

## DISCUSSÕES SOBRE AS ALTERNATIVAS DE TRATAMENTO DE LIXIVIADO DE ATERRO SANITÁRIO NO BRASIL DIANTE DO DESAFIO DOS CONTAMINANTES EMERGENTES

B. C. PEREIRA<sup>1</sup>, J. L. da M. OLIVEIRA, A. L. NASCENTES

Fundação Oswaldo Cruz<sup>1</sup>

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2683-9886><sup>1</sup>

barbaracp90@gmail.com<sup>1</sup>

Submetido 23/10/2020 - Aceito 27/11/2023

DOI: 10.15628/holos.2023.11424

### RESUMO

Os aterros sanitários são uma técnica de disposição final de resíduos que vai ao encontro das exigências legais brasileiras. No entanto, os processos que ocorrem nas células dos aterros originam um efluente de complexa composição denominado lixiviado, o qual requer tratamento adequado. Diferentes processos de tratamento de lixiviado considerados avançados já têm sido empregados no Brasil. Além disso, uma estratégia muito comum é o envio do lixiviado para as estações de tratamento de esgoto (ETE), para que os dois efluentes sejam tratados de forma conjunta. Porém, tanto os processos adotados nas estações de tratamento de lixiviado quanto os que se utilizam nas ETE, têm por

objetivo a remoção de matéria orgânica e nutrientes, não contemplando os chamados contaminantes emergentes. Diante disso, este trabalho se propõe a discutir as principais formas de tratamento do lixiviado de aterro sanitário, com ênfase na remoção desses contaminantes. Muitas das técnicas de tratamento estudadas já são adotadas para tratar lixiviados em aterros brasileiros, o que pode significar eventual remoção desses compostos. A inclusão destas técnicas, como etapa de pré-tratamento do lixiviado e pós-tratamento nas ETE que o recebem, poderia promover a redução de contaminantes emergentes no efluente final.

**PALAVRAS-CHAVE:** Resíduos sólidos, Chorume, Poluentes emergentes, Esgoto.

## DISCUSSIONS ON ALTERNATIVES FOR THE TREATMENT OF LANDFILL LEACHATE IN BRAZIL BEFORE THE CHALLENGE OF EMERGING CONTAMINANTS

### ABSTRACT

Landfills are a final waste disposal technique that meets Brazilian legal requirements. However, the processes that take place in the landfill cells give rise to an effluent of a complex composition called leachate, which requires adequate treatment. Different leachate treatment processes considered advanced have been used in Brazil. In addition, a very common strategy is to send the leachate to the wastewater treatment plants (WWTP), so that the two effluents are treated together. However, both the processes adopted in the leachate treatment plants and those used in the WWTP, aim to remove

organic matter and nutrients, not considering the so-called emerging contaminants. Therefore, this work aims to discuss the main forms of treatment of landfill leachate, with an emphasis on removing these contaminants. Many of the studied treatment techniques are already adopted to treat leachate in Brazilian landfills, which may mean eventual removal of these compounds. The inclusion of these techniques, as a step of pre-treatment of leachate and post-treatment in the STPs that receive it, could promote the reduction of emerging contaminants in the final effluent.

**KEYWORDS:** Solid waste, Leachate, Emerging pollutants, Wastewater.

## 1 INTRODUÇÃO

Os resíduos sólidos urbanos apresentam composição bastante diversificada, sendo compostos por restos de alimentos, papéis, plásticos, materiais metálicos, vidro e até mesmo componentes considerados perigosos por seu potencial nocivo ao meio ambiente e à saúde pública (Castilhos Junior, 2003). Eles refletem o cenário econômico de um país, bem como o padrão de consumo de sua população, e é imprescindível que haja um gerenciamento eficaz destes resíduos, em consonância com as singularidades locais.

Os aterros sanitários consistem numa técnica de engenharia para a disposição de resíduos sólidos urbanos, a qual é projetada e operada para minimizar os impactos à saúde pública e ao meio ambiente (Kreith & Tchobanoglous, 2002). Nesse método, os resíduos sólidos são confinados à menor área possível e recobertos com camadas de solo (ABNT, 1984). Ainda assim, alguns aspectos representam obstáculos para a ampla adoção dessa técnica. Uma questão importante é o tratamento adequado de um dos subprodutos gerados neste processo: o lixiviado. No Brasil, sobretudo nos pequenos municípios, o tratamento do lixiviado costuma ser realizado por meio de processos biológicos, em virtude da relativa simplicidade e viabilidade econômica. Já nos aterros que atendem grandes cidades, é comum a adoção de técnicas de tratamento consideradas mais avançadas, como os processos que utilizam membranas (Costa et al. 2019). Em algumas cidades é feito o encaminhamento do lixiviado para as estações de tratamento de esgotos (ETE) para realizarem o tratamento combinado do lixiviado com esgoto sanitário e, nestes casos, utiliza-se o tipo de processo já instalado nas ETE (Gomes, 2009).

Atualmente dispõe-se de uma grande variedade de técnicas para o tratamento do lixiviado de aterro sanitário. Tais técnicas, em geral, são norteadas pelos mesmos parâmetros adotados para o tratamento de esgotos sanitários, ou seja, para remover compostos orgânicos, compostos nitrogenados, fósforo e sólidos em suspensão. Entretanto, nenhum desses processos foi projetado para a remoção de produtos farmacêuticos ou de higiene pessoal, os denominados contaminantes emergentes (Bellver-Domingo, Fuentes & Hernández-Sancho, 2017).

Nesse sentido, o presente trabalho se propõe a discutir questões sobre o tratamento de lixiviado no Brasil sob o ponto de vista da remoção de contaminantes emergentes, a partir de pesquisa bibliográfica e documental. São abordados aspectos relativos ao gerenciamento dos resíduos sólidos urbanos, com foco para os aterros sanitários e a problemática do lixiviado de aterro sanitário. São apresentadas ainda as principais tecnologias para o tratamento do lixiviado utilizadas no Brasil e o seu potencial na remoção de contaminantes emergentes.

## 2 DESENVOLVIMENTO

### 2.1 Gerenciamento dos Resíduos Sólidos Urbanos

A destinação inadequada dos resíduos sólidos urbanos pode gerar diversos impactos negativos. Esses impactos não se restringem à poluição da água, do ar e do solo e desequilíbrio

ecológico, mas envolvem aspectos sociais como a desvalorização imobiliária, possíveis impactos à saúde pública e a proliferação de vetores (Kjeldsen et al., 2002).

Na maioria dos países em desenvolvimento e recentemente desenvolvidos, os aterros sanitários possivelmente ainda representarão por muito tempo a principal forma de disposição final de resíduos sólidos (Yu, 2013). De acordo com o mais recente Diagnóstico do Manejo de Resíduos Sólidos Urbanos de 2021 que divulga anualmente a base de dados do Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS), existem no território brasileiro 1.572 lixões, 595 aterros controlados e 669 aterros sanitários (Brasil, 2022b).

