



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA
CURSO DE ENGENHARIA QUÍMICA

JOSÉ EDUARDO DA CUNHA SILVA

**ANÁLISE COMPARATIVA DE PROCESSOS DE TRATAMENTO DE LIXIVIADOS:
VIABILIDADE DE APLICAÇÃO EM ATERRO SANITÁRIO NA REGIÃO
METROPOLITANA DO RECIFE**

Recife
2025

JOSÉ EDUARDO DA CUNHA SILVA

**ANÁLISE COMPARATIVA DE PROCESSOS DE TRATAMENTO DE LIXIVIADOS:
VIABILIDADE DE APLICAÇÃO EM ATERRO SANITÁRIO NA REGIÃO
METROPOLITANA DO RECIFE**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à coordenação do curso de graduação em Engenharia Química da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial à obtenção do título de bacharel em Engenharia Química

Orientador: Prof. Dr. Maurício Alves da Motta Sobrinho.

Coorientador: M.Sc. Joana Eliza de Santana

Recife

2025

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do programa de geração automática do SIB/UFPE

Silva, José Eduardo da Cunha.

Análise comparativa de processos de tratamento de lixiviados: viabilidade de aplicação em aterro sanitário na região metropolitana do Recife / José Eduardo da Cunha Silva. - Recife, 2025.

73 p. : il., tab.

Orientador(a): Maurício Alves da Motta Sobrinho

Coorientador(a): Joana Eliza de Santana

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, Engenharia Química - Bacharelado, 2025.

Inclui referências.

1. Tratamento de Efluentes. 2. Foto-Fenton. 3. Processos de Membrana. 4. Osmose Reversa. 5. Viabilidade. I. Motta Sobrinho, Maurício Alves da. (Orientação). II. Santana, Joana Eliza de . (Coorientação). IV. Título.

660 CDD (22.ed.)

JOSÉ EDUARDO DA CUNHA SILVA

**ANÁLISE COMPARATIVA DE PROCESSOS DE TRATAMENTO DE LIXIVIADOS:
VIABILIDADE DE APLICAÇÃO EM ATERRO SANITÁRIO NA REGIÃO
METROPOLITANA DO RECIFE**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
coordenação do curso de graduação em
engenharia química da Universidade Federal de
Pernambuco, como requisito parcial à
obtenção do título de bacharel em Engenharia
Química

Aprovado em: 12/08/2025

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Maurício Alves da Motta Sobrinho (Orientador)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Dr. Tiago José Marques Fraga (Examinador Interno)
Universidade Federal de Pernambuco

Dra. Marcela Bino da Silva Santos (Examinador Externo)
Universidade Federal de Pernambuco

Dedico este trabalho à minha família, principalmente à minha mãe, por ter me incentivado, pelo carinho, atenção e por todo o amor e estímulo aos estudos ao longo da vida.

AGRADECIMENTOS

A Deus pela minha vida.

Aos meus pais e à minha família, em especial à minha mãe Antônia e à minha avó Severina (*in memoriam*), que sempre torceram por mim.

Aos professores Angeles, Celmy e Felipe, por acreditarem em mim e por me fazerem acreditar que seria possível.

Ao professor Maurício Motta e à Joana Santana pela orientação e supervisão.

Aos amigos que me acompanharam no ambiente acadêmico — Matheus, Alice, Thaisa, Glenda, Paola, Alef, Pedro e Diane — que entendem de perto essa correria, muito obrigado por serem luz e ânimo nessa extensa jornada.

Aos meus parceiros de batalha e de busão, Filipe, Hilton e Dedé, pelo apoio, pela companhia e pelos conselhos ao longo destes muitos anos.

Por fim, aos meus amigos incentivadores e “políglotas da vida”, juntos desde o começo — Daianny, Duda e Jefferson — saibam que vocês serão para sempre pessoas especiais para mim.

RESUMO

A gestão e o tratamento de lixiviados provenientes de aterros sanitários representam um desafio ambiental significativo, especialmente em regiões metropolitanas como a do Recife. Este estudo realizou uma revisão integrativa da literatura para analisar e comparar diferentes processos de tratamento de lixiviados, incluindo métodos biológicos, físico-químicos, processos oxidativos avançados e tecnologias de membranas, com o objetivo de identificar a alternativa mais adequada para o Aterro da Muribeca. A revisão considerou estudos publicados entre 2011 e 2025, priorizando dados quantitativos sobre caracterização do lixiviado, eficiência dos tratamentos e viabilidade técnica, econômica e ambiental. A metodologia adotada envolveu a seleção criteriosa de trabalhos nacionais e internacionais, agrupados conforme as técnicas de tratamento aplicadas, e a análise comparativa dos resultados obtidos em diferentes contextos. Foram avaliados parâmetros como DQO, turbidez, sólidos suspensos, pH, além dos custos operacionais e demandas técnicas de cada processo. Os resultados indicaram que, embora a osmose reversa apresente alta eficiência na remoção de contaminantes, sua aplicação direta no aterro da Muribeca é limitada pela complexidade operacional, pelos custos elevados e pela necessidade de pré-tratamentos rigorosos. O processo Foto-Fenton, combinado com tratamentos físico-químicos (coagulação/floculação) e filtração por membranas de menor custo (microfiltração ou ultrafiltração), destacou-se como a alternativa mais equilibrada, apresentando eficiência satisfatória na redução dos principais poluentes e viabilidade econômica compatível com a escala do aterro. Conclui-se que a escolha do processo de tratamento deve considerar a composição e a variabilidade do lixiviado, bem como as condições locais de operação e infraestrutura. A integração de processos, com ênfase no Foto-Fenton e etapas complementares, oferece uma solução técnica, ambiental e economicamente viável para o tratamento do lixiviado no aterro da Muribeca. Estudos futuros devem focar na otimização desses sistemas integrados e na avaliação de sua aplicabilidade em larga escala, visando à sustentabilidade e a proteção dos recursos hídricos.

Palavras-chave: Tratamento de Efluentes; Foto-Fenton; Processos de Membrana; Osmose Reversa; Viabilidade.

ABSTRACT

The management and treatment of leachate from landfills poses a significant environmental challenge, especially in metropolitan areas like Recife. This study conducted an integrative literature review to analyze and compare different leachate treatment processes, including biological, physicochemical, advanced oxidative processes, and membrane technologies, with the goal of identifying the most suitable alternative for the Muribeca Landfill. The review considered studies published between 2011 and 2025, prioritizing quantitative data on leachate characterization, treatment efficiency, and technical, economic, and environmental feasibility. The methodology adopted involved a careful selection of national and international studies, grouped according to the treatment techniques applied, and a comparative analysis of the results obtained in different contexts. Parameters such as COD, turbidity, suspended solids, and pH were evaluated, as well as the operational costs and technical demands of each process. The results indicated that, although reverse osmosis presents high efficiency in contaminant removal, its direct application at the Muribeca landfill is limited by operational complexity, high costs, and the need for rigorous pretreatment. The Photo-Fenton process, combined with physical-chemical treatments (coagulation/flocculation) and lower-cost membrane filtration (microfiltration or ultrafiltration), emerged as the most balanced alternative, presenting satisfactory efficiency in reducing the main pollutants and economic viability compatible with the scale of the landfill. It is concluded that the choice of treatment process should consider the composition and variability of the leachate, as well as local operating conditions and infrastructure. Process integration, with an emphasis on Photo-Fenton and complementary steps, offers a technically, environmentally, and economically viable solution for leachate treatment at the Muribeca landfill. Future studies should focus on optimizing these integrated systems and evaluating their large-scale applicability, aiming for sustainability and the protection of water resources.

Keywords: Effluent Treatment; Photo-Fenton; Membrane Processes; Reverse Osmosis; Viability.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Participação regional na geração brasileira de RSU em 2023.....	18
Figura 2 - Esquema de unidade de tratamento avançado de lixiviado por Fenton.....	22
Figura 3 - Mapa da localização geográfica dos aterros da RMR	23
Figura 4 - Evolução temporal da composição do lixiviado e da produção de gases	25
Figura 5 - Lagoas de estabilização para tratamento do chorume no CTR Candeias	28
Figura 6 - Seleção de tecnologias de tratamento em função da característica do lixiviado	30
Figura 7 - Seletividade proporcionada pela variaçã do tamanho dos poros	32
Figura 8 - Ilustração do funcionamento da osmose e osmose reversa	33
Figura 9 - Idade do aterro x Biodegradabilidade (DBO/DQO).....	40
Figura 10 - Idade dos aterros x Turbidez.....	41
Figura 11 - Comparação da DQO entre os aterros que usam OR e os que usam outros tipos de tratamentos	44
Figura 12 - Distribuição dos parâmetros físico-químicos dos lixiviados tratados via <i>Box Plot</i>	46

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Localização onde cada município constituinte da RMR faz a destinação final de seus RSU	19
Tabela 2 - Massa de Resíduos recebidos por tipo de unidades de disposição final por macrorregião	22
Tabela 3 - Estimativa do volume anual de lixiviado gerado nos aterros sanitários da RMR ..	26
Tabela 4 - Aspectos ambientais e impactos associados as etapas de gestão dos RSU	26
Tabela 5 - Identificação dos aterros estudados: localização e período de operação.....	37
Tabela 6 - Caracterização dos lixiviados brutos	38
Tabela 7 - Identificação dos aterros estudados: idade e tratamentos utilizados	42
Tabela 8 - Caracterização dos lixiviados tratados	43
Tabela 9 - Análise estatística aplicada aos lixiviados brutos e tratados	45
Tabela 10 - Principais limitações e desafios por aterro	48
Tabela 11 - Classificação dos corpos receptores.	50
Tabela 12 - Parâmetros para lançamento de efluentes.....	52
Tabela 13 - Parâmetros dos lixiviados tratados comparando com os padrões CONAMA nº 430/2011	53
Tabela 14 - Categorias dos corpos d'água receptores indicados segundo a resolução CONAMA nº 357/2005.....	54
Tabela 15 - Avaliação dos processos de tratamento de lixiviado.....	55
Tabela 16 - Considerações sobre a viabilidade de aplicação de tecnologias de membrana no aterro da Muribeca.....	57
Tabela 17 - Comparação entre os parâmetros do lixiviado tratado da Muribeca e os padrões exigidos para aplicação da OR	58

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABES	Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABREMA	Associação Brasileira de Recuperação Energética
AGVs	Ácidos Graxos Voláteis
ANA	Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico
APPs	Áreas de Preservação Permanente
COPs	Compostos Orgânicos Persistentes
CPRH	Companhia Pernambucana de Meio Ambiente
CTR	Centro de Tratamento de Resíduos
DBO	Demanda Bioquímica de Oxigênio
DQO	Demanda Química de Oxigênio
ETEs	Estação de Tratamento de Esgoto
GEE	Gases de Efeito Estufa
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IPEA	Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada
MBR	<i>Membrane Bioreactor</i>
MF	Microfiltração
NF	Nanofiltração
NBR	Normas Brasileiras Regulamentadoras
OR	Osmose Reversa
PEAD	Polietileno de Alta Densidade
POAs	Processos Oxidativos Avançados
PH	Potencial Hidrogeniônico
PNRS	Política Nacional de Resíduos Sólidos
RMR	Região Metropolitana do Recife
RSU	Resíduos Sólidos Urbanos
SDT	Sólidos Dissolvidos Totais
SGCR	Sistema Geral de Classificação de Resíduos
UASB	<i>Upflow Anaerobic Slodge Blanket</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

OH	Radical Hidroxila
H ₂ O ₂	Peróxido de Hidrogênio
UV/H ₂ O ₂	Radiação Ultravioleta com Peróxido de Hidrogênio
TiO ₂	Dióxido de Titânio
NH ₄ ⁺	Nitrogênio Amoniacal
H ₂ S	Gás Sulfídrico

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	14
1.1. Objetivo Geral	16
1.2. Objetivos Específicos	16
2. REVISÃO DA LITERATURA	17
2.1. Resíduos Sólidos Urbanos	18
2.2. Aterros Sanitários	20
2.3. Lixiviado.....	24
2.4. Tecnologias de Tratamento do Lixiviado.....	27
2.4.1. <i>Processos Físico-Químicos e Biológicos</i>	29
2.4.2. <i>Processos Oxidativos Avançados</i>	31
2.4.3. <i>Tecnologias por Membranas</i>	32
3. METODOLOGIA.....	34
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	36
4.1. Caracterização do Lixiviado Presente na Literatura.....	36
4.1.1. <i>Lixiviados Brutos</i>	37
4.1.2. <i>Lixiviados Tratados</i>	42
4.2. Análise Estatística	44
4.2.1. <i>Box Plot</i>	46
4.3. Principais Limitações e Desafios.....	47
4.4. Conformidade e Reuso dos Efluentes.....	49
4.4.1. <i>Parâmetros de Lançamento</i>	53
4.5. Viabilidade dos Processos de Tratamento	55
4.5.1 <i>Escolha Técnica do Processo de Tratamento para o Aterro da Muribeca</i>	57
5. CONCLUSÃO.....	57
6. REFERÊNCIAS	58

1. INTRODUÇÃO

O crescimento populacional, a urbanização acelerada e o aumento do consumo ampliam a geração de resíduos sólidos urbanos (RSU) no Brasil, cujo perfil com alta fração orgânica, elevada umidade e baixa segregação na origem dificulta a reciclagem e eleva a produção de lixiviado e biogás em aterros (ABRELPE, 2023; SNIS, 2023). Persistem gargalos de infraestrutura coleta seletiva incipiente, capacidade limitada de triagem, além das fortes assimetrias regionais que ainda ocorrem nas destinações inadequadas em parte do território (Brasil, 2022).

Esses fatores intensificam impactos ambientais, como emissões de metano, odores e vetores (organismos que podem transmitir doenças, como moscas e roedores), além de risco de contaminação hídrica por lixiviado quando o controle e o tratamento são insuficientes (IPCC, 2022; CETESB, 2023). Em 2022, o país alcançou 203,1 milhões de habitantes e gerou cerca de 80 milhões de toneladas de RSU, com cobertura de coleta próxima de 93% (IBGE, 2022; ABREMA, 2024).

A gestão inadequada dos resíduos urbanos provoca impactos ambientais imediatos, agrava problemas de saúde pública e contribui para as mudanças climáticas, destacando-se a poluição do solo, da água e do ar, além do aumento da exposição a riscos sanitários, sobretudo em áreas densamente povoadas (Cortez; Tavares, 2025; Mucelin; Bellini, 2021).

Na Região Metropolitana do Recife (RMR), com densidade de 6.803,60 hab/km² e média de geração de 1,043 kg/hab/dia, os rejeitos são destinados a aterros sanitários, resultando em elevado volume de lixiviado (ABRELPE, 2023; IBGE, 2022). Esse cenário exige soluções tecnológicas eficazes e gestão ambiental integrada para prevenir a contaminação de solos, aquíferos e corpos hídricos (Firmo *et al.*, 2019; ABREMA, 2024).

A produção e a composição do lixiviado são influenciadas pela sazonalidade das chuvas e pelas características dos resíduos, tornando seu tratamento mais complexo e oneroso (Ferreira; Almeida, 2021). Quando mal gerido, esse efluente libera compostos orgânicos, metais pesados e substâncias tóxicas, promovendo eutrofização e contaminando ecossistemas aquáticos, o lençol freático e comunidades humanas (Santos *et al.*, 2022; Gomes, 2009).

Nesse contexto, destaca-se a importância de tecnologias avançadas de tratamento, como processos físico-químicos, biológicos e de separação por membranas, que podem mitigar os impactos ambientais e proteger a saúde pública (Renou *et al.*, 2008; De Almeida; Campos, 2020). No entanto, a eficácia dessas soluções também depende de políticas públicas, infraestrutura adequada e capacitação técnica, frequentemente limitadas em nível local (Silva;

Souza, 2021; Carvalho; Lima, 2020).

Estudos apontam que a adoção de métodos inovadores, requer incentivos regulatórios, articulação institucional e suporte técnico (Martins *et al.*, 2022). O monitoramento contínuo é essencial para avaliar a eficiência dos sistemas adotados e prevenir impactos de longo prazo (Ferreira; Almeida, 2021). Ainda assim, desafios como altos custos, manutenção especializada e adaptação às especificidades locais persistem (Oliveira; Santos, 2023).

Soluções integradas que combinam tratamentos biológicos, físico-químicos, oxidativos avançados e tecnologias por membranas apresentam alto potencial de remoção de cargas poluentes. Tratamentos biológicos reduzem matéria orgânica biodegradável; físico-químicos eliminam sólidos, metais e nutrientes; processos oxidativos, como Foto-Fenton, degradam compostos recalcitrantes; e sistemas de membranas, como a osmose reversa, removem sólidos dissolvidos, íons e micropoluentes, sendo eficazes em configurações híbridas (Habert *et al.*, 2025; Silva *et al.*, 2023; Oliveira *et al.*, 2024).

A captação e o tratamento do metano em aterros utilizam poços verticais e drenos horizontais conectados a uma rede de extração por vácuo, com selagem da cobertura para reduzir vazamentos, esse biogás coletado passa por etapas de pré-tratamento para retirar água condensada, gás sulfídrico (H_2S) e siloxanos, evitando corrosão e danos aos equipamentos (Vali *et al.*, 2024).

Após o condicionamento, o gás pode ser queimado em queimadores para controle de emissões ou aproveitado para gerar energia em motores, turbinas e microturbinas. Quando purificado, transforma-se em biometano, adequado para injeção na rede de gás e uso veicular (IEA Bioenergy, 2023). Os benefícios incluem redução das emissões de metano, diminuição de odores e riscos de explosão, maior estabilidade da massa de resíduos e apoio ao controle de vetores. Quando há aproveitamento energético, somam-se geração de eletricidade e calor, criação de empregos locais, novas receitas para municípios e potencial acesso a créditos de carbono (EPA, 2024).

Dentre os principais contaminantes removidos estão sólidos dissolvidos totais (SDT), amônia, nitrato, cloreto, cálcio, matéria orgânica dissolvida, turbidez e micropoluentes como fármacos e pesticidas, cuja eliminação eficiente depende da sinergia entre os processos empregados (Li *et al.*, 2008; Zhang *et al.*, 2022; Souza *et al.*, 2023).

A escolha da RMR como área de estudo se justifica pela sua relevância populacional, econômica e ambiental, reunindo 14 municípios e cerca de 42% da população do estado (Gama *et al.*, 2019a; IBGE, 2022). No entorno do Aterro da Muribeca, a urbanização intensa, a proximidade com vias de acesso e a presença de zonas residenciais e comerciais acentuam os

desafios para o manejo de resíduos e tratamento dos lixiviados (Silva Junior, 2009; Lins, 2011).

Considerando a crescente geração de rejeitos, a sobrecarga dos sistemas de disposição e os riscos ambientais associados, a região configura-se como território prioritário para a implementação e avaliação de tecnologias inovadoras no tratamento de efluentes de aterros sanitários (Carvalho, 2024; Silva, 2024).

1.1. Objetivo Geral

Analisar, por meio de revisão bibliográfica, a eficiência de diferentes processos de tratamento de lixiviados na remoção de matéria orgânica, visando aplicação no Aterro da Muribeca, localizado na RMR. A partir da avaliação das condições operacionais, dos pré-tratamentos atualmente empregados e dos resultados obtidos em outras localidades, busca-se discutir as possibilidades, os benefícios ambientais e os desafios técnicos para a eventual adoção do processo mais indicado nesse cenário, contribuindo para o aprimoramento da gestão de lixiviados.

1.2. Objetivos Específicos

Para o alcance do objetivo proposto, foram definidos os seguintes objetivos específicos:

- Avaliar as principais características do lixiviado gerado no aterro da Muribeca.
- Investigar alguns métodos de tratamento, como os biológicos, físico-químicos, oxidativos, entre outros, empregados no condicionamento do lixiviado.
- Apresentar casos de sucesso da aplicação de diferentes tecnologias de tratamento de lixiviado, em diferentes regiões do Brasil.
- Comparar os resultados obtidos com a aplicação dos diversos processos de tratamento, destacando suas eficiências na remoção de contaminantes e suas limitações.
- Discutir as possibilidades, benefícios ambientais e desafios técnicos para a adoção do processo mais indicado na RMR, considerando também, o processo que já é aplicado no aterro da Muribeca.

