


**ESTADO DA ARTE DOS SISTEMAS DE WETLANDS PARA O TRATAMENTO DE
EFLUENTES DE ATERROS SANITÁRIOS**

 <https://doi.org/10.63330/aurumpub.031-014>

Jéssica Torres dos Santos

Doutoranda em Recursos Hídricos
Universidade Federal de Pelotas
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6544-2286>

Rubiane Buchweitz Fick

Graduanda em Eng. Ambiental e Sanitária
Universidade Federal de Pelotas
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2131-4952>

Rafael Miritz Bartz

Mestrando em Recursos Hídricos
Universidade Federal de Pelotas
ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-8732-6574>

Jéssica Etcheverria do Prado Hartwig

Doutoranda em Ciências Ambientais
Universidade Federal de Pelotas
ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-9296-0904>

Ana Clara Marins Mendes

Graduanda em Eng. Ambiental e Sanitária
Universidade Federal de Pelotas
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9580-7111>

Caroline Menezes Pinheiro

Mestranda em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental
Universidade Federal do Rio Grande do Sul
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5033-244X>

Ezequiel da Silva Tins

Graduando em Eng. Civil
Universidade Federal de Pelotas
ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-4850-6377>

Gustavo Luís Calegari

Mestrando em Ciências Ambientais
Universidade Federal de Pelotas
ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-7050-3129>

Josiane Pinheiro Farias

Doutoranda em Ciências e Eng. dos Materiais
Universidade Federal de Pelotas
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8933-4984>

Kelian Ramire Waskow Grellert

Graduanda em Eng. Ambiental e Sanitária
Universidade Federal de Pelotas
ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-7930-3281>

Luís Eduardo Tavares Martins

Mestrando Ciências Ambientais
Universidade Federal de Pelotas
ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-6288-2412>

Marcos Antonio da Silva

Mestrando em Ciência e Engenharia dos Materiais
Universidade Federal de Pelotas
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5372-1168>

Luiza Beatriz Gamboa Araújo Morselli

Dra. em Ciência e Engenharia de Materiais
Universidade Federal de Pelotas
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1703-7710>

Thays França Afonso

Dra. em Ciência e Engenharia dos Materiais
Universidade Federal de Pelotas
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7803-7319>

Robson Andreazza

Eng. Agrônomo, Dr. em Solos
Universidade Federal de Pelotas
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9211-9903>

Maurizio Silveira Quadro

Eng. Agrícola, Dr. em Solos
Universidade Federal de Pelotas
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8236-7479>

RESUMO

O lixiviado proveniente de aterro sanitário é um efluente de elevada carga poluidora, caracterizado por altas concentrações de matéria orgânica persistente, nitrogênio amoniacal e metais pesados. O tratamento convencional desse efluente exige elevados custos energéticos e operacionais, o que tem impulsionado a busca por alternativas tecnológicas mais sustentáveis. Este trabalho apresenta uma revisão do estado da arte sobre o emprego de sistemas de Wetlands Construídos (WC) como uma Solução Baseada na Natureza para a depuração de lixiviados. A metodologia baseou-se em uma revisão sistemática da literatura científica,

abrangendo estudos publicados nos últimos anos. Os resultados indicaram crescimento expressivo das publicações nos últimos anos, com maior concentração a partir de 2021. A análise de periódicos revelou destaque para *Science of the Total Environment*, *Ecological Engineering* e *Journal of Environmental Management*. As palavras-chave mais recorrentes evidenciaram o foco no tratamento de águas residuais e no uso de wetlands construídos para tratamento de lixiviados, além do interesse crescente na remoção de contaminantes emergentes e na compreensão de processos microbiológicos envolvidos na eficiência desses sistemas. Conclui-se que os sistemas de Wetlands representam uma tecnologia consolidada e de baixo custo para o pós-tratamento ou tratamento complementar de aterros, embora desafios, como a toxicidade aguda do lixiviado bruto, ainda demandam estratégias de pré-tratamento integradas.

Palavras-chave: Soluções Baseadas na Natureza; Tratamento de Chorume; Infraestrutura Verde; Fitorremediação; Sustentabilidade.