Quando comparados aos lixões, os aterros controlados oferecem menores riscos à saúde pública, mas isso se deve apenas por contarem com a cobertura dos resíduos (Bocchiglieri, 2010). É preciso destacar que dentre essas três práticas de disposição, somente os aterros sanitários atendem às exigências ambientais brasileiras, além de apresentarem vantagens técnicas e econômicas sob a ótica do panorama do país (Gomes, 2009). O fator comum às três formas de disposição de resíduos é a geração de gases e de um efluente líquido conhecido como lixiviado ou chorume. Nos aterros sanitários tanto o lixiviado quanto os gases são coletados para posterior tratamento. Para isso, o solo recebe impermeabilização prévia com o objetivo de impedir que o lixiviado alcance os lençóis freáticos e são colocados tubos enterrados nas células do aterro para a coleta dos gases produzidos. Enquanto os gases captados em um aterro podem ser queimados e/ou aproveitados para fins de geração de energia, o lixiviado é o efluente que precisa ser adequadamente manejado e tratado. Logo, o lixiviado é um subproduto dos aterros sanitários que merece maior atenção quanto ao seu tratamento para que seja reincorporado ao meio ambiente de maneira cuidadosamente controlada, evitando efeitos prejudiciais às águas subterrâneas e superficiais (Great Britain, 2003).

Vale destacar que outro agravante é que, mesmo depois do encerramento da operação de um aterro sanitário, a geração de lixiviado ainda ocorre por décadas. De acordo com o SNIS, no Brasil, 244 aterros sanitários se encontravam inoperantes em 2021, porém não há informações sobre o monitoramento dos mesmos. No Brasil, a NBR 13896/97 determina a manutenção dos sistemas de tratamento de lixiviado enquanto houver a geração desse efluente (ABNT, 1997). Alguns autores afirmam que esse monitoramento deve se estender por até 30 anos após o encerramento, com ênfase na estabilidade geotécnica, geração de gás e tratamento do lixiviado (Barlaz et al., 2002). Esse é também o período de tempo preconizado em muitas legislações ambientais, embora alguns autores defendam que este período deva ser por cerca de 50 anos (Lee & Jones-Lee, 1996). Fica claro, portanto, que o tratamento adequado do lixiviado é um desafio que perdurará além da vida útil do aterro, mesmo quando a entrada de resíduos sólidos e, neste caso, de receita não estiver mais ocorrendo.

## 2.2 Lixiviado de Aterro Sanitário

Lixiviado de aterro sanitário é o termo considerado mais adequado para denominar o líquido resultante da solubilização de compostos sólidos dentro de um aterro sanitário (Souto, 2009). O lixiviado consiste num líquido de coloração escura potencialmente poluente. As contribuições hídricas para a geração do lixiviado são a drenagem superficial, o líquido produzido

a partir da decomposição dos próprios resíduos e, principalmente, o volume de precipitação no aterro (Kreith & Tchobanoglous, 2002; Shroff, 1999). A composição do lixiviado é muito variável, sendo influenciada por diversos fatores, como o tempo e tipo de operação do aterro e o tipo de resíduo disposto. De forma geral, o lixiviado pode apresentar diversos grupos de poluentes: material orgânico dissolvido biodegradável e refratário; macro componentes inorgânicos; metais tóxicos, gases dissolvidos, além de compostos orgânicos xenobióticos (Kjeldsen et al., 2002; Pesenti et al., 2023).

Apesar de ser um efluente de composição tão complexa, no Brasil os padrões de descarte exigidos para o lixiviado são os mesmos preconizados para efluentes de qualquer fonte poluidora conforme a Resolução CONAMA 430/2011 (Brasil, 2011). Sob essa perspectiva generalista, as particularidades do lixiviado não têm sido devidamente consideradas na legislação brasileira. Um exemplo que ilustra uma dessas inadequações é a adoção do parâmetro DBO (Demanda Bioquímica de Oxigênio) para avaliar a matéria orgânica do lixiviado. A presença de compostos tóxicos nesse efluente pode inibir os microrganismos utilizados como inóculo na análise de DBO, o que resultaria em valores subestimados de matéria orgânica (Campos, 2014).

O potencial tóxico do lixiviado de aterro sanitário à saúde humana já vem sendo demonstrado em estudos a nível celular. Baderna et al. (2011) utilizaram ensaios *in vitro* com células de hepatoma HepG2 como modelo para avaliar os efeitos tóxicos de lixiviado bruto em diferentes concentrações volumétricas (1,25; 2,5; 5; 10; 20 e 30%). Foi observada inibição da proliferação celular mesmo em baixas concentrações de lixiviado (de 2,5 a 5%) e efeito citotóxico em concentrações elevadas (a partir de 10%) após 48 h de exposição. Toufexi et al. (2013) avaliaram a exposição de culturas de linfócitos humanos a concentrações de lixiviado de 0,1; 0,2 e 1%, v v<sup>-1</sup>. Os resultados mostraram aumento na frequência de formação de micronúcleos e diminuição da proliferação celular, indicando efeitos genotóxicos e citotóxicos do lixiviado, bem como a sua potencial atividade aneugênica em linfócitos humanos.

Os estudos costumam abordar os efeitos prejudiciais à saúde causados pelo grande número de contaminantes presentes nos lixiviados de aterros sanitários. No entanto, muitos destes contaminantes ainda não foram devidamente identificados e, seu risco para os receptores humanos e ambientais não se encontram claramente definidos (Toufexi et al., 2013). Essa questão representa uma importante lacuna na proposição de tratamentos adequados ao lixiviado, uma vez que não se conhece por completo a gama de compostos com potencial poluidor que devem ser removidos ao longo das etapas de tratamento.

### 2.3 Tipos de Tratamento para o Lixiviado de Aterro Sanitário

De acordo com a NBR 15849/2010, o tratamento de lixiviado de aterro compreende as instalações e estruturas que visam atenuar as características do lixiviado de forma a respeitar a legislação pertinente ao descarte de efluentes (ABNT, 2010).

A composição extremamente variável do lixiviado de aterro sanitário é um desafio para o seu tratamento. Sendo assim, as mais diversas formas de tratamento têm sido empregadas para

que sejam alcançadas eficiências satisfatórias, o que requer inclusive a combinação de várias técnicas (Moura et al., 2023).

Os tratamentos biológicos são comumente adotados para tratar lixiviados que apresentem maior biodegradabilidade. Essas técnicas são relativamente simples e de baixo custo quando comparados aos demais tipos de tratamento (Miao et al., 2019). Porém, isoladamente, os tratamentos biológicos não são capazes de proporcionar eficiências que atendam aos padrões de descarte (Oller, Malato & Sánchez-Pérez, 2011). Dentre os processos biológicos mais utilizados para o tratamento de lixiviados destacam-se as lagoas, lodo ativado, MBR (*Membrane Biological Reactor*), MBBR (*Moving Bed Biofilm Reactor*), filtro biológico percolador e alagados construídos (*wetlands*).

Comparados aos demais processos biológicos, os sistemas de lagoas necessitam de uma área construída maior. Isto porque neste processo é utilizada uma determinada concentração de biomassa em suspensão que permanece em contato com o lixiviado durante longos períodos. As variantes mais utilizadas são as lagoas anaeróbias e aeradas, mas é possível o uso de lagoas facultativas no tratamento de lixiviados (Carrilho & Carvalho, 2016). São processos com baixos custos operacionais e de simples manutenção, no entanto, fatores climáticos são capazes de impactar fortemente seu desempenho. Destaca-se ainda que, isoladamente, as lagoas não atendem satisfatoriamente legislações mais exigentes (Maynard, Ouki & Williams, 1999; Renou et al., 2008).