2. REVISÃO DA LITERATURA

O acelerado crescimento populacional, somado à urbanização desordenada e às mudanças nos padrões de consumo, tem ampliado a geração de resíduos sólidos urbanos e imposto desafios ambientais e sociais de grande escala. Apesar de avanços em políticas públicas, marcos regulatórios e expansão da coleta, a destinação inadequada ainda persiste em parcela relevante dos municípios brasileiros (TCU, 2020; SNIS, 2023).

A situação é mais crítica em localidades com baixo Índice de Desenvolvimento Humano, frequentemente periféricas ou afastadas dos grandes centros, onde déficits de infraestrutura, saneamento e capacidade institucional agravam a deposição em áreas sem controle ambiental e ampliam riscos à saúde e ao meio ambiente (PNUD, 2022; OMS, 2022).

A condução inadequada dos resíduos impacta negativamente o meio ambiente, promovendo a contaminação do solo, dos recursos hídricos e a emissão de gases de efeito estufa, além de representar riscos à saúde das populações expostas. Por esse motivo, a disposição final adequada dos RSU, preferencialmente em aterros sanitários licenciados, permanece como o método predominante no Brasil. Contudo, esses sistemas enfrentam limitações operacionais, técnicas e estruturais que comprometem sua eficiência em diversas regiões do país (Xavier *et al.*, 2021; Silva *et al.*, 2022a).

Entre os subprodutos gerados nos aterros sanitários, o lixiviado se destaca pela elevada complexidade. Esse efluente, resultante da decomposição da fração orgânica dos resíduos diluídos e da água (proveniente da chuva), apresenta altas concentrações de matéria orgânica, nitrogênio amoniacal, metais pesados e outros poluentes, exigindo tratamentos específicos e eficazes para evitar a degradação da qualidade das águas subterrâneas e superficiais (Xu *et al.*, 2020; Almeida *et al.*, 2022).

Nesse sentido, diversas tecnologias vêm sendo pesquisadas para aprimorar o tratamento do percolato (efluente líquido resultante da decomposição da matéria orgânica presente nos resíduos). Destacam-se as estratégias que combinam processos físico-químicos e biológicos com técnicas baseadas em membranas semipermeáveis. A osmose reversa, em especial, tem sido amplamente utilizada nas etapas finais de tratamento (polimento), devido à sua alta eficiência na remoção de compostos recalcitrantes e ao potencial de viabilizar o reuso do efluente tratado (De Almeida; Campos, 2021; Lange; Amaral, 2020).

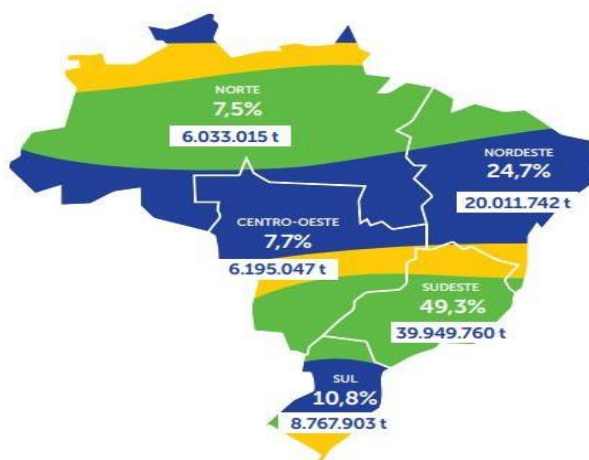
2.1. Resíduos Sólidos Urbanos

O crescimento populacional, a industrialização e o avanço urbano desordenado, aliados às mudanças nos padrões de consumo, têm impulsionado significativamente a geração de resíduos sólidos urbanos (RSU). A NBR 10004-1:2024, que estabelece os requisitos para classificação de resíduos quanto à periculosidade e a NBR 10004-2:2024, que detalha o Sistema Geral de Classificação de Resíduos (SGCR), indica que esses materiais incluem tanto os resíduos perigosos quanto não perigosos conforme critérios técnico-normativos atualizados (ABNT, 2024). Esse cenário contribui diretamente para a degradação ambiental, emissão de gases de efeito estufa (GEE) e contaminação dos recursos naturais (Paschoalin Filho; Dias; Cortês, 2014).

No Brasil, observa-se uma tendência persistente de aumento na geração de RSU. Em 2016, foram produzidas cerca de 78,3 milhões de toneladas, das quais 71,3 milhões foram coletadas, restando cerca de 7 milhões sem destinação adequada (ABRELPE, 2016).

Em 2023, esse volume chegou a aproximadamente 81 milhões de toneladas, com geração per capita de 1,05 kg/habitante/dia, sendo que o Nordeste respondeu por cerca de 25% desse total. A composição dos resíduos apresenta forte heterogeneidade, com predomínio da fração orgânica, seguida por recicláveis e rejeitos. A gravimetria nacional aponta que 33,6% dos resíduos gerados seriam potencialmente recicláveis, variando conforme fatores socioeconômicos, culturais e climáticos (ABREMA, 2024). Esses dados estão ilustrados na Figura 1.¹

Figura 1 - Participação regional na geração brasileira de RSU em 2023



Fonte: ABREMA (2024).

¹ Paleta cromática meramente ilustrativa.

Na Região Metropolitana do Recife (RMR), com mais de 4 milhões de habitantes, essa realidade se intensifica. Municípios como Recife, Jaboatão dos Guararapes e Ipojuca apresentam elevada geração de rejeitos, impulsionada pelo crescimento urbano, industrial e turístico (Gama *et al.*, 2019b).

A composição gravimétrica local é majoritariamente orgânica (50–60%), seguida por recicláveis secos (30–35%) e frações de rejeitos e inertes, perfil influenciado por feiras e mercados públicos, padrões de consumo da gastronomia regional, sazonalidade turística e a dinâmica do Complexo Portuário de Suape (CPRH, 2022b). Notadamente, Recife se mantém alinhada à média nacional no tocante à fração reciclável (30–35%), convergindo com diagnósticos setoriais recentes (SNIS, 2023).

A compreensão dessa composição é crucial para o planejamento eficaz da coleta, transporte e disposição final. Estudos destacam a necessidade de estratégias específicas para o aproveitamento da fração orgânica, especialmente no Nordeste (ABES, 2023).

Apesar de avanços em regulamentações e tecnologias, apenas cerca de 61,1 % dos resíduos coletados no Brasil foram destinados, em 2022, a aterros sanitários licenciados e Centros de Tratamento de Resíduos (CTR), um leve aumento em relação aos 60,5 % registrados em 2021, enquanto o restante ainda segue para lixões e aterros controlados, ampliando os riscos à saúde pública e ao meio ambiente (Xavier *et al.*, 2021; ABREMA, 2024).

A Tabela 1 apresenta a localidade onde é realizada a destinação final dos RSUs de cada município da área metropolitana.

Tabela 1 - Localização onde cada município constituinte da RMR faz a destinação final de seus RSU

Municípios	Destinação Final dos RSU
Abreu e Lima	CTR PE - Ecoparque
Araçoiaba	CTR PE - Ecoparque
Cabo de Santo Agostinho	CTR Candeias – Ecopesa Ambiental
Camaragibe	CTR PE - Ecoparque
Goiana	CTR PE - Ecoparque
Igarassu	CTR PE - Ecoparque
Ipojuca	Aterro Sanitário Municipal do Ipojuca
Itamaracá	CTR PE - Ecoparque
Itapissuma	CTR PE - Ecoparque
Jaboatão dos Guararapes	CTR Candeias – Ecopesa Ambiental
Moreno	CTR Candeias – Ecopesa Ambiental
Olinda	CTR PE - Ecoparque
Paulista	CTR PE - Ecoparque
Recife	CTR Candeias – Ecopesa Ambiental
São Lourenço da Mata	CTR Candeias – Ecopesa Ambiental

Fonte: Adaptado de CPRH (2022a).

Entre os subprodutos da disposição final, destaca-se o lixiviado, efluente de alta complexidade e toxicidade, cuja formação decorre da decomposição da matéria orgânica associada à percolação de água. Seu tratamento demanda tecnologias avançadas para prevenir impactos severos nos corpos hídricos e no solo (Vieira *et al.*, 2020b; Yang *et al.*, 2021).

Nesse contexto, estratégias como a coleta seletiva e a reciclagem são fundamentais para reduzir o volume de resíduos destinados a aterros, promovendo inclusão social e geração de renda. Contudo, as baixas taxas de reaproveitamento exigem maior investimento em infraestrutura e políticas públicas (Silva *et al.*, 2022b). Alternativas emergentes, como compostagem e recuperação energética da fração orgânica, por meio da produção de biogás e biometano, alinham-se aos princípios da economia circular e da mitigação das emissões de GEE (ABRELPE, 2023).

Na RMR, observa-se um movimento gradual em direção a práticas mais sustentáveis. Iniciativas experimentais de compostagem, biodigestão e educação ambiental vêm sendo implementadas, associadas a parcerias com cooperativas de catadores. Adicionalmente, começam a surgir investimentos em tecnologias inovadoras, como sistemas de captação e aproveitamento do metano gerado nos aterros (com uso do biogás para geração de eletricidade, calor ou purificação a biometano) e estações de tratamento avançado de lixiviado, refletindo um compromisso crescente com a sustentabilidade regional (CPRH, 2022b; Silva, C. *et al.*, 2021).

A formação de consórcios intermunicipais também tem se mostrado estratégica, ampliando a eficiência dos sistemas e viabilizando o acesso a tecnologias modernas (ABES, 2023). Essa articulação fortalece a governança regional e permite enfrentar com mais eficácia os desafios complexos da gestão de resíduos.

Portanto, avançar rumo a um modelo sustentável de gestão dos rejeitos urbanos requer o equilíbrio entre dimensões ecológicas, sociais, econômicas e institucionais, condição essencial para a conservação ambiental e melhoria da qualidade de vida da população (Jacobi, 2003).

2.2. Aterros Sanitários

No Brasil, os aterros sanitários representam a principal forma legalmente reconhecida de disposição final de resíduos sólidos urbanos (RSU). Essas estruturas,

projetadas com base em critérios de engenharia sanitária, visam mitigar impactos ambientais e proteger a saúde pública, sendo referência internacional no controle de rejeitos urbanos (Tchobanoglous *et al.*, 2017; ABRELPE, 2024).

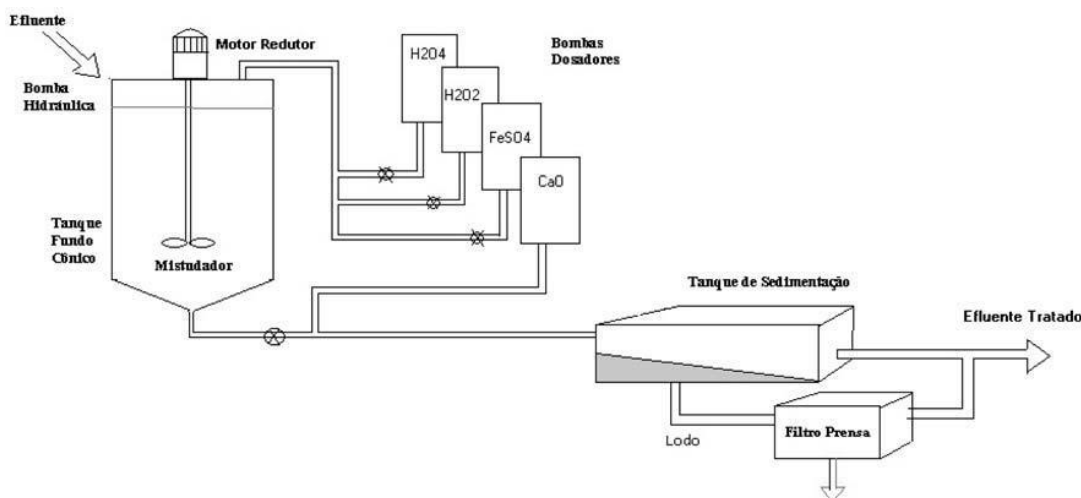
A operação desses aterros envolve a disposição em camadas compactadas e recobertas, favorecendo a estabilização da fração orgânica, contenção de odores e controle de vetores, elementos que asseguram seu desempenho sanitário (Oliveira; Santos, 2023). Do ponto de vista técnico, os aterros são organizados em células implantadas sobre barreiras geotécnicas formadas por argila compactada e geomembranas de polietileno de alta densidade (PEAD), que impedem a migração de contaminantes para o solo e aquíferos (Liu *et al.*, 2021).

Além das barreiras físicas, os sistemas hidráulicos de drenagem e coleta de lixiviado são essenciais para evitar a contaminação de corpos hídricos, exigindo tratamento especializado para esse efluente (Santos, A. *et al.*, 2021). A captação e o aproveitamento energético do biogás, rico em metano, também têm sido incorporados como estratégias de valorização energética e controle de emissões atmosféricas (Lima *et al.*, 2018).

Historicamente, o Brasil evoluiu de práticas como os lixões para aterros controlados e, mais recentemente, sanitários, impulsionado pela Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), instituída pela Lei nº 12.305/2010. Essa legislação reconheceu os aterros sanitários como única forma autorizada de disposição final, condicionando o acesso a recursos públicos à adoção de práticas sustentáveis (Brasil, 2010; Jacobi; Besen, 2011).

Apesar dos avanços, a efetivação da PNRS ainda enfrenta entraves como restrições orçamentárias, déficit de mão de obra qualificada e desarticulação entre políticas ambientais e urbanas (Oliveira; Santos, 2023; ABRELPE, 2024). Mesmo com o uso de tecnologias avançadas, os aterros seguem como fontes potenciais de impacto ambiental, destacando-se a emissão de GEE e a geração de lixiviado com alta carga poluente (Silva, V. *et al.*, 2021; Kumar *et al.*, 2021).

Em resposta, têm sido adotadas soluções como unidades de tratamento avançado de lixiviado e recuperação energética do biogás, em alinhamento aos princípios da sustentabilidade e da economia circular (Ghisellini *et al.*, 2018; Laurent *et al.*, 2014). Entre essas unidades, destacam-se os POAs (processo oxidativos avançados), como o Fenton, que combinam oxidação química, neutralização e separação sólido-líquido para reduzir DQO, cor e compostos recalcitrantes, conforme ilustrado na Figura 2.

Figura 2 - Esquema de unidade de tratamento avançado de lixiviado por Fenton

Fonte: Adaptado de Silva J., *et al.* (2021).

No entanto, persistem desigualdades regionais de infraestrutura e capacidade de gestão, refletidas na manutenção de depósitos irregulares em diversas localidades, o que evidencia os desafios à erradicação dos lixões (Brasil, 2020).

A Tabela 2 ilustra a distribuição da massa de resíduos sólidos dispostos em diferentes tipos de unidades de destinação final, discriminadas por macrorregião.

Tabela 2 - Massa de Resíduos recebidos por tipo de unidades de disposição final por macrorregião

Regiões	Aterros Sanitários (Dom+Pub)	Aterros Sanitários (Podas)	Lixão e Aterros Controlados (Dom+Pub)	Lixões e Aterros Controlados (Podas)	Total (t)
Centro-Oeste	$2,64 \times 10^6$	$1,11 \times 10^5$	$1,05 \times 10^6$	$4,25 \times 10^4$	$4,37 \times 10^6$
Nordeste	$6,97 \times 10^6$	$5,72 \times 10^5$	$4,7 \times 10^6$	$4,17 \times 10^5$	$1,26 \times 10^7$
Norte	$1,41 \times 10^6$	6×10^5	$1,97 \times 10^6$	$1,14 \times 10^5$	$3,56 \times 10^6$
Sudeste	$2,16 \times 10^7$	$7,66 \times 10^5$	$2,79 \times 10^6$	$1,12 \times 10^5$	$2,53 \times 10^7$
Sul	$5,26 \times 10^6$	$3,55 \times 10^5$	$3,89 \times 10^5$	$3,98 \times 10^3$	$6,01 \times 10^6$
Total	$3,79 \times 10^7$	$1,86 \times 10^6$	$1,14 \times 10^7$	$6,91 \times 10^5$	$5,19 \times 10^7$

Fonte: Adaptado de Brasil (2016).

Na Região Metropolitana do Recife (RMR), observa-se tanto avanços quanto desafios. A destinação de RSU ocorre majoritariamente em aterros localizados em municípios como Igarassu, Jaboatão dos Guararapes e Ipojuca. Essas unidades contam com impermeabilização, drenagem de percolado, captação de biogás e monitoramento ambiental, buscando alinhamento às melhores práticas de sustentabilidade (Pernambuco, 2023; Instituto Água e Saneamento, 2024). Na Figura 3, pode-se observar a localização dos aterros sanitários na RMR.

Figura 3 - Mapa da localização geográfica dos aterros da RMR
 *Atualizado em 01/09/2022.



Fonte: Adaptado de CPRH (2022a).

Contudo, a ausência de aterros em certos municípios obriga o transporte de resíduos para cidades vizinhas, o que aumenta custos e compromete a eficiência do sistema. Esse cenário também dificulta a universalização da coleta seletiva e do saneamento, especialmente em áreas de baixa renda (Guarda, 2024; Instituto Água e Saneamento, 2024).

A gestão dos RSU na capital pernambucana enfrenta desafios de natureza tecnológica, política e econômica. Embora haja domínio técnico para implantação e operação de aterros sanitários, a falta de integração na gestão e os custos operacionais ainda dificultam a consolidação de um sistema universalizado (Szigethy; Antenor, 2025). Nessa perspectiva, são fundamentais os investimentos contínuos e a articulação entre setor público e iniciativa privada, diante do aumento da geração per capita de resíduos na região (IPEA, 2025).

Além dos aspectos técnicos, os impactos socioambientais também se fazem presentes. Em Jaboatão dos Guararapes, a proximidade de residências com áreas de disposição de resíduos está associada a altas taxas de mortalidade infantil por doenças infecciosas, conflitos fundiários e degradação do rio Jaboatão. Esses fatores reforçam a necessidade de políticas integradas que considerem infraestrutura, inclusão social e saúde pública (Vilela, 2023; Mapa de Conflitos Fiocruz, 2023).

A Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável reforça a importância da prevenção, redução, reciclagem e reaproveitamento dos resíduos. Experiências internacionais demonstram que a adoção de políticas baseadas na hierarquia de resíduos e na economia circular reduz a dependência dos aterros, trazendo benefícios ambientais e sociais duradouros (Andreasi Bassi *et al.*, 2017; Szigethy; Antenor, 2025).

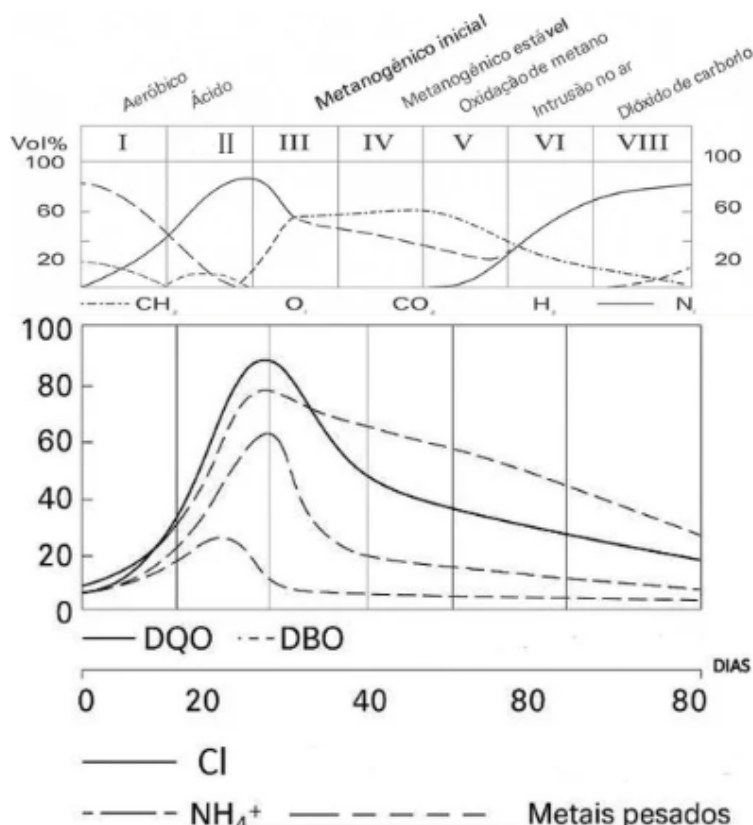
Por fim, estudos indicam que, além da infraestrutura física, a efetividade dos aterros sanitários na RMR depende de mecanismos de controle social, gestão transparente e participação ativa da sociedade civil. A criação de conselhos municipais, planos de resíduos e sistemas públicos de informação são instrumentos essenciais para o fortalecimento da governança e para assegurar a destinação ambientalmente adequada dos resíduos urbanos (Instituto Água e Saneamento, 2024).

