicados no tratamento de esgoto sanitário**: recomendações para implantação e boas práticas de operação e manutenção/Ministério da Saúde. Fundação Nacional de Saúde. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 2018.

SILVA, L. A.M. et al. Uso sustentável de macrófitas no tratamento de efluentes: uma revisão

sistemática. **Journal of Environmental Analysis and Progress**, p. 228-238, 2019.

SUBTIL, E. L.; SANCHEZ, A. A.; CAVALHERO, A. Sistemas descentralizados de tratamento de esgoto e reúso de água. **In: Ciência e Tecnologia Ambiental: Conceitos e Perspectivas** (pp.201 - 220), capítulo 9, Editora UFABC, 2016.

TORTORA, G. J. et al. *Microbiologia*. 8ª.ed. Porto Alegre: Editora Artmed, 2005.

VYMAZAL, J. Constructed wetlands for wastewater treatment. **Water**, v. 2, n. 3, p. 530-549, 2010.

VON SPERLING, M.; SEZERINO, P.H. Dimensionamento de wetlands construídos no Brasil. **Boletim Wetlands Brasil**, Edição Especial, 2018. ISSN 2359-0548. Disponível em: <https://gesad.ufsc.br/boletins-tecnico-informativos/>.

ZIMMERMANN, T. G. et al. Implantação de sistema biológico de tratamento de efluentes como ferramenta para a educação ambiental em escolas. **Revista Viver IFRS**, v. 9, n. 9, p. 118-123, 2021.

ZINATO, T. M. C.; GUIMARÃES, M. M. Estudo sobre a utilização de “wetlands” construídas para tratamento de águas residuárias no Brasil. **In: VIII Congresso Brasileiro de Gestão Ambiental**, p. 27-30, 2017.

Recebido em: 06/11/2023.

Aceito em: 09/05/2024.