No processo de lodo ativado, microrganismos (biomassa) realizam reações bioquímicas utilizando o substrato presente no efluente a ser tratado. Este processo ocorre em um tanque onde se promove a atividade metabólica aeróbia e a mistura do lodo com o efluente. Após o tempo de reação, ocorre a separação da biomassa (sólidos) e do efluente tratado (líquido) em um decantador. Parte dos sólidos é descartada enquanto outra parcela é recirculada para o reator, o que resulta em elevadas eficiências de remoção (Von Sperling, 2002). Devido a essa recirculação, a área ocupada pelo processo é menor do que a requerida com as lagoas. Ao longo dos mais de 100 anos de existência do processo de lodo ativado, foram desenvolvidas muitas variantes do processo convencional, tais como: lodo ativado com aeração prolongada, aeração escalonada, operação em bateladas sequenciais, MBR, MBBR, entre outras (Jordão & Pessôa, 2014).

O processo MBR consiste na junção de dois tipos de tratamento: um reator biológico onde microrganismos degradam material orgânico, semelhante ao processo de lodo ativado convencional; e um módulo de membrana substituindo o decantador (Sutherland, 2010). No processo MBBR, são adicionados materiais suportes que são mantidos em movimento no tanque de aeração onde a biomassa cresce e se desenvolve na forma de um biofilme aderido (Mannina & Viviani, 2009).

Os filtros biológicos percoladores são processos que utilizam material suporte fixo onde são formados os biofilmes que permanecem aderidos. Este material suporte é mais denso que os utilizados no MBBR, sendo comum o uso de brita. O efluente a ser tratado é distribuído por cima dos filtros através de distribuidores rotativos sobre as superfícies do material suporte permitindo a interação com o biofilme. Os efluentes percolam o material suporte de forma descendente,

carreando consigo o oxigênio necessário para promover as reações que ocorrem no biofilme (Daigger & Boltz, 2011).

Os alagados construídos são sistemas projetados que simulam áreas úmidas naturais onde possuem determinadas espécies vegetais adaptadas àquela condição. Nestes sistemas é comum o uso não só de microrganismos para o tratamento dos efluentes, mas as plantas e o solo. Tais condições promovem a remoção de contaminantes presentes nos efluentes (Kivaisi, 2001; Bakhshoodeh et al., 2020). Um aspecto importante para estes sistemas é o tempo de contato entre o efluente a zona de raízes das plantas que acabam exigindo uma área construída maior, semelhante aos sistemas de lagoas.

Os processos físicos e químicos costumam ser exitosos na remoção de sólidos suspensos, coloides e cor presentes em lixiviados de aterros sanitários. Eles podem ser ainda empregados como etapa de pré-tratamento, com o objetivo de remover nitrogênio amoniacal, ou como pós-tratamento visando a remoção de compostos recalcitrantes (Renou et al., 2008). Os processos de coagulação-floculação, processos oxidativos avançados, membranas e carvão ativado são os processos que mais se destacam no tratamento de lixiviado.

A coagulação-floculação é um processo físico-químico relativamente simples para remoção de sólidos não sedimentáveis, como surfactantes, metais tóxicos, ácidos graxos e húmicos (Torretta et., 2017). Ressalta-se que, com o emprego desse tipo de processo, ocorre a geração de um subproduto indesejável, o lodo químico. O descarte do lodo é um dos problemas desta técnica, pois ele tende a possuir concentrações elevadas de alumínio e/ou ferro dependendo do agente coagulante utilizado no processo.

Os processos oxidativos avançados requerem a geração de radicais hidroxila ( $\bullet\text{OH}$ ) que são os responsáveis pela degradação dos compostos recalcitrantes (Cho, Hong & Hong, 2002; Pera-Titus et al., 2004). Assim, oxidantes fortes como o ozônio, peróxido de hidrogênio, íons ferrosos, radiação UV e dióxido de titânio são utilizados como agentes promotores desses radicais. Porém alguns desses processos que ainda apresentam limitações em escala real podem ser ineficazes em efluentes com turbidez e, em alguns casos, pode haver a geração de lodo contendo ferro, como nos processos Fenton e Foto-Fenton (Brienza & Katsoyiannis, 2017). Outra limitação dessas técnicas é a ação inespecífica do radical hidroxila podendo gerar outros compostos a partir da condensação dos produtos intermediários da degradação.

O uso de membranas no tratamento de lixiviados tem se expandido principalmente nas grandes cidades. As membranas são basicamente uma interface fina que controla a permeação de determinadas espécies químicas em contato com ela. A constituição das membranas pode ser homogênea ou heterogênea, apresentando camadas de composições. A microfiltração, ultrafiltração, nanofiltração e a osmose inversa são exemplos de processos com membranas que podem ser aplicados no tratamento de lixiviados (Baker, 2004; Metcalf & Eddy, 2016). Os problemas desta técnica são o efluente descartado pelo processo (concentrado), que normalmente possui concentrações elevadas de contaminantes, e o descarte das membranas utilizadas.



Técnicas que utilizam o fenômeno da adsorção também têm sido aplicadas no tratamento de lixiviados e o carvão ativado é um adsorvente usado com sucesso na remoção de contaminantes. No entanto, a necessidade frequente de regeneração é uma desvantagem do uso do carvão. (Renou et al., 2008) A regeneração consiste em um conjunto de processos que tem por objetivo a recuperação parcial da capacidade adsorvente do carvão exaurido, o que resulta em aumento dos custos de operação (Metcalf & Eddy, 2016).

Logo, diferentes processos podem ser utilizados para o tratamento de lixiviado de aterro sanitário e cada um possui vantagens e desvantagens intrínsecas que devem ser conhecidas antes de sua implementação. Na Tabela 1 são citados alguns desses processos adotados para o tratamento de lixiviados de aterros brasileiros.

**Tabela 1: Tipos de tratamento de lixiviado empregados em aterros brasileiros.**

Aterro	Localização	Tipo de Tratamento	Referências
Central de Tratamento de Resíduos Seropédica	Seropédica/RJ	Processos físicos, químicos e biológicos, incluindo osmose inversa	(Ciclus, 2020)
Central de Tratamento de Resíduos Alcantara	São Gonçalo/RJ	Pré-tratamento (filtração) e osmose inversa em 3 etapas	(AST, 2020)
Conselheiro Josino	Campos dos Goytacazes/RJ	Pré-tratamento (filtração) e osmose inversa em 3 etapas	(AST, 2020)
Nova Friburgo	Nova Friburgo/RJ	Pré-tratamento (filtração) e osmose inversa em 2 etapas adaptada para o concentrado	(AST, 2020)
Osasco	Osasco/SP	MBR ( <i>Membrane Biological Reactor</i> )	(Sprovieri & Contrera, 2017)
Rio Claro	Rio Claro/SP	MBR ( <i>Membrane Biological Reactor</i> )	(Sprovieri & Contrera, 2017)
Rincão das Flores	Caxias do Sul/RS	Coagulação/floculação, filtro biológico e lodo ativado	(Pertile, 2013)
Lajeado	Lajeado/RS	Coagulação/floculação, filtro de areia e osmose inversa	(Roehrs et al., 2019)
Aterro sanitário de Foz do Iguaçu	Foz do Iguaçu/PR	Pré-tratamento (filtração) e osmose inversa	(CATVE, 2019)
Maceió	Maceió/AL	Lagoas anaeróbia e aerada, coagulação/floculação, filtração (carvão ativado e zeólita) e nanofiltração	(Araújo, 2019)

Apesar de se constatar que em muitos aterros brasileiros são empregadas tecnologias avançadas para o tratamento do lixiviado, é importante esclarecer que somente 30% de todos os aterros sanitários instalados contam com tratamento do lixiviado in loco, ou seja, que é realizado no próprio aterro (Brasil, 2019). Diante desse cenário, uma estratégia muito comum é o envio do lixiviado para estações de tratamento de esgoto para que ocorra o chamado tratamento combinado. Essa técnica consiste no tratamento conjunto do lixiviado e do esgoto na ETE, de

maneira que o efluente tratado atenda aos requisitos previstos pela legislação (Gomes, 2009). Os pontos positivos da adoção dessa alternativa se concentram na questão econômica: baixos custos de operação, sem a necessidade de adição de nitrogênio e fósforo, elementos presentes em maiores concentrações no lixiviado e esgoto, respectivamente (Renou et al., 2008). Os pontos negativos se referem aos compostos com possíveis efeitos tóxicos à biomassa ou com baixa biodegradabilidade presentes no lixiviado, que podem reduzir a eficiência do tratamento (Çeçen & Aktaş, 2004).