2.3. Lixiviado

O chorume, ou lixiviado, é um fluido percolado altamente poluente resultante da decomposição da fração orgânica dos resíduos sólidos urbanos. Sua formação está vinculada à umidade dos resíduos, à atividade microbológica e às condições ambientais, apresentando composição variável ao longo do tempo e exigindo manejo especializado para conter seus impactos (Silva, A., 2021; Kjeldsen *et al.*, 2002).

Esse efluente escuro, de odor forte, possui elevadas concentrações de DQO, DBO, nitrogênio amoniacal, metais pesados, cloretos, compostos fenólicos, micropoluentes emergentes e sólidos dissolvidos totais, que desafiam os sistemas convencionais de tratamento (Renou *et al.*, 2008; Aziz *et al.*, 2018). O pH costuma variar entre ligeiramente ácido e neutro, enquanto a condutividade elétrica frequentemente supera 10.000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (Tchobanoglous *et al.*, 1993; Lins *et al.*, 2020).

A evolução do lixiviado acompanha os estágios da degradação anaeróbia no aterro, inicialmente dominada por processos acidogênicos, seguida da fase metanogênica. Durante esse ciclo, são produzidos metano, CO_2 e ácidos graxos voláteis, o que altera significativamente a composição do efluente (Christensen *et al.*, 2001; Robinson, 2007). Sua dinâmica de formação e composição desse efluente acompanha o envelhecimento da massa de resíduos, com variações físico-químicas e microbológicas ao longo do tempo, conforme ilustrado na Figura 4.

Figura 4 - Evolução temporal da composição do lixiviado e da produção de gases

Fonte: Adaptado de Kjeldsen *et al.* (2002).

Na Região Metropolitana do Recife (RMR), as características do lixiviado são influenciadas pelo clima tropical úmido, marcado por períodos de elevada pluviosidade, que favorecem a percolação da água através dos resíduos e aumentam o volume do efluente gerado, levando a predominância de resíduos orgânicos na composição dos RSU, contribuindo para elevadas concentrações de matéria orgânica dissolvida no lixiviado. A análise de aterros como Muribeca, Igarassu e Ipojuca aponta DQO entre 3.500 e 8.000 mg/L, nitrogênio amoniacal acima de 1.200 mg/L e presença relevante de metais pesados (Santos *et al.*, 2023; Ferreira *et al.*, 2019; CPRH, 2022b).

A geração do chorume aumenta expressivamente entre abril e julho, período de chuvas intensas, exigindo infraestrutura de drenagem dimensionada para absorver variações de vazão e carga poluente. Nessas condições, métodos tradicionais de tratamento como lagoas e processos físico-químicos tornam-se insuficientes (Pernambuco, 2020).

Em seguida, a Tabela 3 apresenta uma estimativa do volume anual de lixiviado gerado nos aterros sanitários da RMR nos últimos anos, calculada a partir dos dados oficiais de resíduos sólidos urbanos dispostos em aterros.

Tabela 3 - Estimativa do volume anual de lixiviado gerado nos aterros sanitários da RMR

Anos	RSU dispostos em aterros (ton/ano)	Valor estimado de lixiviados (m³/ano)
2018	1.180.000	354.000
2019	1.190.000	357.000
2020	1.201.290	360.387
2021	1.210.000	363.000
2022	1.220.000	366.000

Fonte: Adaptado de Souza *et al* (2023).

A osmose reversa, tecnologia de membranas amplamente utilizada, é eficiente na remoção de compostos nitrogenados, metais pesados e sólidos dissolvidos, parâmetros críticos no tratamento de lixiviados. No aterro de Ipojuca, sua aplicação reduziu significativamente essas cargas poluentes, permitindo que o efluente tratado atendesse a padrões mais rigorosos. Contudo, em períodos de alta pluviosidade, a vazão do lixiviado pode aumentar até 60%, exigindo ajustes operacionais para evitar sobrecarga do sistema (Vital Engenharia Ambiental, 2024).

Além da complexidade química, o impacto ambiental do chorume é ampliado por sua persistência após o encerramento das operações dos aterros, demandando estratégias de longo prazo de monitoramento e tratamento (Destro, 2020)

Tabela 4, resume os principais aspectos ambientais e impactos associados às diferentes etapas da gestão dos resíduos sólidos urbanos, incluindo a coleta, o transporte, a disposição e o tratamento do lixiviado.

Tabela 4 - Aspectos ambientais e impactos associados as etapas de gestão dos RSU

Processos	Aspectos Ambientais	Impactos Ambientais
Coleta e Transporte	Geração de resíduos inerentes do processo (bateria, pneu, óleo queimado, etc.)	Alteração da qualidade da água e do solo
Coleta e Transporte	Manipulação de materiais infectados	Risco a saúde
Coleta e Transporte	Emissão de material particulado	Alteração da qualidade do ar
Disposição	Geração de rejeito	Ocupação de aterros (uso e ocupação do solo)
Tratamento	Geração de lixiviado	Contaminação da água e do solo
Tratamento	Consumo de reagentes químicos	Redução da disponibilidade de recursos naturais
Tratamento	Consumo de água	Redução da disponibilidade de recursos naturais

Fonte: Adaptado de Gomes *et al.* (2015).

A gestão eficiente do lixiviado, especialmente em regiões com variabilidade pluviométrica como a RMR, requer políticas públicas integradas, monitoramento sistemático e tecnologias de tratamento avançado, fundamentais para mitigar riscos ambientais e garantir a segurança hídrica e sanitária da população (Aziz *et al.*, 2018; Wu *et al.*, 2020).

2.4. Tecnologias de Tratamento do Lixiviado

O tratamento do lixiviado de aterros sanitários representa um dos maiores desafios para a sustentabilidade ambiental dos sistemas de disposição final de resíduos sólidos urbanos, devido à sua elevada complexidade físico-química e toxicológica (Foo; Hameed, 2009; Naveen *et al.*, 2021). A presença de altas concentrações de matéria orgânica, metais pesados, compostos tóxicos e micropoluentes emergentes exige o desenvolvimento e a aplicação de tecnologias robustas, eficientes e adaptáveis às especificidades de cada unidade de aterro (Renou *et al.*, 2008).

As tecnologias de tratamento do lixiviado podem ser agrupadas em quatro categorias principais: físicas, químicas, biológicas e híbridas. Os processos físico-químicos, como a coagulação-floculação, filtração direta e adsorção em carvão ativado, têm se mostrado eficazes na remoção de sólidos suspensos, turbidez, cor e metais, sendo especialmente relevantes para efluentes com baixa biodegradabilidade ou alta recalcitrância (Castilhos Junior *et al.*, 2020; Rohers, 2020).

Por sua vez, os processos biológicos apresentam boa eficiência na remoção de matéria orgânica biodegradável e compostos nitrogenados, sendo mais indicados para lixiviados jovens e com menor toxicidade (Silva *et al.*, 2021; Oliveira *et al.*, 2022). Em muitos casos, a combinação de diferentes tecnologias, formando sistemas híbridos, é necessária para garantir o atendimento aos padrões ambientais de lançamento.

No entanto, a crescente recalcitrância observada em lixiviados de aterros mais antigos demanda processos mais avançados, como os métodos oxidativos (ozonização, peróxido de hidrogênio, Fenton e Foto-Fenton), que promovem a degradação de compostos orgânicos refratários e micropoluentes resistentes ao tratamento convencional (Mantzavinos; Kassinos, 2003; Rodriguez-Narvaez *et al.*, 2017).

Paralelamente, os processos de separação por membranas, como microfiltração, ultrafiltração, nanofiltração e osmose reversa, têm se destacado pela elevada eficiência na

remoção de sólidos dissolvidos, compostos inorgânicos e matéria orgânica não-biodegradável, permitindo a obtenção de efluentes compatíveis com os limites ambientais mais rigorosos (Aziz *et al.*, 2018).

Diante da variabilidade do lixiviado e das limitações de cada tecnologia isolada, os sistemas híbridos, que integram etapas físico-químicas, biológicas e avançadas, têm ganhado destaque por ampliar a eficiência e a estabilidade do tratamento. Destacam-se os reatores com membranas (MBR) e as combinações com processos oxidativos, que oferecem respostas eficazes aos desafios ambientais dos aterros sanitários (Aziz *et al.*, 2021).

Na região em estudo, a busca por soluções eficientes para o tratamento do lixiviado tem levado à adoção de diferentes rotas tecnológicas, adaptadas às características locais dos aterros. O tratamento biológico, especialmente por meio de lagoas de estabilização, foi amplamente utilizado devido à sua simplicidade e viabilidade econômica, e apresentou bons resultados na remoção de matéria orgânica facilmente degradável. Contudo, sua eficiência é limitada diante da presença de compostos recalcitrantes e metais pesados, especialmente em lixiviados provenientes de aterros com maior tempo de operação (Lange; Amaral, 2020).

Lagoas de estabilização do CTR Candeias em Jaboatão dos Guararapes, podem ser visualizadas na Figura 5.

Figura 5 - Lagoas de estabilização para tratamento do chorume no CTR Candeias



Fonte: Pernambuco (2018).

Outra alternativa recorrente é o co-tratamento do lixiviado em estações de tratamento de esgoto, aproveitando a infraestrutura já existente e otimizando custos operacionais.

Apesar das vantagens econômicas, essa estratégia pode ser impactada negativamente pela presença de substâncias tóxicas e pela baixa biodegradabilidade do lixiviado, fatores que podem comprometer a eficiência dos processos biológicos convencionais das estações de tratamento de esgoto (ETEs) e exigir monitoramento rigoroso (Çeçen; Aktaş, 2004).

Além disso, processos físico-químicos como coagulação, floculação e adsorção têm sido empregados como etapas complementares, visando a remoção de sólidos, metais e compostos orgânicos persistentes. A adsorção em materiais alternativos, como zeólitas e argilas modificadas, tem se mostrado promissora, embora desafios relacionados à regeneração e ao custo dos materiais ainda persistam (Silva *et al.*, 2020).

No campo das inovações, destacam-se a aplicação experimental de barreiras reativas permeáveis e técnicas de fitorremediação, que vêm sendo estudadas como alternativas para o polimento final do lixiviado, com resultados positivos na retenção de contaminantes específicos. Por fim, a evaporação natural foi testada em escala piloto, demonstrando potencial para redução de volume, mas sua aplicação é restrita pelas condições climáticas da região, caracterizada por alta precipitação (Santos, M. *et al.*, 2021).

Por fim, a tendência de integração de processos físico-químicos e biológicos, formando sistemas híbridos, tem se mostrado eficaz para tratar compostos recalcitrantes e reduzir a toxicidade residual. Experiências em grandes centros urbanos evidenciam o potencial de integração de múltiplas etapas de tratamento para aumentar a eficiência global. Isso representa uma perspectiva interessante para adaptação futura na área metropolitana da capital pernambucana (Cavalcante, 2014).

2.4.1. Processos Físico-Químicos e Biológicos

Dando continuidade às abordagens tecnológicas para o tratamento de lixiviados, destacam-se as categorias físicas, químicas, biológicas e híbridas, consolidadas e amplamente empregadas conforme o perfil do efluente e o estágio de operação do aterro. Métodos físico-químicos, como adsorção com carvão ativado e processos com membranas, apresentam elevada eficácia na remoção de carga orgânica, amônia e metais, especialmente em lixiviados de baixa biodegradabilidade. Já os processos biológicos, incluindo reatores anaeróbicos e sistemas de membranas biológicas (MBR), são mais indicados para a remoção de matéria orgânica e nitrogênio, sobretudo em lixiviados mais maduros (Kamal *et al.*, 2022; Xiang *et al.*, 2025).

Os tratamentos biológicos, como reatores anaeróbios do tipo UASB (*Upflow Anaerobic Sludge Blanket*) e sistemas aeróbios de lodos ativados, são especialmente eficientes para

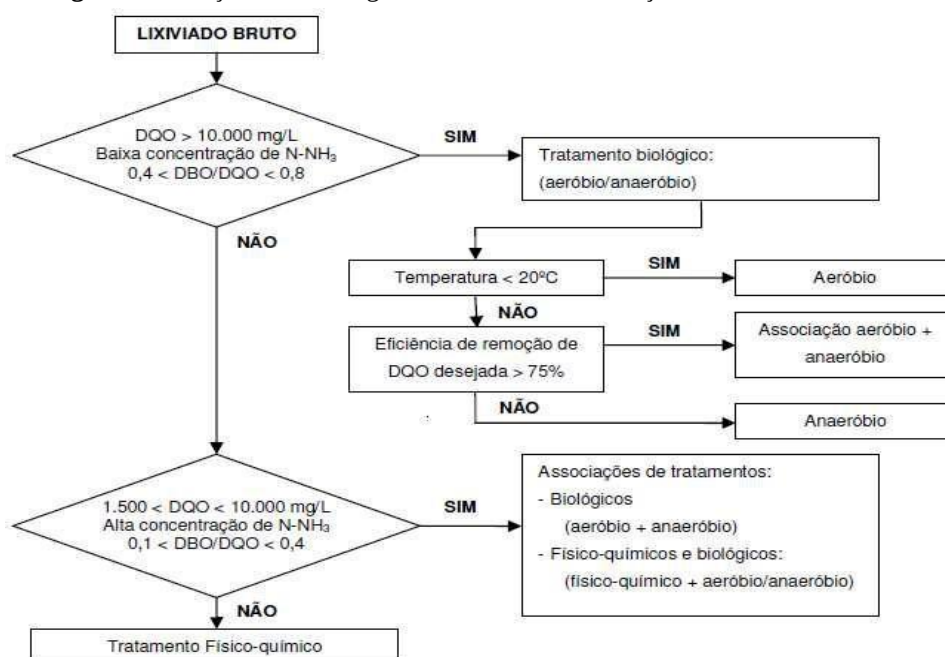
lixiviados jovens, ricos em matéria orgânica biodegradável, promovendo significativa redução da carga poluente e, em alguns casos, geração de biogás (Feng *et al.*, 2007; Wiszniewski *et al.*, 2006). No entanto, sua eficiência diminui diante de lixiviados mais maduros, com alta concentração de compostos recalcitrantes e baixa biodegradabilidade.

Já os processos físico-químicos, como coagulação-floculação, sedimentação, adsorção em carvão ativado e troca iônica, são fundamentais para tratar lixiviados envelhecidos ou com elevada presença de metais e de compostos orgânicos persistentes (Amokrane; Comel; Veron, 1997; Foo; Hameed, 2009; Fu; Wang, 2011). Apesar de eficientes, essas técnicas podem apresentar custos operacionais elevados, necessidade de regeneração de materiais e geração de resíduos secundários, limitando sua aplicação em larga escala, especialmente em contextos de recursos restritos.

Diante da variabilidade do lixiviado ao longo do tempo e das limitações inerentes a cada tecnologia isolada, a combinação de métodos – os chamados sistemas híbridos – tem sido adotada para otimizar o desempenho global do tratamento (Aziz *et al.*, 2021; Renou *et al.*, 2008). Ainda assim, a crescente complexidade dos lixiviados, especialmente em regiões como a área do estudo, demanda alternativas capazes de garantir maior eficiência e estabilidade operacional.

A Figura 6 ilustra a importância da escolha do tratamento adequado. Essa análise reforça que a caracterização prévia do fluido percolado é essencial para o sucesso da estratégia de tratamento adotada.

Figura 6 - Seleção de tecnologias de tratamento em função da característica do lixiviado



Fonte: Moravia (2010).

2.4.2. Processos Oxidativos Avançados

Como complemento às técnicas físico-químicas e biológicas convencionais, os POAs têm se destacado como alternativas eficazes para o tratamento de efluentes com baixa biodegradabilidade, especialmente em função da geração de espécies reativas de oxigênio, como o radical hidroxila ($\bullet\text{OH}$), capazes de degradar compostos orgânicos recalcitrantes, incluindo fármacos, pesticidas e corantes (Mantzavinos; Kassinos, 2003; Iglesias *et al.*, 2019).

Entre as técnicas mais empregadas, destacam-se a ozonização, o uso isolado de peróxido de hidrogênio (H_2O_2), a combinação de radiação ultravioleta com peróxido ($\text{UV}/\text{H}_2\text{O}_2$), o processo Fenton e a fotocatalise heterogênea, que utiliza catalisadores como o dióxido de titânio (TiO_2). Essas abordagens são eficientes na remoção de cor, odor, demanda química de oxigênio (DQO), compostos fenólicos e diversos micropoluentes (Rodriguez-Narvaez *et al.*, 2017; Wang *et al.*, 2020).

A escolha do método oxidativo ideal depende da composição físico-química do lixiviado e dos objetivos do tratamento. O processo Fenton, por exemplo, é simples e eficiente na degradação de matéria orgânica, mas gera lodo com alto teor de ferro, exigindo manejo adequado (Deng; Englehardt, 2006). Já a ozonização é eficaz na remoção de compostos aromáticos e na descoloração, embora apresente custos operacionais mais elevados devido à necessidade de produção contínua de ozônio (Bila *et al.*, 2005).

Em geral, esses processos são utilizados como pós-tratamento, atuando como etapa de polimento após sistemas biológicos ou físico-químicos, contribuindo para a redução da toxicidade residual e o aperfeiçoamento da qualidade final do efluente (Aziz *et al.*, 2021; Rodriguez-Narvaez *et al.*, 2017).

A elevada complexidade do lixiviado demanda tecnologias de tratamento avançadas. Logo, os POAs têm se destacado pela capacidade de degradar poluentes orgânicos e inorgânicos, especialmente quando integrados a etapas convencionais, como lagoas de estabilização, e a processos físico-químicos. Sua aplicação como etapa de polimento mostra-se promissora para atender aos padrões ambientais mais exigentes, principalmente durante períodos de maior geração de lixiviado (Araújo; Antonelli, 2016; Corso; Scandelai; Tavares, 2015).

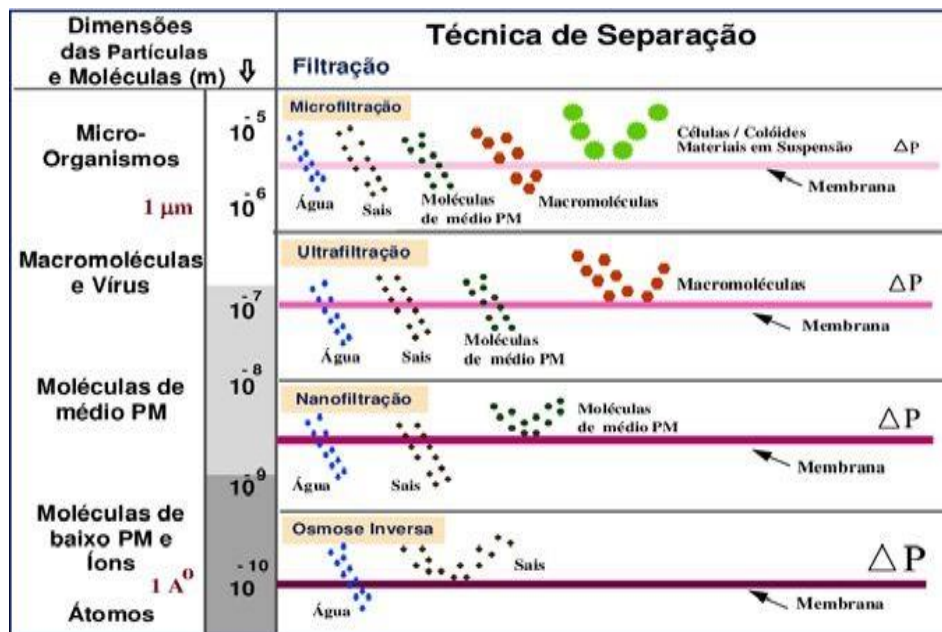
2.4.3. Tecnologias por Membranas

Especialmente após a aplicação de processos oxidativos, a separação por membranas destaca-se como alternativa eficiente para a remoção seletiva de poluentes presentes no lixiviado de aterros sanitários. Essa tecnologia utiliza barreiras semipermeáveis capazes de reter partículas maiores — como sólidos em suspensão, microrganismos e compostos orgânicos complexos — permitindo a passagem de água e solutos de baixa massa molecular (Baker, 2012).

