

REMOÇÃO DE FÓSFORO DE ÁGUAS RESIDUÁRIAS POR SISTEMAS DE ALAGADOS CONSTRUÍDOS DE FLUXO SUBSUPERFICIAL HORIZONTAL: REVISÃO BIBLIOMÉTRICA E BIBLIOGRÁFICA (2016 - 2021)

REMOVAL OF PHOSPHORUS FROM WASTEWATER BY HORIZONTAL SUBSURFACE FLOW CONSTRUCTED WETLANDS: BIBLIOMETRIC AND BIBLIOGRAPHIC REVIEW (2016 - 2021)

ELIMINACIÓN DE FÓSFORO DE LAS AGUAS RESIDUALES MEDIANTE SISTEMAS DE HUMEDALES CONSTRUIDOS DE FLUJO SUBSUPERFICIAL HORIZONTAL: REVISIÓN BIBLIOMÉTRICA Y BIBLIOGRÁFICA (2016 - 2021)

Eduarda Almeida Copati¹
Luciane Fontana²
Tatiane Araujo de Jesus³

Resumo: Este estudo teve como objetivo avaliar a remoção de fósforo total (PT) de efluentes por Sistemas de Alagados Construídos (SACs) de fluxo subsuperficial horizontal por meio de revisão bibliométrica e bibliográfica (2016 - 2021). Foram realizadas buscas no portal *Scopus* com as palavras-chave: “*phosphorus*”, “*constructed wetland*”, “*substrate*” e “*horizontal*”. Foram elaborados gráficos, mapa cientométrico e análise de componentes principais. Foram obtidos 34 artigos, sendo 17 da China. O substrato mais frequente e com maior eficiência de remoção de PT (100%) foi o cascalho. A macrófita que apresentou a maior eficiência de remoção de PT foi a *Typha domingensis*.

Palavras-chave: Eutrofização. Macrófita. Material suporte. Nutriente. Tratamento de esgoto.

Abstract: This study aimed to evaluate the removal of total phosphorus (PT) from effluents by Horizontal Subsurface Flow Constructed Wetlands (HSSF-CWs) through a bibliometric and bibliographic review (2016 - 2021). Searches were carried out on the *Scopus* portal with the keywords: “*phosphorus*”, “*constructed wetland*”, “*substrate*” and “*horizontal*”. Graphs, scientometric map, and principal component analysis were prepared. 34 articles were obtained, 17 from China. The most frequent substrate with the highest TP removal efficiency (100%) was gravel. The macrophyte that showed the highest TP removal efficiency was *Typha domingensis*.

Keywords: Eutrophication. Macrophyte. Nutrient. Sewage treatment. Support material.

¹ Estudante de graduação em Bacharelado em Ciência e Tecnologia. Universidade Federal do ABC. ORCID: 0000-0001-7377-1023. E-mail: eduarda.copati@aluno.ufabc.edu.br

² Doutora em Ciências Biológicas. Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, SP, Brasil. ORCID: 0000-0002-8951-845X. E-mail: lucianefontana@gmail.com.

³ Doutora em Engenharia Hidráulica e Saneamento. Universidade Federal do ABC. ORCID: 000-0002-5206-6584. E-mail: tatiane.jesus@ufabc.edu.br.

Resumen: Este estudio tuvo como objetivo evaluar la remoción de fósforo total (PT) de los efluentes por Sistemas de Humedales Construidos (SAC) con flujo subsuperficial horizontal a través de una revisión bibliométrica y bibliográfica (2016 - 2021). Se realizaron búsquedas en el portal Scopus con las palabras clave: “*phosphorus*”, “*constructed wetlands*”, “*substrate*” y “*horizontal*”. Se prepararon gráficos, mapa cienciométrico y análisis de componentes principales. Se obtuvieron 34 artículos, 17 de China. El sustrato más frecuente con la mayor eficiencia de eliminación de PT (100%) fue la grava. El macrófito que mostró la mayor eficiencia de eliminación de PT fue *Typha domingensis*.

Palabras clave: Eutrofización. Macrófito. Material de apoyo. Nutritivo. Tratamiento de aguas residuales.

Submetido 26//07/2022

Aceito 11/04/2023

Publicado 06/07/2023

Introdução

A eutrofização artificial é um dos principais problemas ambientais da atualidade e pode ser definida como o aumento exacerbado da biomassa de organismos fotossintéticos em corpos d'água, sendo desencadeada pelo aumento das concentrações de nutrientes (nitrogênio e fósforo) (LE MOAL et al., 2019). As atividades humanas são as principais fontes de nutrientes para os ecossistemas aquáticos, como o uso de fertilizantes na agricultura, produtos de limpeza contendo polifosfatos e o lançamento de esgotos brutos ou tratados sem etapa específica de remoção de nutrientes (SOUZA et al., 2014). A eutrofização tem diversas consequências indesejáveis, como: diminuição dos níveis de oxigênio dissolvido; perda de biodiversidade; aumento da emissão de gases de efeito estufa; proliferação de cianobactérias; mortandade de peixes; entupimento de filtros das Estações de Tratamento de Águas; e aumento de custos do tratamento de água (BEAULIEU, DELSONTRO e DOWNING, 2019; BALDOVI et al., 2021). Schindler (2012) indica o fósforo (P) como o principal elemento controlador da eutrofização em ecossistemas aquáticos. Em contrapartida, ele é necessário para a vida, já que está presente em moléculas essenciais para o processo de obtenção de energia dos seres vivos, como os fosfolípidios, ácidos nucleicos (DNA, RNA), adenosina trifosfato e difosfato (ATP e ADP) (MARONEZE et al., 2014).

Neste sentido, inúmeras tecnologias ambientais para minimizar esses impactos têm sido desenvolvidas, como os Sistemas de Alagados Construídos (SACs) com uma infinidade de tipos, materiais etc. Compreender melhor como funcionam e quais têm sido mais efetivas é essencial para evitar futuros problemas de escassez de fósforo, além de impossibilitar o aumento da eutrofização, já que permite a retirada desse elemento das águas residuárias e o seu reaproveitamento agrícola. Desse modo, os SACs são vistos como etapa promissora de tratamento terciário para Estações de Tratamento de Esgotos (ETEs), isto é, têm baixo custo, fácil manejo, elevada eficiência de remoção de nutrientes e outros poluentes de efluentes e permite a recuperação dos nutrientes por meio da compostagem da biomassa de macrófitas (WANG et al., 2019; BALDOVI et al., 2021).

Existem algumas configurações distintas de SACs, com diferentes funções de remoção de poluentes: superficial e subsuperficial (horizontal e vertical) (MACHADO et al., 2017; BENASSI et al., 2018; DELL'OSBEL et al., 2020). No presente estudo iremos nos concentrar nos SACs de fluxo subsuperficial horizontal, os quais são compostos por um substrato, filme

microbiológico e macrófitas aquáticas, quando o fluxo se dá subsuperficialmente (MARONEZE et al., 2014; BENASSI et al., 2018). Os poluentes nos SACs são removidos a partir da composição física e química de cada um deles. O P, por sua vez, é adsorvido pelo substrato, absorvido pelas plantas e pode ser removido por meio de reações com a microbiota formada nos SACs, ou seja, micro-organismos que podem auxiliar no processo de remoção. O estudo de Mendonça et al. (2012) demonstra que os resultados de remoção de fósforo de águas residuárias têm sido mais promissores em SACs não cultivados do que nos cultivados com plantas, ou seja, um fator decisivo para a adsorção de tal elemento é a escolha do substrato. Entretanto, as macrófitas não devem ser negligenciadas, visto que estudos mais recentes têm demonstrado a importância das macrófitas na remoção de poluentes, sendo primordial realizar o manejo da biomassa para a manutenção da eficiência de remoção dos poluentes (VYMAZAL, 2020; BALDOVI et al., 2021).

O P não tem um ciclo de mudança de composição para a melhor assimilação, assim como o nitrogênio ou o carbono. Logo, a remoção do mesmo em SACs pode se dar por diferentes maneiras. A adsorção do P por meio do substrato é o principal fator para a remoção desse nutriente em SACs. Diferentes resultados são observados em reações do P com diferentes minerais - como Ca, Fe e Al -, além de outros fatores gerais do sistema, tais como: carga orgânica, carga hidráulica, valores de pH, entre outros. A adsorção de P é mais eficiente quando esse elemento se apresenta em sua forma inorgânica. Entretanto, a assimilação biótica (absorção por plantas e microbiota do sistema) é melhor quando o P está sob a forma orgânica, a qual também é encontrada em efluentes (VYMAZAL e KROPFELOVÁ, 2008).