No âmbito legal, com a Lei 11.445 de 2007, foram estabelecidas novas diretrizes nacionais, destacando o planejamento dos serviços básicos como instrumento fundamental para atingir a universalização do saneamento básico no Brasil. O documento preconiza que o Plano Municipal de Saneamento Básico seja elaborado pelas prefeituras de todos os municípios do país para que, após a aprovação por parte do Governo Federal, sejam destinadas verbas para obras de saneamento (Brasil, 2007). Fica claro também que tais planos devem abranger as quatro áreas: serviços de água, esgotos, resíduos sólidos e drenagem das águas pluviais urbanas (Trata Brasil, 2017). De acordo com os relatórios do SNIS, em 2021, pelo menos 95,4% dos municípios contavam com sistemas de abastecimento de água e 50% eram providos de sistemas públicos de esgotamento sanitário. Ainda segundo esse levantamento, 65,6% dos municípios informaram atender toda sua população urbana com coleta direta e indireta de resíduos domiciliares e 68,2% dos municípios contavam com algum tipo de sistema de drenagem (Brasil, 2022a; Brasil, 2022b; Brasil, 2022c).

Tanto a gestão dos serviços de esgoto quanto a dos resíduos sólidos se encontram sob a titularidade do poder público municipal, estabelecendo-se um cenário propício para a implementação do tratamento combinado de lixiviado e esgoto sanitário. Na Tabela 2 são elencados alguns exemplos de aterros brasileiros que atualmente enviam ou já enviaram lixiviado para estações de tratamento de esgotos.

**Tabela 2: Aterros brasileiros que utilizam o tratamento combinado.**

Aterro	Localização	Status	ETE <sup>1</sup>	Tipo de Tratamento	Referências
Bandeirantes	São Paulo/SP	Desativado	Barueri	Lodo ativado convencional	(Bocchiglieri, 2010; Silva, 2011; ECOURBIS, 2020; Rosa et al., 2017; Figueiredo, 2011; CONSEMA, 2018; Brasil, 2017)
São João		Desativado			
Santo Amaro		Desativado			
Vila Albertina		Desativado			
Essencis		Em operação			
CDR Pedreira		Em operação			
Extrema	Porto Alegre/RS	Desativado	Lami	Lagoas de estabilização	(Bocchiglieri, 2010; Kreling, 2006; Gomes, 2009)
Santa Tecla	Gravataí/RS	Desativado	Canoas	Lodo ativado em bateladas	(Sousa, 2011)
Salvaterra	Juiz de Fora/MG	Desativado	Barbosa Lage	Lodo ativado com aeração prolongada	(Magalhães, 2012; Brasil, 2017)



CTR BR-040	Belo Horizonte/ MG	Desativado	Ribeirão Arrudas	Lodo ativado convencional	(Moravia, 2010; Brasil, 2017)
Dois Arcos	São Pedro da Aldeia/RJ	Em operação	São Pedro (ProLagos)	Lodo ativado com remoção biológica de nutrientes	(Nascentes, 2013)

<sup>1</sup>ETE – Estação de Tratamento de Esgotos que recebe o lixiviado.

Observa-se que muitos destes aterros já se encontram desativados, destacando a importância dessa forma de tratamento para além da vida útil dos aterros sanitários. Uma vez que o tratamento combinado já faz parte da realidade do país, são necessários esforços para o estabelecimento de critérios para a utilização dessa técnica, as quais devem ser adequadamente definidas para o cenário brasileiro, principalmente no que diz respeito à relação lixiviado/esgoto (Gomes, 2009).

Alguns autores afirmam que a relação volumétrica entre o lixiviado e o esgoto sanitário passível de ser aplicada é de 2%. Para lixiviados que apresentam valores de demanda química de oxigênio (DQO) de até 10.000 mg L<sup>-1</sup>, seria possível adotar até 5% (Mcbean, Rovers & Farquhar, 1995). Já outros estudos tomam por base o tempo de operação do aterro para adotar o percentual volumétrico de lixiviado. O lixiviado proveniente de aterro com idade intermediária (entre 5 e 10 anos) pode ser aplicado na relação volumétrica de até 4% (correspondendo a 50% da carga total de nitrogênio amoniacal da estação). Para lixiviado vindo de aterro que opera há pouco tempo (menos de 5 anos), recomenda-se percentual inferior a 2% em volume (Brennan et al., 2017).

Vale lembrar que geralmente a preocupação é avaliar quais percentuais de lixiviado que podem vir a comprometer a eficiência dos processos de tratamento. Nesse sentido, são utilizados apenas os parâmetros exigidos nas legislações brasileiras, os quais não fazem menção aos contaminantes emergentes e o lixiviado é uma fonte potencial dessas substâncias, que pode significar uma contribuição expressiva desses compostos a depender do percentual volumétrico aplicado.

## 2.4 Contaminantes emergentes

Os contaminantes emergentes podem ser compreendidos como qualquer produto químico de origem sintética ou natural que pode causar danos ao homem e/ou biota selvagem, mas que ainda não são regulamentados e, portanto, seu monitoramento não possui efeito legal. Enquadram-se nessa classificação os medicamentos (sejam drogas prescritas ou não prescritas), produtos de cuidado e higiene pessoal (sabonetes, desinfetantes etc.), aditivos químicos, entre outros (USGS, 2017).

Diferentemente dos poluentes “convencionais” presentes no esgoto como matéria orgânica e nutrientes, ainda há pouca informação sobre a dinâmica dos contaminantes emergentes em sistemas aquáticos bem como seus efeitos à saúde (Ma et al., 2018). Daí a necessidade do contínuo aprimoramento de técnicas analíticas para identificar e quantificar a variedade de compostos que podem ser encontrados e que normalmente estão em baixíssimas concentrações.

Como são substâncias que não estão regulamentadas, ainda não existem valores limites de concentrações para a descarga desses contaminantes no meio ambiente de maneira segura, havendo apenas diretrizes internacionais (Diretrizes da União Europeia 2013/39 / UE e 2015/495 / UE) (Barbosa et al., 2016). No entanto, a literatura reforça que a descarga desses contaminantes põe em risco a qualidade da água e pode ocasionar impactos nos organismos aquáticos (Luo et al., 2014). Dentre este universo de compostos, alguns merecem especial atenção como os hormônios, em virtude do seu potencial de interferência endócrina; os psicoterápicos, por sua ação no sistema nervoso central e; os antibióticos por estarem relacionados com o aumento do número de bactérias resistentes aos antimicrobianos (Montagner, Vidal & Acayaba, 2017).