Os princípios que regem esse processo remontam ao século XVIII, com os primeiros estudos sobre osmose conduzidos por Abbé Nollet, mas sua aplicação prática em escala industrial só se consolidou no século XX, impulsionada pela demanda por água potável em regiões afetadas pela Segunda Guerra Mundial (Habert; Amor; Jullien, 1997).

O avanço tecnológico permitiu o desenvolvimento de membranas mais seletivas e resistentes, classificadas conforme o material (orgânico ou inorgânico), a estrutura (simétrica ou assimétrica) e, principalmente, o tamanho dos poros, critério que define sua aplicação em técnicas específicas (Mulder, 1996; Judd, 2011; Madaeni *et al.*, 2015). A Figura 7 ilustra a faixa de retenção de partículas e compostos, discriminada segundo o tipo de membrana.

Figura 7 - Seletividade proporcionada pela variação do tamanho dos poros



Fonte: Adaptado de Habert *et al.* (1997).

A microfiltração (MF) utiliza membranas com poros entre 0,1 a 10 µm, sendo eficaz

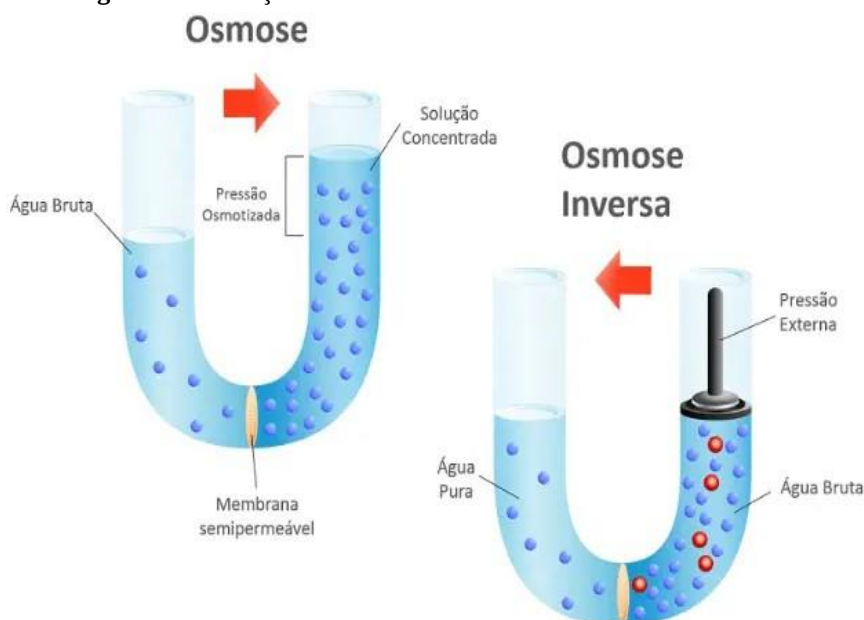
na remoção de partículas suspensas, colóides e algumas bactérias, podendo operar em modo direto (*in-line*) ou tangencial (*cross-flow*), este último favorecendo maior durabilidade da membrana (Bergamasco *et al.*, 2011).

A ultrafiltração (UF), com poros de aproximadamente 0,01 μm , retém vírus, proteínas e compostos orgânicos de alta massa molecular, sendo ideal como pré-tratamento para sistemas mais seletivos, como a osmose reversa (AWWA, 2008; Howe; Clark, 2002).

Já a nanofiltração (NF) representa uma solução intermediária entre a UF e a OR, operando com poros em torno de 1 nanômetro (nm) e sendo eficaz na retenção de íons divalentes, pesticidas, compostos fenólicos e frações orgânicas de menor massa (Shon *et al.*, 2013; Foo; Hameed, 2009).

A osmose reversa (OR) constitui o processo de maior seletividade, operando por meio da aplicação de uma pressão superior à pressão osmótica para forçar a passagem de água pura através de uma membrana semipermeável, retendo a maioria dos solutos, incluindo amônia, metais pesados, sais dissolvidos e micropoluentes orgânicos. conforme ilustrado na Figura 8. Apesar de sua alta eficiência, a OR requer pré-tratamento rigoroso do efluente para prevenir o *fouling* (acúmulo indesejado de materiais nas membranas) e maximizar a vida útil da membrana (Pérez-González *et al.*, 2012; Kurniawan *et al.*, 2006).

Figura 8 - Ilustração do funcionamento da osmose e osmose reversa



Fonte: Petrochem (2025).

3. METODOLOGIA

Este trabalho adotou a metodologia de revisão integrativa da literatura, com o objetivo de identificar, organizar e analisar dados físico-químicos de lixiviados de aterros sanitários (como DBO, pH, condutividade, metais, cor, entre outros), bem como avaliar a eficiência de diferentes tecnologias de tratamento. A pergunta norteadora da pesquisa foi: “Qual a melhor estratégia de tratamento de lixiviado para o aterro da Muribeca, considerando as tecnologias aplicadas no Brasil e suas implicações?”.

A revisão buscou reunir estudos sobre lixiviados brutos e tratados, provenientes de diferentes regiões do Brasil, a fim de discutir a viabilidade teórica de aplicação dessas tecnologias no contexto específico do aterro da Muribeca localizado na RMR.

A coleta de conteúdos foi realizada por meio da análise de fontes secundárias incluindo artigos científicos, dissertações, teses, relatórios técnicos, normas ambientais e documentos institucionais. Também foram consultados documentos oficiais de órgãos como o Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), o Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA), a Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA) e a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT).

Para assegurar que a revisão contemplasse estudos atuais e relevantes, foram definidos critérios específicos de inclusão e exclusão:

a) Critérios de inclusão:

- Estudos publicados entre 2011 e 2025;
- Estudos experimentais ou revisões sistemáticas sobre caracterização e tratamento de lixiviado de aterros, abrangendo métodos biológicos, físico-químicos, processos oxidativos avançados e tecnologias por membranas;
- Trabalhos que apresentem dados quantitativos;
- Estudos realizados no Brasil;
- Trabalhos que descrevam etapas de pré-tratamento e resultados da aplicação dos diferentes processos de tratamento de lixiviado.

b) Critérios de exclusão:

- Trabalhos sem dados quantitativos relevantes.

- Estudos que não abordaram processos de tratamento de lixiviado ou não apresentem discussão sobre sua viabilidade.
- Publicações sem acesso ao texto completo disponível na íntegra.

Com base nesses critérios, os estudos identificados passaram por uma triagem e foram agrupados de acordo com os métodos empregados e os tipos de lixiviados avaliados. Em seguida, os trabalhos selecionados foram organizados segundo a técnica de degradação utilizada, sendo distribuídos nos seguintes grupos:

- Emprego de processos variados de tratamento (biológico, coagulação/floculação, POAs, etc.).
- Aplicação da tecnologia baseadas em membranas (osmose reversa, ultrafiltração, nanofiltração e microfiltração).

Para viabilizar uma comparação adequada entre os estudos, foram coletados os seguintes parâmetros das pesquisas selecionadas:

- Dados físico-químicos antes e após diferentes tratamentos;
- Padrões e fatores que influenciam a composição do lixiviado;
- Eficiência de remoção de contaminantes (%);
- Influência do pH e sua interferência na eficiência dos processos de tratamento.

Com essa abordagem, busca-se compreender o potencial dos diferentes processos de tratamento de lixiviados como alternativas viáveis e sustentáveis, contribuindo para o avanço do conhecimento técnico e para o incentivo à adoção de tecnologias inovadoras e integradas no setor de gestão de resíduos sólidos urbanos.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo, são apresentados e discutidos os resultados obtidos a partir da análise crítica dos experimentos descritos nos estudos selecionados, os quais serviram de base para o desenvolvimento desta pesquisa. Esses artigos, contemplam diferentes abordagens e tecnologias aplicadas ao tratamento de lixiviado de aterros sanitários, com ênfase na eficiência dos processos, nas condições operacionais e nos indicadores de desempenho ambiental.

A escolha metodológica pela análise comparativa de literatura permitiu reunir evidências relevantes sobre a aplicação de tecnologias avançadas. Ao examinar as variáveis experimentais presentes nos artigos — como DQO, DBO, nitrogênio amoniacal, pH e condutividade — buscou-se compreender o comportamento dos sistemas de tratamento diante da complexidade do lixiviado e das diferentes estratégias de pré e pós-tratamento empregadas.

4.1. Caracterização do Lixiviado Presente na Literatura

A análise detalhada desse lixiviado é essencial para definir as melhores estratégias de tratamento e compreender os possíveis impactos ambientais decorrentes do seu descarte. Com o passar dos anos de operação do aterro, a composição química tende a se tornar mais estável, embora ainda apresente grande diversidade e complexidade, refletindo as diferentes características dos resíduos depositados e das condições locais.

Mesmo com o tempo, é comum que os efluentes gerados em aterros não atendam integralmente aos padrões ambientais exigidos para o lançamento em corpos d'água, o que pode causar desequilíbrios ecológicos e prejudicar o meio ambiente.

Por causa disso, nas estações de tratamento, são aplicados diversos processos, como métodos físico-químicos, biológicos, POAs, membranas e outras tecnologias complementares. Apesar dessas alternativas, muitas vezes o material tratado ainda apresenta concentrações significativas de poluentes, principalmente matéria orgânica e nitrogênio amoniacal, reforçando a necessidade de um controle rigoroso antes do descarte final.

Dessa forma, como critérios de amostragem foram analisados dados de amostras de lixiviado bruto e tratado, coletadas em diferentes etapas dos processos de tratamento e em pontos estratégicos dos sistemas, seguindo protocolos padronizados para garantir a representatividade e a comparabilidade dos resultados, considerando diversos parâmetros e os

métodos empregados para a depuração, com o objetivo de avaliar a eficiência das tecnologias aplicadas.

4.1.1. Lixiviados Brutos

A seguir, são expostas as informações relativas à localização dos estudos analisados, bem como a identificação dos respectivos períodos de operação e os padrões de resíduos recebidos. Esses dados encontram-se organizados e detalhados na Tabela 5, proporcionando uma visão geral dos contextos geográficos e demográficos que fundamentam as análises posteriores.

Tabela 5 - Identificação dos aterros estudados: localização e período de operação

Autores	Aterros e localização	Operação
Gewehr (2012)	Minas do Leão – Rio Grande do Sul	2001 - Atualmente
Pertile (2013)	Rincão das Flores – Rio Grande do Sul	2010 - 2020
Almeida (2016)	Seropédica – Rio de Janeiro	2011 - Atualmente
Leite (2016)	Muribeca - Pernambuco	1985 - 2009
Recio (2019)	Campo Mourão – Paraná	2019 - Atualmente
Pereira (2022)	Marituba - Pará	2015 - Atualmente

Fonte: Adaptado de Gewehr (2012), Pertile (2013), Almeida (2016), Recio (2019), Leite (2016), Pereira (2022).

Com a realização da coleta do lixiviado bruto constitui-se etapa essencial para a obtenção de informações não apenas sobre os padrões dos resíduos presentes, mas também sobre diversos outros parâmetros que desempenham papel significativo na análise e na escolha do método de tratamento mais apropriado.

A Tabela 6 apresenta as médias dos principais resultados obtidos por diferentes autores a partir da realização dessas coletas.

Tabela 6 - Caracterização dos lixiviados brutos

Parâmetro	Muribeca	Minas do Leão	Rincão das Flores	Seropédica	Marituba	Campo Mourão
DQO (mg O ₂ . L ⁻¹)	1225,5	4786	3175	4137	9845	1866
DBO (mg O ₂ . L ⁻¹)	150	1617	1418	290	-	675
DBO/DQO	0,12	0,3	0,45	0,07	-	0,4
Cor (Hazen)	1810	10353	-	-	5083	2460
pH	8,4	8,3	-	7,84	7,66	8,51
Turbidez (NTU)	66,2	1093	138	115	1714	286,5
Nitrogênio Amoniacal (mg. L ⁻¹)	735	1441	737	1236	6479	1232
Condutividade (mS.cm ⁻¹)	-	26,2	-	17,51	-	13,8
Sólidos Totais (mg. L ⁻¹)	5200	15911	7724	-	-	750,8
Sólidos Suspensos Totais (mg. L ⁻¹)	94,5	1653	54	-	-	-

Fonte: Adaptado de Gewehr (2012), Pertile (2013), Almeida (2016), Recio (2019), Leite (2016), Pereira (2022).

A caracterização dos lixiviados brutos provenientes de diferentes aterros sanitários evidencia que sua composição não depende unicamente da idade cronológica do aterro, mas sim de uma combinação de fatores, como o tipo de resíduo disposto, as condições climáticas da região (em especial a pluviosidade) e as práticas operacionais adotadas.

Todos os aterros analisados recebem predominantemente RSU, classificados como não perigosos, e ainda assim geram lixiviados com elevada carga orgânica, presença expressiva de compostos nitrogenados e variações nos sólidos suspensos e dissolvidos, além de metais, cor e turbidez.

A idade do aterro influencia diretamente na biodegradabilidade da matéria orgânica presente no lixiviado, sendo essa característica melhor avaliada pela razão DBO/DQO. Aterros mais jovens, como Campo Mourão (6 anos), apresentam razão DBO/DQO de 0,4, indicando predominância de compostos orgânicos facilmente degradáveis, típicos da fase acidogênica. Já o aterro de Rincão das Flores, apesar de já encerrado (10 anos), apresenta uma razão DBO/DQO ainda mais elevada, de 0,45, sugerindo que parte significativa da matéria orgânica permanece biodegradável.

Por outro lado, aterros mais antigos ou desativados, como Muribeca (24 anos, desativado desde 2009), exibem razão DBO/DQO de 0,12, refletindo baixa

biodegradabilidade e predominância de substâncias recalcitrantes, como as húmicas, características da fase metanogênica estabilizada. Dessa forma, a análise da razão DBO/DQO, e não apenas dos valores isolados de DBO ou DQO, é fundamental para compreender o estágio de degradação dos resíduos e a complexidade do tratamento do lixiviado.

No entanto, a idade do lixiviado nem sempre acompanha a idade do aterro, como observado em Campo Mourão, cujo lixiviado já apresenta características de estabilização precoce — possivelmente decorrente de fatores como alta umidade interna, natureza dos resíduos dispostos e rápida exclusão de oxigênio.

A pluviosidade também exerce influência significativa sobre a composição do lixiviado. Segundo Leite (2016), no aterro da Muribeca, a amostragem foi realizada durante o período chuvoso, o que resultou em um lixiviado mais diluído. Dessa forma, os valores observados de DQO (1225,5 mg/L), DBO (150 mg/L), turbidez (66,2 NTU) e sólidos suspensos totais (94,5 mg/L) já refletem o efeito da diluição promovida pelas chuvas, evidenciando concentrações menores desses parâmetros em comparação ao que seria esperado em períodos de estiagem.

Segundo Gewehr (2012) e Leite (2016), outro aspecto relevante é a persistência do nitrogênio amoniacal (NH_4^+), que se manteve elevado em todos os aterros, independentemente da idade, com valores entre 735 mg/L (Muribeca) e 1441 mg/L (Minas do Leão), confirmando a necessidade de tecnologias específicas para sua remoção.

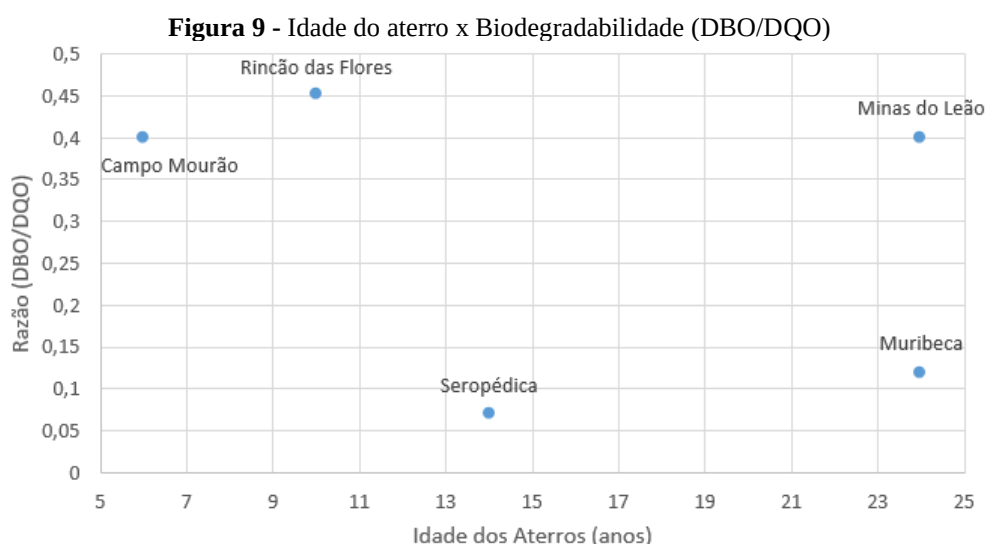
No aterro de Seropédica, a recirculação do lixiviado, prática que consiste na coleta e reintrodução do efluente no corpo de resíduos por meio de sistemas de irrigação ou poços, visa acelerar a degradação da matéria orgânica e otimizar a estabilização do aterro. No entanto, esse procedimento também pode contribuir para o aumento dos teores de compostos recalcitrantes, uma vez que favorece a solubilização e mobilização dessas substâncias, além de estimular reações químicas e biológicas que podem gerar novos compostos de difícil degradação.

Os compostos recalcitrantes presentes no lixiviado incluem, por exemplo, ácidos húmicos, substâncias aromáticas, metais pesados, hidrocarbonetos policíclicos aromáticos (HPA's), substâncias xenobióticas e nitrogênio amoniacal. Esses compostos são caracterizados por sua baixa biodegradabilidade e persistência no ambiente, tornando o tratamento do lixiviado mais complexo e exigindo processos mais avançados para sua remoção.

Então, observa-se que essa recirculação do lixiviado, embora traga benefícios operacionais ao promover a degradação da matéria orgânica e a estabilização do aterro,

pode impactar significativamente a composição do lixiviado, especialmente em relação ao aumento da concentração de compostos de difícil remoção, o que representa um desafio adicional para o tratamento e a disposição final adequada desse efluente.

Na Figura 9, é possível observar como a idade dos aterros se relaciona com a biodegradabilidade expressa em função da razão DBO/DQO.



Fonte: O autor (2025).

O gráfico que relaciona a idade dos aterros à biodegradabilidade dos lixiviados brutos evidencia uma tendência de redução da carga orgânica com o avanço da idade do aterro. Essa diminuição da DQO é esperada, já que aterros mais jovens tendem a gerar lixiviados com maior concentração de matéria orgânica biodegradável, enquanto aterros mais antigos apresentam lixiviados estabilizados, com predominância de compostos recalcitrantes.