1 INTRODUÇÃO

O crescimento populacional, aliado a estilos de vida marcados pelo consumo, tem intensificado de forma significativa a geração de resíduos sólidos urbanos (RSU). No Brasil, a geração de Resíduos Sólidos no ano de 2023 foi de aproximadamente 81 milhões de toneladas, equivalente a mais de 221 mil toneladas de resíduos gerados diariamente (ABREMA, 2024). A gestão de resíduos sólidos no Brasil é regida pela Lei nº 12.305/2010, que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) e estabelece uma ordem de prioridade rigorosa para o manejo, iniciando pela não geração e passando sucessivamente pela redução, reutilização, reciclagem e tratamento. De acordo com este marco legal, os aterros sanitários continuam sendo o método predominante de disposição final ambientalmente adequada, devendo ser utilizados exclusivamente para o recebimento de rejeitos, ou seja, resíduos que esgotaram todas as possibilidades de recuperação técnica ou econômica. Ao determinar a extinção dos lixões, a legislação impõe o desafio de gerir os impactos ambientais decorrentes do confinamento desses materiais, destacando-se a necessidade de sistemas eficazes para o tratamento do lixiviado gerado nesta última etapa da cadeia produtiva. O aterro sanitário é a principal alternativa para descarte de resíduos sólidos municipais e industriais globalmente (Yang et al., 2023).

O chorume gerado nos aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos representa um sério desafio ambiental, causando impactos ecológicos e de saúde pública (Bakhshoodeh et al., 2020; El-Saadony et al., 2023). Esse efluente geralmente contém altas concentrações de poluentes e compostos tóxicos, exigindo tratamento adequado antes de ser liberado, sendo caracterizado por elevadas concentrações de matéria

orgânica, metais pesados, nitrogênio, fósforo e sais, além de apresentar valores de pH que variam de ácido a neutro, dependendo da idade do aterro sanitário (Bakhshoodeh et al., 2020).

No que tange ao controle da poluição hídrica, as Resoluções CONAMA nº 357/2005 e nº 430/2011 estabelece os parâmetros e limites máximos para o lançamento de efluentes em corpos de água. Enquanto a primeira classifica as águas doces, salobras e salinas de acordo com seus usos preponderantes, a segunda especifica as condições restritivas para o descarte de efluentes complexos, como o lixiviado de aterro. Entre os principais desafios impostos por essas normativas destaca-se a remoção de elevadas concentrações de nitrogênio amoniacal e matéria orgânica (expressa em DBO5 e DQO), exigindo sistemas de tratamento que operem com alta estabilidade biológica.

Nos últimos anos, diversas tecnologias têm sido investigadas para o tratamento de lixiviados, incluindo processos de oxidação avançados, filtração por membranas e sistemas biológicos com elevado potencial para reduzir a contaminação da água. Entre essas tecnologias destacam-se as Soluções Baseadas na Natureza (SbN), que se apresentam como uma solução econômica, de simples construção e operação, baixo consumo energético, além de apresentarem eficácia a longo prazo no tratamento e benefícios ambientais adicionais como integração paisagística e serviços ecossistêmicos (Von Sperling; Sezerino, 2018)

Nesse sentido, é possível aplicar diferentes abordagens, como as zonas húmidas naturais e construídas (Almeida, 2025). Os *Wetlands*, ou zonas úmidas construídas, são uma abordagem de baixa tecnologia utilizada para tratamento de águas contaminadas de forma controlada e otimizada, inspirada nos processos naturais das zonas húmidas naturais. Nesse sistema, a remoção de contaminantes ocorre através de uma ação combinada entre plantas, microrganismos e componentes do substrato, é possível diminuir a concentração dos compostos para níveis seguros para a biota/ambiente aquático (Almeida, 2025). Nesse caso, as plantas desempenham principalmente um papel indireto na remoção de contaminantes, pois elas ajudam a criar condições adequadas para a remoção de poluentes. O único efeito direto é a absorção de nutrientes e metais pesados (Bakhshoodeh et al., 2020).

O uso de tecnologias como *Wetlands* Construídos auxilia no cumprimento da PNRS (Lei 12.305/2010) e das Resoluções CONAMA 357 e 430, ao garantir que o tratamento do lixiviado atinja os padrões de lançamento exigidos antes de retornar ao meio ambiente, promovendo a sustentabilidade da disposição final. Diante do exposto, este trabalho tem como objetivo realizar uma revisão bibliográfica sobre a aplicação de *wetlands* construídos no tratamento de lixiviados de aterros sanitários.

