DESEMPENHO DAS MACRÓFITAS NO TRATAMENTO DE LODO DE ESGOTO EM SISTEMAS DE WETLANDS CONSTRUÍDOS DE FLUXO VERTICAL

Lucas Leandro de Sousa (IC) e Ana Lucia da Fonseca Bragança Pinheiro (Orientadora)

Apoio: PIBIC Mackenzie

RESUMO

O tratamento do lodo de esgoto exige redução de umidade, estabilização da matéria orgânica e controle da água drenada. Entre as alternativas de baixo consumo energético, *wetlands* construídos de fluxo vertical combinam drenagem, evaporação, evapotranspiração e processos biológicos. Este estudo analisou o desempenho de macrófitas em sistemas de fluxo vertical para tratamento de lodo de esgoto por meio de revisão sistemática, usando o PRISMA 2020 como referência para organizar a seleção. As buscas foram atualizadas em 24 de agosto de 2026 nas bases Scopus e Web of Science. Foram identificados 97 registros; após a remoção de 40 duplicatas, 57 foram triados e oito publicações foram selecionadas para a síntese narrativa. A heterogeneidade de escala, clima, taxa de aplicação de sólidos, regime de alimentação e desfechos não permitiu metanálise. Os estudos elegíveis concentraram-se em *Phragmites australis*, *Typha angustifolia* e *Arundo donax*. *Phragmites australis* foi avaliada em maior número de condições e apresentou resultados favoráveis de desaguamento e estabilização, além de maior tolerância às cargas elevadas na comparação direta com *Arundo donax*. *Typha angustifolia* apresentou desempenho próximo ao de *Phragmites* em vários parâmetros e maior perda de água em cinco de seis regimes avaliados. *Arundo donax* mostrou boa produção de biomassa e desempenho da água drenada em cargas moderadas, mas apresentou estresse nas maiores cargas. Os resultados não permitem uma hierarquia universal; no conjunto analisado, *Phragmites australis* reuniu mais comparações diretas favoráveis. Carga de sólidos, repouso, clima e configuração do sistema devem ser considerados na interpretação do desempenho.

Palavras-chave: macrófitas; *wetlands* construídos; lodo de esgoto.

ABSTRACT

Sewage sludge treatment requires moisture reduction, organic matter stabilization, and control of drained-water quality. Among low-energy alternatives, vertical-flow constructed wetlands combine drainage, evaporation, evapotranspiration, and biological processes. This study analyzed macrophyte performance in vertical-flow constructed wetlands for sewage sludge treatment through a systematic review, using PRISMA 2020 as a reference to organize study selection. Searches were updated on 24 August 2026 in Scopus and Web of Science. Ninety-seven records were identified; after removing 40 duplicates, 57 were screened and eight publications were included in the narrative synthesis. Heterogeneity in experimental scale,

climate, solids loading rate, feeding regime, and outcomes precluded meta-analysis. Eligible studies focused on *Phragmites australis*, *Typha angustifolia*, and *Arundo donax*. *Phragmites australis* was evaluated under more conditions and showed favorable dewatering and stabilization results, as well as greater tolerance to high loads in the direct comparison with *Arundo donax*. *Typha angustifolia* performed similarly to *Phragmites* for several parameters and showed greater water loss in five of six feeding regimes in one study. *Arundo donax* showed good biomass production and drained-water performance at moderate loads but experienced stress at higher loads. The data do not support a universal ranking of species; within the analyzed corpus, however, *Phragmites australis* accumulated the largest number of favorable direct comparisons. Solids loading, resting periods, climate, and system configuration should be considered when interpreting performance.

Keywords: macrophytes; constructed wetlands; sewage sludge.

1 INTRODUÇÃO

Os *wetlands* construídos de fluxo vertical para tratamento de lodo de esgoto são sistemas vegetados que utilizam um meio filtrante e processos naturais para promover o desaguamento e a estabilização do material acumulado. O lodo é aplicado sobre a superfície do sistema e permanece no *wetland* ao longo de ciclos de alimentação e repouso. Este artigo analisa o desempenho das macrófitas empregadas nesses sistemas, considerando o desenvolvimento das plantas, seu crescimento e biomassa, o tratamento do lodo e a qualidade da água drenada.

O manejo do lodo é uma etapa própria do tratamento de esgoto. O lodo gerado em estações de tratamento apresenta elevado teor de água e pode conter matéria orgânica, nutrientes e microrganismos (Hu *et al.*, 2020a; Tan *et al.*, 2024). A redução da umidade e a estabilização do material diminuem o volume a ser manejado e favorecem as etapas posteriores de transporte e destinação.

O tratamento do lodo integra a gestão do esgotamento sanitário e complementa o tratamento da fase líquida do esgoto. Os *wetlands* construídos para tratamento de lodo têm sido estudados como soluções de baixa demanda energética e operacional (Gholipour *et al.*, 2022; Tan *et al.*, 2024). A melhoria do saneamento e do tratamento de águas residuárias integra o Objetivo de Desenvolvimento Sustentável 6 da Agenda 2030 (United Nations, 2015). Nesse contexto, reunir evidências sobre o desempenho das macrófitas pode apoiar a escolha das espécies e a definição das condições de operação desses sistemas.

Os *wetlands* construídos de fluxo vertical operam com ciclos alternados de alimentação e repouso. Durante a alimentação, o lodo é distribuído sobre o meio filtrante; a água livre percola e é coletada pela drenagem, enquanto os sólidos permanecem na superfície (Tan *et al.*, 2024). No repouso, a drenagem residual, a evaporação e a evapotranspiração contribuem para a redução da umidade, e a entrada de oxigênio favorece a estabilização do lodo (Tan *et al.*, 2024). Em alguns sistemas, tubos de ventilação conectados à drenagem são utilizados para ampliar a aeração, configuração avaliada por Liang *et al.* (2021).