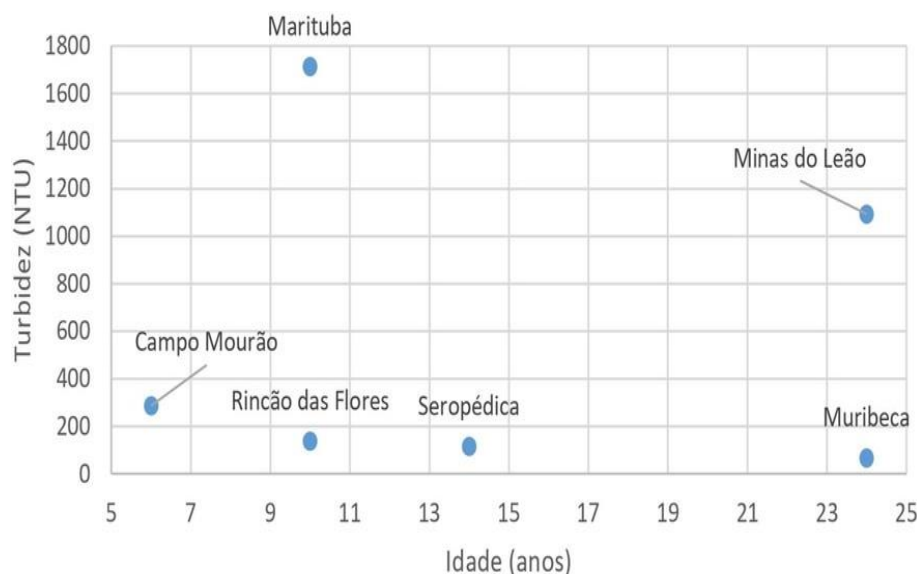
Como *outlier* negativo, destaca-se o aterro de Seropédica, que mesmo sendo relativamente jovem, apresentou baixa razão DBO/DQO ($<0,1$), indicando presença elevada de substâncias recalcitrantes, como ácidos húmicos e fúlvicos. Esse comportamento pode estar relacionado às características específicas dos resíduos dispostos no local.

Por outro lado, o aterro Rincão das Flores se destaca como *outlier* positivo, apresentando valores de biodegradabilidade (DBO/DQO) significativamente superiores aos demais. Esse resultado pode ser atribuído à elevada carga orgânica inicial e à baixa eficiência nos processos de pré-tratamento, sobretudo nas etapas biológica e físico-química, agravada pela presença de matéria coloidal e partículas que dificultam a remoção da DQO, comprometendo o desempenho dos sistemas de microfiltração.

Na Figura 10, também foi realizada uma análise de como a idade dos aterros afeta o

fator turbidez.

Figura 10 - Idade dos aterros x Turbidez



Fonte: O autor (2025).

O gráfico que relaciona a idade dos aterros à turbidez dos lixiviados brutos indica, em geral, uma tendência de redução da turbidez com o aumento da idade do aterro. Esse comportamento está associado à estabilização gradual da matéria orgânica e à diminuição da quantidade de sólidos em suspensão ao longo do tempo.

Entretanto, o aterro Minas do Leão se destaca como um *outlier*, apresentando turbidez elevada, embora seja um aterro relativamente antigo. Esse desvio pode estar relacionado às características físico-químicas específicas do lixiviado, como pH alcalino, alta concentração de matéria carbonácea e nitrogênio amoniacal, além de uma baixa razão DBO/DQO, que indica predominância de matéria orgânica recalcitrante — fatores que dificultam a remoção de partículas em processos biológicos convencionais.

Já o aterro de Marituba, embora mais jovem, apresentou a turbidez mais elevada entre todos, o que pode ser explicado pela alta carga orgânica inicial e pela presença expressiva de sólidos em suspensão, característica comum em lixiviados de aterros recém-operantes.

Esses dados corroboram a complexidade na definição do estágio de maturação do lixiviado e reforçam a importância de uma análise integrada dos múltiplos parâmetros que influenciam sua composição e tratabilidade.

4.1.2. Lixiviados Tratados

Após a análise e caracterização dos lixiviados brutos, procedeu-se à avaliação dos lixiviados tratados, incluindo a identificação e descrição dos processos empregados em cada método de tratamento, podendo ser observado na Tabela 7.

Tabela 7 - Identificação dos aterros estudados: idade e tratamentos utilizados

Aterros	Idade	Tratamentos
Minas do Leão	24 anos	Coagulação/Floculação + Lodo Ativado
Rincão das Flores	10 anos (Desativado)	Microfiltração + Osmose Reversa
Seropédica	14 anos	Ultrafiltração + Osmose Reversa
Muribeca	24 anos (Desativado)	Coagulação/Floculação + Foto-Fenton
Campo Mourão	6 anos	Ozonização
Marituba	10 anos	Microfiltração + Osmose Reversa

Fonte: Adaptado de Gewehr (2012), Pertile (2013), Almeida (2016), Recio (2019), Leite (2016), Pereira (2022).

A coleta do lixiviado tratado representa uma etapa fundamental para a obtenção de informações essenciais, não apenas para a identificação dos processos de tratamento aplicados, mas também para a análise dos diversos desafios envolvidos na caracterização do efluente pós-tratamento. Esses dados são determinantes para a seleção do método de tratamento mais eficiente e adequado ao objetivo desta pesquisa, sendo a aplicação no aterro da Muribeca.

Na Tabela 8, são apresentadas as médias dos principais resultados obtidos por diferentes autores, considerando as etapas de tratamento empregadas.

Tabela 8 - Caracterização dos lixiviados tratados

Parâmetro	Muribeca	Minas do Leão	Rincão das Flores	Seropédica	Marituba	Campo Mourão
DQO (mg O ₂ . L ⁻¹)	109,8	3000	529	877	28,8	566,9
DBO (mg O ₂ . L ⁻¹)	35	453	64	-	-	495,5
DBO/DQO	0,32	0,15	0,12	-	-	0,9
Cor (Hazen)	280	10738	-	-	245,3	227,5
pH	7	7,4	-	7,4	7,5	8,5
Turbidez (NTU)	18,4	756	35	3,7	198,9	310,4
Nitrogênio Amoniacal (mg. L ⁻¹)	653	589	-	332	146,4	310,4
Condutividade (mS.cm ⁻¹)	-	16,1	-	4,1	-	10
Sólidos Totais (mg. L ⁻¹)	-	5947	-	-	-	1363,6
Sólidos Suspensos Totais (mg. L ⁻¹)	-	256	-	-	-	-

Fonte: Adaptado de Gewehr (2012), Pertile (2013), Almeida (2016), Recio (2019), Leite (2016), Pereira (2022).

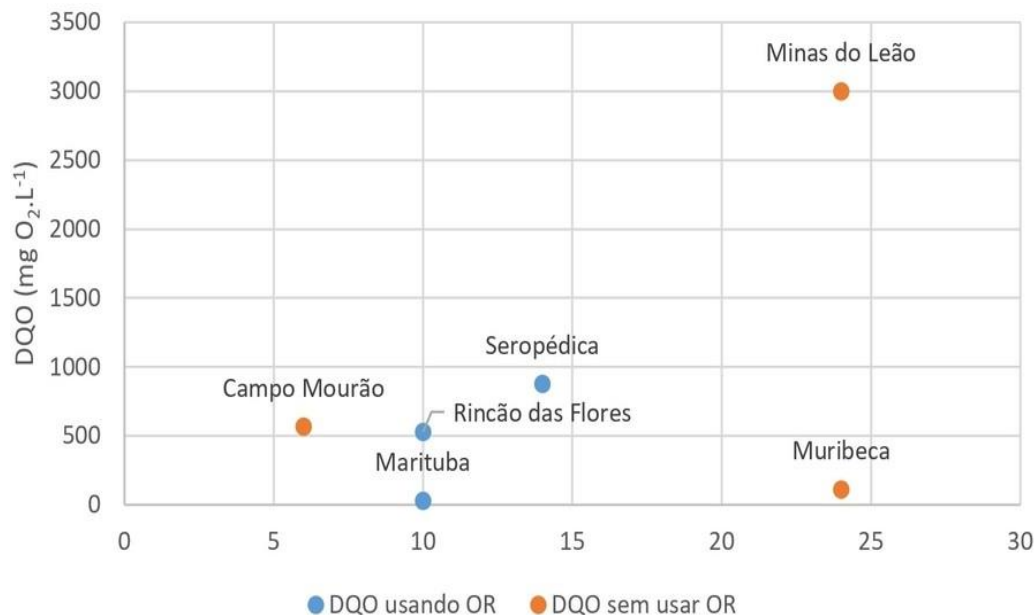
A caracterização dos lixiviados tratados provenientes de diferentes aterros sanitários evidencia a influência significativa dos processos de tratamento na qualidade final do efluente, refletida na redução da carga orgânica, sólidos suspensos e compostos nitrogenados. A osmose reversa destaca-se como a tecnologia que proporciona os melhores resultados na remoção desses contaminantes.

Independentemente da idade do aterro, os lixiviados brutos apresentam elevada carga orgânica, expressa por altos valores de DQO e DBO, além de significativa concentração de nitrogênio amoniacal e sólidos totais, neste estudo, processos convencionais, como coagulação/floculação, ozonização e Foto-Fenton, promovem reduções relevantes em turbidez, cor e sólidos suspensos, mas mantêm concentrações relativamente elevadas de DQO, DBO e nitrogênio amoniacal. A exemplo disso, segundo Gewehr (2012), o aterro de Minas do Leão, que utiliza coagulação/floculação associada a lodo ativado, apresenta DQO residual em torno de 3000 mg/L e nitrogênio amoniacal próximo de 589 mg/L, indicando a persistência de matéria orgânica recalcitrante.

Segundo Pertile (2013), Almeida (2016), e Pereira (2022), aterros que aplicam a OR, como os de Rincão das Flores, Seropédica e Marituba, apresentam reduções expressivas desses parâmetros, com DQO residual variando entre 28,8 mg/L e 877 mg/L, e nitrogênio

amoniaco inferior a 332 mg/L, conforme mostrado na Figura 11.

Figura 11 - Comparação da DQO entre os aterros que usam OR e os que usam outros tipos de tratamentos



Fonte: O autor (2025).

A razão DBO/DQO também é mais favorável, indicando maior biodegradabilidade e menor presença de substâncias recalcitrantes, essenciais para a qualidade do efluente e viabilidade do descarte ou reúso. Além disso, ainda há promoção da redução substancial na turbidez e sólidos totais, parâmetros críticos para a operação eficiente de sistemas subsequentes e para minimizar impactos ambientais

Observando os resultados, tem-se que a combinação de coagulação/floculação com processos oxidativos avançados, como o Foto-Fenton, tem se mostrado a alternativa mais eficaz para a preparação do lixiviado. Essa associação reduz significativamente sólidos suspensos, turbidez, cor e matéria orgânica recalcitrante, além de degradar compostos tóxicos e substâncias húmicas que causam incrustações nas membranas.

4.2. Análise Estatística

Inicialmente, para a realização de uma análise estatística, procedeu-se à utilização da média, desvio padrão e variância para cada estudo analisado. Essa abordagem permite avaliar a confiabilidade dos dados, indicando se os processos foram consistentes ou se os

resultados apresentam alta variabilidade, conforme apresentado na Tabela 9.

Tabela 9 - Análise estatística aplicada aos lixiviados brutos e tratados

Parâmetro	Média (Brutos)	Desvio Padrão (Brutos)	Variância (Brutos)	Média (Tratados)	Desvio Padrão (Tratados)	Variância (Tratados)
DQO (mg O ₂ . L ⁻¹)	4172,4	3083,9	8,5x10 ⁶	851,9	1098	1,2x10 ⁶
DBO (mg O ₂ . L ⁻¹)	830	660,1	4,4x10 ⁵	261,9	246,2	6,1x10 ⁴
DBO/DQO	0,268	0,168	0,028	0,372	0,362	0,131
Cor (Hazen)	4926,5	3884,5	1,5x10 ⁷	2872,7	5243,6	2,7x10 ⁷
pH	8,2	0,371	0,137	7,55	0,568	0,323
Turbidez (NTU)	568,8	679,7	4,6x10 ⁵	196,5	285,9	8,2x10 ⁴
Nitrogênio Amoniacal (mg. L ⁻¹)	1976,7	2224,4	4,9x10 ⁵	406,2	210	4,4x10 ⁴
Condutividade (mS.cm ⁻¹)	19,2	6,36	40,5	10,1	6	36
Sólidos Totais (mg. L ⁻¹)	7396,5	6366,4	4,4x10 ⁷	3655,3	3240,9	1,1x10 ⁷
Sólidos Suspensos Totais (mg. L ⁻¹)	600,5	911,7	8,3x10 ⁵	-	-	-

Fonte: Adaptado de Gewehr (2012), Pertile (2013), Almeida (2016), Recio (2019), Leite (2016), Pereira (2022).

A aplicação de estatísticas descritivas, como média, desvio padrão e variância, aos parâmetros físico-químicos dos lixiviados brutos e tratados evidencia a complexidade envolvida no tratamento desse tipo de efluente.

Os lixiviados brutos apresentaram elevada dispersão dos dados, reflexo da variabilidade intrínseca dos resíduos sólidos urbanos, da idade dos aterros e das diferentes fases de decomposição.

Em contrapartida, os lixiviados tratados demonstraram maior uniformidade, com valores significativamente menores de desvio padrão e variância, indicando a eficácia dos métodos de tratamento empregados em reduzir a carga poluente e estabilizar os parâmetros. Essa análise permitiu não apenas quantificar a variabilidade, mas também avaliar a consistência dos processos aplicados, contribuindo para a seleção de tecnologias mais eficientes e economicamente viáveis para o tratamento de lixiviados.

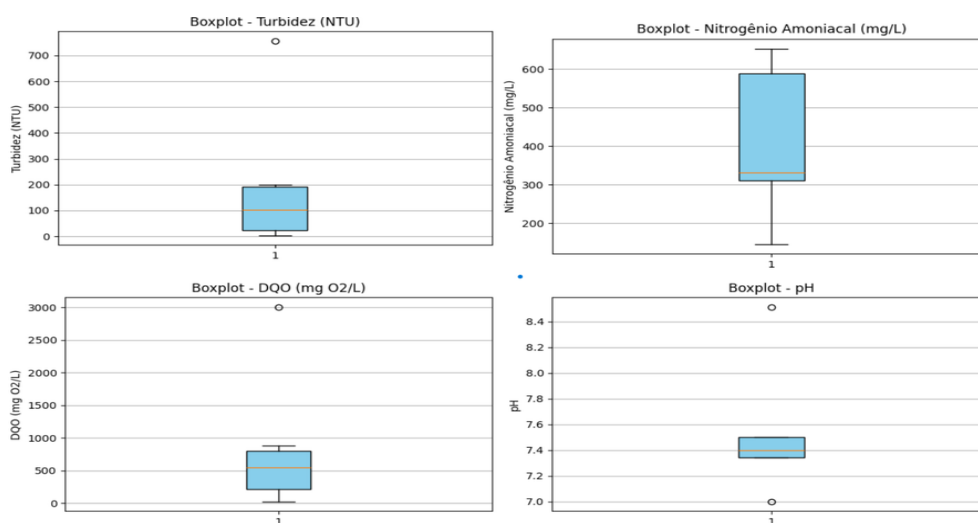
4.2.1. Box Plot

O *box plot* é um gráfico que representa a distribuição dos dados por meio de seus quartis, mediana e possíveis valores atípicos (*outliers*), utilizado neste trabalho para ilustrar visualmente a dispersão dos parâmetros analisados. Essa ferramenta gráfica corrobora os resultados obtidos na análise estatística anterior, confirmando as tendências centrais, a variabilidade e a presença de anomalias nos dados.

Para isso, foram selecionados os parâmetros principais que apresentaram maior representatividade e constância na maioria dos estudos analisados: DQO, pH, turbidez e nitrogênio amoniacal. A partir desses parâmetros, foi possível observar a dinâmica de obtenção dos dados e avaliar a confiabilidade dos resultados apresentados.

Os gráficos representados na Figura 12 ilustram a distribuição dos valores dos parâmetros turbidez, nitrogênio amoniacal, DQO e pH dos lixiviados tratados provenientes dos diferentes aterros analisados.

Figura 12 - Distribuição dos parâmetros físico-químicos dos lixiviados tratados via *Box Plot*



Fonte: O autor (2025).

Em turbidez, observa-se que a mediana está próxima de 100 NTU, indicando que metade dos aterros apresenta valores de turbidez tratados abaixo desse nível, sugerindo uma remoção significativa de sólidos suspensos pelos processos aplicados. A presença de um *outlier* elevado, em torno de 750 NTU corresponde ao lixiviado tratado do aterro de Minas do Leão, indicando que neste aterro a turbidez residual permanece alta, possivelmente devido a características específicas do lixiviado ou menor eficiência do tratamento.

Para o nitrogênio amoniacal, a análise revela uma mediana em torno de 320 mg/L,

com uma amplitude considerável entre o primeiro e o terceiro quartil, refletindo variações na concentração residual desse composto entre os aterros. O valor mínimo próximo de 146 mg/L está associado ao aterro de Marituba, enquanto o valor máximo, próximo de 653 mg/L, corresponde ao aterro da Muribeca. A amplitude dos valores indica que, embora alguns tratamentos consigam reduzir significativamente o nitrogênio amoniacal, outros ainda apresentam concentrações elevadas, o que pode impactar negativamente a qualidade do efluente e exigir processos complementares para sua remoção.

Referente à DQO, a mediana está em torno de 550 mg O₂/L, corroborando a análise anterior, e a caixa alongada evidencia a heterogeneidade dos resultados entre os aterros. O *outlier* destacado, com valor próximo a 3000 mg O₂/L pertence novamente ao aterro de Minas do Leão, reforçando a existência de lixiviados tratados com carga orgânica residual elevada, indicando a necessidade de tratamentos mais eficazes.

Por fim, para o pH mostra uma mediana próxima a 7,4, com valores concentrados em uma faixa estreita, indicando que os lixiviados tratados apresentam pH relativamente estável e próximo da neutralidade, condição favorável para a maioria dos processos de tratamento e para o descarte ambiental.

Porém, há presença de um *outlier* superior, com pH em torno de 8,51, está relacionado ao aterro de Campo Mourão, sugerindo variações pontuais que podem influenciar a eficiência dos processos de tratamento e a qualidade do efluente final.

Em conjunto, os resultados apresentados evidenciam a variabilidade dos parâmetros nos lixiviados tratados, reforçando a necessidade de processos de tratamento robustos e adaptáveis para garantir a qualidade do efluente final, minimizando impactos ambientais e possibilitando seu reúso ou descarte seguro.

4.3. Principais Limitações e Desafios

O tratamento de lixiviados de aterros sanitários apresenta desafios significativos devido à complexidade e variabilidade da composição do efluente, caracterizado por alta carga orgânica, presença de compostos recalcitrantes e elevadas concentrações de nitrogênio amoniacal. Esses obstáculos se manifestam de forma distinta em cada aterro analisado.

No aterro Rincão das Flores, os digestores anaeróbios foram eficazes na remoção de DQO e DBO, mas mostraram baixa eficiência na eliminação de amônia, possivelmente devido à formação de compostos inibidores da fase metanogênica. Isso evidencia a necessidade

de etapas complementares, como nitrificação e desnitrificação, para o adequado tratamento do nitrogênio.

Em Seropédica e Marituba, os sistemas de separação por membranas, como microfiltração e osmose reversa, apresentaram elevada capacidade de remoção de contaminantes. Contudo, sofreram com *fouling* e polarização por concentração, o que reduziu o fluxo de permeado. Para mitigar esses efeitos, foram adotadas estratégias operacionais específicas, como pré-tratamentos químicos e controle da velocidade de escoamento.

Nos aterros Minas do Leão e Muribeca, a baixa biodegradabilidade do lixiviado, típica de aterros mais antigos, comprometeu o desempenho dos tratamentos biológicos, exigindo o uso de processos físico-químicos, como coagulação/floculação e oxidação avançada. Esses métodos se mostraram eficientes na remoção de substâncias húmicas e fúlvicas, embora com custos operacionais elevados.

Além disso, a necessidade de pré-tratamentos para proteger os sistemas de membranas e garantir a estabilidade dos processos aumentou a complexidade operacional e os custos, limitando sua aplicação em larga escala.

A variabilidade temporal da composição do lixiviado, comum a todos os aterros, também dificulta a padronização dos tratamentos e exige ajustes frequentes. O tratamento de compostos recalcitrantes, como ácidos húmicos e fúlvicos, requer abordagens físico-químicas específicas, aumentando os desafios operacionais.

Na Tabela 10 podem-se observar os principais percalços enfrentados nos processos de tratamento dos lixiviados.