A absorção biótica ocorre principalmente pela necessidade que as plantas têm de assimilação dos nutrientes, tal qual o P. Entretanto, essas plantas têm um limite de retenção de nutrientes, e que, após atingi-lo, ficam saturadas e não têm o mesmo desempenho nos SACs como no início de operação do sistema (VYMAZAL e KROPFELOVÁ, 2008; BALDOVI et al., 2021). Para manter o desempenho de remoção de nutrientes nos SACs é necessário não sobrecarregar o sistema. Uma das maneiras de solucionar esse problema é por meio do manejo das plantas, isto é, com a remoção sistematizada das plantas, sendo diferenciado pela retirada inteira de plantas submersas ou a poda de plantas emergentes. Realizando o manejo das plantas,

o estoque de nutrientes não fica sobrecarregado, permitindo que cada planta absorva mais nutrientes e cresça (VYMAZAL, 2020).

O biofilme de SACs é capaz de captar o P e depositá-lo no substrato, demonstrando o processo de remoção do nutriente dos corpos hídricos com o auxílio da microbiota (DODDS, 2003). Em SACs de fluxo subsuperficial horizontal nota-se a retenção e adsorção do P em maior eficiência que nos de fluxo superficial e/ou vertical. Isso ocorre devido ao fato de a sedimentação do elemento ser a principal técnica para remoção do nutriente em águas residuárias (VYMAZAL, 2010). Entretanto, o recente estudo de Baldovi et al. (2021) em SAC de fluxo horizontal superficial cultivado com *Eichhornia crassipes* apresentou excelentes resultados de remoção de P da água residuária (~90%), com grande participação das macrófitas. Os autores destacam a importância do manejo frequente (retirada controlada) de parte da biomassa. Em tal estudo foi realizado o manejo semanal.

Outro fator importante para a remoção de fósforo é o tempo de detenção hidráulica (TDH). Baldovi et al. (2021) fizeram um estudo com TDHs de 3, 5 e 7 dias. Todos os tratamentos apresentaram excelentes remoções de PT (~90%). Entretanto, o de menor TDH (3 dias) foi o que apresentou a melhor remoção pelas macrófitas aquáticas. Nesse estudo, não foi utilizado substrato, então a absorção de P foi pela *E. crassipes*, sedimentação e assimilação por algas. A diminuição do TDH impacta em maior vazão, ou seja, maior renovação do afluente, maior disponibilidade de nutrientes e, por conseguinte, maior taxa de aplicação superficial e menor área necessária para implantação do SAC.

Diversos tipos de substratos podem ser utilizados em SACs, sendo os mais comuns, cascalho, brita e areia. Todavia, quanto mais é possível pesquisar e analisar os resultados, mais se encontram substratos alternativos para a remoção de nutrientes. Søvik e Kløve (2005) utilizaram conchas e areia como material suporte em SACs e demonstraram que esse substrato em uma configuração de fluxo subsuperficial foi capaz de reter o P, variando entre 57 e 93%, sendo que a concentração inicial variou entre 5 - 25 mg L⁻¹. Além disso, Miranda et al. (2020) utilizaram pedaços de garrafa PET como substrato de SACs, provando que tal meio suporte foi capaz de remover os sólidos totais de maneira mais eficaz do que os tanques onde se utilizou cascalho como substrato. Entretanto, o PET e outros polímeros devem ser evitados, dado o problema dos microplásticos no ambiente. A pesquisa de Bolton et al. (2019), com SAC de fluxo horizontal subsuperficial utilizando biocarvão de lascas de cânhamo como substrato,

obteve excelentes resultados de remoção de fósforo (94,3%). A água residuária tratada teve concentração inicial de P variando entre 7,07 e 2,99 mg L⁻¹. Assim, com base nos exemplos apresentados, nota-se que há possibilidades de se utilizar diferentes substratos, incluindo os não-convencionais, os quais podem gerar ótimos resultados na remoção de P nos SACs.

Enquanto o P é escasso em jazidas, adubos fosfatados são introduzidos em plantações agrícolas para auxiliar no crescimento e manutenção de nutrientes do solo. Desse modo, a partir dos SACs é possível remover o P de esgotos domésticos e usar esse material para a fertilização do solo (MARONEZE et al., 2014; DELL'OSBEL et al., 2020). Ressalta-se que o P reciclado é muito mais sustentável do que o extraído das rochas (WITHERS et al., 2019).

Assim, visto que a eutrofização de ecossistemas aquáticos tem consequências indesejáveis, além da escassez do P para a agricultura, é importante investigar tecnologias capazes de reverter esse cenário. Desse modo, a fim de nortear futuras pesquisas experimentais, o presente estudo teve como objetivo avaliar a remoção de P de águas residuárias por SACs de fluxo subsuperficial horizontal por meio de revisão bibliométrica e bibliográfica (2016 - 2021). Foram avaliados também a influência do substrato, do TDH e diferentes espécies de macrófitas na remoção de P nos SACs.

Material e métodos

Parte da presente pesquisa foi de cunho bibliográfico, ou seja, uma pesquisa do tipo “estado da arte”, que, por definição, é o tipo de pesquisa que visa ao entendimento de determinada área de estudo em determinado período de tempo (SHIGUNOV NETO, 2020). Para tanto, a pesquisa bibliográfica derivou-se do estudo de publicações sobre remoção de P em SACs de fluxo subsuperficial horizontal do período entre 2016 e 2021. Outra parte da pesquisa foi de caráter bibliométrico, ou seja, de cunho quantitativo, que visa mensurar parâmetros da publicação de determinado assunto. Desse modo, analisa dados como: quantidade de publicação, países onde foram publicados, autores, entre outros. A pesquisa bibliométrica tem por objetivo mensurar a produtividade. Na presente pesquisa foi realizada a bibliometria a fim de avaliar os parâmetros de publicação sobre SACs de fluxo subsuperficial horizontal e remoção de P (GUIMARÃES, MOREIRA e BEZERRA, 2021).

Foi realizada pesquisa na base de dados *Scopus*, por meio do Acesso CAFe (Comunidade Acadêmica Federada) do portal CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de

Pessoal de Nível Superior), para localizar artigos científicos e outros documentos a fim de efetuar o levantamento de informações bibliométricas e bibliográficas de pesquisas realizadas acerca do tema. A base de dados escolhida para essa pesquisa foi o *Scopus*, pois esse é o maior banco de dados de artigos, citações e resumos, possibilitando a visualização de periódicos em todo o mundo, o que facilitou a pesquisa bibliométrica realizada (SCOPUS, 2023).

Para obter precisão no material a ser analisado foi utilizada busca direcionada com as seguintes palavras-chave: “*phosphorus*”, “*constructed wetland*”, “*substrate*” e “*horizontal*”. A busca foi limitada cronologicamente, incluindo apenas os artigos publicados de janeiro de 2016 a dezembro de 2021, a fim de analisar apenas os resultados mais recentes.

Foram obtidos 34 artigos científicos a partir do levantamento bibliométrico realizado na base de dados *Scopus*. Foram excluídos quatro artigos da revisão bibliográfica, visto que um deles estava disponível apenas no idioma chinês; o segundo não foi possível acessar; o terceiro tratava de um composto que contém fósforo (triazophos) e o quarto era um estudo de revisão bibliográfica.

Foram gerados gráficos relacionando o número de publicações por ano e por país do assunto pesquisado, para que assim obtivéssemos o levantamento bibliométrico acerca de SACs, enfatizando o estudo dos substratos com vistas à remoção de PT. Foi elaborado um mapa cientométrico no *software VOSviewer* (<https://www.vosviewer.com>) a partir dos dados obtidos pelo *Scopus*. Foi realizada uma seleção das palavras que apareceram no mínimo quatro vezes, a fim de determinar a relação do substrato com as demais palavras-chave nos artigos científicos.

Posteriormente, foi realizada a análise bibliográfica por meio da leitura detalhada dos artigos e a compilação dos dados extraídos em uma matriz. Os dados extraídos referem-se aos substratos utilizados nos SACs, as concentrações iniciais e finais de fósforo, as taxas de remoção do fósforo, TDH, a escala do SAC, a existência ou não de macrófitas no sistema, o manejo das plantas, além de outras informações para o conhecimento e análise dos diferentes substratos e resultados de remoção do fósforo.