A taxa de aplicação de sólidos precisa ser compatível com a capacidade de drenagem e secagem do *wetland*. Cargas elevadas podem aumentar a espessura do depósito, prolongar a umidade e favorecer a colmatação (Tan *et al.*, 2024). O regime de alimentação e o período de repouso devem, portanto, ser considerados em conjunto com a carga aplicada.

As condições climáticas interferem no balanço hídrico do *wetland*. Temperatura, radiação, umidade do ar e precipitação afetam a evaporação, a evapotranspiração e o teor de

sólidos do resíduo (Gholipour *et al.*, 2022; Tan *et al.*, 2024). Por isso, resultados obtidos em regiões distintas precisam ser interpretados dentro das condições climáticas de cada estudo.

As macrófitas participam do funcionamento físico e biológico dos *wetlands* construídos de fluxo vertical. Raízes e rizomas contribuem para a manutenção de caminhos de drenagem e oferecem superfície para o desenvolvimento de biofilmes; a transpiração também participa da remoção de água (Gholipour *et al.*, 2022; Tan *et al.*, 2024). A contribuição de cada mecanismo varia com a espécie e com as condições de operação.

A capacidade de manter o crescimento durante o acúmulo de lodo é um fator relevante para o uso das macrófitas. A carga aplicada, o período de repouso e as condições climáticas podem interferir no desenvolvimento das plantas (Gholipour *et al.*, 2022; Tan *et al.*, 2024). O desempenho da macrófita deve, portanto, ser analisado junto às condições em que o *wetland* foi operado.

A contribuição da macrófita não pode ser isolada quando o sistema combina vegetação com outros organismos ou dispositivos. Hu *et al.* (2020a, 2020b) e Gholipour *et al.* (2024b) avaliaram configurações com *Eisenia fetida*, nas quais os efeitos observados resultam da associação entre planta e minhocas. Liang *et al.* (2021) avaliaram vegetação associada à ventilação, de modo que o efeito dessa configuração também não pode ser atribuído apenas à macrófita.

Este trabalho tem problema de pesquisa é: “Quais macrófitas apresentam melhor desempenho em Sistemas de Wetlands Construídas de Fluxo vertical para tratamento de lodo de esgoto?”. Como objetivo analisar o desempenho das macrófitas no tratamento de lodo de esgoto em *wetlands* construídos de fluxo vertical. Busca-se analisar as macrófitas utilizadas nesses sistemas, suas características biológicas e os fatores que intervêm em seu desenvolvimento; analisar seu crescimento e a incorporação de biomassa; e analisar a qualidade da água drenada com o uso dessas espécies. O desaguamento e a estabilização do lodo são considerados na avaliação do desempenho geral dos *wetlands*.

2 METODOLOGIA

Esta pesquisa foi conduzida por meio de uma revisão sistemática da literatura sobre o desempenho de macrófitas em *wetlands* construídos de fluxo vertical para tratamento de lodo de esgoto. O processo foi organizado em questão de pesquisa, estratégia de busca, fontes de informação, critérios de inclusão e exclusão, seleção dos estudos, avaliação metodológica e extração e análise dos dados. O PRISMA 2020 foi adotado como referência para organizar e apresentar as etapas da revisão (Page *et al.*, 2021). Os procedimentos de busca e seleção foram descritos de forma a permitir sua compreensão e reprodução (Galvão; Ricarte, 2019).

A questão de pesquisa definida para orientar a revisão foi: quais macrófitas apresentam melhor desempenho em *wetlands* construídos de fluxo vertical para tratamento de lodo de esgoto? A comparação considerou os quatro domínios definidos nos objetivos do trabalho.

A estratégia de busca foi construída com três grupos de palavras-chave e expressões: denominações do sistema, espécies de macrófitas e termos relacionados ao lodo e aos resultados de interesse. Para ampliar a recuperação dos estudos, o primeiro grupo incluiu as denominações *sludge treatment wetland*, *sludge treatment reed bed*, *sludge drying reed bed*, *vertical flow constructed wetland*, *vertical subsurface flow constructed wetland* e *surface constructed wetland*. No grupo de espécies foram definidos previamente *Phragmites australis*, *Typha angustifolia*, *Typha latifolia*, *Cyperus papyrus* e *Vetiveria zizanioides*. As expressões completas utilizadas em cada base são apresentadas a seguir.

Scopus: TITLE("sludge treatment wetland*" OR "sludge treatment reed bed*" OR "sludge drying reed bed*" OR "vertical flow constructed wetland*" OR "vertical subsurface flow constructed wetland*" OR "surface constructed wetland*") AND TITLE-ABS-KEY("*Phragmites australis*" OR "*Typha angustifolia*" OR "*Typha latifolia*" OR "*Cyperus papyrus*" OR "*Vetiveria zizanioides*") AND TITLE-ABS-KEY(sludge OR leachate OR "drained water" OR dewatering OR "domestic wastewater" OR "municipal wastewater" OR "removal efficiency") AND PUBYEAR > 2018 AND PUBYEAR < 2027

Web of Science: TI=("sludge treatment wetland*" OR "sludge treatment reed bed*" OR "sludge drying reed bed*" OR "vertical flow constructed wetland*" OR "vertical subsurface flow constructed wetland*" OR "surface constructed wetland*") AND TS=("*Phragmites australis*" OR "*Typha angustifolia*" OR "*Typha latifolia*" OR "*Cyperus papyrus*" OR "*Vetiveria zizanioides*") AND TS=(sludge OR leachate OR "drained water" OR dewatering OR "domestic wastewater" OR "municipal wastewater" OR "removal efficiency") AND PY=(2019-2026)

As buscas foram realizadas nas bases Scopus e Web of Science e atualizadas em 24 de agosto de 2026. A janela 2019-2026 foi mantida na estratégia para reproduzir a etapa intermediária do projeto, enquanto o recorte de elegibilidade 2020-2026 foi aplicado na triagem. Por isso, registros de 2019 aparecem nos resultados brutos, mas não no conjunto selecionado.