2 METODOLOGIA

O presente trabalho caracterizou-se como uma revisão bibliográfica desenvolvida com base em pesquisas já elaboradas, constituídas principalmente de artigos científicos. Esse estudo baseou-se na análise

de publicações científicas indexadas em inglês na base de dados Science Direct (Elsevier). A busca de artigos foi realizada utilizando as palavras-chave: “*wetland*” e “*landfill leachate*”, empregando o recurso de aspas duplas (“”) no início e no final de cada termo, bem como o operador booleano AND entre as palavras, a fim de restringir os resultados a estudos que abordassem simultaneamente os dois temas.

A coleta de dados foi realizada em agosto de 2025, considerando todas as publicações disponíveis na base até o momento da busca. Após a identificação inicial dos documentos, foi realizada uma triagem com base nos critérios de elegibilidade definidos para o estudo, excluindo-se documentos duplicados e aqueles que não apresentavam relação direta com o tema da pesquisa.

Após a realização da busca dos artigos, os dados foram tratados com o pacote bibliometrix, disponível no software RStudio (versão 2025.05.1 Build 513). Essa ferramenta permitiu a organização e análise das informações bibliográficas extraídas da base de dados, possibilitando a realização de análises quantitativas da produção científica relacionada ao tema.

Com base nessa análise, foram extraídos e organizados os seguintes resultados: distribuição dos artigos por ano de publicação, periódicos com maior número de publicações sobre o tema e palavras-chave mais frequentes. Para este estudo, foram considerados apenas artigos científicos e artigos de revisão, aplicando-se esses critérios como filtros de seleção.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A evolução temporal das publicações sobre o uso de *wetlands* no tratamento de lixiviado, apresentada na Figura 1, revela um campo científico em crescimento. Dos 1.962 estudos identificados, observa-se uma concentração significativa de trabalhos a partir do ano de 2021, o que evidencia a consolidação dessa tecnologia como uma alternativa estratégica frente aos desafios do saneamento contemporâneo.

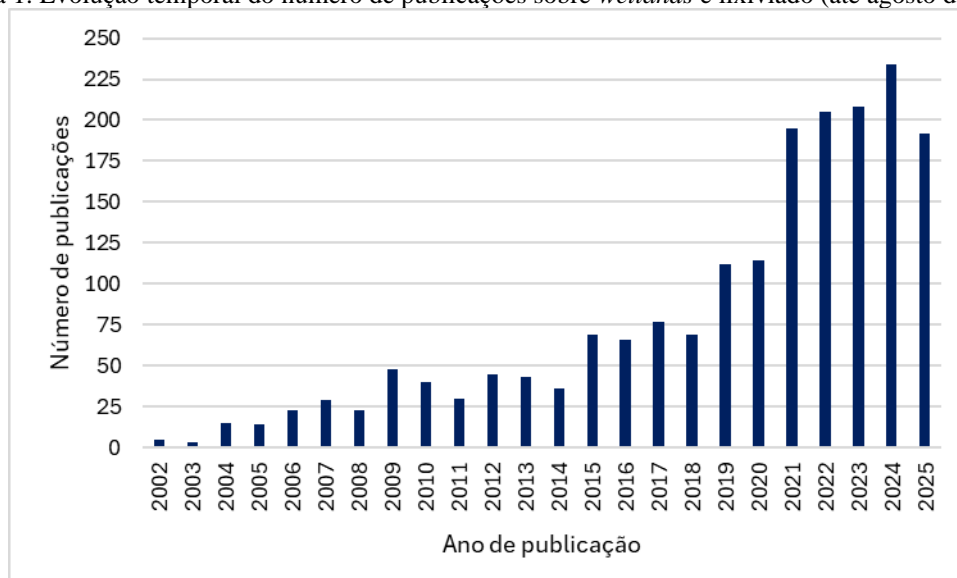
Em relação à natureza dos documentos, a predominância de estudos experimentais (70%), conduzidos em escalas que variam da laboratorial à real, demonstra o caráter prático e aplicado da pesquisa na área. Complementarmente, a expressiva parcela de artigos de revisão (30%) indica um esforço da comunidade acadêmica em sintetizar os mecanismos de tratamento e os avanços alcançados. Vale ressaltar que os dados de 2025 compreendem as publicações registradas até agosto, mantendo a tendência de alta produtividade observada nos anos anteriores.