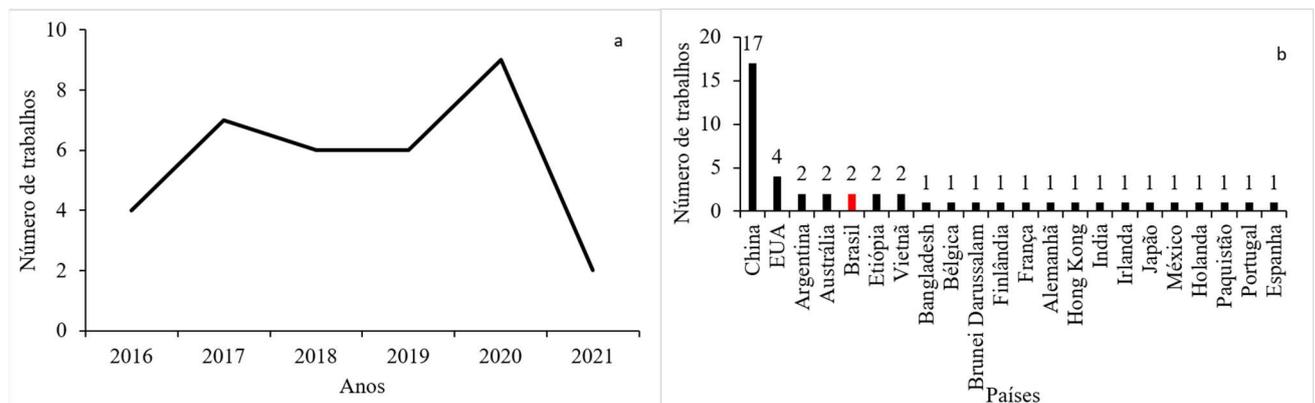
Finalmente, foi realizada análise estatística multivariada dos resultados extraídos no levantamento bibliométrico. A Análise de Componentes Principais (ACP) foi realizada no

software PCord versão 6.0 (MCCUNE e MEFFORD, 2011), com matriz de dados não transformada.

Resultados e Discussão

Podemos visualizar por meio da Figura 1(a) a distribuição de publicações dos 34 artigos ao longo dos cinco anos selecionados para a realização da pesquisa (2016 - 2021). É visível uma tendência de aumento nas publicações de 2016 para 2017, seguido por uma estabilização no número de publicações até 2019, com um pico ascendente no ano de 2020, seguido por uma queda abrupta em 2021. Provavelmente, essa queda se deve à pandemia de Covid-19. De fato, foi observado que durante o segundo trimestre de 2020 houve uma queda dos artigos enviados para publicação por mulheres (de 48% para 37%), o que pode ter relação com o período vivenciado durante a pandemia (CANDIDO e CAMPOS, 2020).

Figura 1. Número de trabalhos sobre Sistemas de Alagados Construídos de fluxo subsuperficial horizontal: (a) 2016 - 2021; (b) distribuição por países, com destaque ao Brasil (coluna vermelha).



Fonte: Elaborada pelas autoras.

É notória a disparidade geográfica do número de artigos publicados entre os países, sendo a China o país com o maior destaque em número de publicações, representando 50% dos artigos encontrados no levantamento. Em segundo lugar se destaca os Estados Unidos da América, com cerca de 11,8% dos artigos obtidos. O Brasil está em quinto lugar, com 2 artigos

O mapa cientométrico ajudou a identificar as palavras que são mais associadas ao substrato nos 34 artigos obtidos. O *software* agrupou as palavras em quatro grupos, identificados como: grupo 1 (azul), grupo 2 (vermelho), grupo 3 (amarelo) e grupo 4 (verde).

No grupo 1 (azul) é possível verificar que as palavras associadas ao substrato têm relação com a remoção do nutriente fósforo, dentre essas “*adsorption*” (o processo caracterizado pela remoção do fósforo por meio do substrato), “*microbial community*” e “*bacteria*”, que podem estar relacionadas com a remoção do PT por meio da interação do elemento com a microbiota e os micro-organismos, como bactérias, formados nos substratos de SACs. É possível verificar que nesse grupo está presente o termo “*electrokinesis*”, o qual identifica um tipo de procedimento para a remoção de fósforo usando eletrólise em água e reduzindo o PT para, assim, aderir a um elemento presente no cátodo da eletrólise, por exemplo, o ferro, possibilitando a remoção do ortofosfato combinada ao ferro. Além disso também se percebe a presença dos termos “*phosphorus*” e “*pollutant removal*” caracterizando o grupo azul com a junção de termos referentes à remoção de nutrientes não removidos em tratamentos convencionais de efluentes, promovendo a purificação da água.

No grupo 2 (vermelho) observamos os termos como “*biological oxygen demand analysis*”, “*water pollutant*” e “*wastewater*”. Esses termos indicam que o grupo vermelho se relaciona primordialmente com a remoção de matéria orgânica e, em uma análise mais profunda, identifica-se que o tratamento das águas residuárias por meio dos SACs não possibilita apenas a remoção de nutrientes, mas também a remoção de matéria orgânica.

No grupo 3 (amarelo) estão presentes termos mais gerais que relacionam SACs com o desempenho do sistema, o elemento nitrogênio e a demanda química de oxigênio. Esses termos são usados em grande quantidade dentro dos 34 artigos encontrados nesta pesquisa. Isso foi verificado por meio dos volumes das esferas em amarelo no mapa cientométrico.

O grupo 4 (verde) apresenta a relação dos termos com a remoção de nitrogênio, pois nele estão presentes os termos “*denitrification*”, “*ammonia*” e “*gravel*”. Esses são termos relacionados à composição do nitrogênio e sua remoção, além do substrato cascalho, que é um dos mais utilizados em SACs.

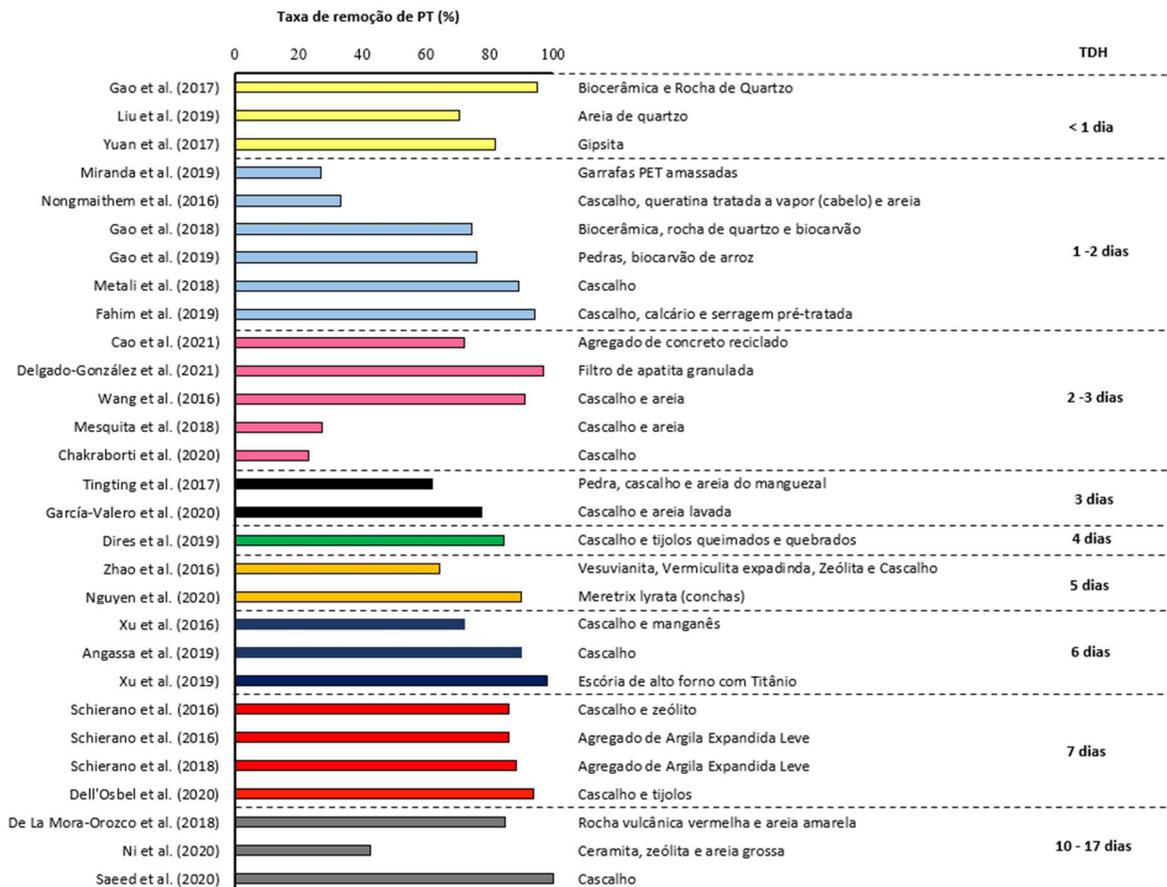
Dos 34 resultados obtidos na busca, foi realizada a leitura aprofundada e análise bibliográfica de 30 documentos. Não foi possível acessar um dos trabalhos, já que um estava no idioma chinês e os demais não estavam no escopo da pesquisa. As informações dos 30

artigos foram organizadas em uma matriz de dados. Em seguida, foram elaborados gráficos para comparar os valores de remoção do P e outras informações pertinentes para a consistência do estudo, tais como: substratos, TDH e macrófitas utilizadas nos SACs.