Foram elegíveis estudos primários publicados entre 2020 e 2026 que avaliaram *wetlands* construídos de fluxo vertical para tratamento de lodo de esgoto de ETE, com presença de macrófita e pelo menos um resultado relacionado aos objetivos da revisão: desenvolvimento da planta, crescimento ou biomassa, desaguamento ou estabilização do lodo, ou qualidade da água drenada.

Foram excluídos: estudos fora do período; revisões e outros documentos sem resultados primários; trabalhos cuja matriz tratada não fosse lodo de esgoto; estudos de lodo

industrial; trabalhos em que lodo ou material derivado de lodo fosse apenas substrato, adsorvente ou matéria-prima; e estudos sem resultado relacionado aos objetivos. Lixiviados de aterro e outros afluentes líquidos externos foram considerados matrizes distintas, enquanto a água drenada ou o lixiviado produzido pelo próprio tratamento do lodo permaneceu elegível como desfecho. Quando havia mais de um motivo, foi registrado apenas o primeiro critério aplicável, evitando dupla contagem.

A separação entre lodo de esgoto e outras matrizes foi mantida porque a estratégia de busca, deliberadamente sensível, recuperou estudos de *wetlands* de fluxo vertical aplicados ao tratamento de água e de outros efluentes. Esses registros foram triados, mas não integraram a síntese quando não respondiam à questão da revisão. O Quadro 1 sintetiza os critérios de inclusão e exclusão adotados.

Quadro 1 - Critérios de elegibilidade aplicados na revisão

Dimensão	Inclusão	Exclusão
Período	Publicação entre 2020 e 2026.	Publicação anterior a 2020.
Tipo de estudo	Estudo primário com resultados experimentais ou operacionais.	Revisão, texto de síntese ou documento sem resultado primário.
Matriz	Lodo de esgoto de ETE: primário, secundário, misto ou excedente/ativado. A água drenada ou o lixiviado gerado no próprio tratamento pode ser avaliado como desfecho.	Água residuária, água cinza, lixiviado de aterro ou outro afluente líquido externo, água contaminada, efluente industrial ou lodo industrial.
Sistema	*Wetland* construído de fluxo vertical aplicado ao tratamento de lodo de esgoto.	Sistema que não corresponda ao recorte de tratamento vertical de lodo de esgoto.
Macrófita/desfecho	Presença de macrófita e resultado de crescimento/biomassa, desaguamento, estabilização ou qualidade da água drenada.	Lodo apenas como material/substrato ou ausência de resultado pertinente.

Fonte: Elaboração própria (2026).

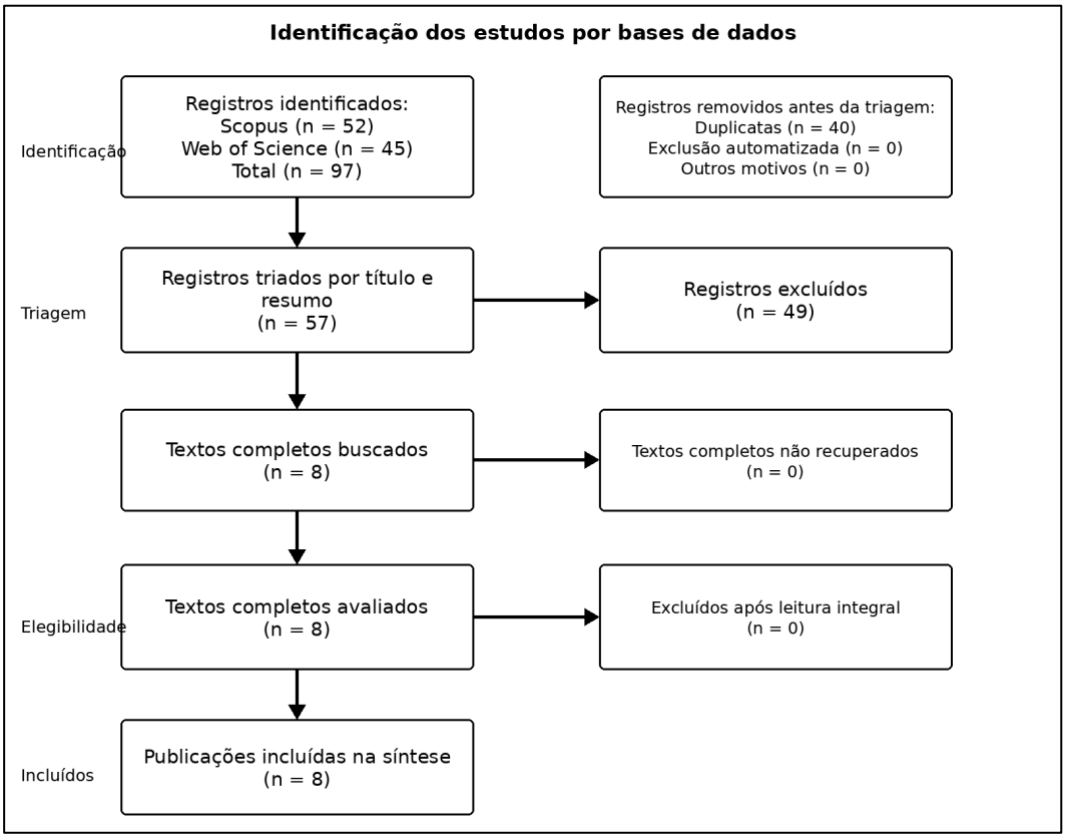
Os registros das duas bases foram consolidados por título e conferidos por DOI, quando disponível. A deduplicação foi aplicada apenas a registros bibliográficos repetidos entre as bases; publicações distintas que utilizaram o mesmo sistema experimental foram mantidas como trabalhos separados. Em seguida, títulos e resumos foram avaliados segundo os critérios de elegibilidade, e os registros compatíveis com a questão da revisão foram recuperados em texto completo. A seleção foi conduzida sem dupla avaliação independente, condição registrada como limitação do processo.