Outro ponto que pode explicar o aumento das publicações nos anos mais recentes está relacionado ao crescimento das preocupações ambientais associadas à gestão de lixiviados de aterros sanitários. O lixiviado apresenta elevada carga orgânica, presença de compostos recalcitrantes e potencial toxicidade, o que torna seu tratamento um desafio para tecnologias convencionais. Nesse contexto, sistemas baseados

em *wetlands* construídos têm sido amplamente investigados devido ao seu baixo consumo energético, simplicidade operacional e capacidade de integração com processos naturais de remoção de poluentes, fatores que contribuem para o aumento do interesse científico nesta área.

Além disso, o avanço das pesquisas também pode estar associado à busca por soluções mais sustentáveis e baseadas na natureza para o tratamento de efluentes complexos. As *wetlands* construídas têm sido amplamente investigadas por combinarem processos físicos, químicos e biológicos, envolvendo a ação conjunta de substratos, plantas macrófitas e comunidades microbianas na remoção de contaminantes. Dessa forma, o crescimento das publicações ao longo do tempo reflete não apenas a expansão do interesse acadêmico, mas também o reconhecimento dessa tecnologia como uma alternativa promissora dentro das estratégias de tratamento ambientalmente sustentáveis.

Figura 1. Evolução temporal do número de publicações sobre *wetlands* e lixiviado (até agosto de 2025).



Fonte: Autores.

A análise do número de publicações por periódicos (Figura 2) demonstra que a maior concentração de estudos se encontra no periódico *Science of the Total Environment* (227 publicações), o que mostra uma ampla inserção do tema em uma revista multidisciplinar de destaque na área ambiental. Além disso, periódicos como *Ecological Engineering* (115), *Journal of Environmental Management* (114) e *Chemosphere* (103) reforçam o destaque da temática no contexto da engenharia ecológica, gestão ambiental e poluição química. Essa diversidade de publicação sugere que a pesquisa não se restringe apenas ao tratamento de água, mas também dialoga com práticas de mitigação da poluição, conservação ambiental e desenvolvimento sustentável.

Em uma escala intermediária de recorrência, revistas como *Waste Management* (49) e *Journal of Cleaner Production* (46) também demonstram a associação com a gestão de resíduos e práticas de produção

mais limpa, áreas que complementam os estudos ambientais ao tratar da sustentabilidade em processos industriais. Por outro lado, periódicos como *Ecotoxicology and Environmental Safety* (19) e *Process Safety and Environmental Protection* (19) apresentaram menor número de publicações, o que indica que aspectos relacionados à toxicologia ambiental e segurança de processos industriais têm menor representatividade no recorte analisado.

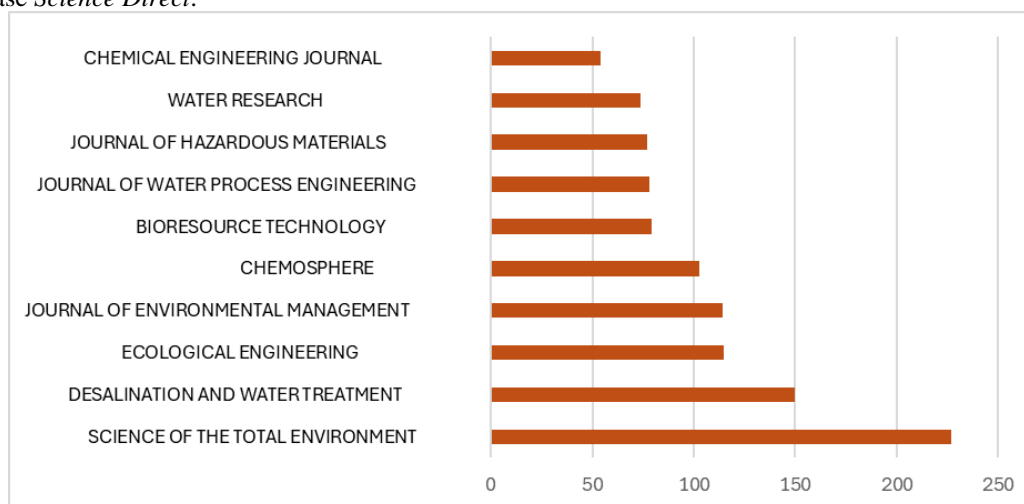
A distribuição das publicações entre diferentes periódicos evidencia o caráter interdisciplinar das pesquisas relacionadas ao tema. A presença simultânea de revistas voltadas à engenharia ambiental, gestão de resíduos, produção mais limpa e avaliação de riscos ambientais indica que os estudos não se limitam apenas a abordagens tecnológicas de tratamento, mas também incorporam perspectivas relacionadas ao gerenciamento sustentável de recursos, prevenção da poluição e avaliação de impactos ambientais. Assim, a distribuição das publicações em diferentes periódicos evidencia o caráter interdisciplinar do tema, que envolve engenharia ambiental, gestão de resíduos e controle da poluição hídrica.