O substrato cascalho foi utilizado de forma isolada ou combinada com outros substratos em 17 dos 30 estudos analisados, sendo o substrato mais frequente nos estudos. Além disso, as macrófitas mais utilizadas nos SACs estudados foram as dos gêneros *Phragmites* e *Typha*, tendo as espécies *Phragmites australis* (7 ocorrências) e *Typha domigensis* (4 ocorrências), as de maiores ocorrências, respectivamente.

Pela Figura 3, foi possível comparar as referências dos artigos pela remoção de PT de acordo com o TDH e os tipos de substratos utilizados nos SACs. O cascalho foi o substrato que apresentou resultados bastante variados em relação à remoção de PT. Para entender o que pode influenciar a maior taxa de remoção de PT é necessário comparar alguns estudos. No estudo com menor porcentagem de remoção de PT, dentro de todos os artigos analisados, foi utilizado o substrato de cascalho, TDH de 2,5 dias e a macrófita *Schoenoplectus californicus*, e, com isso, foi possível a remoção de 23% de PT (CHAKRABORTI e BAYS, 2020). Em comparação ao estudo em que também se utilizou cascalho, com o uso da *Phragmites australis* como macrófita e um TDH com cerca de 17 dias, obteve-se a remoção de 100% de PT (SAEED et al., 2020). Assim, supõe-se que outros fatores em conjunto e não individualizados foram responsáveis pela remoção de PT.

Figura 3. Taxa de remoção de fósforo total (PT, %) nos artigos avaliados, conforme o tempo de detenção hidráulica (TDH) e os tipos de substratos.



Fonte: Elaborada pelas autoras.

Com base nisso, podemos identificar que nesses sistemas contendo substrato de cascalho foi essencial a absorção do PT pela macrófita; e o TDH, quando deixado por 16,8 dias, a remoção de P foi cerca de 100%. Em alguns sistemas de tratamento não seria viável ter um TDH de 16,8 dias, todavia foi possível obter uma remoção de 77,7% de PT com um TDH menor (de 3 dias), associado à absorção do fósforo pela *Phragmites australis* e a adsorção pelos substratos de cascalho e areia lavada (GARCÍA-VALERO et al., 2020).

Observando estudos que utilizaram um TDH de até 3 dias (Figura 3) é possível destacar alguns resultados. Com o substrato de biocerâmica e rocha de quartzo, a macrófita *Cyperus alternifolius* em um TDH de apenas 0,12 dia, foi obtida a remoção de 95% de PT (GAO et al., 2017). O valor do TDH em comparação com os estudos citados anteriormente foi bem menor,

entretanto, esse estudo fez uso da eletrólise para promover a ligação do P com o ferro e, então, remover o mesmo por precipitação. A consequência negativa desse experimento foi o aumento do ferro no efluente. Os autores refizeram o estudo no ano subsequente, como mostrado na Figura 3, onde se manteve a mesma macrófita (*Cyperus alternifolius*), o TDH foi alterado para 1 dia e, além da biocerâmica e rocha de quartzo previamente utilizadas, foi incluído o biocarvão (GAO et al., 2018). Com a adição do biocarvão, além da remoção de PT, foi possível remover uma porcentagem do ferro presente por conta da eletrólise.

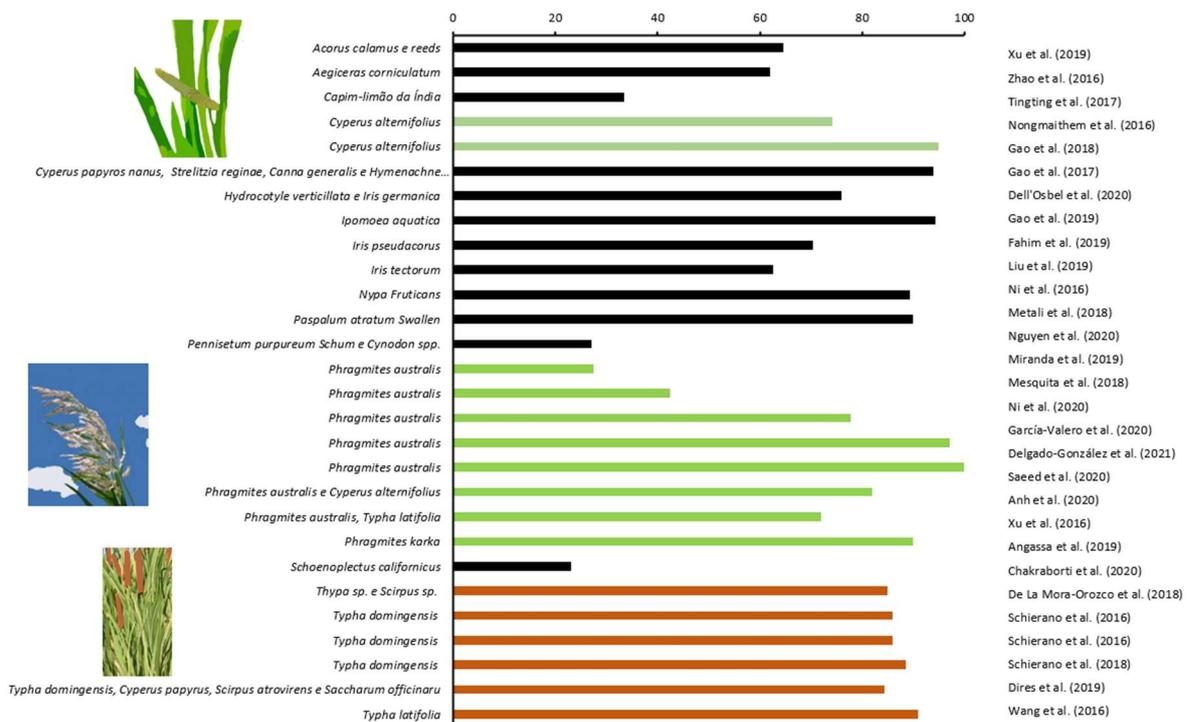
Por outro lado, um dos resultados menos satisfatórios de remoção de PT, de 27%, foi obtido utilizando garrafas PET como substrato, as macrófitas *Pennisetum purpureum* Schum e *Cynodon* spp. e TDH de 1 dia (MIRANDA et al., 2020). Mesmo com a necessidade de estudar substratos diferentes e acessíveis, é importante se atentar à qualidade do efluente final e, por conseguinte, do que será lançado no corpo receptor. Ressalta-se que o uso de PET como substrato pode aumentar o índice de microplástico, um poluente que pode alterar a biota e o ecossistema oceânico (JONES, 2019).

Destaca-se um resultado satisfatório na remoção de PT por um estudo que utilizou a macrófita *Phragmites australis* associada ao uso do substrato de apatita granulada e TDH em torno de 2 dias. Esse estudo obteve a remoção de 97,1% de PT das águas residuárias (DELGADO-GONZÁLEZ et al., 2021). Isso mostra que com um substrato diferente do cascalho e o uso da *Phragmites* não é preciso um TDH tão alto para ter uma remoção de PT próxima de 100%. Além disso, é importante destacar que o uso de cascalho como substrato conjuntamente à *Typha latifolia* com mais um TDH de 2 dias, foi possível a retirada de cerca de 91% de remoção de PT de águas residuárias (WANG et al., 2016).

A partir dos resultados mencionados anteriormente, decidimos avaliar as macrófitas usadas nos SACs e determinar se haveria alguma contribuição importante na remoção de PT. Conforme a Figura 4, é possível avaliar o desempenho dos SACs em relação às macrófitas utilizadas. Apesar de notar uma certa diversificação das macrófitas utilizadas nos estudos levantados, há um uso considerável das macrófitas dos gêneros *Phragmites* e *Typha*. É possível também visualizar que as espécies desses dois gêneros apresentaram resultados efetivos nos SACs em relação à remoção de PT, mais especificamente, *Typha* teve valores aproximados e elevados de remoção de PT (acima de 80%) nos SACs em que esteve presente. Tanto Gao et al. (2017) como Gao et al. (2018) obtiveram bons resultados de remoção de P, principalmente

pelo uso de eletrólise. Consequentemente, houve o aumento considerável das concentrações de ferro, prejudicando a qualidade do efluente final. Assim, entende-se que para melhorar a remoção de P em SACs, seja melhor adequar substratos, TDH, as espécies e o manejo de macrófitas nos SACs ao invés de sobrecarregar o sistema com eletrólise ou outros artificios. Corroborando com essa afirmação, podemos citar a célebre frase de William Mitsch (1992), “Do not over-engineer the system, design it with nature, not against it”, ou seja, não devemos sobrecarregar os SACs com engenharia e sim concebê-los com a natureza e não contra ela.