A busca recuperou 52 registros na Scopus e 45 na Web of Science, totalizando 97 registros. Após a remoção de 40 duplicatas, 57 registros únicos foram triados por título e resumo.

Na triagem, 49 registros foram excluídos: 41 porque a matriz principal não era lodo de esgoto; três por estarem fora do período 2020-2026; dois por serem revisões; um por tratar lodo industrial; e dois porque o lodo ou material derivado era apenas substrato ou matéria-prima. Oito textos completos foram recuperados e todos atenderam aos critérios, totalizando oito publicações na síntese. Al-Rashdi *et al.* (2024) e Al-Rashdi *et al.* (2025) foram mantidos como trabalhos distintos, pois apresentam objetivos e desfechos diferentes, embora tenham utilizado o mesmo sistema experimental de 18 *wetlands* piloto.

A maior parte das exclusões ocorreu porque a busca recuperou *wetlands* de fluxo vertical aplicados a matrizes diferentes do lodo de esgoto. A Figura 1 organiza as etapas de identificação, triagem, elegibilidade e inclusão com base no modelo PRISMA 2020, adaptado ao processo desta revisão. O Quadro 2 apresenta os critérios de exclusão e o número de registros excluídos em cada um deles.

Figura 1 - Fluxograma de seleção dos estudos, adaptado do modelo PRISMA 2020



Fonte: Elaboração própria (2026) e adaptado de Page *et al.* (2021).

Quadro 2 - Motivos principais de exclusão na triagem por título e resumo

Motivo principal	n	Interpretação
Matriz diferente de lodo de esgoto	41	Águas residuárias, águas cinzas, lixiviados de aterro ou outros afluentes líquidos externos, águas contaminadas e efluentes industriais.
Fora do recorte 2020-2026	3	Publicações de 2019 recuperadas pela estratégia sensível.
Revisão / estudo não primário	2	Publicações de síntese usadas apenas na contextualização.
Lodo industrial	1	Matriz sólida incompatível com o recorte de lodo de esgoto.
Lodo apenas como substrato/material	2	Lodo ou derivado empregado como material do leito ou matéria-prima, sem ser a matriz tratada.
Total excluído	49	Registros excluídos na triagem por título e resumo.

Fonte: Elaboração própria (2026).

A qualidade metodológica dos estudos foi considerada de forma descritiva, observando-se a escala do experimento, a presença de comparador, a duração, as condições operacionais e climáticas e a presença de fatores auxiliares, como minhocas ou ventilação. Não foi aplicada ferramenta formal de avaliação de risco de viés, e a seleção foi realizada por um único pesquisador; essas condições foram consideradas limitações desta revisão.

A extração dos dados foi orientada pelos objetivos da revisão. Para cada publicação foram registrados autoria e ano, matriz, escala e configuração, macrófita e comparador, taxa de aplicação, duração e resultados referentes a quatro domínios: desenvolvimento e condições das macrófitas; crescimento e biomassa; desaguamento e estabilização do lodo; e qualidade da água drenada. Fatores operacionais e climáticos relacionados a esses resultados também foram registrados e organizados em quadro comparativo.

Os estudos diferiram quanto a escala, clima, carga, regime de alimentação, presença de minhocas ou ventilação, duração e forma de cálculo dos resultados. Essas diferenças não permitiram metanálise. A síntese foi realizada de forma narrativa e organizada pelos quatro domínios definidos para a revisão.

As oito publicações selecionadas foram publicadas entre 2020 e 2025. Hu *et al.* (2020a, 2020b, 2021) compararam *Phragmites australis* e *Typha angustifolia* em *wetlands* na China. Gholipour *et al.* (2024a, 2024b) avaliaram sistemas em clima mediterrâneo e incluíram *Arundo donax*. Al-Rashdi *et al.* (2024, 2025) publicaram dois trabalhos com objetivos distintos

a partir do mesmo sistema piloto com *Phragmites australis* no Omã. Liang *et al.* (2021) avaliaram o efeito da vegetação e da ventilação em *wetlands* na China.

Para caracterizar as publicações, foram considerados a escala e a configuração do sistema, o local do estudo, a macrófita ou o comparador e as condições operacionais informadas. Os resultados foram organizados em quatro domínios de desempenho: desenvolvimento e condições das macrófitas; crescimento e biomassa; desaguamento e estabilização do lodo; e qualidade da água drenada. O Quadro 3 reúne essas características, os domínios avaliados e os principais resultados relacionados aos objetivos da revisão.

Quadro 3 - Características e principais resultados das oito publicações selecionadas