Enquanto matrizes como o esgoto sanitário, água de abastecimento e solo já contam com um vasto conhecimento acerca dos contaminantes emergentes, os estudos sobre sua ocorrência e remoção em lixiviado de aterro ainda são limitados (Qi et al., 2018). Os resíduos dispostos nos aterros (medicamentos, itens de higiene e cuidado pessoal) são potenciais fontes desses compostos que possivelmente estarão presentes no lixiviado gerado.

Eggen, Moeder e Arukwe (2010) detectaram diferentes contaminantes emergentes em lixiviado com destaque para os retardadores de chama que tem potencial carcinogênico, plastificantes que possuem ação neurotóxica e repelentes de insetos. Já Lu et al. (2016) relataram a presença de diversos produtos farmacêuticos em amostras brutas de lixiviado, incluindo analgésicos e antiinflamatórios, reguladores lipídicos e estatinas redutoras de colesterol, drogas psiquiátricas, antibióticos macrólidos, drogas estimulantes, beta-lactâmicos, inibidores da bomba de prótons, anestesia dissociativa e compostos simpaticomiméticos. É possível a ocorrência de diferentes contaminantes emergentes em lixiviado de aterro sanitário em níveis semelhantes aos encontrados em esgoto sanitário (entre  $\mu\text{g L}^{-1}$  e  $\text{ng L}^{-1}$ ). O desafio é saber a quais processos o lixiviado pode ser submetido para a remoção não somente dos contaminantes “convencionais” e recalcitrantes, como também os emergentes.

## 2.5 Remoção de Contaminantes Emergentes por Diferentes Processos de Tratamento

Nos últimos 15 anos, alguns estudos avaliaram o potencial de remoção de diferentes contaminantes emergentes presentes em lixiviado de aterro sanitário através de processos de tratamento já existentes. A maior parte desses trabalhos buscou avaliar diferentes processos isolados ou combinados para a remoção de grupos específicos de micropoluentes emergentes como os aditivos químicos usados em materiais plásticos (bisfenol A e ácidos ftálicos), os desreguladores endócrinos (hormônios estrogênicos) e os produtos de cuidado pessoal e farmacêuticos (PPCP - *Pharmaceuticals and Personal Care Products*).

He et al. (2009) investigaram a remoção de ésteres de ácido ftálico e bisfenol A presentes em lixiviados de aterros sanitários jovens e antigos. Utilizando o processo Fenton, foram obtidas remoções de mais de 40% dos ésteres de ácido ftálico e 62% do bisfenol A no lixiviado antigo. Já as eficiências de remoção alcançadas no lixiviado jovem foram de apenas 20% e 37%, respectivamente. Os autores realizaram ainda um acréscimo dos compostos de interesse no lixiviado bruto e observaram que, após esse incremento, as eficiências de remoção foram superiores a 88%. Dessa forma, concluiu-se que as concentrações iniciais dos contaminantes têm

relação com as eficiências de remoção dos mesmos, indicando que as baixas concentrações dos compostos investigados no lixiviado podem dificultar a performance do processo Fenton. Silva et al. (2013) utilizaram a combinação de diferentes processos para tratar lixiviado de aterro sanitário (lodo ativado + processo foto-Fenton + lodo ativado). Já na primeira etapa biológica foram obtidas elevadas eficiências (>80%) de remoção de contaminantes, dentre eles o bisfenol A.

A remoção de éster de ftalado (derivado de ácido ftálico) por coagulação/floculação foi observada por Zhang e Wang (2009). Foram obtidas maiores eficiências utilizando cloreto de poli-alumínio comparado ao cloreto férrico e sulfato de alumínio que são os coagulantes mais utilizados neste tipo de processo.

Joseph et al. (2013) avaliaram a remoção de bisfenol A e 17 $\alpha$ -etinilestradiol (EE2) em diversas matrizes através da combinação do processo de coagulação com o processo de adsorção (nanotubos de carbono e carvão ativado em pó). Os autores utilizaram soluções sintéticas com características de lixiviados de aterros jovens e antigos. Foram observadas eficiências de remoção superiores a 99% tanto para o bisfenol A quanto para o EE2 com a combinação de coagulação e adsorção por carvão ativado. A remoção máxima dos contaminantes foi alcançada com uma dose de carvão de 80 mg L<sup>-1</sup>, no entanto, para o lixiviado de aterro antigo foi necessária uma concentração ligeiramente maior. O uso de coagulantes não representou acréscimo significativo de remoção dos contaminantes e o carvão ativado apresentou desempenho melhor que os nanomateriais de carbono.

Sui et al. (2017) estudaram a remoção de PPCP de lixiviados de aterros sanitários por um MBR. O sistema MBR era composto por um tanque anóxico, dois tanques aeróbios e um módulo de ultrafiltração. Dos dezoito PPCP investigados no trabalho, quatorze foram detectáveis nas amostras de lixiviado bruto com concentrações entre 0,39 a 349  $\mu\text{g L}^{-1}$ . Com o tratamento por MBR, destaca-se que foram obtidas eficiências de remoção superiores a 90% para o metoprolol (anti-hipertensivo) e superiores a 86% para o gemfibrozil (regulador lipídico).

A remoção de PPCP também foi avaliada por Yi et al. (2017) por meio de um sistema híbrido contendo tanques de equalização, lagoas aeróbias, alagado construído e lagoas de maturação. As maiores eficiências obtidas foram superiores a 77%.

Ao avaliar amostras de lixiviados brutos e tratados por processos biológico e/ou osmose inversa, Nika et al. (2020), observaram que o processo de osmose inversa se fazia necessário para obter remoções superiores a 98% para os principais poluentes e contaminantes emergentes dentre os mais de 50 contemplados no estudo.

O único trabalho encontrado sobre tratamento combinado foi o realizado por Pereira et al. (2018). Os autores obtiveram uma redução na atividade estrogênica durante o tratamento combinado utilizando o processo de lodo ativado com fluxo contínuo e em regime de batelada. Os resultados indicaram ainda que o aumento da concentração de lixiviado adicionado ao esgoto pode ser prejudicial para a remoção de compostos estrogênicos.

No caso do tratamento combinado, uma estratégia para promover a remoção dos contaminantes poderia ser a inclusão de uma etapa de pós-tratamento nas ETE, utilizando as técnicas já aplicadas para o tratamento de lixiviado, como os processos oxidativos avançados e o

uso de membranas. Essas técnicas têm elevado custo de operação quando empregadas no tratamento do lixiviado bruto, necessitando de frequentes substituições das membranas, por exemplo. No entanto, se adotadas como pós-tratamento de efluentes de um sistema combinado (esgoto com lixiviado), o efluente a ser tratado já seria bem mais tolerável, apresentando baixas concentrações de matéria orgânica, sólidos e, ocasionalmente, nutrientes. A inserção de um pré-tratamento por coagulação-floculação apenas ao lixiviado também pode minimizar os danos às membranas (Alfaia et al., 2019), tornando o sistema de tratamento mais eficiente e menos oneroso.

No Estado do Rio de Janeiro, a lei 9.055 sancionada em 8 de outubro de 2020, afirma no Artigo 13 que fica proibido o tratamento do lixiviado bruto nas ETE a menos que haja pré ou pós-tratamento de forma a assegurar o atendimento aos padrões de descarte da Resolução CONAMA 430/2011 (Rio de Janeiro, 2020). Tal determinação pode, ainda que de forma não intencional, resultar em maiores remoções de contaminantes emergentes.

### 3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

No Brasil a disposição final de resíduos sólidos se dá predominantemente em lixões, aterros controlados e aterros sanitários. Uma vez que a Política Nacional de Resíduos Sólidos determinou em 2010 a erradicação dos lixões, incentivando assim a ampliação da disposição final em aterros sanitários, o debate sobre o tratamento do lixiviado ainda estará presente por muito tempo.