Tabela 10 - Principais limitações e desafios por aterro

Aterros	Limitações	Desafios
Rincão das Flores	Baixa remoção de amônia por digestores anaeróbios	Necessidade de processos complementares
Seropédica	<i>Fouling</i> e polarização em membranas	Manutenção da eficiência e pré-tratamentos químicos
Marituba	<i>Fouling</i> e polarização em membranas	Controle operacional para evitar declínio do fluxo
Minas do Leão	Redução da biodegradabilidade do lixiviado	Aplicação de processos físico-químicos com custos altos
Muribeca	Redução da biodegradabilidade e eficiência ecológica baixa	Adaptação constante devido a variabilidade do lixiviado
Campo Mourão	Presença de compostos recalcitrantes	Necessidade de tratamentos físico-químicos complementares

Fonte: Adaptado de Gewehr (2012), Pertile (2013), Almeida (2016), Recio (2019), Leite (2016), Pereira (2022).

Dessa forma, o equilíbrio entre eficiência ambiental e viabilidade econômica permanece um dos principais entraves, especialmente em tecnologias de alto desempenho como os processos por membranas e oxidação avançada, cujo custo operacional ainda é elevado para implementação em larga escala.

4.4. Conformidade e Reuso dos Efluentes

A Resolução do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) desempenha papel fundamental na regulamentação ambiental brasileira, estabelecendo normas e padrões para a proteção dos recursos hídricos e o controle da poluição.

No contexto do tratamento de lixiviados, a Resolução CONAMA nº 357/2005, que dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes para o lançamento de efluentes, e sua complementação pela Resolução nº 430/2011, são instrumentos essenciais para garantir que os efluentes tratados atendam aos critérios ambientais necessários para sua disposição ou reúso.

Essas resoluções classificam os corpos hídricos em categorias específicas — águas doces, salobras e salinas — e definem, para cada classe, os padrões de qualidade que os efluentes devem respeitar para não comprometer a integridade dos ecossistemas aquáticos, conforme apresentado na Tabela 11.

Dessa forma, as resoluções CONAMA nº 357/2005 e nº 430/2011 estabelecem a classificação dos corpos hídricos brasileiros em categorias — águas doces, salobras e salinas — e, para cada classe, definem os padrões de qualidade que os efluentes devem obrigatoriamente atender antes do lançamento. Esses padrões, detalhados em tabelas específicas dessas resoluções, determinam limites máximos para parâmetros como DQO, nitrogênio amoniacal, turbidez, pH, entre outros, visando proteger a integridade dos ecossistemas aquáticos. No presente trabalho, esses critérios estão sintetizados na Tabela 11, que apresenta a classificação dos corpos receptores conforme a legislação vigente.

Tabela 11 - Classificação dos corpos receptores.

Classe		Características
Águas Doces	Especial	Águas destinadas: a) ao abastecimento para consumo humano, com desinfecção; b) à preservação do equilíbrio natural das comunidades aquáticas; e, c) à preservação dos ambientes aquáticos em unidades de conservação de proteção integral.
	I	Águas que podem ser destinadas: a) ao abastecimento para consumo humano, após tratamento simplificado; b) à proteção das comunidades aquáticas; c) à recreação de contato primário, tais como natação, esqui aquático e mergulho, conforme Resolução CONAMA no 274, de 2000; d) à irrigação de hortaliças que são consumidas cruas e de frutas que se desenvolvam rentes ao solo e que sejam ingeridas cruas sem remoção de película; e e) à proteção das comunidades aquáticas em Terras Indígenas.
	II	águas que podem ser destinadas: a) ao abastecimento para consumo humano, após tratamento convencional; b) à proteção das comunidades aquáticas; c) à recreação de contato primário, tais como natação, esqui aquático e mergulho, conforme Resolução CONAMA no 274, de 2000; d) à irrigação de hortaliças, plantas frutíferas e de parques, jardins, campos de esporte e lazer, com os quais o público possa vir a ter contato direto; e e) à aquicultura e à atividade de pesca

	III	Águas que podem ser destinadas: a) ao abastecimento para consumo humano, após tratamento convencional ou avançado; b) à irrigação de culturas arbóreas, cerealíferas e forrageiras; c) à pesca amadora; d) à recreação de contato secundário; e e) à dessedentação de animais.
	IV	Águas que podem ser destinadas: a) à navegação; e b) à harmonia paisagística.
Águas Salinas	Especial	Águas destinadas: a) preservação dos ambientes aquáticos em unidades de conservação de proteção integral; e b) preservação do equilíbrio natural das comunidades aquáticas.
	I	Águas que podem ser destinadas: à recreação de contato primário, conforme Resolução CONAMA nº 274, de 2000; a) à proteção das comunidades aquáticas; e b) à aquicultura e à atividade de pesca.
	II	Águas que podem ser destinadas: a) à pesca amadora; e b) à recreação de contato secundário.
	III	Águas que podem ser destinadas: a) à navegação; e b) à harmonia paisagística.
Águas Salobras	Especial	Águas destinadas: a) à preservação dos ambientes aquáticos em unidades de conservação de proteção integral; e, b) preservação do equilíbrio natural das comunidades aquáticas.
	I	Águas que podem ser destinadas: a) à recreação de contato primário, conforme Resolução CONAMA nº 274, de 2000; b) à proteção das comunidades aquáticas; c) à aquicultura e à atividade de pesca; ao abastecimento para consumo humano após tratamento convencional ou avançado; e d) à irrigação de hortaliças que são consumidas cruas e de frutas que se desenvolvam rentes ao solo e que sejam ingeridas cruas sem remoção de película, e à irrigação de parques, jardins, campos de esporte e

		lazer, com os quais o público possa vir a ter contato direto.
	II	Águas que podem ser destinadas: a) à pesca amadora; e b) à recreação de contato secundário.
	III	Águas que podem ser destinadas: a) à navegação; e b) à harmonia paisagística.

Fonte: Adaptado de Brasil (2011).

A Resolução CONAMA nº 430/2011 proíbe a diluição do efluente com águas de melhor qualidade antes do lançamento, exigindo que o efluente seja adequadamente tratado para atender aos padrões estabelecidos. A Tabela 12 apresenta os principais parâmetros e seus limites máximos para o lançamento de efluentes em corpos hídricos.

Tabela 12 - Parâmetros para lançamento de efluentes

Parâmetros	Unidade	Limite Máximo
pH	-	5,0 a 9,0
Temperatura	°C	< 40
Materiais Sedimentáveis	mg/L	≤ 1
Óleos Minerais	mg/L	≤ 20
Óleos Vegetais e Gorduras Animais	mg/L	≤ 50
Sólidos Suspensos Totais	mg/L	≤ 100
Sulfeto	mg/L	≤ 1
Nitrogênio Amoniacal	mg/L	≤ 20 (pH ≤ 8); ≤ 5 (pH > 8)
Sulfato	mg/L	≤ 500
Demanda Química de Oxigênio (DQO)	mg/L	≤ 200
Oxigênio Dissolvido	mg/L	≥ 3
Turbidez	NTU	≤ 100

Fonte: Adaptado de Brasil (2011).

Essa regulamentação é fundamental para garantir que o lançamento dos lixiviados tratados provenientes de aterros sanitários em todo o território nacional ocorra de forma ambientalmente segura, protegendo os corpos receptores.

Além disso, a conformidade com os limites legais possibilita o reúso seguro desses

efluentes em diversas aplicações, como irrigação, recarga de aquíferos e processos industriais, promovendo a sustentabilidade e a proteção dos recursos hídricos.

4.4.1. Parâmetros de Lançamento

A partir da análise e organização dos parâmetros representativos dos lixiviados tratados, obteve-se a Tabela 13.

Tabela 13 - Parâmetros dos lixiviados tratados comparando com os padrões CONAMA nº 430/2011

Parâmetro	Muribeca	Minas do Leão	Rincão das Flores	Seropédica	Marituba	Campo Mourão	Resolução CONAMA 430/2011
pH	7	7,4	-	7,4	7,5	8,5	5 - 9
DQO (mg O ₂ . L ⁻¹)	109,8	3000	529	877	28,8	566,9	60% do valor bruto
Turbidez (NTU)	18,4	756	35	3,7	198,9	167	100
Nitrogênio Amoniacal (mg/L)	653	589	-	332	146,4	310,4	20

Fonte: Adaptado de Gewehr (2012), Pertile (2013), Almeida (2016), Leite (2016), Recio (2019), Pereira (2022).

A análise comparativa dos lixiviados tratados provenientes de diferentes aterros sanitários, à luz dos parâmetros estabelecidos pela Resolução CONAMA nº 430/2011, evidencia que a maioria dos efluentes não atende integralmente aos limites legais para lançamento em corpos hídricos.

Embora o pH dos lixiviados esteja dentro da faixa permitida, parâmetros críticos como DQO, turbidez e nitrogênio amoniacal frequentemente ultrapassam os valores máximos estabelecidos, indicando a persistência de carga orgânica e contaminantes que podem comprometer a qualidade dos corpos receptores.

Os lixiviados tratado pelos aterros de Marituba e Muribeca apresentam DQO dentro dos limites legais, porém ainda apresentam concentrações elevadas de nitrogênio amoniacal, fator que requerem atenção para evitar impactos ambientais.

A turbidez, indicador importante da presença de sólidos suspensos, também se mostra inadequada em diversos casos, como nos lixiviados de Minas do Leão, Marituba e Campo Mourão.

Seguidamente, apresenta-se a Tabela 14, que sintetiza os parâmetros dos lixiviados tratados analisados e a possível classificação dos corpos hídricos para recebimento dos

efluentes conforme critérios da resolução CONAMA nº 357/2005.

Tabela 14 - Categorias dos corpos d'água receptores indicados segundo a resolução CONAMA nº 357/2005

Autores - Aterros	Classe
Leite (2016) - Muribeca	Águas Doces – Classe II ou Inferior
Gewehr (2012) – Minas do Leão	Não Conforme
Pertile (2013) – Rincão das Flores	Não Conforme
Almeida (2016) - Seropédica	Não Conforme
Pereira (2022) - Marituba	Não Conforme
Recio (2019) – Campo Mourão	Não Conforme

Fonte: O autor (2025).

A análise dos lixiviados tratados, com base nos limites estabelecidos pela resolução, evidencia que, embora o pH esteja dentro da faixa permitida, a maioria dos efluentes ainda apresenta inconformidades em parâmetros críticos, como DQO, turbidez e nitrogênio amoniacal. Tais excedentes indicam a persistência de carga orgânica e contaminantes que comprometem o lançamento seguro em corpos hídricos.

Somente os estudos de Marituba e Muribeca atenderam aos limites de DQO. No entanto, ambos ainda apresentaram níveis elevados de nitrogênio amoniacal, apontando a necessidade de tratamentos adicionais.

A turbidez também se manteve acima dos padrões em diversas amostras, incluindo as de Minas do Leão, Marituba e Campo Mourão, mesmo com a aplicação de osmose reversa. Essa ineficiência pode estar associada à ausência de pré-tratamentos ou à limitação da OR na remoção de compostos recalcitrantes e amoniacais.

Para que os efluentes possam ser lançados em corpos hídricos compatíveis com a Classe I de águas doces que exigem $DQO \leq 200 \text{ mg/L}$ (idealmente $< 200 \text{ mg/L}$), turbidez $< 100 \text{ NTU}$ e nitrogênio amoniacal $< 20 \text{ mg/L}$ — são necessárias intervenções específicas em cada caso:

- Muribeca: requer apenas tratamento complementar para remoção de nitrogênio amoniacal, como nitrificação-desnitrificação.
- Minas do Leão e Campo Mourão: demandam ações integradas para remoção de matéria orgânica e turbidez, associando processos físico-químicos e avançados.
- Rincão das Flores e Seropédica: necessitam de maior eficiência na remoção de DQO e nitrogênio amoniacal, com possíveis melhorias em processos biológicos e oxidativos.
- Marituba: embora atenda ao limite de DQO, exige otimização na remoção de

turbidez e nitrogênio, com destaque para filtração e tratamento biológico.

Portanto, o uso da osmose reversa ou a aplicação exclusiva de outros processos convencionais, sem a devida integração e adequação entre as etapas, tendem a ser insuficientes para garantir a remoção eficiente de todos os poluentes presentes nos lixiviados. Especialmente no que se refere a compostos recalcitrantes e nitrogênio amoniacal, que exigem abordagens mais específicas e complementares.

4.5. Viabilidade dos Processos de Tratamento

A comparação dos processos de tratamento de lixiviados revela variações significativas em eficiência, custo e complexidade operacional, conforme apresentado na Tabela 15.

Tabela 15 - Avaliação dos processos de tratamento de lixiviado

Aterros	Remoção (DQO/DBO/ NAT/Turbidez)	Eficiência Global (%)	Custo Estimado Mensal (R\$)
Muribeca	78% / 87% / 34% / 90%	~75%	Moderado ~ (Média de R\$10.000)
Campo Mourão	66% / 70% / 46% / 80%	~70%	Moderado ~ (Média de R\$12.000)
Minas do Leão	53% / 60% / 25% / 74%	~60%	Moderado ~ (Média de R\$20.000)
Marituba	97% / 98% / 83,5%	~95%	Alto ~ (Média de R\$150.000)
Serópedica	75% / 79% / 65% / -	~73%	Muito Alto ~ (Média de R\$300.000)
Rincão das Flores	89% / 94% / 80% / -	~88%	Muito Alto ~ (Média de R\$330.000)

Fonte: Adaptado de Gewehr (2012), Pertile (2013), Almeida (2016), Leite (2016), Recio (2019), Pereira (2022).

Os custos apresentados referem-se à soma dos principais custos de implantação e operação dos sistemas de tratamento, conforme reportado nos estudos analisados e obtido por meio de uma pesquisa de mercado teórica, realizada para estimar e comparar os valores reais associados à implementação desses sistemas, especialmente em sistemas piloto ou de pequeno porte, conforme analisado nas dissertações consultadas.

Esses valores englobam despesas com aquisição de equipamentos, consumo de reagentes, energia elétrica, manutenção e descarte de resíduos, podendo variar de acordo com a escala do projeto, as características do lixiviado e as condições locais.

Os sistemas que combinam processos de membrana, como os de Marituba e Rincão

das Flores, apresentam as maiores eficiências globais (~95% e ~88%), porém com custos elevados (R\$150.000 a R\$330.000), refletindo a complexidade e o uso intensivo de reagentes e energia. Seropédica, que utiliza ultrafiltração seguida de osmose reversa, também demonstra alta eficiência (~73%) com um custo elevado (~R\$300.000).

Em contrapartida, processos baseados em coagulação/floculação combinados com tratamentos avançados, como o Foto-Fenton em Muribeca e a ozonização em Campo Mourão, apresentam eficiência moderada (~70-75%) e custos significativamente menores (~R\$10.000 a R\$12.000), opções mais viáveis para operações de menor escala ou com restrições orçamentárias. O processo de Minas do Leão, que utiliza coagulação/floculação com lodo ativado, apresenta a menor eficiência (~60%) e custos intermediários (~R\$20.000), indicando menor desempenho para o investimento.

Assim, a escolha do tratamento deve equilibrar eficiência e custo, considerando a complexidade dos processos e fatores técnicos. Sistemas com membranas combinadas são indicados para alta qualidade do efluente, enquanto tratamentos físico-químicos e oxidativos podem ser alternativas econômicas para contextos específicos, desde que complementados para garantir a conformidade ambiental.

4.5.1 Escolha Técnica do Processo de Tratamento para o Aterro da Muribeca

Com base na análise técnica, econômica e ambiental dos sistemas de tratamento avaliados, conclui-se que a aplicação exclusiva de tecnologias de membrana, embora reconhecida por sua elevada eficiência na remoção de contaminantes, não representa a alternativa mais adequada para o aterro da Muribeca, apresentado conforme a Tabela 16.

Tabela 16 - Considerações sobre a viabilidade de aplicação de tecnologias de membrana no aterro da Muribeca

Aspectos	Considerações
Qualidade do Lixiviado	Características compatíveis com tratamento por OR, porém com alta variabilidade e carga orgânica
Pré-Tratamento	Necessário para remoção de sólidos, matéria orgânica e compostos incrustantes, reduzindo <i>fouling</i>
Eficiência	Alta eficiência na remoção de DQO, nitrogênio amoniacal, metais e micropoluentes, garantindo permeado de qualidade
Custo	Elevado custo inicial e operacional, demandando otimização e possíveis parcerias para viabilização econômica
Operação e Manutenção	Requer mão de obra qualificada, monitoramento contínuo e manutenção especializada
Manejo do Concentrado	Desafio ambiental e operacional, exige soluções integradas para disposição segura ou reaproveitamento
Sustentabilidade	Potencial para redução de impactos ambientais e promoção de reuso, alinhado a PNRS

Fonte: O autor (2025).

O lixiviado tratado por Foto-Fenton apresenta pH e DQO dentro dos limites operacionais de tecnologias como a OR, como mostrado na Tabela 17. Entretanto, a presença de turbidez e nitrogênio amoniacal acima dos parâmetros recomendados exigiria pré-tratamentos rigorosos, elevando a complexidade do sistema.

Tabela 17 - Comparação entre os parâmetros do lixiviado tratado da Muribeca e os padrões exigidos para aplicação da OR

Parâmetro	Lixiviado Tratado	Padrão OR
pH	7	6,5 – 8,5
DQO (mg O ₂ . L ⁻¹)	109,8	<200 – 300
Nitrogênio Amoniacal (mg/L)	653	< 20
Turbidez (NTU)	18,4	< 5

Fonte: Adaptado de Leite (2016), Pérez-González *et al.* (2012), Kurniawan *et al.* (2016), Silva *et al.* (2022).

Além disso, a operação do sistema com osmose reversa demanda mão de obra especializada, o que, aliado ao alto custo de instalação e manutenção, compromete sua viabilidade em contextos de menor escala. Considerando que o aterro se encontra desativado e que a geração de lixiviado tende à redução contínua, a adoção de um sistema tão oneroso e tecnicamente exigente torna-se desproporcional à demanda atual.

Propõe-se como solução mais adequada, a combinação de tratamento físico-químico (coagulação/floculação), Foto-Fenton com a filtração por membranas de menor custo, como microfiltração ou ultrafiltração.

Essa alternativa apresenta eficiência suficiente para reduzir significativamente os principais parâmetros de poluição, como DQO, turbidez e sólidos suspensos, preparando o lixiviado para o descarte seguro ou tratamento final complementar. Logo, essa solução se mostra tecnicamente eficaz, economicamente proporcional à escala da demanda e ambientalmente segura, garantindo o cumprimento dos limites legais para o lançamento de efluentes e promovendo a sustentabilidade do sistema de tratamento.

Portanto, a proposta de realizar esta integração é mais equilibrada e adequada do que depender exclusivamente de algum dos processos isoladamente.

5. CONCLUSÃO

Diante da crescente preocupação com os impactos ambientais da disposição de resíduos sólidos urbanos, este trabalho avaliou, de forma teórica, o potencial dos tratamentos aplicáveis a lixiviados de aterros sanitários, com ênfase na comparação entre métodos biológicos, físico-químicos, oxidativos avançados e tecnologias por membranas, visando identificar a alternativa mais adequada para o aterro da Muribeca. Utilizando uma metodologia integrativa baseada em revisão bibliográfica e análise de estudos de caso nacionais, foram identificadas as principais limitações e possibilidades técnicas para a região.

A variabilidade e a degradabilidade dos lixiviados influenciam diretamente a escolha e a eficiência dos processos de tratamento. Lixiviados jovens respondem melhor a tratamentos biológicos, enquanto lixiviados mais maduros, com elevada carga de compostos recalcitrantes, demandam etapas físico-químicas, processos oxidativos avançados e tecnologias por membranas para remoção eficaz dos poluentes.

A análise comparativa dos processos indicou que, embora a osmose reversa apresente alta eficiência na remoção de contaminantes, sua aplicação direta no aterro da Muribeca é limitada pela complexidade operacional, altos custos e necessidade de pré-tratamentos rigorosos. O processo Foto-Fenton, aliado a tratamentos físico-químicos como coagulação/floculação e filtração por membranas de menor custo (microfiltração ou ultrafiltração), mostrou-se a alternativa mais equilibrada, tecnicamente eficaz, economicamente viável e ambientalmente segura para o contexto local. Essa configuração atende aos padrões da Resolução CONAMA 430/2011 sem exigir o investimento integral de um sistema como a osmose reversa.

Em resposta à questão norteadora — “Qual a melhor estratégia de tratamento de lixiviado para o aterro da Muribeca?” — conclui-se que a combinação de processos integrados, capazes de tratar seletivamente as frações biodegradáveis e recalcitrantes do lixiviado, otimiza recursos e contribui para a proteção dos corpos hídricos da região.