Publicação	Sistema / matriz	Macrófita(s) e condição	Resultado diretamente pertinente
Hu *et al.* (2020a)	STW; lodo de ETE; China.	*P. australis* e *T. angustifolia* (comparação); com e sem *E. fetida*.	Remoções >80% para vários poluentes. *P. australis*: NH_4^+ 89,5-90,4%. Com 10,8 kg m^{-3} de minhocas: COD 99,1%, NH_4^+ 93,1%, TN 91,5% e TP 91,0%.
Hu *et al.* (2020b)	STW; lodo excedente; China.	*P. australis* e *T. angustifolia* (comparação); 60, 80, 90 e 120 kg DS m^{-2} ano^{-1}.	Melhor condição em *P. australis* a 80 kg DS m^{-2} ano^{-1}: DS 45,0% e VS/TS 40,5%.
Hu *et al.* (2021)	SDRB; lodo excedente; China.	*P. australis* e *T. angustifolia* (comparação); seis regimes de alimentação.	*Typha* apresentou maior perda de água em cinco dos seis regimes. Em 3 L/dia, *P. australis* teve a maior perda de água (79,6%) e o melhor conjunto de remoções: COD 99,6%, TN 94,9%, NH_4^+ 98,2% e TP 95,0%; *E. coli* 86,2-92,8% menor que em *Typha*.
Liang *et al.* (2021)	Três STW piloto; lodo ativado excedente; China.	Vegetação plantada, com e sem ventilação; controle sem planta.	Vegetação + ventilação apresentou menor umidade e melhor desaguamento/mineralização. Foco principal: emissões gasosas.
Al-Rashdi *et al.* (2024)	18 STRB piloto; lodo ativado; Omã.	*P. australis* e controle não plantado; 75, 100 e 125 kg TS m^{-2} ano^{-1}.	Redução de volume até 98%; 100 kg TS m^{-2} ano^{-1} indicado como referência operacional para o sistema estudado.
Gholipour *et al.* (2024a)	W-STRB; lodo primário + secundário; Portugal.	*P. australis* e *A. donax* (comparação); 50, 60 e 70 kg DS m^{-2} ano^{-1}.	A 50 kg: DS superficial de 80% em *Phragmites* e 81% em *Arundo*; na subsuperfície, 41% e 25%, respectivamente. *Arundo* apresentou sinais de estresse a 60 e 70 kg DS m^{-2} ano^{-1} e perda nas unidades acima de 60 kg; *Phragmites* teve 20% maior perda de água.

Publicação	Sistema / matriz	Macrófita(s) e condição	Resultado diretamente pertinente
Gholipour *et al.* (2024b)	W-STRB; lodo primário + secundário; Portugal.	*A. donax*, com e sem *E. fetida*; 43,59 kg DS m^{-2} ano^{-1}.	Minhocas aumentaram em 43% a biomassa úmida acima do solo; planta + minhocas removeu cerca de 99% de TSS e COD e reduziu a liberação de nitrato e fósforo.
Al-Rashdi *et al.* (2025)	Mesmo experimento piloto de 2024; Omã.	*P. australis* e controle não plantado; 75, 100 e 125 kg TS m^{-2} ano^{-1}.	A 75 kg m^{-2} ano^{-1}, TS residual 35,32% no plantado e 16,58% no controle; publicação complementar sobre emissões.

Fonte: Elaboração própria (2026).

3 DESENVOLVIMENTO DO ARGUMENTO

A estratégia de busca definiu previamente cinco espécies: *Phragmites australis*, *Typha angustifolia*, *Typha latifolia*, *Cyperus papyrus* e *Vetiveria zizanioides*. Entre as publicações elegíveis, as espécies efetivamente representadas foram *Phragmites australis*, *Typha angustifolia* e *Arundo donax*. *Arundo donax* não constava na lista predefinida, mas apareceu em dois estudos recuperados pela estratégia. Nesta revisão, as características biológicas foram analisadas a partir das respostas registradas nos estudos, como crescimento em altura, número de hastes, biomassa, tolerância ao acúmulo de lodo e evapotranspiração. *Phragmites australis* aparece em maior número de publicações, o que amplia a base de observação, mas não demonstra, isoladamente, superioridade da espécie.

A carga de lodo é um fator relevante para o desenvolvimento das plantas e para o desempenho do sistema. Hu *et al.* (2020b) obtiveram melhor desaguamento a 80 kg DS m^{-2} ano^{-1} e observaram piora da estabilização em carga mais alta. Gholipour *et al.* (2024a) registraram sinais de estresse em *Arundo donax* a 60 e 70 kg DS m^{-2} ano^{-1}, com perda de plantas nas unidades acima de 60 kg DS m^{-2} ano^{-1}, enquanto *Phragmites australis* permaneceu funcional.

O repouso entre aplicações contribui para a redução da umidade do lodo e para a recuperação das condições de drenagem e aeração do sistema (Tan *et al.*, 2024). No estudo mediterrâneo, a precipitação durante o repouso final foi associada ao aumento da umidade e ao estresse de *Arundo donax* nas maiores cargas (Gholipour *et al.*, 2024a).

O clima também interfere no comportamento dos *wetlands* e das macrófitas. Liang *et al.* (2021) registraram variação sazonal no sistema estudado. Em clima quente e árido, Al-Rashdi *et al.* (2024) observaram a manutenção de *Phragmites australis* nas condições avaliadas. Esses resultados indicam que a escolha da espécie deve considerar sua tolerância às condições climáticas e o balanço hídrico local.

Organismos associados também modificaram os resultados observados nos *wetlands*. Hu *et al.* (2020a) avaliaram a qualidade da água drenada em configurações com diferentes densidades de *Eisenia fetida*, enquanto Hu *et al.* (2020b) analisaram seus efeitos sobre características do lodo. Gholipour *et al.* (2024b) avaliaram a associação entre *Arundo donax* e *Eisenia fetida* quanto à biomassa e à qualidade da água drenada.

Os dados de crescimento e biomassa aparecem com menor frequência que os resultados de desaguamento e qualidade da água drenada. Entre os estudos selecionados, Gholipour *et al.* (2024a, 2024b) apresentaram as informações mais detalhadas para esse domínio.

O crescimento em altura foi semelhante entre *Phragmites australis* e *Arundo donax* no estudo mediterrâneo. Gholipour *et al.* (2024a) registraram médias de cerca de 12 cm/mês para *Phragmites australis* e 11 cm/mês para *Arundo donax*. O número de hastes aumentou de 2 para 11 em *Phragmites* e de 3 para 7 em *Arundo*. Nas cargas de 60 e 70 kg DS m^{-2} ano^{-1}, *Arundo* apresentou sinais de estresse; os autores associaram esse comportamento ao maior acúmulo de lodo, à umidade e à menor disponibilidade de oxigênio.