No entanto, as diversas técnicas de tratamento ainda são predominantemente projetadas para remoção de matéria orgânica e nutrientes, enquanto demais questões, como a remoção de contaminantes emergentes, se restringem aos poucos estudos acadêmicos. Apesar disso, tais estudos demonstram o potencial de remoção de alguns desses contaminantes por processos de tratamento que já são empregados no Brasil. Dessa forma, é possível que a sua remoção esteja ocorrendo ao longo das etapas de tratamento dos lixiviados brasileiros.

O tratamento combinado do lixiviado de aterro sanitário com o esgoto nas estações de tratamento de esgoto representa uma forma de tratamento conveniente sob o ponto de vista do gerenciamento. A possibilidade de enviar o lixiviado de aterros encerrados para as estações de tratamento de esgotos consiste na solução de um problema que, eventualmente, todos os aterros um dia enfrentarão.

Por outro lado, a adição de lixiviado nas estações de tratamento de esgoto pode representar um aporte de contaminantes emergentes para o qual as estações não foram preparadas. Nesse sentido, a inclusão de etapas de pré e pós-tratamento pode ser uma estratégia exitosa na remoção desses contaminantes. Somado a esta questão de caráter operacional, é preciso que surjam proposições para o aprimoramento das legislações para o descarte seguro destes efluentes, alicerçadas em estudos que integrem eficiência, viabilidade econômica e, sobretudo, garantia da saúde.

#### 4 REFERÊNCIAS

- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. (1984) NBR 8419: Apresentação de projetos de aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos - Procedimento. Rio de Janeiro.
- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. (1997) NBR 13896: Aterros de resíduos não perigosos - Critérios para projeto, implantação e operação - Procedimento. Rio de Janeiro.
- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2010) NBR 15849: Resíduos sólidos urbanos - Aterros sanitários de pequeno porte - Diretrizes para localização, projeto, implantação, operação e encerramento. Rio de Janeiro.
- Alfaia, R. G. S. M., Nascimento, M. M. P., Bila, D. M., & Campos, J. C. (2019). Coagulation/flocculation as a pretreatment of landfill leachate for minimizing fouling in membrane processes. *Desalination and Water Treatment*, 159, 53–59.
- Araújo, L. G. S. (2019). Avaliação do lixiviado de aterro sanitário: geração e tecnologias de tratamento. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental), Universidade Federal de Pernambuco, Caruaru, Pernambuco, Brasil.
- AST Ambiente. (2020) Projetos. Recuperado em 11 de outubro de 2020 de <https://ast-ambiente.com/pt/projetos>
- Baderna, D., Maggioni, S., Boriani, E., Gemma, S., Molteni, M., Lombardo, A., & Colombo, A. et al. (2011). A combined approach to investigate the toxicity of an industrial landfill's leachate: Chemical analyses, risk assessment and in vitro assays. *Environmental Research*, 111(4), 603–613.
- Baker, R. W. (2004). *Membrane technology and applications*. California: McGraw-Hill.
- Bakhshoodeh, R., Alavi, N., Oldham, C., Santos, R. M., Babaei, A. A., Vymazal, J., & Paydary, P. (2020). Constructed wetlands for landfill leachate treatment: A review. *Ecological Engineering*, 146, 105725.
- Barbosa, M. O., Moreira, N. F. F., Ribeiro, A. R., Pereira, M. F. R. & Silva, A. M. T. (2016). Occurrence and removal of organic micropollutants: An overview of the watch list of EU Decision 2015/495. *Water Research*, 94, 257–279.
- Barlaz, M. A., Rooker, A. P., Kjeldsen, P., Gabr, M. A. & Borden, R. C. (2002). Critical Evaluation of Factors Required To Terminate the Postclosure Monitoring Period at Solid Waste Landfills. *Environmental Science & Technology*, 36(16), 3457–3464.
- Bellver-Domingo, A., Fuentes, R., & Hernández-Sancho, F. (2017). Shadow prices of emerging pollutants in wastewater treatment plants: Quantification of environmental externalities. *Journal of Environmental Management*, 203, 439–447.



- Bocchiglieri, M. M. (2010). O lixiviado dos aterros sanitários em estações de tratamento dos sistemas públicos de esgotos. Tese (Doutorado em Saúde Pública), Universidade de São Paulo, São Paulo, São Paulo, Brasil.
- Brasil. (2017). ANA - Agência Nacional de Águas. Atlas esgotos: despoluição de bacias hidrográficas. Brasília, DF.
- Brasil. (2007). Lei nº 11.445, de 5 de janeiro de 2007: Estabelece diretrizes nacionais para o saneamento básico, Brasília, DF.
- Brasil. (2022a). Ministério das Cidades. Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento: Diagnóstico dos Serviços de Água e Esgoto. Brasília, DF.
- Brasil. (2022b). Ministério das Cidades. Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento: Diagnóstico do Manejo de Resíduos Sólidos Urbanos. Brasília, DF.
- Brasil. (2022c). Ministério das Cidades. Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento: Diagnóstico de Drenagem e Manejo de Águas Pluviais Urbanas. Brasília, DF.
- Brasil. (2011). Ministério do Meio Ambiente. Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). Resolução nº430 de 13 de maio de 2011: Dispõe sobre as condições e padrões de lançamentos de efluentes, Brasília, DF.
- Brennan, R. B., Clifford, E., Devroedt, C., Morrison, L. & Healy, M. G. (2017). Treatment of landfill leachate in municipal wastewater treatment plants and impacts on effluent ammonium concentrations. *Journal of Environmental Management*, 188, 64–72.
- Brienza, M., & Katsoyiannis, I. A. (2017). Sulfate Radical Technologies as Tertiary Treatment for the Removal of Emerging Contaminants from Wastewater. *Sustainability*, 9(9), 1604.
- Campos, J. R. (2014). Descarte de Lixiviado de aterros sanitários em estações de tratamento de esgoto: Uma análise crítica. *Revista DAE*, 62(197), 6–17.
- Carrilho, S. M. S. V. & Carvalho, E. H. (2016). Avaliação da disposição de lodos de fossa e tanque sépticos em lagoas de estabilização que tratam lixiviados de aterro sanitário. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, 21(1), 183-196.
- Castilhos Junior, A.B. (Coord.) et al. (2003). Resíduos sólidos urbanos: aterro sustentável para municípios de pequeno porte. PROSAB. Rio de Janeiro: ABES.
- CATVE. (2019). Prefeitura de Foz inaugura Estação de Tratamento de Chorume no Aterro Sanitário. Recuperado em 5 de outubro de 2020 em <https://catve.com/noticia/6/264647/>
- Çeçen, F., & Aktaş, Ö. (2004). Aerobic Co-Treatment of Landfill Leachate with Domestic Wastewater. *Environmental Engineering Science*, 21(3), 303–312.