Figura 4. Taxa de remoção de Fósforo total (PT, %) nos artigos avaliados, conforme as macrófitas aquáticas presentes nos Sistemas de Alagados Construídos.



Fonte: Elaborada pelas autoras.

Devido à grande diversidade das macrófitas utilizadas, representantes do gênero *Phragmites* foram os mais presentes na revisão bibliográfica. Por exemplo, em um SAC cujo TDH era de 2,4 dias, substrato de cascalho e areia, foi verificada remoção de cerca de 27,5% de PT (MESQUITA et al., 2018). Estudos que também utilizaram cascalho como substrato e

Phragmites obtiveram diferentes resultados de remoção de PT, com o TDH de 3 dias foi possível a remoção de 77,7% de PT do SAC (GARCÍA-VALERO et al., 2020).

De forma análoga, um SAC com substrato apenas de cascalho e TDH de 6 dias apresentou a remoção 89,9% de PT (ANGASSA et al., 2019). Por outro lado, o SAC com o mesmo TDH, incluindo manganês no substrato e a macrófita *Typha latifolia* no sistema, obteve-se remoção de 72% de PT (XU et al., 2016). Como os estudos eram semelhantes e obtiveram resultados diferentes, uma possível solução para esse resultado seria a competição entre as plantas. Com o uso das macrófitas *Typha latifolia* e *Phragmites* conjuntamente, as duas macrófitas, que são de gêneros diferentes e apresentam requerimentos ambientais específicos, poderiam competir por recursos, acarretando menor remoção de P se comparados os dois sistemas. De forma semelhante, Sanchez et al. (2018) observaram menor retirada de remoção de matéria orgânica em SACs contendo *Eleocharis* sp. e *Typha* sp., quando comparado com tanques, onde cada planta estava isoladamente, evidenciando piora na remoção devido à competição entre as espécies (interespecífica).

É possível citar o SAC com substrato de ceramita, zeólita e areia grossa, o qual também utilizou a macrófita do gênero *Phragmites* em TDH de 12 dias e alcançou uma remoção de 42,5% de PT (NI et al., 2020). Nesse caso, pode-se dizer que a combinação entre o tipo de substrato e a macrófita não obteve um resultado satisfatório de remoção de PT do sistema.

No estudo que utilizou a macrófita *Phragmites karka* houve uma relação explícita de que a planta desempenhou um papel importante na remoção de PT (ANGASSA et al., 2019). Entretanto, de maneira geral, é possível estabelecer que a configuração inteira do SAC é responsável pelo desempenho apresentado, então, é necessário que o TDH, o substrato e a macrófita tenham seus papéis individuais para a remoção de PT no geral.

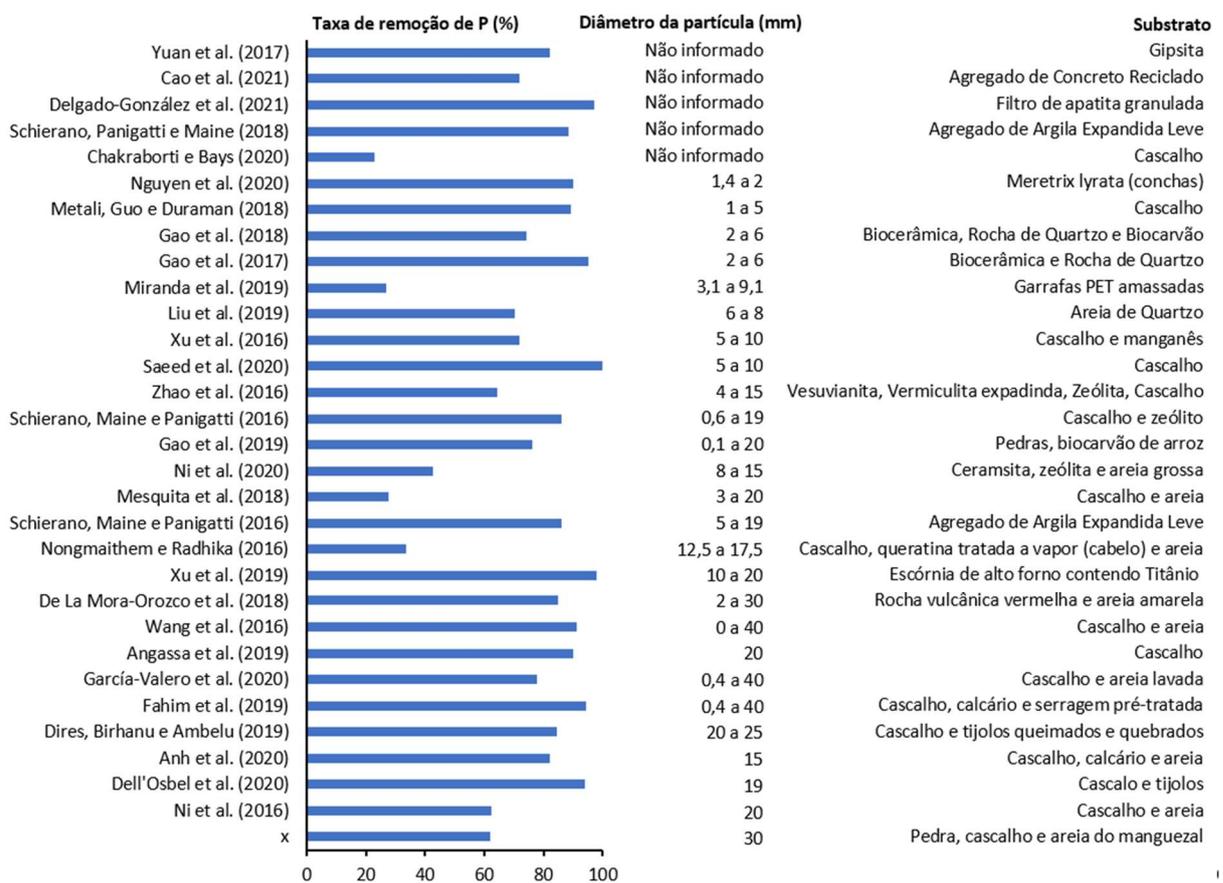
A partir da Figura 4 é possível identificar algumas espécies de macrófitas que tiveram desempenho no SAC significativamente menor que a média aritmética de remoção de PT (75%) no levantamento: *Schoenoplectus californicus* (23%), o uso combinado de *Pennisetum purpureum* Schum e *Cynodon* spp. (27%) e *Cymbopogon citratus* (33%).

De acordo com os artigos estudados durante a pesquisa há uma certa variedade de substratos, alguns deles contendo outros elementos associados, como a escória de alto forno com titânio, outros de fácil acesso, como tijolos de argila, conchas e biocarvão de arroz, os

quais tiveram resultados satisfatórios na remoção de PT dentro de suas escalas. Entretanto, outros como garrafa PET e até queratina (cabelo) tratada à vapor não tiveram bons resultados.

Além de variáveis como o substrato, macrófita e TDH utilizados nas configurações de cada SAC, também obtivemos o diâmetro das partículas dos substratos para avaliar a relação entre o diâmetro da partícula e a remoção de PT. No presente estudo, notou-se que a variação do diâmetro da partícula não tem uma relação direta com a remoção de PT (Figura 5).

Figura 5. Taxa de remoção de fósforo total (PT, %) nos artigos avaliados, substratos utilizados e o diâmetro da partícula.



Fonte: Elaborada pelas autoras.

Os substratos mais utilizados, como o cascalho e a areia apresentaram tanto resultados de remoção de P elevados como baixos. Porém, foi possível obter uma boa porcentagem de

remoção de PT com o substrato de cascalho se usa uma macrófita que auxilia na absorção do P e adequando o TDH de acordo com a configuração e necessidade dos SACs.

A Figura 6 apresenta a avaliação conjunta dos dados extraídos dos artigos científicos pela ACP. A análise conjunta dos dados utilizando o TDH como variável categórica explica 80,3% da variabilidade em seus dois primeiros eixos (Figura 6A).