No mesmo estudo, *Phragmites australis* apresentou maior biomassa seca, enquanto *Arundo donax* apresentou massa úmida elevada e maior teor de água nos tecidos (Gholipour *et al.*, 2024a). Por isso, nesta revisão, as comparações de biomassa distinguem massa úmida e massa seca.

A associação de *Arundo donax* com *Eisenia fetida* aumentou a biomassa úmida acima do solo de 11,5 para 16,4 kg m^{-2}, cerca de 43%, no sistema avaliado por Gholipour *et al.* (2024b). O estudo não realizou comparação equivalente com outras espécies, de modo que esse resultado se refere à configuração com *Arundo donax* e minhocas.

Os estudos de Hu *et al.* (2020a, 2020b, 2021) não apresentam dados morfométricos equivalentes para *Phragmites australis* e *Typha angustifolia*. Por isso, os resultados disponíveis permitem comparar o comportamento operacional dessas espécies, mas não sustentam uma comparação direta de produção de biomassa entre elas.

O efeito da carga de sólidos sobre o desaguamento e a estabilização foi avaliado em quatro condições por Hu *et al.* (2020b). *Phragmites australis* apresentou o melhor resultado a 80 kg DS m^{-2} ano^{-1}, com 45,0% de sólidos secos e relação VS/TS de 40,5%, o menor valor dessa relação entre as condições avaliadas.

A comparação entre *Phragmites australis* e *Arundo donax* mostrou diferenças conforme a profundidade do lodo e a carga aplicada. A 50 kg DS m^{-2} ano^{-1}, Gholipour *et al.*

(2024a) registraram cerca de 80% de sólidos secos na camada superficial com *Phragmites* e 81% com *Arundo*; na subsuperfície, os valores foram 41% e 25%, respectivamente. A 70 kg DS m^{-2} ano^{-1}, a evapotranspiração foi de 5,23 mm/dia em *Phragmites* e 4,24 mm/dia em *Arundo*, correspondendo a maior perda de água no sistema com *Phragmites*.

Em clima quente e árido, Al-Rashdi *et al.* (2024) avaliaram 18 *wetlands* piloto, metade plantada com *Phragmites australis*. A redução de volume chegou a 98%, e os autores indicaram 100 kg m^{-2} ano^{-1} como carga de referência para o sistema estudado. O estudo teve como foco o desaguamento e o tratamento do lodo.

A publicação de Al-Rashdi *et al.* (2025) utilizou o mesmo sistema experimental de 18 *wetlands* piloto empregado no trabalho de 2024, mas analisou outro conjunto de desfechos, com foco nas emissões gasosas. Por apresentar objetivo e resultados próprios, o trabalho de 2025 foi mantido como publicação distinta; a utilização do mesmo sistema foi registrada apenas para caracterizar a origem comum dos dados experimentais.

A combinação entre vegetação e ventilação apresentou menor umidade do resíduo no estudo de Liang *et al.* (2021) do que as configurações apenas plantada ou apenas ventilada. Como os dois fatores atuaram simultaneamente nessa configuração, o efeito observado não pode ser atribuído exclusivamente à vegetação.

A qualidade da água drenada foi um dos domínios avaliados nos estudos selecionados. Hu *et al.* (2020a, 2021) analisaram diretamente a influência das espécies sobre parâmetros da fase líquida, enquanto Gholipour *et al.* (2024b) avaliaram a configuração com *Arundo donax* associada ou não a minhocas.

A combinação entre espécie vegetal e presença de minhocas influenciou a qualidade da água drenada. Hu *et al.* (2020a) registraram remoções superiores a 80% de COD, nitrogênio total, fósforo total e amônio nos *wetlands* com macrófitas. A remoção de NH_4^+ foi maior nas unidades com *Phragmites australis*, entre 89,5% e 90,4%. Na condição com *Phragmites* e 10,8 kg m^{-3} de *Eisenia fetida*, as remoções em massa atingiram 99,1% para COD, 93,1% para NH_4^+, 91,5% para TN e 91,0% para TP. Como havia minhocas, esses valores representam o desempenho da configuração e não apenas da planta.

O regime de alimentação modificou as diferenças observadas entre *Phragmites australis* e *Typha angustifolia*. Hu *et al.* (2021) registraram perda de água entre 6,9% e 34,5% maior com *Typha* em cinco dos seis regimes de alimentação, resultado associado pelos autores à maior altura das plantas. Na condição de 3 L/dia, *Phragmites* apresentou a maior perda de água do experimento, 79,6%, e remoções de 99,6% para COD, 94,9% para TN, 98,2% para NH_4^+ e 95,0% para TP. A concentração de *Escherichia coli* no *wetland* com *Phragmites* também foi entre 86,2% e 92,8% menor que no sistema com *Typha*.

A presença de minhocas também modificou os resultados obtidos com *Arundo donax*. Gholipour *et al.* (2024b) registraram remoção de cerca de 99% de TSS e COD e menores massas liberadas de nitrato e fósforo na unidade com planta e minhocas em comparação com a unidade apenas plantada. Parte das concentrações finais de nitrogênio e fósforo, porém, permaneceu acima dos limites de reúso adotados no estudo.

Na fase líquida, *Phragmites australis* apresentou vantagens em amônio e qualidade microbiológica nas comparações disponíveis com *Typha angustifolia*. As diferenças, porém, não foram uniformes para todos os parâmetros e dependeram do regime de alimentação, do tempo de operação e dos componentes auxiliares do leito.

Phragmites australis foi avaliada em maior número de condições e apresentou resultados favoráveis em diferentes domínios. Os trabalhos de Hu *et al.* (2020a, 2020b, 2021) forneceram comparações com *Typha angustifolia* envolvendo características do lodo, perda de água e qualidade da água drenada. Gholipour *et al.* (2024a) registraram maior evapotranspiração e maior tolerância às cargas elevadas na comparação com *Arundo donax*. Al-Rashdi *et al.* (2024, 2025) avaliaram *Phragmites* em clima quente e árido em duas publicações distintas realizadas no mesmo sistema experimental.