Portanto, a escolha do tratamento deve considerar a composição química do lixiviado, sua evolução temporal e as condições específicas do aterro. Na Região Metropolitana do Recife, sistemas híbridos de média complexidade, oferecem o melhor equilíbrio entre desempenho, viabilidade econômica e ambiental.

6. REFERÊNCIAS

ABBASI, T.; TRIPATHI, A. K.; ABBASI, S. **Hazardous waste management**. Boca Raton: CRC Press, 2022.

ABES - Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental. **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil 2023**. Disponível em: <https://abes-dn.org.br/>. Acesso em: 10 maio 2024.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 10.004 - 1:2024 - Resíduos sólidos — Classificação — Parte 1: Requisitos de classificação**. Rio de Janeiro, 2024.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 10.004 - 1:2024 - Resíduos sólidos — Classificação — Parte 2: Requisitos de classificação**. Rio de Janeiro, 2024.

ABRELPE - Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais. **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2016**. São Paulo: ABRELPE, 2016.

ABRELPE - Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais. **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2018**. São Paulo: ABRELPE, 2018.

ABRELPE - Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais. **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2019**. São Paulo: ABRELPE, 2019.

ABRELPE - Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais. **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2023**. São Paulo: ABRELPE, 2023.

ABRELPE - Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais. **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2024**. São Paulo: ABRELPE, 2024.

ABREMA - Associação Brasileira De Recuperação Energética de Resíduos e Meio Ambiente. **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2023/2024**. São Paulo: ABREMA, 2024.

AGUASIGMA. 2021. **Tratamiento de lixiviados en vertederos**. Disponível em: <https://aguasigma.com/pt/articulos-tecnicos-tratamiento-de-lixiviados-en-vertederos/>. Acesso em: 25 jun. 2025.

ALEXANDER, M. **Biodegradation and bioremediation**. 2. ed. San Diego: Academic Press, 1999. 453 p.

ALMEIDA, R.; SOUZA, L. F.; PEREIRA, J. M.; SANTOS, V. C.; OLIVEIRA, T. R. Compostos minerais e orgânicos de lixiviados de células experimentais de aterro com infiltração de concentrado de osmose inversa. In: Simpósio de Gestão Ambiental e Biodiversidade, 10. 2022, Santo André. **Anais**. . . , 2022.

ALMEIDA, R. **Utilização de nanofiltração e osmose inversa no tratamento de lixiviado de aterro sanitário**. 2016. 93 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Química) - Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2016.

ANA - Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. **Relatório de Gestão 2024**. Brasília: ANA, 2024.

AMOKRANE, A.; COMEL, C.; VERON, J. Pré-tratamento de lixiviados de aterro sanitário por coagulação-floculação. **Water Research**, v. 31, n. 11, p. 2775-2782, 1997.

ANDRADE, C. F. Metais pesados em lixiviados de aterros sanitários: comportamento e estratégias de remoção. **Revista Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 7, n. 2, p. 45-56, 2002.

ANDREASI, B. S.; CHRISTENSEN, T. H.; DAMGAARD, A. **Environmental performance of household waste management in Europe – An example of 7 countries**. *Waste Management*, v. 69, p. 545-557, 2017.

AKANBI, O. S. Fouling and scaling in membrane systems: mechanisms, control, and cleaning. **Desalination and Water Treatment**, v. 213, p. 1-15, 2021.

ARAÚJO, A. S.; ANTONELLI, R. Processo Fenton e suas aplicações no tratamento de lixiviados de aterros sanitários. **Revista Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 21, n. 2, p. 201-215, 2016.

AWWA - AMERICAN WATER WORKS ASSOCIATION. Microfiltration and Ultrafiltration Membranes for Drinking Water. **Journal-American Water Works Association**, v. 100, n. 12, p. 84-97, 2008.

AZIZ, S. Q.; ALI, N.; ALI, E.; YUSOFF, M. S.; KASSIM, A. H. Assessment of various tropical landfill leachate characteristics and treatment strategies in Malaysia. **Desalination and Water Treatment**, v. 102, p. 1-10, 2018.

AZIZ, S. Q.; AL-FATTAL, D. S.; AL-SAAD, A. A. Avanços recentes no tratamento de chorume de aterros sanitários: uma revisão. **Environmental Technology & Innovation**, v. 21, p. 101267, 2021.

BARBOSA, R. S.; SOUZA, M. P.; SILVA, C. M. Fiscalização ambiental em aterros sanitários: desafios e perspectivas. **Revista Brasileira de Direito Ambiental**, v. 14, n. 55, p. 123-138, 2019.

BERGAMASCO, R.; KONRADT-MORAES, L.C.; VIEIRA, M.F.; FAGUNDES-KLEN, M.R.; VIEIRA, A.M.S. Performance of coagulation- ultrafiltration hybrid process for water supply treatment. **Clerical Engineering Journal**, v. 166, 483-489, 2011.

BERNARDES, A. M.; ESPINOSA, D. C. R. **Gestão e gerenciamento de resíduos sólidos**. 2. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2019.

BILA, D. M.; MONTALVÃO, A. F.; AZEVEDO, D. A.; DEZZOTTI, M. Ozonização de chorume de aterro: avaliação da remoção de toxicidade e melhoria da biodegradabilidade. **Chemosphere**, v. 61, n. 9, p. 1288-1294, 2005.

BORGES, A. C.; SANTOS, M. A.; ALMEIDA, R. M.; SOUZA, L. F. Aplicação de membranas no tratamento de lixiviados: desafios e perspectivas para o Nordeste brasileiro. **Revista Engenharia Ambiental**, v. 17, n. 2, p. 45-56, 2020.

BRASIL. CONAMA - Conselho Nacional do Meio Ambiente. **Resolução CONAMA 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. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 18 mar. 2005.

BRASIL. CONAMA - Conselho Nacional do Meio Ambiente. **Resolução CONAMA nº 430, de 13 de maio de 2011**. Dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes, complementa e altera a Resolução nº 357/2005. Diário da União, Brasília, DF, 16 maio <https://www.legisweb.com.br/legislacao/?id=114770>. Acesso 10 mai. 2025.

BRASIL. CONAMA - Conselho Nacional do Meio Ambiente. **Resolução CONAMA nº 237, de 19 de dezembro de 1997**. Dispõe sobre o licenciamento ambiental. Diário Oficial da União: Brasília, DF, 22 dez. 1997. Disponível em: <https://www.legisweb.com.br/legislacao/?id=97816>. Acesso em: 26 jun. 2025.

BRASIL. [Constituição (1988)]. **Constituição da República Federativa do Brasil**. Organizado por Cláudio Brandão de Oliveira. Rio de Janeiro: Roma Victor, 2002. 320 p.

BRASIL. **Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010**. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, ano 147, n. 148, p. 3-7, 3 ago. 2010.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **Relatório Nacional de Resíduos Sólidos Urbanos: 2019**. Disponível em: <https://relatorios.sinir.gov.br/relatorios/nacional/?ano=2019>. Acesso em: 11 jun. 2025.

BRASIL Ministério do Meio Ambiente. **Plano Nacional de Resíduos Sólidos**. Brasília, 2022. Disponível em: <https://www.gov.br/mma/pt-br/assuntos/meio-ambiente-urbano-recursos-hidricos-qualidade-ambiental/plano-nacional-de-residuos-solidos>. Acesso em: 11 jun. 2025

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **Plano Nacional de Resíduos Sólidos: versão 2020**. Brasília, DF: Ministério do Meio Ambiente, 2020. 328 p. Disponível em: <https://www.gov.br/mma/pt-br/assuntos/agendaambientalurbana/gestao-de-residuos/>. Acesso em: 25 jun. 2025.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **Relatório Nacional de Resíduos Sólidos Urbanos: 2019**. Disponível em: <https://relatorios.sinir.gov.br/relatorios/nacional/?ano=2019>. Acesso em: 11 jun. 2025.

Brasil. Sistema Nacional de Informações sobre a Gestão dos Resíduos Sólidos - SINIR. **Relatório de Resíduos Sólidos Urbanos 2025**. Brasília: Ministério do Meio Ambiente, 2025.

BRASIL. Sistema Nacional de Meio Ambiente – SISNAMA. **Lei nº 6.938, de 31 de agosto de 1981**. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, p. 16509, 02 conjuntos. 1981.

CAMPOS, J. C. Tratamento de lixiviados de aterros sanitários: desafios e perspectivas. **Revista Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 26, n. 2, p. 345-356, 2021.

CARVALHO, A. L.; LIMA, R. S. Desafios e perspectivas para a gestão de resíduos sólidos urbanos em municípios brasileiros. **Revista de Administração Pública**, v. 54, n. 6, p. 1600-1615, 2020.

CARVALHO, M. S. Gestão de resíduos sólidos urbanos e sustentabilidade: um estudo de caso em Ipojuca, Pernambuco. **Revista Brasileira de Ciências Ambientais**, v. 49, p. 1-15, 2024.

CAVALCANTE, R. M. S. Tratamento de lixiviados de aterros sanitários: desafios e perspectivas para regiões tropicais. **Revista Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 19, n. 2, p. 123-134, 2014.

CASTILHOS JUNIOR, A. B.; DALSSASSO, R. L.; ROHERS, F. Pré-tratamento de lixiviados de aterros sanitários por filtração direta ascendente e coluna de carvão ativado. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 15, n. 4, p. 393-402, 2020.

CETESB – Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. **Inventário Estadual de Resíduos Sólidos Urbanos no Estado de São Paulo 2023**. São Paulo, 2024. Disponível em: <https://www.cetesb.sp.gov.br/residuossolidos/publicacoes-e-relatorios/>. Acesso em: 12 ago. 2025.

CHRISTENSEN, T. H.; KJELDSSEN, P.; ALBRECHTSEN, H. J.; HERON, G.; NIELSEN, P. H.; BJERG, P. L.; HOLM, P. E. Biogeochemistry of landfill leachate plume. **Applied Geochemistry**, v. 16, n. 6, p. 659-718, 2001.

CHRISTENSEN, T. H.; BJERG, P. L.; BANWART, S. A.; JAKOBSEN, R.; HERON, G. Characterization of redox conditions in landfill leachate-contaminated groundwater. **Journal of Contaminant Hydrology**, v. 11, n. 1-2, p. 51-76, 1992.

CORSO, C. R.; SCANDELAI, A. M.; TAVARES, C. R. G. Aplicação de processos oxidativos avançados no tratamento de lixiviados: desafios e perspectivas para o Nordeste brasileiro. **Revista Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 20, n. 4, p. 401-415, 2015.

CORTEZ, R. T.; TAVARES, R. R. Resíduos sólidos e desigualdades socioambientais no município do Rio de Janeiro: entre políticas públicas e invisibilidades territoriais. **Revista Científica de Alto Impacto**, v. 29, ed. 145, p. 1-20, 2025.

COSTA, L. F.; SOUZA, R. S.; ALMEIDA, T. S. Barreiras ambientais e institucionais na destinação de concentrados de osmose reversa em aterros sanitários do Nordeste. **Revista Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 30, n. 1, p. 55-67, 2024.

CPRH - Agência Estadual de Meio Ambiente de Pernambuco. **Relatório de Monitoramento Ambiental dos Aterros Sanitários da Região Metropolitana do Recife**. Recife: CPRH, 2022a. Disponível em: <https://www.cprh.pe.gov.br/wp-content/uploads/2022/relatorio-monitoramento-aterros-rmr.pdf>. Acesso em: 15 jul. 2025.

CPRH - Agência Estadual de Meio Ambiente de Pernambuco. **Relatório de gestão de resíduos sólidos urbanos**. Recife: CPRH, 2022b. Disponível em: <https://www.cprh.pe.gov.br/wp-content/uploads/2022/relatorio-gestao-residuos-solidos.pdf>. Acesso em: 15 jul. 2025.

ÇEÇEN, F.; AKTAŞ, Ö. Co-treatment of landfill leachate with municipal wastewater by sequencing batch and continuous flow activated sludge processes. **Journal of Hazardous Materials**, v. 112, n. 1-2, p. 175-183, 2004.

DE ALMEIDA, R.; CAMPOS, J. C. Compostos minerais e orgânicos de lixiviados de células experimentais de aterro com infiltração de concentrado de osmose inversa. In: Simpósio de Gestão Ambiental e Biodiversidade, 10.2021, Santo André. **Anais...**, 2021.

DE ALMEIDA, C. M.; CAMPOS, J. C. Tecnologias de tratamento de lixiviados de aterros sanitários: uma revisão. **Revista Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 25, n. 2, p. 201-215, 2020.

DENG, Y.; ENGLEHARDT, J. D. Tratamento de chorume de aterro pelo processo Fenton. **Water Research**, v. 40, n. 20, p. 3683-3694, 2006.

DESTRO, G. E. **Caracterização e proposição de tratamento adequado a lixivia- dos produzidos em aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos**. 2020. Dissertação (Mestrado em Agronegócio e Desenvolvimento) – Faculdade de Ciências e Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Tupã, 2020.

EPA. **Basic information about landfill gas 2024**. Disponível em: <https://www.epa.gov/lmop/basic-information-about-landfill-gas>. Acesso em: 11 jun. 2025.

FENG, S. J.; YANG, Z. F.; WANG, D. B.; ZHANG, Y. Anaerobic treatment of landfill leachate with high ammonium concentration. **Chemosphere**, v. 66, n. 2, p. 211-217, 2007.

FERREIRA, C. H.; ALMEIDA, V. S. Monitoramento ambiental em aterros sanitários: desafios e perspectivas. **Revista Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 26, n. 3, p. 456-465, 2021.

FERREIRA, A. C.; SOUZA, L. M.; SANTOS, R. S.; LIMA, T. F. Caracterização físico-química do lixiviado de aterros sanitários do Nordeste brasileiro. **Revista Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 24, n. 2, p. 353-362, 2019.

FERREIRA, J. S.; ALBUQUERQUE, M. S.; SOUZA, D. R. Desafios operacionais na gestão de lixiviados em municípios de pequeno porte. **Revista Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 27, n. 4, p. 401-412, 2022.

FIRMO, A. L.; LIMA, E. S.; SILVA, M. G.; SOUZA, K. L. Análise da eficiência de sistemas de tratamento de lixiviado em aterros sanitários. **Revista Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 24, n. 4, p. 789-798, 2019.

FOO, K. Y.; HAMEED, B. H. An overview of landfill leachate treatment via activated carbon adsorption process. **Journal of Hazardous Materials**, v. 171, n. 1-3, p. 54-60, 2009.

FU, F.; WANG, Q. Remoção de íons de metais pesados de águas residuais: uma revisão. **Journal of Environmental Management**, v. 92, n. 3, p. 407-418, 2011.

GAMA, J. R.; SOUZA, M. F.; ALMEIDA, P. R.; LIMA, T. S. Caracterização dos resíduos sólidos urbanos na Região Metropolitana do Recife. **Revista Brasileira de Ciências Ambientais**, v. 44, p. 123-134, 2019a.

GAMA, J. R.; SANTOS, M. C. F.; SOUZA, J. S. S.; SANTOS, J. S. S. Diagnóstico da gestão de resíduos sólidos urbanos na Região Metropolitana do Recife. **Revista Brasileira de Gestão Urbana**, v. 11, n. 2, p. 1-15, 2019b.

GARCÍA-PACHECO, R. Tratamento de chorume de aterro sanitário utilizando membranas de osmose reversa de segunda mão: estudo de caso de longo prazo em uma instalação em operação em larga escala. **Membranas, Basel**, v. 12, n. 11, p. 1170, 2022.

GEWEHR, G. A. **Tratamento por coagulação-floculação de lixiviado bruto de aterro sanitário com e sem pré-tratamento biológico em reator sequencial em batelada**. 2012. 163 f. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) - Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012.

GOMES, L. P. **Impactos da contaminação do solo e da água por resíduos sólidos em áreas urbanas**. São Paulo: Editora Atlas, 2009.

GOMES, L. P.; KOHL, C. A.; SOUZA, C. L. de L.; REMPEL, N.; MIRANDA, L. A. S.; MORAES, C. A. M. Avaliação ambiental de aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos precedidos ou não por unidades de compostagem. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 20, n. 3, p. 449–462, jul./set. 2015.

GUARDA, A. Desafios e perspectivas da gestão de resíduos sólidos na Região Metropolitana do Recife. **Revista Brasileira de Gestão Urbana**, v. 16, n. 2, p. 1-15, 2024.

HABERT, A.; SOUZA, P. R.; LIMA, F. S.; ALMEIDA, J. M. Aplicação de membranas no tratamento de lixiviados: avanços e desafios no Brasil. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 30, n. 1, p. 45-59, 2025.

HABERT, C.; AMOR, B.; JULLIEN, A. Processos de membrana no tratamento de água: Microfiltração, ultrafiltração, nanofiltração e osmose reversa. **Dessalinização**, v. 113, n. 2-3, pág. 205-223, 1997.

HABERT, A. C.; MOURA, D. C.; SANTOS, L. S.; SANTOS, A. B. Osmose reversa (OR) no tratamento de lixiviados de aterro sanitário: desafios e perspectivas. **Revista DAE**, v. 223, p. 52-65, 2020.

HOORNWEG, D.; BHADA-TATA, P. **What a waste: a global review of solid waste management**. Washington, DC: World Bank, 2012.

HOWE, K. J.; CLARK, M. M. Fouling of microfiltration and ultrafiltration membranes by natural waters. **Environmental Science & Technology**, v. 36, n. 16, p. 3571-3576, 2002.

IEA BIOENERGY. **Task 37: Energy from Biogas 2023**. Disponível em: <https://task37.ieabioenergy.com/>. Acesso em: 11 jun. 2025.

IGLESIAS, O.; RODRÍGUEZ-CHUECA, J.; DOMÍNGUEZ, J. R.; GARCÍA-GARCÍA, J.; MARCÍAS, M. Landfill leachate treatment by advanced oxidation processes: State of the art. **Science of the Total Environment**, v. 646, p. 1131-1146, 2019.

Instituto Água e Saneamento. **Diagnóstico dos resíduos sólidos urbanos na Região Metropolitana do Recife**. Recife: IAS, 2024.

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). **Panorama do Censo Demográfico 2022**. Rio de Janeiro: IBGE, 2022.

IPEA. Atlas da geração de resíduos sólidos urbanos no Brasil. Brasília: Ipea, 2025.
JACOBI, P. R.; BESEN, G. R. Gestão de resíduos sólidos no Brasil: desafios e perspectivas. **Estudos Avançados**, v. 25, n. 72, p. 223-242, 2011.

IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change. **Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change**. Working Group III Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. New York: Cambridge University Press, 2022. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg3/>. Acesso em: 11 jun. 2025

JACOBI, P. R. Gestão participativa e educação ambiental: articulando processos e construindo cidadania. **Cadernos de Pesquisa**, v. 33, n. 118, p. 189-205, 2003.

JUDD, S. The MBR book: principles and applications of membrane bioreactors **for water and wastewater treatment**. 2. ed. Oxford: Elsevier, 2011. 536 p.

KAMAL, T.; AHMAD, I.; KHAN, S. J.; MAHMOOD, Q.; ZAHID, M. Recent advances in landfill leachate treatment technologies: A review. **Chemosphere**, v. 307, p. 136145, 2022

KJELDSEN, P.; BARLAZ, M. A.; ROOKER, A. P.; BAUN, A.; LEDIN, A.; CHRISTENSEN, T. H. Present and long-term composition of MSW landfill leachate: a review. **Critical Reviews in Environmental Science and Technology**, v. 32, n. 4, p. 297-336, 2002.

KUMAR, A.; JOSHI, G.; RAM, S.; KUMAR, S. Environmental impacts of landfilling and composting: A critical review. **Environmental Technology & Innovation**, 21, 101264, 2021.

KURNIAWAN, T. A.; LO, W. H.; CHAN, G. Y. S. Physico–chemical treatments for removal of recalcitrant contaminants from landfill leachate. **Journal of Hazardous Materials**, v. 129, n. 1-3, p. 80-100, 2006.

LANGE, L. C.; AMARAL, M. C. S. Sazonalidade e variabilidade na geração de lixiviado em aterros sanitários do Nordeste. **Revista Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 25, n. 3, p. 233-245, 2020.