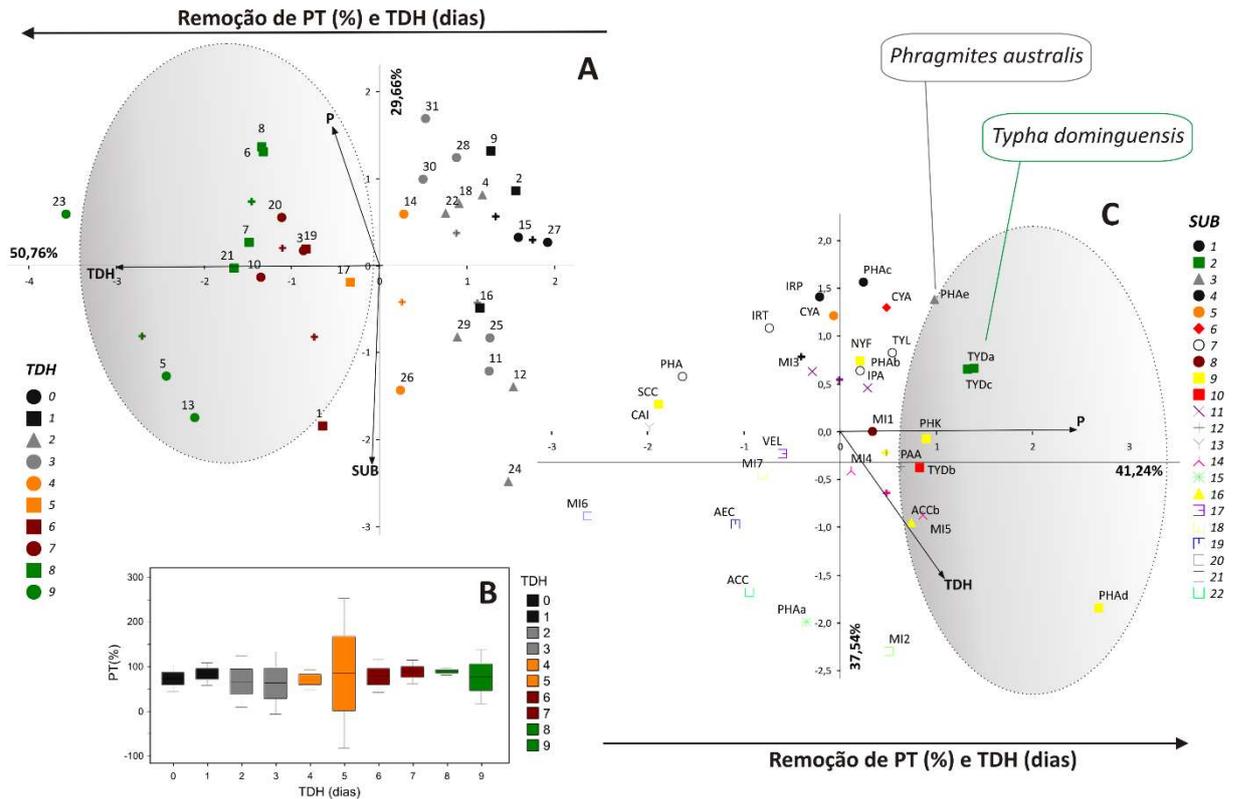
De forma geral, o eixo 1 (50,76%, quadrante negativo) ordena as unidades amostrais com TDHs entre 5 e 9 dias e que estiveram mais relacionadas aos elevados valores de remoção de PT. O mesmo eixo (quadrante positivo) ordena as unidades amostrais com TDHs entre 0 e 4 dias e que apresentam menores correlações com os valores de remoção de PT (Figura 6A). A variação conjunta dos dados observada no eixo 1 foi considerada significativa ($p = 0,0004$). O eixo 2 (29,66%) não foi considerado significativo ($p = 0,1572$) e não revelou nenhum padrão de ordenação das unidades amostrais em relação ao TDH.

A Figura 6B mostra a variação na remoção de PT de acordo com os valores de TDH. De forma geral, a análise revela grande variação na remoção de PT considerando os trabalhos conduzidos com TDH de 5 dias, razão pela qual a ACP pode ter encontrado um determinado padrão quando considera o TDH como variável categórica. Embora o padrão observado na variação dos dados indique uma boa correlação entre remoção de PT e TDH entre 5 e 9 dias, sugere-se cautela na interpretação das relações entre TDH e remoção de P com base nos dados levantados, especialmente pelo TDH de 5 dias, cuja variação foi mencionada anteriormente.

Para avaliar a correlação entre os tipos de substratos e de espécies de macrófitas com as porcentagens de remoção de PT, os mesmos dados foram analisados pela ACP (Figura 6C). Nessa análise, os tipos de substratos foram utilizados como variável categórica e as macrófitas incluídas dentre as variáveis analisadas. Em seus dois primeiros eixos, a análise explicou 78,78% da variabilidade conjunta dos dados e ambos foram considerados significativos ($p = 0,0002$). O eixo 1 (41,24%; quadrante positivo) ordenou as unidades amostrais com maiores TDHs e mais correlacionadas à remoção de PT. Nesse eixo, as macrófitas *Typha dominguensis* (TYDa, TYDc) e *Phragmites australis* (PHAd) foram as espécies mais correlacionadas aos valores elevados de remoção de PT. Em relação aos tipos de substratos, agregado de argila expandida leve (2), cascalho (9), cascalho e zeólito (10), cascalho, tijolos queimados e

quebradiços (14) e escória de alto forno contendo titânio (16), também estiveram mais relacionados às maiores remoções de PT.

Figura 6. Análise Multivariada de Componentes Principais (ACP) dos dados extraídos dos artigos científicos avaliados.



Nota: **A.** Para ACP com dados categorizados pelos tipos de TDH utilizados (cores), nessa análise não foram incluídas as espécies de macrófitas. **B.** Para *Boxplot* com as variações na remoção de PT (%) e TDH (dias) foram utilizados nos estudos. Valores mínimos, máximos e medianos estão representados pelas barras verticais e horizontais, respectivamente. **C.** Já para ACP consideraram-se todos os dados levantados (incluindo as macrófitas).

Fonte: Elaborada pelas autoras.

Conclusão

O presente estudo teve como objetivo avaliar a remoção de P de águas residuárias por SACs de fluxo subsuperficial horizontal, por meio de revisão bibliométrica e bibliográfica no período de 2016 a 2021.

Em relação ao levantamento bibliométrico, foram obtidos 34 artigos relacionados à remoção de P em SACs de fluxo subsuperficial horizontal no período de 2016 a 2021. A China produziu metade das publicações obtidas no levantamento. O Brasil possui apenas dois artigos publicados durante o período estudado, denotando a necessidade de realizar mais pesquisas sobre o tema no país, visto que se trata de tecnologia de tratamento de esgotos de baixo custo e de baixo impacto ambiental, eficiente na remoção de nutrientes e com potencial de recuperação de recursos (água, nutrientes e biomassa).

O substrato mais frequentemente utilizado nos artigos foi o cascalho, seguido de areia, calcário e tijolos de argila. Os cinco substratos que apresentaram os maiores valores de remoção de PT nos SACs foram: cascalho (100%); escória de alto forno de titânio (98%); apatita granulada (97%); biocerâmica com rocha de quartzo (95%); e cascalho, calcário e serragem pré-tratada (94%).

Não foi observada uma relação direta entre o TDH e a remoção de PT nos SACs. A remoção média ficou em torno de 75% e o valor permanece praticamente o mesmo para TDHs ≤ 3 dias (73%).

As espécies de macrófitas aquáticas mais frequentes no levantamento foram: *Phragmites australis* (7 vezes) e *Typha domingensis* (4 vezes). O gênero *Typha* foi o que apresentou os melhores resultados de remoção de PT (87%), representado pelas espécies *Typha domingensis* e *Typha latifolia*. Notou-se que em apenas um dos artigos foi realizado o manejo das macrófitas, o qual tem papel fundamental na remoção de nutrientes. Recomenda-se realizar o manejo das macrófitas em futuros estudos com SACs e em sistemas reais.

Dessa maneira, conclui-se que nos SACs subsuperficiais horizontais, a remoção de PT está mais associada ao substrato e à espécie de macrófita, e que, mesmo o cascalho, um material acessível, se utilizado em uma configuração adequada, com uma macrófita que ajude na absorção de PT, é possível ter bons resultados.