Typha angustifolia apresentou desempenho próximo ao de *Phragmites australis* em vários parâmetros. Hu *et al.* (2021) observaram maior perda de água com *Typha* em cinco dos seis regimes de alimentação; na condição de 3 L/dia, *Phragmites* apresentou a maior perda de água e o melhor conjunto de remoções. Hu *et al.* (2020a, 2020b) também registraram vantagens específicas de *Phragmites* em amônio e desaguamento. As três comparações entre *Phragmites* e *Typha* foram produzidas pelo mesmo grupo de pesquisa, o que deve ser considerado na interpretação do conjunto.

Arundo donax apresentou boa produção de biomassa e resultados favoráveis para a água drenada quando associada a minhocas no sistema avaliado por Gholipour *et al.* (2024b). Na comparação entre espécies, foram observados sinais de estresse em *Arundo donax* a 60 e 70 kg DS m^{-2} ano^{-1} e perda de plantas nas unidades submetidas a cargas superiores a 60 kg DS m^{-2} ano^{-1} (Gholipour *et al.*, 2024a). No conjunto desta revisão, esses resultados indicam desempenho favorável em cargas moderadas nas condições mediterrâneas avaliadas, mas não permitem generalizar o comportamento da espécie para cargas maiores.

Revisões anteriores registram outras macrófitas em *wetlands* para tratamento de lodo (Gholipour *et al.*, 2022), mas essas espécies não foram representadas por estudos primários elegíveis no conjunto analisado. Por isso, a revisão não permite concluir sobre o desempenho das espécies ausentes da seleção.

As diferenças de carga, clima e configuração entre os estudos impedem uma ordenação única das espécies. No conjunto desta revisão, *Phragmites australis* apresentou maior número de resultados favoráveis nas comparações diretas disponíveis, em desaguamento, tolerância às cargas e alguns parâmetros da água drenada.

Quadro 4 – Síntese comparativa das macrófitas no conjunto analisado

Macrófita	Representação no conjunto	Pontos fortes	Limitações
Phragmites australis	6 publicações; duas de Al-Rashdi derivam do mesmo experimento piloto.	Desaguamento, estabilização, evapotranspiração, tolerância a carga e resultados favoráveis para a água drenada; avaliada em diferentes climas.	Não foi superior em todos os parâmetros; efeito depende de carga, repouso e configuração.
Typha angustifolia	3 publicações, todas do mesmo grupo de pesquisa.	Boa remoção de matéria orgânica e nutrientes; desempenho próximo ao de *Phragmites* em vários resultados.	Menor número de estudos e resultados inferiores em alguns desfechos-chave.
Arundo donax	2 publicações.	Boa biomassa e resultados favoráveis para a água drenada; desaguamento adequado em carga moderada.	Sinais de estresse a 60 e 70 kg DS m^{-2} ano^{-1} e perda nas unidades acima de 60 kg DS m^{-2} ano^{-1}; dados restritos ao clima mediterrâneo.
Outras espécies	Não representadas por publicações primárias elegíveis na busca executada.	Revisões anteriores registram outras macrófitas em leitos de lodo.	A lista prévia de espécies na estratégia de busca limita conclusões sobre a ausência de outras macrófitas na literatura.

Fonte: Elaboração própria (2026).

A presença de comparadores em parte dos estudos permite avaliar diferenças entre espécies ou entre *wetlands* plantados e controles nas condições testadas. Essa característica fortalece a interpretação dos resultados específicos, embora não elimine as diferenças de configuração entre os trabalhos.

Os estudos, porém, não são diretamente intercambiáveis. As cargas variam de cerca de 20 a 125 kg de sólidos m^{-2} ano^{-1}; os períodos de alimentação e repouso, a duração, o clima e os métodos de cálculo também diferem. Parte dos sistemas inclui minhocas ou ventilação. Por isso, a síntese privilegia padrões convergentes, sem calcular médias agrupadas.

Al-Rashdi *et al.* (2024) e Al-Rashdi *et al.* (2025) são publicações distintas, com objetivos e desfechos diferentes, mas utilizaram o mesmo sistema experimental de 18

wetlands piloto. Essa relação foi registrada para caracterizar a origem dos dados, sem tratar uma das publicações como duplicata ou excluí-la da síntese.

A revisão apresenta limitações metodológicas: a seleção foi conduzida por um único pesquisador, não foi aplicado instrumento formal de risco de viés e apenas Scopus e Web of Science foram consultadas. A estratégia de busca restringiu o primeiro grupo de termos ao título e utilizou uma lista prévia de cinco macrófitas, o que pode ter reduzido a recuperação de trabalhos que empregaram outra terminologia ou avaliaram outras espécies. *Arundo donax* não constava na lista predefinida, mas foi representada em dois estudos recuperados pela estratégia. Assim, a ausência de uma espécie no conjunto selecionado não deve ser interpretada como ausência dessa espécie na literatura.

O número de comparações independentes entre espécies é pequeno. Os três trabalhos que comparam diretamente *Phragmites australis* e *Typha angustifolia* foram produzidos pelo mesmo grupo de pesquisa, e parte das publicações selecionadas tem como foco principal outros desfechos, como emissões gasosas. Assim, as diferenças observadas representam o conjunto disponível e devem ser interpretadas dentro das condições de cada estudo.