- Cho, S. P., Hong, S. C., & Hong, S.-I. (2002). Photocatalytic degradation of the landfill leachate containing refractory matters and nitrogen compounds. *Applied Catalysis B: Environmental*, 39(2), 125–133.
- Ciclus. (2020). De passivos ambientais a ativos econômicos. Recuperado em 10 de outubro de 2020 em: [http://ciclusambiental.com.br/pt\\_BR/agua-e-biogas/](http://ciclusambiental.com.br/pt_BR/agua-e-biogas/)
- CONSEMA. (2018). Ata da Audiência Pública sobre o EIA/RIMA do empreendimento “Aterro Sanitário de Co-disposição de Resíduos Industriais Classe II A e B”, de responsabilidade da CDR Pedreira. São Paulo, 8 maio 2018. Recuperado em 5 de outubro de 2020 em: <https://smastr16.blob.core.windows.net/consema/2019/03/ata-da-ap-aterro-sanitario-cdr-pedreira-2018.05.08-em-sao-paulo.pdf>
- Costa, A. M., Alfaia, R. G. de S. M., & Campos, J. C. (2019). Landfill leachate treatment in Brazil – An overview. *Journal of Environmental Management*, 232, 110–116.
- Daigger, G. T., & Boltz, J. P. (2011). *Trickling Filter and Trickling Filter-Suspended Growth Process Design and Operation: A State-of-the-Art Review*. Water Environment Research.
- ECOURBIS. (2020). Serviços. Recuperado em 5 de outubro de 2020 em: <https://www.ecourbis.com.br/aterros-desativados.aspx?content=santo-amaro>
- Eggen, T., Moeder, M., & Arukwe, A. (2010). Municipal landfill leachates: A significant source for new and emerging pollutants. *Science of The Total Environment*, 408(21), 5147–5157.
- Figueiredo, N. J. V. (2011). Utilização de biogás de aterro sanitário para geração de energia elétrica - estudo de caso. Dissertação (Mestrado em Ciências), Universidade de São Paulo, São Paulo, São Paulo, Brasil.
- Gomes, L. P. (coord) et al. (2009). Resíduos Sólidos. Estudos de caracterização e tratabilidade de lixiviados de aterros sanitários para as condições brasileiras. PROSAB 5. Rio de Janeiro: ABES.
- Great Britain. (2003). *Guidance on monitoring of landfill leachate, groundwater and surface water*. Bristol: Environment Agency.
- He, P.-J., Zheng, Z., Zhang, H., Shao, L.-M., & Tang, Q.-Y. (2009). PAEs and BPA removal in landfill leachate with Fenton process and its relationship with leachate DOM composition. *Science of The Total Environment*, 407(17), 4928–4933.
- Jordão, E. P.; Pessôa, C. A. (2014). *Tratamento de esgotos domésticos*. Rio de Janeiro: ABES.
- Joseph, L., Boateng, L. K., Flora, J. R. V., Park, Y.-G., Son, A., Badawy, M., & Yoon, Y. (2013). Removal of bisphenol A and 17 $\alpha$ -ethinyl estradiol by combined coagulation and adsorption using carbon nanomaterials and powdered activated carbon. *Separation and Purification Technology*, 107, 37–47.
- Kivaisi, A. K. (2001). The potential for constructed wetlands for wastewater treatment and reuse in developing countries: A review. *Ecological Engineering*, 16(4), 545–560.

- Kjeldsen, P., Barlaz, M. A., Rooker, A. P., Baun, A., Ledin, A. & Christensen, T. H. (2002). Present and Long-Term Composition of MSW Landfill Leachate: A Review. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 32(4), 297–336.
- Kreith, F.; Tchobanoglous, G. (2002). *Handbook of Solid Waste Management*. California: McGraw-Hill.
- Kreling, M. T. (2006). Aterro sanitário da Extrema e resíduos sólidos urbanos domiciliares: percepção dos moradores. Dissertação (Mestrado em Geografia), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Rio Grande do Sul, Brasil.
- Lee, G. F. & Jones-Lee, A. (1996). Dry Tomb Landfills. *MSW Management*, 6, 82-89.
- Lu, M.-C., Chen, Y. Y., Chiou, M.-R., Chen, M. Y., & Fan, H.-J. (2016). Occurrence and treatment efficiency of pharmaceuticals in landfill leachates. *Waste Management*, 55, 257–264.
- Luo, Y., Guo, W., Ngo, H. H., Nghiem, L. D., Hai, F. I. Zhang, J. & Liang, S. et al. (2014). A review on the occurrence of micropollutants in the aquatic environment and their fate and removal during wastewater treatment. *Science of The Total Environment*, 473–474, 619–641.
- Ma, J., Dai, R., Chen, M., Khan, S. J. & Wang, Z. (2018). Applications of membrane bioreactors for water reclamation: Micropollutant removal, mechanisms and perspectives. *Bioresource Technology*, 269, 532–543.
- Magalhães, D. N. D. (2012). Toxicidade no cotratamento de esgoto sanitário e lixiviado de aterro sanitário. Dissertação (Mestrado em Ciências), Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, Minas Gerais, Brasil.
- Mannina, G., & Viviani, G. (2009). Hybrid moving bed biofilm reactors: An effective solution for upgrading a large wastewater treatment plant. *Water Science and Technology*, 60(5), 1103–1116.
- Maynard, H. E., Ouki, S. K., & Williams, S. C. (1992). Tertiary lagoons: a review of removal mechanisms and performance. *Water Research*, 33(1), 1-13.
- McBean, E. A.; Rovers, F. A.; Farquhar, G. J. (1995). *Solid waste landfill engineering and design*. New Jersey: Prentice Hall.
- Metcalf, L.; Eddy, H.P. (2016). *Tratamento de Efluentes e Recuperação de Recursos*. Tradução: Ivanildo Hespanhol, José Carlos Mierzwa. São Paulo: Bookman.
- Miao, L., Yang, G., Tao, T., & Peng, Y. (2019). Recent advances in nitrogen removal from landfill leachate using biological treatments – A review. *Journal of Environmental Management*, 235, 178–185.
- Montagner, C. C., Vidal, C., & Acayaba, R. (2017). Contaminantes emergentes em matrizes aquáticas do Brasil: Cenário atual e aspectos analíticos, ecotoxicológicos e regulatórios. *Química Nova*, 40(9), 1094-1110.



- Moravia, W. G. (2010). Avaliação do tratamento de lixiviado de aterro sanitário através de processo oxidativo avançado conjugado com sistema de separação por membranas. Tese (Doutorado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos), Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil.
- Moura, M. C. C., Santos, G. O., Silva, M. L., Silva, R. A. C. da, Leite, N. D., & Bastos, J. B. dos S. (2023). Influência da granulometria das cinzas de incineração de resíduos sólidos perigosos (RSP) na filtração de lixiviado de aterro sanitário. HOLOS, 5(39). <https://doi.org/10.15628/holos.2023.16328>
- Nascentes, A. L. (2013). Tratamento combinado de lixiviado de aterro sanitário e esgoto doméstico. Tese (Doutorado em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos), Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil.
- Nika, M. C., Ntaiou, K., Elytis, K., Thomaidi, V. S., Gatidou, G., Kalantzi, O. I., & Thomaidis, N. S., et al. (2020). Wide-scope target analysis of emerging contaminants in landfill leachates and risk assessment using Risk Quotient methodology. *Journal of Hazardous Materials*, 394, 122493.
- Oller, I., Malato, S., & Sánchez-Pérez, J. A. (2011). Combination of Advanced Oxidation Processes and biological treatments for wastewater decontamination—A review. *Science of The Total Environment*, 409(20), 4141–4166.
- Pera-Titus, M., García-Molina, V., Baños, M. A., Giménez, J. & Espuglas, S. (2004). Degradation of chlorophenols by means of advanced oxidation processes: A general review. *Applied Catalysis B: Environmental*, 47(4), 219–256.
- Pereira, C. P., Pereira, T. C., Gomes, G., Quintaes, B. R., Bila, D. M., & Campos, J. C. (2018). Evaluation of reduction estrogenic activity in the combined treatment of landfill leachate and sanitary sewage. *Waste Management*, 80, 339–348.
- Pertile, C. (2013). Avaliação de processos de separação por membranas como alternativas no tratamento de lixiviado de aterro sanitário. Dissertação (Mestrado em Engenharia), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Rio Grande do Sul, Brasil.
- Pesenti, M. E. A., Marques, T. A., Campos, V. A., Urata, S. L., & Prates, K. V. M. C. (2023). Avaliação do potencial biorremediador dos fungos *Candida* spp. e *Trichophyton* spp. no tratamento de lixiviado proveniente de aterro sanitário. HOLOS, 5(39). <https://doi.org/10.15628/holos.2023.16307>
- Qi, C., Huang, J., Wang, B., Deng, S., Wang, Y., & Yu, G. (2018). Contaminants of emerging concern in landfill leachate in China: A review. *Emerging Contaminants*, 4(1), 1–10.
- Renou, S., Givaudan, J. G., Poulain, S., Dirassouyan, F., & Moulin, P. (2008). Landfill leachate treatment: Review and opportunity. *Journal of Hazardous Materials*, 150(3), 468–493.
- Rio de Janeiro (2020). Lei nº 9.055, de 8 de outubro de 2020: Diário Oficial do Estado do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 9 de outubro de 2020, n. 188, ano XLVI, parte I, p. 2–3.