Referências

- ANGASSA, K.; LETA, S.; MULAT, W.; KLOSS, H.; MEERS, E. Evaluation of Pilot-Scale Constructed Wetlands with Phragmites karka for Phytoremediation of Municipal Wastewater and Biomass Production in Ethiopia. **Environmental Processes**, v. 6, n. 1, p. 65–84, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40710-019-00358-x>.
- ANH, B. T. K.; THANH, N. V.; PHUONG, N. M.; HA, N. T. H.; YEN, N. H.; LAP, B. Q.; KIM, D.D. Selection of Suitable Filter Materials for Horizontal Subsurface Flow Constructed Wetland Treating Swine Wastewater. **Water, Air, and Soil Pollution**, v. 231, n. 2, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11270-020-4449-6>.
- BALDOVI, A. A.; AGUIAR, A. R. B.; BENASSI, R. F.; VYMAZAL, J.; JESUS, T. A. Phosphorus removal in a pilot scale free water surface constructed wetland: hydraulic retention time, seasonality and standing stock evaluation. **Chemosphere**, v. 266, p. 12839, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.128939>
- BEAULIEU, J. J.; DELSONTRO T.; DOWNING, J. A. Eutrophication will increase methane emissions from lakes and impoundments during the 21st century. **Nature Communications**, v. 10, p. 1375, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41467-019-09100-5>
- BENASSI, R. F.; MATHEUS, D. R.; SUBTIL, E. L.; COELHO, L. H. G.; OLIVEIRA, L. H. S.; MORETTO, M. R. D.; JESUS, T. A.; PAGANINI, W. S.; BALDOVI, A. A.; SANCHEZ, A. A.; STOPA, J. M. **Manual de sistemas de Wetlands construídas para o tratamento de esgotos sanitário: implantação, operação e manutenção**. Santo André: UFABC, 2018. ISBN: 978-85-65212-85-4
- BOLTON, L.; JOSEPH, S.; GREENWAY, M.; DONNE, S.; MUNROE, P.; MARJO, C. E. Phosphorus adsorption onto an enriched biochar substrate in constructed wetlands treating wastewater. **Ecological Engineering**, v. 1, p. 100005, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecoena.2019.100005>
- CANDIDO, M. R.; CAMPOS, L. A. Pandemia reduz submissões de artigos acadêmicos assinados por mulheres. **Blog DADOS**, 2020. Disponível em: <http://dados.iesp.uerj.br/pandemia-reduz-submissoes-de-mulheres/>. Acesso em 17 fev. 2023.
- CAO, Z.; ZHOU, L.; GAO, Z.; HUANG, Z.; JIAO, X.; ZHANG, Z.; MA, K.; DI, Z.; BAI, Y. Comprehensive benefits assessment of using recycled concrete aggregates as the substrate in constructed wetland polishing effluent from wastewater treatment plant. **Journal of Cleaner Production**, v. 288, p. 125551, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125551>.
- CHAKRABORTI, R. K.; BAYS, J. S. Natural treatment of high-strength reverse osmosis concentrate by constructed wetlands for reclaimed water use. **Water (Switzerland)**, v. 12, n. 1, 2020. DOI: <https://doi.org/10.3390/w12010158>.
- DE LA MORA-OROZCO, C. GONZÁLEZ-ACUÑA, I. J.; SAUCEDO-TERÁN, R. A.; FLORES-LÓPEZ, H. E.; RUBIO-ARIAS, H. O.; OCHOA-RIVERO, J. M. Removing organic matter and nutrients from pig farm wastewater with a constructed wetland system. **International Journal of**

Environmental Research and Public Health, v. 15, n. 5, 2018. DOI:
<https://doi.org/10.3390/ijerph15051031>.

DELGADO-GONZÁLEZ, L.; PROST-BOUCLE, S.; TROESCH, S.; MOLLE, P. Granulated apatite filters for phosphorous retention in treatment wetlands: Experience from full-scale applications. **Journal of Water Process Engineering**, v. 40, 2021. DOI:
<https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2021.101927>

DELL'OSBEL, N.; COLARES, G. S.; OLIVEIRA, G. A.; RODRIGUES, L. R.; SILVA, F. P.; RODRIGUEZ, A. L.; LÓPEZ, D. A. R.; LUTTERBECK, C. A.; SILVEIRA, E. O.; KIST, L. T.; MACHADO, E. L. Hybrid constructed wetlands for the treatment of urban wastewaters: Increased nutrient removal and landscape potential. **Ecological Engineering**, v. 158, n. 158, p. 106072, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2020.106072>

DIRES, S.; BIRHANU, T.; AMBELU, A. Use of broken brick to enhance the removal of nutrients in subsurface flow constructed wetlands receiving hospital wastewater. **Water Science and Technology**, v. 79, n. 1, p. 156–164, 2019. DOI: <https://doi.org/10.2166/wst.2019.037>.

DODDS, W. K. The Role of Periphyton in Phosphorus Retention in Shallow Freshwater Aquatic Systems. **Journal of Phycology**, v. 39, n. 5, p. 840–849, 2003. DOI: 10.1046/j.1529-8817.2003.02081.x

FAHIM, R.; LU, X.; JILANI, G.; HUSSAIN, J.; HUSSAIN, I. Comparison of floating-bed wetland and gravel filter amended with limestone and sawdust for sewage treatment. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 26, n. 20, p. 20400–20410, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11356-019-05325-5>.

GAO, Y.; XIE, Y. W.; ZHANG, Q.; WANG, A. L.; YU, Y. X.; YANG, L. Y. Intensified nitrate and phosphorus removal in an electrolysis-integrated horizontal subsurface-flow constructed wetland. **Water Research**, v. 108, p. 39–45, 2017. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.watres.2016.10.033>.

GAO, Y.; YAN, C.; WEI, R.; ZHANG, W.; SHEN, J.; WANG, M.; GAO, B.; YANG, Y.; YANG, L. Photovoltaic electrolysis improves nitrogen and phosphorus removals of biochar-amended constructed wetlands. **Ecological Engineering**, v. 138, n. April, p. 71–78, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2019.07.004>.

GAO, Y.; ZHANG, W.; GAO, B.; JIA, W.; MIAO, A.; XIAO, L.; YANG, L. Highly efficient removal of nitrogen and phosphorus in an electrolysis-integrated horizontal subsurface-flow constructed wetland amended with biochar. **Water Research**, v. 139, p. 301–310, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2018.04.007>.

GARCÍA-VALERO, A.; MARTÍNEZ-MARTÍNEZ, S.; FAZ, A.; TERRERO, M. A.; MUÑOZ, M. A.; GÓMEZ-LÓPEZ, M. D.; ACOSTA, J. A. Treatment of wastewater from the tannery industry in a

constructed wetland planted with phragmites australis. **Agronomy**, v. 10, n. 2, p. 1–15, 2020. DOI: <https://doi.org/10.3390/agronomy10020176>

GUIMARÃES, A. J. R.; MOREIRA, P. S.C.; BEZERRA, C. A. Modelos de inovação: Análise bibliométrica da produção científica. **Brazilian Journal of Information Science: Research trends**. v. 15, 2021. DOI: doi.org/10.36311/1981.1640.2001.v15.e02106

JONES, F. A ameaça dos microplásticos. Revista pesquisa FAPESP, 2019. Edição 281. Disponível em <<https://revistapesquisa.fapesp.br/a-ameaca-dos-microplasticos/>>. Acesso em 3 de junho de 2022.

LE MOAL, M.; GASCUEL-ODOUX, C.; MÉNESGUEN, A.; SOUCHON, Y.; ÉTRILLARD, C.; LEVAIN, A.; MOATAR, F.; PANNARD, A.; SOUCHU, P.; LEFEBVRE, A.; PINAY, G. Eutrophication: A new wine in an old bottle? *Science of The Total Environment*, v. 651, p. 1-11, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.09.139>

LIMA, R. A. de; VELHO, L. M. L. S.; FARIA, L. I. L. de. Análise cientométrica da atividade científica na área de solos: o caso da América Latina. **Embrapa Solos**. v. 172, 2011.

LIU, H.; HU, Z.; JIANG, L.; ZHUANG, L.; HAO, L.; NIE, L. Roles of carbon source-derived extracellular polymeric substances in solids accumulation and nutrient removal in horizontal subsurface flow constructed wetlands. **Chemical Engineering Journal**, v. 362, p. 702–711, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2019.01.067>.

MACHADO, A. I.; BERETTA, M.; FRAGOSO, R; DUARTE, E. Overview of the state of the art of constructed wetlands for decentralized wastewater management in Brazil. *Journal of Environmental Management*, v. 187, p. 560–570, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.11.015>.

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. *Revista Ambiente e Água*, v. 9, n. 3, p. 445–458, 2014. DOI: 10.4136/ambi-agua.1403

MCCUNE, B.; MEFFORD, M. J. PC-ORD. Multivariate analysis of ecological data. Gleneden Beach, Oregon: MjM Software, 2011.

MENDONÇA, H. V.; RIBEIRO, C. B. M.; BORGES, A. C.; BASTOS, R. R. Remoção de nitrogênio e fósforo de águas residuárias de laticínios por sistemas alagados construídos operando em bateladas. *Revista Ambiente e Água*, v. 7, n. 2, p. 75–87, 2012. DOI: <http://dx.doi.org/10.4136/ambi-agua.805>

MESQUITA, C.; ALBUQUERQUE, A.; AMARAL, L.; NOGUERIA, R. Effectiveness and temporal variation of a full-scale horizontal constructed wetland in reducing nitrogen and phosphorus from

domestic wastewater. **ChemEngineering**, v. 2, n. 1, p. 1–14, 2018. DOI: <https://doi.org/10.3390/chemengineering2010003>.