As principais lacunas são estudos de longa duração que comparem diferentes espécies sob o mesmo lodo e a mesma configuração, especialmente em clima tropical; mensuração conjunta de sólidos, estabilização, biomassa, evapotranspiração e qualidade da água drenada; e avaliações em escala plena por vários ciclos anuais.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

As oito publicações selecionadas concentraram-se em *Phragmites australis*, *Typha angustifolia* e *Arundo donax* e apresentaram diferenças de carga, clima, configuração e resultados avaliados. A comparação foi organizada nos quatro domínios definidos para a revisão: desenvolvimento e condições das macrófitas; crescimento e biomassa; desaguamento e estabilização do lodo; e qualidade da água drenada.

Phragmites australis apresentou resultados favoráveis nas comparações diretas disponíveis, com bom desaguamento e estabilização em condições específicas, maior perda de água que *Arundo donax* no experimento mediterrâneo e vantagens em amônio e qualidade microbiológica nas comparações com *Typha angustifolia*. *Typha angustifolia*, por sua vez, apresentou maior perda de água em cinco dos seis regimes avaliados em uma das comparações. As diferenças entre espécies variaram conforme o resultado analisado e as condições operacionais.

Typha angustifolia apresentou remoções elevadas de matéria orgânica e nutrientes nas condições avaliadas. *Arundo donax* apresentou boa produção de biomassa e resultados

favoráveis para a água drenada em cargas moderadas, mas mostrou menor tolerância às maiores cargas no experimento mediterrâneo. Os dados disponíveis não permitem generalizar essas diferenças para todos os climas e configurações.

A escolha da macrófita deve considerar a carga de sólidos, o regime de alimentação e repouso e as condições climáticas do sistema. No conjunto analisado, *Phragmites australis* apresentou maior número de resultados favoráveis nas comparações diretas, mas ainda são necessários estudos de longa duração, em escala plena e com comparações independentes, especialmente em clima tropical.

5 REFERÊNCIAS

AL-RASHDI, Tahra Talib *et al.* A study of pilot *sludge treatment reed beds* for sludge dewatering and treatment under a hot and arid climate. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 31, n. 8, p. 12467-12482, 2024. Disponível em: https://doi.org/10.1007/s11356-023-31804-x. Acesso em: 22 jun. 2026.

AL-RASHDI, Tahra *et al.* Quantification of greenhouse gas emissions from pilot *sludge treatment reed beds* and unplanted drying beds under a hot and arid climate. **Journal of Environmental Management**, v. 394, art. 127427, 2025. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2025.127427. Acesso em: 22 jun. 2026.

GALVÃO, Maria Cristiane Barbosa; RICARTE, Ivan Luiz Marques. Revisão sistemática da literatura: conceituação, produção e publicação. **Logeion: Filosofia da Informação**, v. 6, n. 1, p. 57-73, 2019. Disponível em: https://doi.org/10.21728/logeion.2019v6n1.p57-73. Acesso em: 22 jun. 2026.

GHOLIPOUR, Amir; FRAGOSO, Rita; DUARTE, Elizabeth; GALVÃO, Ana. Sludge Treatment *Reed* Bed under different climates: a review using meta-analysis. **Science of the Total Environment**, v. 843, art. 156953, 2022. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.156953. Acesso em: 22 jun. 2026.

GHOLIPOUR, Amir; FRAGOSO, Rita; GALVÃO, Ana; DUARTE, Elizabeth. A comparative study of worm-sludge treatment *reed* bed planted with *Phragmites australis* and *Arundo donax* in the Mediterranean region. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 31, p. 51551-51567, 2024a. Disponível em: https://doi.org/10.1007/s11356-024-34632-9. Acesso em: 22 jun. 2026.

GHOLIPOUR, Amir; FRAGOSO, Rita; GALVÃO, Ana; DUARTE, Elizabeth. Evaluating drained water quality in a pilot worm-sludge treatment *reed* bed planted with *Arundo donnas* in the Mediterranean climate. **Science of the Total Environment**, v. 928, art. 172587, 2024b. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.172587. Acesso em: 22 jun. 2026.

HU, Shanshan *et al.* Drained water quality in *sludge treatment wetlands*: effects of earthworm densities and plant species. **Journal of Cleaner Production**, v. 247, art. 119128, 2020a. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119128. Acesso em: 22 jun. 2026.

HU, Shanshan *et al.* Effects of loading rates and plant species on sludge characteristics in earthworm assistant *sludge treatment wetlands*. **Science of the Total Environment**, v. 730,

art. 139142, 2020b. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139142. Acesso em: 22 jun. 2026.

HU, Shanshan; CHEN, Huilun; CHEN, Zhongbing. Performance of *sludge drying reed beds* for the leachate purification: effects of sludge loading frequencies and plant species. **Environmental Research**, v. 194, art. 110452, 2021. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.envres.2020.110452. Acesso em: 22 jun. 2026.

LIANG, Junyu *et al.* Evalution of the fate of greenhouse gas emissions from the sludge mineralisation process in *Sludge treatment wetlands*. **Ecological Engineering**, v. 159, art. 106124, 2021. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2020.106124. Acesso em: 22 jun. 2026.

PAGE, Matthew J. *et al.* The PRISMA 2020 statement: an updated guideline for reporting systematic reviews. **BMJ**, v. 372, art. n71, 2021. Disponível em: https://doi.org/10.1136/bmj.n71. Acesso em: 22 jun. 2026.

TAN, Y. Y.; HUONG, Y. Z.; TANG, F. E.; SAPTORO, A. A review of sewage sludge dewatering and stabilisation in *reed* bed system: towards the process-based modelling. **International Journal of Environmental Science and Technology**, v. 21, n. 1, p. 997-1020, 2024. Disponível em: https://doi.org/10.1007/s13762-023-05063-9. Acesso em: 22 jun. 2026.

UNITED NATIONS. **Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development**. New York: United Nations, 2015. Disponível em: https://sdgs.un.org/2030agenda. Acesso em: 30 ago. 2026.

Contatos: lucasleandro.sousa@mackenzista.com.br e analucia.pinheiro@mackenzie.br