LAURENT, A.; BERNSTAD, A.; BAKAS, I.; NIELSEN, P. H. Review of methodologies for assessing the environmental performance of waste management systems. **Journal of Environmental Management**, v. 146, p. 167-176, 2014.

LEITE, L. A. M. **Tratamento de lixiviado de aterros urbanos utilizando o processo Foto-Fenton combinado a coagulação-floculação**. 2016. 132 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química - Área de Engenharia Ambiental) - Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2016.

LI, Y.; ZHANG, J.; WANG, J.; ZHAO, Q.; LI, J. Application of reverse osmosis for landfill leachate treatment: A review. **Journal of Hazardous Materials**, v. 153, n. 1-2, p. 1-18, 2008.

LI, Y.; ZHANG, Y.; WANG, Y.; ZHANG, Y. Environmental risk assessment of landfill leachate: A review. **Journal of Environmental Management**, v. 336, p. 117-128, 2023.

LIMA, M. S.; SILVA, T. F.; SOUZA, R. S. Aproveitamento energético do biogás em aterros sanitários: potencial e desafios no Brasil. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 23, n. 4, p. 789-800, 2018.

LINDE, K.; JENSEN, P. E.; CHRISTENSEN, T. H. Tratamento de três tipos de chorume de aterro com osmose reversa. **Desalination**, v. 101, p. 21-30, 1995.

LINS, R. F.; SOUZA, A. P.; MOURA, D. P. Parâmetros físico-químicos do lixiviado em aterros sanitários do semiárido. **Revista Brasileira de Engenharia Ambiental**, v. 26, n. 2, p. 112-128, 2020.

LIU, Y.; ZHANG, H.; LI, J.; REN, H.; LI, G. Advances in landfill liner systems: Materials, performance, and environmental impact. **Journal of Environmental Management**, v. 292, 112779, 2021.

LOIZIDOU, M.; ANDREADAKIS, A.; ZAPARAS, I. Integrated management of municipal solid waste in urban areas. **Global NEST Journal**, v. 6, n. 3, p. 245-252, 2004.

LOIZIDOU, M.; KAPETANIOS, E. G.; KASSINOS, D. Physicochemical and biological treatment of landfill leachate. **Waste Management & Research**, v. 22, n. 3, p. 199-207, 2004.

LÓPEZ, A.; PAGANO, M.; VOLPE, A.; DI PALMA, L. Removal of emerging contaminants from wastewater by advanced oxidation processes and membrane bioreactors. **Journal of Environmental Management**, v. 260, p. 110140, 2020.

LOU, X. F.; NAUGHTON, C.; ZHANG, D. Q.; ZHANG, Q. Y. Municipal solid waste characteristics and management in China. **Waste Management**, v. 46, p. 234-242, 2015.

MADAENI, S. S.; GHASEMI, N.; AMIRI, M. C. Membrane technology: applications to industrial wastewater treatment. **Desalination and Water Treatment**, v. 54, n. 2, p. 333-346, 2015.

MANTZAVINOS, D.; KASSINOS, D. Processos oxidativos avançados (POAs) no tratamento de águas residuais. **Current Opinion in Chemical Engineering**, v. 2, n. 3, p. 364-370, 2003.

MAPA DE CONFLITOS FIOCRUZ. **Conflitos ambientais e saúde na Região Metropolitana do Recife**. Rio de Janeiro: Fiocruz, 2023.

MARTINS, I. S.; OLIVEIRA, R. A.; SOUZA, K. L.; SILVA, M. G. Avaliação de tecnologias de tratamento de lixiviado em aterros sanitários. **Revista Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 27, n. 1, p. 45-54, 2022.

MIRANDA, L. S.; ALMEIDA, M. C. Estrutura e funcionamento do SISNAMA: desafios e perspectivas. **Revista Brasileira de Direito Ambiental**, v. 3, pág. 112-130, 2019.

MUCELIN, C. A.; BELLINI, M. Lixo e impactos ambientais perceptíveis no ecossistema urbano. *Sociedade & Natureza*, v. 33, n. 1, p. 1-15, 2021. **Sociedade & Natureza**, Uberlândia, v. 20, n. 1, p. 111-124, jun. 2008.

MULDER, M. **Basic principles of membrane technology**. 2. ed. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 564 p. 1996.

NAVEEN, B. P.; SIKDAR, P. K.; SIVANESAN, S. Recent trends in landfill leachate treatment: A review. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 28, p. 6658966619, 2021.

OLIVEIRA, A. L.; SANTOS, R. F. Gestão de resíduos sólidos urbanos: desafios e oportunidades para a sustentabilidade. **Revista Brasileira de Gestão Ambiental**, v. 17, n. 2, p. 234-245, 2023.

OLIVEIRA, G. G. Gestão ambiental municipal: desafios e perspectivas para a sustentabilidade. **Revista Brasileira de Gestão Ambiental**, v. 11, n. 1, p. 123-138, 2017.

OLIVEIRA, T. G.; SANTOS, V. H. Desafios operacionais dos aterros sanitários no Brasil. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 28, n. 1, p. 123-135, 2023.

OLIVEIRA, T. G.; SANTOS, J. R.; SOUZA, A. C. Infraestrutura energética e sustentabilidade de sistemas de membranas em aterros sanitários. **Revista Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 27, n. 2, p. 201-215, 2021.

OONK, H.; BOOM, A. Long-term leachate emission from landfill sites. **Waste Management & Research**, v. 13, n. 6, p. 581-593, 1995.

OPAS/OMS – Organização Pan-Americana da Saúde; Organização Mundial da Saúde. **Resíduos sólidos e saúde ambiental nas Américas: riscos e recomendações**. Washington, DC: OPAS/OMS, 2022.

PASCHOALIN FILHO, J. A.; DIAS, N. W. C.; CORTÊS, R. M. V. Resíduos sólidos urbanos: impactos ambientais e desafios para a gestão sustentável. **Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental**, v. 18, n. 2, p. 123-134, 2014.

PEREIRA, C. F. **Caracterização físico-química de lixiviado bruto e tratado por osmose reversa de aterro sanitário no estado do Pará**. 2022. 95 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Sanitária e Ambiental) - Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal do Pará, Belém, 2022.

PEREIRA, L. F. Tecnologias emergentes para o tratamento de lixiviados: estudo de caso em aterros do Recife. **Revista Engenharia Ambiental**, v. 18, n. 2, p. 145-158, 2021.

PEREIRA, M. F.; OLIVEIRA, T. G.; NASCENTES, R. S. Tratamento de lixiviados de aterros sanitários: desafios e perspectivas para municípios de pequeno porte. **Holos**, Ano 39, v. 6, e11424, 2023.

PÉREZ-GONZÁLEZ, A.; URTIAGA, A. M.; IBÁÑEZ, R.; ORTIZ, I. State of the art and review on the treatment technologies of water reverse osmosis concentrates. **Water Research**, v. 46, n. 2, p. 267-283, 2012.

PERNAMBUCO. **Conselho Estadual de Meio Ambiente. Resolução CONSEMA nº 01, de 23 de março de 2018**. Dispõe sobre a política estadual de resíduos sólidos e diretrizes para o gerenciamento ambiental no Estado de Pernambuco. Diário Oficial do Estado de Pernambuco: Recife, PE, 24 mar. 2018a. Disponível em: https://www.semas.pe.gov.br/wpcontent/uploads/2018/03/Resolucao_CONSEMA_01_2018.pdf. Acesso em: 11 jun. 2025.

PERNAMBUCO. **Diagnóstico e propostas para a Região Metropolitana do Recife**. Recife: Governo do Estado de Pernambuco, 2023. Disponível em: <http://www2.secid.pe.gov.br/diagnostico-rmr.pdf>. Acesso em: 15 jul. 2025.

PERNAMBUCO. **Lei nº 16.241, de 14 de dezembro de 2017**. Institui a Política Estadual de Educação Ambiental e dá outras providências. Diário Oficial do Estado de Pernambuco: Recife, PE, 15 dez. 2017. Disponível em: https://www.semas.pe.gov.br/wp-content/uploads/2017/12/Lei_16241_2017.pdf. Acesso em: 26 jun. 2025.

PERNAMBUCO. **Plano Estadual de Resíduos Sólidos. Recife: Governo de Pernambuco, 2020**. Disponível em: <https://www.semas.pe.gov.br/wp-content/uploads/2020/12/Plano-Estadual-de-Residuos-Solidos-PE.pdf>. Acesso em: 15 jul. 2025.

PERNAMBUCO. Secretaria Estadual de Meio Ambiente e Sustentabilidade. **Relatório de Gestão Ambiental 2017**. Recife: SEMAS, 2017.

PERNAMBUCO. Secretaria das Cidades. **Equipe da Secid acompanha agenda da Comissão de Meio Ambiente da Alepe. Recife: Governo do Estado de Pernambuco, 2018**. Disponível em: http://www2.secid.pe.gov.br/web/secid/exibir_noticia?groupId=12855articleId=42839901&templateId=15537. Acesso em: 15 jul. 2025.

PERTILE, C. **Avaliação de processos de separação por membranas como alternativas no tratamento de lixiviado de aterro sanitário**. 2013. 127 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2013.

Petrochem. **O que faz e como funciona uma osmose inversa**. Disponível em: <https://www.petrochem.pt/pt/area-de-negocio/tratamento-de-aguas/equipamentos/filtracao/osmose-inversa/o-que-faz-e-como-funciona-uma-osmose-inversa.html>. Acesso em: 25 jun. 2025.

PHILIPPI JR., A. **Saneamento, saúde e ambiente: fundamentos para um desenvolvimento sustentável**. Barueri, SP: Manole, 2014.

PNUD – Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento. **Atlas do Desenvolvimento Humano no Brasil: atualização metodológica e indicadores municipais**. Brasília: PNUD, 2022.

RAMOS, L. S.; FERREIRA, J. S.; ALBUQUERQUE, M. S. Variabilidade dos lixiviados em aterros sanitários do Nordeste: desafios para o tratamento. **Revista Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 30, n. 1, p. 55-67, 2025.

RECIO, L. V. **Tratamento de lixiviado de aterro sanitário por processo de ozonização**. 2019. 45 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Ambiental) Departamento de Engenharia Ambiental, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campo Mourão, 2019.

RENOU, S.; GIVAUDAN, J. G.; PAUWEL, D. D.; BORDAS, F.; LETTINGA, G.; DEDEURWAERDER, T. Landfill leachate treatment: Review and opportunity. **Journal of Hazardous Materials**, v. 150, n. 3, p. 468-493, 2008.

ROBINSON, H. D. The composition and properties of landfill leachate. **Progress in Physical Geography**, v. 31, n. 4, p. 439-461, 2007.

ROCHA, J. C. **Aterros sanitários: projeto, implantação, operação e monitoramento**. São Paulo: Editora Rima, 2005.

RODRIGUEZ-NARVAEZ, O. M.; PERAL, J.; DOMINGUEZ, J. R.; BARCELO, D. Advanced oxidation processes for removal of antibiotics from water: a review. **Chemical Engineering Journal**, v. 323, p. 361-380, 2017.

ROHERS, F. **Tratamento físico-químico de lixiviado de aterro sanitário por filtração direta ascendente**. 2020. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2020.

SANTOS, A. C.; SILVA, V. F.; SOUZA, L. M. Gestão integrada de resíduos sólidos urbanos: desafios e oportunidades. **Revista Engenharia Ambiental**, v. 21, n. 2, p. 45-59, 2021.

SANTOS, M. A. S.; MEDEIROS, A. P. S.; SOUZA, J. R. T. Tecnologias integradas para o tratamento de lixiviados de aterros sanitários: uma revisão. **Holos**, v. 37, n. 1, p. 1-15, 2021.

SANTOS, P. dos; SILVA, A. L.; LIMA, R. S. Impactos ambientais causados pelo manejo inadequado de resíduos sólidos urbanos. **Revista Brasileira de Meio Ambiente**, v. 10, n. 2, p. 34-45, 2022.

SOARES, A. C.; MOURA, A. F.; LIMA, T. F. Estratégias de pré-tratamento para proteção de membranas em sistemas de osmose reversa aplicados a lixiviados. **Revista Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 27, n. 2, p. 201-215, 2022.

SOUZA, M. A. A.; FUSCO, W.; LYRA, M. R. S. B. **Censo 2022: população reduz no núcleo metropolitano litorâneo e cresce nos polos de desenvolvimento da RM Recife**. Observatório das Metrópoles, 2023. Disponível em: <https://www.observatoriodasmetropoles.net.br/censo-2022-populacao-reduz-no-nucleo-metropolitano-litoraneo-e-cresce-nos-polos-de-desenvolvimento-da-rm-recife/>. Acesso em: ago. 2025.

SHON, H. K.; VIGNESWARAN, S.; KIM, I. S.; NGO, H. H.; ESTEVES, S. R. Nanofiltration for water and wastewater treatment – a mini review. **Drink. Water Eng. Sci.**, v. 6, p. 47-53, 2013.

SILVA, A. S. R. **Utilização de método geofísico como ferramenta inovadora para incrementar a produção de biogás e absorver o aproveitamento energético. Caso de estudo: Aterro do Barlavento – Célula B**. 2021. Dissertação (Mestrado em Engenharia do Ambiente – Perfil Engenharia Sanitária) – Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa, 2021.

SILVA, C. A.; SOUZA, R. S. Políticas públicas e gestão de resíduos sólidos urbanos no Brasil. **Revista Brasileira de Ciências Ambientais**, v. 56, p. 1-15, 2021.

SILVA, J. A. M.; SOUZA, J. B.; SANTOS, A. C.; SANTOS, A. S.; SANTOS, J. C. Tratamento de lixiviados de aterros de resíduos sólidos utilizando Processos Fenton e Foto-Fenton Solar. **Revista Ambiente & Água**, v. 16, n. 2, p. 1-13, 2021

SILVA, M. F. Tecnologias inovadoras para o tratamento de lixiviado em aterros sanitários: um estudo de caso. **Revista de Engenharia Ambiental**, v. 29, n. 2, p. 234-245, 2024.

SILVA, M. G.; SOUZA, A. P.; LIMA, R. S.; ALMEIDA, F. J.; BARBOSA, D. M. Gestão de resíduos sólidos urbanos: desafios e perspectivas para a sustentabilidade. **Revista Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 27, n. 1, p. 1-12, 2022a.

SILVA, M. G.; LIMA, J. S.; SOUZA, R. S. Inovações e desafios na gestão de resíduos sólidos urbanos no Brasil. **Revista Brasileira de Gestão Ambiental**, v. 16, n. 2, p. 45-59, 2022b.

SILVA, M. G.; SOUZA, T. S.; ALMEIDA, R. M. Tecnologias de impermeabilização e tratamento de lixiviado em aterros sanitários brasileiros. **Revista Engenharia Civil**, v. 30, n. 1, p. 77-89, 2020.

SILVA, V. L.; SOUZA, T. S.; OLIVEIRA, L. M. Impactos ambientais de aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos: uma revisão. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 28, n. 1, p. 1-15, 2021.

SNIS – Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento. **Coleta de Dados do SNIS – Resíduos Sólidos**. Disponível em: <https://www.gov.br/cidades/pt-br/aceso-a-informacao/acoes-e-programas/saneamento/snis/area-do-prestador-e-municipios/coleta-de-dados-do-snis-residuos-solidos-1>. Acesso em: 11 jun. 2025.

SOUZA, A. L.; OLIVEIRA, R. A.; SILVA, M. G.; LIMA, T. S. Avaliação da eficiência da osmose reversa no tratamento de lixiviado de aterro sanitário. **Revista Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 28, n. 2, p. 123-134, 2023.

SOUZA, D. M.; SILVA, M. A. S. O papel do CONAMA no Sistema Nacional de Meio Ambiente. **Revista Direito Ambiental e Sociedade**, v. 1, pág. 33-48, 2020.

SZIGETHY, A.; ANTENOR, M. Políticas públicas e gestão de resíduos sólidos: desafios para a sustentabilidade urbana. **Revista Brasileira de Gestão Urbana**, v. 17, n. 1, p. 1-18, 2025.

TCHOBANOGLIOUS, G.; THEISEN, H. M.; ELIASSEN, R. **Integrated Solid Waste Management: Engineering Principles and Management Issues**. New York: McGraw-Hill, 1993.

TCHOBANOGLIOUS, G.; THEISEN, H.; VIGIL, S. A. **Gerenciamento integrado de resíduos sólidos: engenharia, princípios e práticas**. 3. ed. Porto Alegre: AMGH, 2017.

TCU – Tribunal de Contas da União. **Política Nacional de Resíduos Sólidos: auditoria operacional sobre disposição final de resíduos urbanos (Acórdão 2.610/2020-Plenário)**. Brasília: TCU, 2020.

VALI, S. A.; MORAL-VICO, J.; FONT, X.; SÁNCHEZ, A. Adsorptive removal of siloxanes from biogas: recent advances in catalyst reusability and water content effect. **Biomass Conversion and Biorefinery**, v. 14, p. 23 259–23 273, 2024.

VIEIRA, R. M.; SOUZA, J. S.; SANTOS, A. C.; OLIVEIRA, L. F.; PEREIRA, M. A. Avaliação do desempenho operacional de uma estação de tratamento de lixiviado de aterro sanitário. **Revista Ibero Americana de Ciências Ambientais**, v. 11, n. 1, p. 131-145, 2020a.

VIEIRA, A. S.; OLIVEIRA, L. B.; SOUZA, A. P. Impactos ambientais da disposição inadequada de resíduos sólidos urbanos. **Revista Ambiente & Água**, v. 15, n. 4, p. 1-15, 2020b.

VILELA, M. S. Justiça ambiental e saúde coletiva: estudo de caso em Jaboatão dos Guararapes. **Cadernos de Saúde Pública**, v. 39, n. 2, p. 1-15, 2023.

Vital Engenharia Ambiental. **Relatório Técnico de Operação do Aterro Sanitário de Ipojuca**. Ipojuca: Vital Engenharia Ambiental, 2024.

WANG, Y.; ZHANG, H.; ZHOU, Y.; LI, A. Recent advances in landfill leachate treatment using advanced oxidation processes. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 27, p. 1-19, 2020.

WISZNIOWSKI, J.; ROBERT, D.; SURMACZ-GÓRSKA, J.; WEBER, J. V.; MARCINOWSKA, R. Landfill leachate treatment methods: A review. **Environmental Chemistry Letters**, v. 4, n. 1, p. 51-61, 2006.

WU, J.; ZHANG, J.; ZHANG, Y.; ZHANG, C.; ZHANG, S. Characteristics, treatment, and resource utilization of landfill leachate: A review. **Chemosphere**, v. 246, p. 125-136, 2020.

XAVIER, C. R.; LIMA, T. S.; ALMEIDA, F. J.; SOUZA, P. H.; BARBOSA, D. M. Políticas públicas e gestão municipal de resíduos sólidos urbanos no Brasil: avanços e desafios. **Revista Brasileira de Políticas Públicas**, v. 11, n. 2, p. 45-60, 2021.

XIANG, Y.; ZHANG, Y.; WANG, Y.; LI, X.; CHEN, Y.; ZHOU, Y. Advances in membrane bioreactor technology for landfill leachate treatment: Current status and future perspectives. **Journal of Environmental Management**, v. 350, p. 120456, 2025.

XU, Z. Y.; WANG, S. S.; ZHANG, Y. R.; LI, A. M.; CHEN, G. H. Biological treatment of landfill leachate with the integration of partial nitrification, anaerobic ammonium oxidation and heterotrophic denitrification. **Bioresource Technology**, v. 314, p. 123-130, 2020.

YANG, Y.; ZHANG, N.; ZHOU, J. Environmental impacts of landfill leachate: a review. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 28, n. 5, p. 5432-5445, 2021.

ZANG, Y.; ZHANG, Y.; WANG, Y.; ZHANG, Y. Recent advances in landfill leachate treatment using membrane technology: A review. **Journal of Environmental Management**, v. 293, p. 112-118, 2021.

ZHANG, Y.; ZHOU, J.; WANG, J.; ZHAO, Q.; LI, J. Removal of emerging contaminants from landfill leachate by reverse osmosis: A review. **Science of the Total Environment**, v. 838, p. 156-170, 2022.