Outro aspecto relevante é que a concentração de artigos em periódicos de alto impacto na área ambiental sugere que o tema tem despertado interesse crescente na comunidade científica internacional. Revistas como *Science of the Total Environment*, *Chemosphere* e *Journal of Environmental Management* são reconhecidas por publicar pesquisas relacionadas à avaliação de poluentes, tecnologias de tratamento e gestão ambiental, o que indica que os estudos analisados estão inseridos em um contexto de discussão científica consolidado e de ampla visibilidade. Isso também sugere que as pesquisas desenvolvidas nessa área contribuem diretamente para o avanço do conhecimento sobre controle da poluição e proteção dos recursos hídricos.

Adicionalmente, a presença de periódicos voltados à sustentabilidade e à gestão de resíduos reforça a tendência de integração entre diferentes estratégias de mitigação de impactos ambientais. Essa convergência aponta para uma abordagem cada vez mais sistêmica na pesquisa ambiental, na qual tecnologias de tratamento são avaliadas não apenas pela sua eficiência técnica, mas também por sua contribuição para práticas sustentáveis e economia circular. Nesse sentido, a diversidade de periódicos identificados reflete a ampliação das discussões científicas sobre soluções ambientalmente responsáveis, evidenciando a importância de abordagens multidisciplinares para enfrentar os desafios associados à poluição e à gestão de recursos naturais.

ESTADO DA ARTE DOS SISTEMAS DE WETLANDS PARA O TRATAMENTO DE EFLUENTES DE ATERROS SANITÁRIOS

Figura 2. Principais revistas que publicaram artigos sobre o tema, até agosto de 2025 (n = 1962 artigos), considerando os registros extraídos da base *Science Direct*.



Fonte: Autores.

A análise das palavras-chave, representada na Figura 3, mostra que os termos mais recorrentes estão relacionados ao tratamento de águas residuais, destacando-se *wastewater treatment* e *wastewater*, o que evidencia a relevância do assunto na literatura científica. Em seguida, aparecem *landfill leachate* e *constructed wetlands*, confirmando a importância dos *wetlands* construídos como tecnologia sustentável para o manejo de lixiviados de aterros sanitários. Também foram frequentes termos ligados a estratégias de remediação, como *phytoremediation*, *adsorption* e *bioremediation*, que reforçam a diversidade de abordagens estudadas. Além disso, a presença de palavras como *heavy metals*, *microplastics*, *emerging contaminants* e *nitrogen* indica que os estudos vêm abrangendo tanto contaminantes clássicos quanto os chamados contaminantes emergentes. Por fim, termos como *microbial community*, *anammox* e *nitrogen removal* evidenciam a relevância dos processos microbiológicos para explicar e aprimorar a eficiência dos *wetlands* no tratamento de efluentes.

Além disso, a diversidade de termos observada nas palavras-chave sugere que os estudos sobre *wetlands* construídos para tratamento de lixiviados têm abordado diferentes dimensões do processo de tratamento. Enquanto algumas pesquisas se concentram na eficiência de remoção de poluentes específicos, outras investigam os mecanismos envolvidos na depuração, incluindo interações entre plantas, substratos e comunidades microbianas. Essa multiplicidade de abordagens evidencia que o campo de pesquisa não se limita apenas à avaliação de desempenho dos sistemas, mas também busca compreender os processos ecológicos e bioquímicos que sustentam o funcionamento dessas tecnologias.