METALI, H. M. K. H.; GUO, Z. R.; DURAMAN, S. B. Removal of various pollutants using constructed wetland with selected plants in humid tropical areas. **IET Conference Publications**, v. 2018, n. CP750, 2018. DOI: 10.1049/cp.2018.1512.

MITSCH, W. J. Landscape design and the role of created, restored, and natural riparian wetlands in controlling nonpoint source pollution. **Ecological Engineering**, v. 1 (1–2), p. 27–47, 1992. DOI: [https://doi.org/10.1016/0925-8574\(92\)90024-V](https://doi.org/10.1016/0925-8574(92)90024-V)

MIRANDA, S. T.; MATOS, A. T.; MATOS, M. P.; SARAIVA, C. Efficiency of horizontal subsurface flow-constructed wetlands considering different support materials and the cultivation positions of plant species. **Revista Ambiente e Água**, v. 15, n. 2, 2020. DOI: <https://doi.org/10.4136/ambi-agua.2476>

NGUYEN, T. A. H.; NGO, H. H.; GUO, W. S.; NGUYEN, T. H. H.; SODA, S.; VU, N. D.; BUI, T. K. A.; VO, T. D. H.; BUI, T. T.; NGUYEN, T. T.; PHAM, T. T. White hard clam (*Meretrix lyrata*) shells media to improve phosphorus removal in lab-scale horizontal sub-surface flow constructed wetlands: Performance, removal pathways, and lifespan. **Bioresource Technology**, v. 312, n. May, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.123602>

NI, L.; XU, J.; CHU, J.; LI, S.; WANG, P.; LI, Y.; LI, Y.; ZHU, L.; WANG, C. Correlation Among Soil Enzyme Activities, Root Enzyme Activities, and Contaminant Removal in Two-Stage In Situ Constructed Wetlands Purifying Domestic Wastewater. **Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology**, v. 97, n. 1, p. 131–137, 2016. DOI: 10.1007/s00128-016-1844-1.

NI, Q.; WANG, T.; LIAO, J.; SHI, W.; HUANG, Z.; MIAO, H.; WU, P.; RUAN, W. Operational performances and enzymatic activities for eutrophic water treatment by vertical-flow and horizontal-flow constructed wetlands. **Water (Switzerland)**, v. 12, n. 7, 2020. DOI: 10.3390/w12072007.

NONGMAITHEM, A.; RADHIKA, B. Assessment of secondary treatment efficiency of dairy wastewater using pilot constructed wetland with hair waste modified substrate. **Indian Journal of Science and Technology**, v. 9, n. 39, 2016. DOI: 10.17485/ijst/2016/v9i39/100779

SAEED, T.; MIAH, M. J.; MAJED, N.; HASAN, M.; KHAN, T. Pollutant removal from landfill leachate employing two-stage constructed wetland mesocosms: co-treatment with municipal sewage. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 27, n. 22, p. 28316–28332, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11356-020-09208-y>.

SANCHEZ, A. A.; FERREIRA, A. C.; STOPA, J. M.; BELLATO, F. C.; JESUS, T. A.; COELHO, L. H. G.; DOMINGUES, M. R.; SUBTIL, E. L.; MATHEUS, D. R.; BENASSI, R. F. Organic Matter, Turbidity, and Apparent Color Removal in Planted (*Typha* sp. and *Eleocharis* sp.) and Unplanted Constructed Wetlands. **Journal of Environmental Engineering**, v. 144, p. 06018007, 2018. DOI: 10.1061/(ASCE)EE.1943-7870.0001443

SCHIERANO, M. C.; MAINE, M. A.; PANIGATTI, M. C. Dairy farm wastewater treatment using horizontal subsurface flow wetlands with *Typha domingensis* and different substrates. **Environmental**

Technology (United Kingdom), v. 38, n. 2, p. 192–198, 2016. DOI:
<http://dx.doi.org/10.1080/09593330.2016.1231228>.

SCHIERANO, M. C.; PANIGATTI, M. C.; MAINE, M. A. Horizontal subsurface flow constructed wetlands for tertiary treatment of dairy wastewater. **International Journal of Phytoremediation**, v. 20, n. 9, p. 895–900, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1080/15226514.2018.1438361>.

SHIGUNOV NETO, A. S. Panorama da pesquisa em formação de professores: uma análise do que se publica na Revista Brasileira da Educação Profissional e Tecnológica (RBEPT). **Revista Brasileira da Educação Profissional e Tecnológica (RBEPT)**, v. 2, 2020. DOI: 10.15628/rbept.2020.11076

SCHINDLER, D. W. The dilemma of controlling cultural eutrophication of lakes. **Proceedings of the Royal Society B**, v. 279, p. 4322–4333, 2012. DOI:10.1098/rspb.2012.1032

SCOPUS, 2023. Disponível em:

https://service.elsevier.com/app/answers/detail/a_id/15100/c/10544/supporthub/scopus/. Acesso em 17 fev. 2023.

SOUZA, J. S.; PEDROSA, P.; GATTS, P. V.; GRAVINA, G. A. Application of concentrations and proportions of nutrients in the diagnosis of eutrophication. *Revista Vértices*, v. 16, n. 1, p. 199–218, 2014. DOI: 10.5935/1809-2667.20140013

SØVIK, A. K.; KLØVE, B. Phosphorus retention processes in shell sand filter systems treating municipal wastewater. **Ecological Engineering**, v. 25, n. 2, p. 168–182, 2005. DOI:
<https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2005.04.007>

TIAN, T.; TAM, N. F. Y.; ZAN, Q.; CHEUNG, S. G.; SHIN, P. K. S.; WONG, Y. S.; ZHANG, L.; CHEN, Z. Performance and bacterial community structure of a 10-years old constructed mangrove wetland. **Marine Pollution Bulletin**, v. 124, n. 2, p. 1096–1105, 2017. DOI:
<http://dx.doi.org/10.1016/j.marpolbul.2017.07.005>.

VYMAZAL, J. Constructed wetlands for wastewater treatment. **Water (Switzerland)**, v. 2, n. 3, p. 530–549, 2010. DOI: 10.1016/j.ecoleng.2005.07.002

VYMAZAL, J. Removal of nutrients in constructed wetlands for wastewater treatment through plant harvesting – Biomass and load matter the most. **Ecological Engineering**, v. 155, p. 105962, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2020.105962>

VYMAZAL J.; KROPFLOVA, L. **Wastewater treatment in constructed wetlands with horizontal sub-surface flow**, vol. 14. Dordrecht: Springer, 2008.

WANG, R.; ZHAO, X.; LIU, H.; WU, H. Elucidating the impact of influent pollutant loadings on pollutants removal in agricultural waste-based constructed wetlands treating low C/N wastewater. **Bioresource Technology**, v. 273, p. 529–537, 2019. DOI:
<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.11.044>

WANG, W.; WANG, X.; ZHOU, L.; LIU, H.; DING, Z.; LIANG, Y. Wastewater treatment in a constructed wetland followed by an oxidation pond in a rural area of China. **Environmental**

Engineering and Management Journal, v. 15, n. 1, p. 199–205, 2016. DOI: [10.30638/eemj.2016.022](https://doi.org/10.30638/eemj.2016.022).

WITHERS, P. J. A. Closing the phosphorus cycle. **Nature Sustainability**, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41893-019-0428-6>

XU, J.; ZHAO, G.; HUANG, X.; GUO, H.; LIU, W. Use of horizontal subsurface flow constructed wetlands to treat reverse osmosis concentrate of rolling wastewater. **International Journal of Phytoremediation**, v. 19, n. 3, p. 262–269, 2016. DOI: <http://dx.doi.org/10.1080/15226514.2016.1217392>

XU, R.; ZHANG, Y.; LIU, R.; CAO, Y.; WANG, G.; JI, L.; XU, Y. Effects of different substrates on nitrogen and phosphorus removal in horizontal subsurface flow constructed wetlands. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 26, n. 16, p. 16229–16238, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11356-019-04945-1>.

YUAN, Z.; FU, S.; XU, X., WENDLING, L. Mineral Processing Residue Use as Substrate in a Modular Engineered Wetland for Wastewater Treatment. **Environmental Processes**, v. 4, n. 3, p. 523–547, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40710-017-0247-6>

ZHAO, J.; ZHAO, Y.; XU, Z.; DOHERTY, L.; LIU, R. Highway runoff treatment by hybrid adsorptive media-baffled subsurface flow constructed wetland. **Ecological Engineering**, v. 91, p. 231–239, 2016. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecoleng.2016.02.020>.