Outro aspecto relevante é a presença de termos relacionados a contaminantes emergentes, como *microplastics* e *emerging contaminants*, o que indica uma tendência recente da literatura em expandir o escopo de investigação para além dos poluentes tradicionalmente monitorados. Esse movimento reflete as preocupações crescentes com compostos que apresentam persistência ambiental, potencial toxicidade e

palavras-chave revela a diversidade de abordagens investigadas, incluindo estratégias de remediação, remoção de nutrientes, estudo de comunidades microbianas e avaliação de contaminantes emergentes. Em conjunto, esses resultados evidenciam o caráter multidisciplinar da temática e reforçam o papel dos *wetlands* construídos como uma alternativa promissora e amplamente investigada para o tratamento sustentável de lixiviados.

4 CONCLUSÕES

O estudo demonstrou o crescimento das pesquisas sobre a utilização de *wetlands* no tratamento de lixiviados de aterros sanitários. Os dados indicam que o interesse global por essa área tem se intensificado, refletido em um aumento significativo na taxa de publicações científicas nos últimos anos.

Com base na análise de periódicos e palavras-chave, pode-se concluir que os *wetlands* construídos se destacam como alternativa promissora para o tratamento de lixiviados de aterros sanitários, sendo frequentemente associados a pesquisas sobre tratamento de águas residuais, fitorremediação, remoção de metais pesados e poluentes emergentes. A análise bibliográfica mostra que o tema possui caráter interdisciplinar e relevância crescente, reforçando seu potencial como solução sustentável, de baixo custo e eficaz para a gestão de efluentes e a proteção dos recursos hídricos.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE RESÍDUOS E MEIO AMBIENTE (ABREMA). Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2024. São Paulo: ABREMA, 2024. Disponível em: <<https://www.abrema.org.br/panorama/>>.

ALMEIDA, C. M. R. Zonas húmidas naturais e construídas como soluções baseadas na natureza para a manutenção da boa qualidade da água dos ecossistemas aquáticos. *Revista de Ciência Elementar*, Porto, v. 13, n. 1, 2025.

BAKHSHOODEH, R., ALAVI, N., OLDHAM, C., SANTOS, R., BABAEI, A., VYMAZAL, J., PAYDARY, P. Constructed wetlands for landfill leachate treatment: a review, *Ecological Engineering*, v.146, 2020.

BRASIL. Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei no 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. Brasília, DF: Presidência da República, [2010].

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). Resolução nº 357, de 17 de março de 2005. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências. Brasília, DF: MMA, 2005.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). Resolução nº 430, de 13 de maio de 2011. Dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes, complementa e altera a Resolução nº

Jéssica Torres dos Santos | Rubiane Buchweitz Fick | Rafael Miritz Bartz | Jéssica Etcheverria do Prado Hartwig | Ana Clara Marins Mendes | Caroline Menezes Pinheiro | Ezequiel da Silva Tins | Gustavo Luís Calegari | Josiane Pinheiro Farias | Kelian Ramire Waskow Grellert | Luís Eduardo Tavares Martins | Marcos Antonio da Silva | Luiza Beatriz Gamboa Araújo Morselli | Thays França Afonso | Robson Andreazza | Maurizio Silveira Quadro

357, de 17 de março de 2005, do Conselho Nacional do Meio Ambiente-CONAMA. Brasília, DF: MMA, 2011.

EL-SAADONY, M. T.; SAAD, A. M.; EL-WAFAI, N. A.; ABOU-ALY, H. E.; SALEM, H. M.; SOLIMAN, S. M.; ABD EL-MAGEED, T. A.; ELRYS, A. S.; SELIM, S.; ABD EL-HACK, M. E.; KAPPACHERY, S.; EL-TARABILY, K. A.; ABUQAMAR, S. F. Hazardous wastes and management strategies of landfill leachates: a comprehensive review. *Environmental Technology and Innovation*, v. 31, 2023.

VON SPERLING, Marcos; SEZERINO, Pablo H. Dimensionamento de wetlands construídos no Brasil. Documento de consenso entre pesquisadores e praticantes. *Boletim Wetlands Brasil*, v. 65, 2018.

YANG, X.; ARIAS, M. E.; ERGAS, S. J. Hybrid constructed wetlands amended with zeolite/biochar for enhanced landfill leachate treatment. *Ecological Engineering*, v. 192, 2023