- Roehrs, G.; Benoit, L. A.; Mallmann, R. A.; Mallmann, A. C. (2019). Avaliação do tratamento de chorume do aterro sanitário de lajeado, utilizando sistema físico-químico e osmose reversa. In: 10º FÓRUM INTERNACIONAL DE RESÍDUOS SÓLIDOS, João Pessoa. Anais... João Pessoa: Instituto Venturi.
- Rosa, B. P., Paula, B. C. de L., Coleone, E. S. do A., & Campos, F. (2017). Impactos causados em cursos d'água por aterros controlados desativados no Município de São Paulo, Sudeste do Brasil. *Revista Brasileira de Gestão Ambiental e Sustentabilidade*, 4(7), 63–76.
- Shroff, V. S. (1999). An investigation of leachate production from MSW landfills in semi-arid climates. Dissertação (Mestrado em Ciências), University of Calgary, Calgary, Alberta, Canadá.
- Silva, C. A. M. da C. e, Campos, J. C., Ferreira, J. A., Miguel, M. A. L., & Quintaes, B. R. (2011). Caracterização microbiológica de lixiviados gerados por resíduos sólidos domiciliares e de serviços de saúde da cidade do Rio de Janeiro. *Engenharia Sanitaria e Ambiental*, 16(2), 127–132.
- Silva, T. F. C. V., Silva, M. E. F., Cunha-Queda, A. C., Fonseca, A., Saraiva, I., Sousa, M. A., & Gonçalves, C., et al. (2013). Multistage treatment system for raw leachate from sanitary landfill combining biological nitrification–denitrification/solar photo-Fenton/biological processes, at a scale close to industrial – Biodegradability enhancement and evolution profile of trace pollutants. *Water Research*, 47(16), 6167–6186.
- Souto, G. D. de B. (2009). Lixiviado de aterros sanitários brasileiros – estudo de remoção do nitrogênio amoniacal por processo de arraste com ar ("stripping"). Tese (Doutorado em Engenharia), Universidade de São Paulo. São Carlos, São Paulo, Brasil.
- Souza, Â. A. R. (2011). Tratamento consorciado de esgoto sanitário com lixiviados de aterros sanitários, lodo de tanques sépticos e efluentes de sanitários químicos por lodos ativados em batelada na ETE Canoas – CORSAN. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade do Vale do Rio dos Sinos. São Leopoldo, Rio Grande do Sul, Brasil.
- Sprovieri, J. A. S; Contrera, R. C. (2017). Levantamento dos Aterros Sanitários com Tratamento de Lixiviado in loco no Estado de São Paulo e suas tecnologias. In: V SIMPÓSIO SOBRE RESÍDUOS SÓLIDOS (SIRS), São Paulo. Anais...São Paulo: Escola de Engenharia de São Carlos- USP São Carlos.
- Sui, Q., Zhao, W., Cao, X., Lu, S., Qiu, Z., Gu, X., & Yu, G. (2017). Pharmaceuticals and personal care products in the leachates from a typical landfill reservoir of municipal solid waste in Shanghai, China: Occurrence and removal by a full-scale membrane bioreactor. *Journal of Hazardous Materials*, 323, 99–108.
- Sutherland, K. (2010). The rise of membrane bioreactors. *Filtration & Separation*, 47(5), 14–16.
- Torretta, V., Ferronato, N., Katsoyiannis, I., Tolkou, A., & Airoidi, M. (2016). Novel and Conventional Technologies for Landfill Leachates Treatment: A Review. *Sustainability*, 9(1), 9-23.
- Toufexi, E., Tsarpali, V., Efthimiou, I., Vidali, M-S., Vlastos, D., & Dailianis, S. (2013). Environmental and human risk assessment of landfill leachate: An integrated approach with the use of HOLOS, Ano 39, v.6, e11424, 2023

cytotoxic and genotoxic stress indices in mussel and human cells. *Journal of Hazardous Materials*, 260, 593–601.

Trata Brasil. (2017) A importância do Plano Municipal de Saneamento Básico no Brasil. Recuperado em 7 de outubro de 2020 em: <http://www.tratabrasil.org.br/blog/2017/02/02/planos-municipais-no-brasil/>

USGS. (2017). Contaminants of Emerging Concern in the Environment. Recuperado em 2 de outubro de 2020 em: <https://toxics.usgs.gov/investigations/cec/index.php>

Von Sperling, M. (2002). Princípios do tratamento biológico de águas residuárias, v.4 - Lodos Ativados. Belo Horizonte: Editora UFMG.

Yi, X., Tran, N. H., Yin, T., He, Y., & Gin, K. Y.-H. (2017). Removal of selected PPCPs, EDCs, and antibiotic resistance genes in landfill leachate by a full-scale constructed wetlands system. *Water Research*, 121, 46–60.

Yu, W. (2013). Leachate management in the aftercare period of municipal waste landfills. Tese (Doutorado em Ciência e Tecnologia), Aalto University, Espoo, Uusimaa, Finlândia.

Zhang, C., & Wang, Y. (2009). Removal of dissolved organic matter and phthalic acid esters from landfill leachate through a complexation–flocculation process. *Waste Management*, 29(1), 110–116.

## COMO CITAR ESTE ARTIGO

Pereira, B. C., Oliveira, J. L. da M., & Nascetes, A. L. DISCUSSÕES SOBRE AS ALTERNATIVAS DE TRATAMENTO DE LIXIVIADO DE ATERRO SANITÁRIO NO BRASIL DIANTE DO DESAFIO DOS CONTAMINANTES EMERGENTES. *HOLOS*, 6(39). Recuperado de <https://www2.ifrn.edu.br/ojs/index.php/HOLOS/article/view/11424>

## SOBRE OS AUTORES

### B. C. PEREIRA

Doutora em Saúde Pública e Meio Ambiente pela Fundação Oswaldo Cruz (Fiocruz), possui mestrado em Engenharia Agrícola e Ambiental pela Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro (UFRRJ) (2018) e graduação em Engenharia Química pela mesma instituição. Áreas de pesquisa: tratamento de esgotos sanitários, tratamento de lixiviado de aterro sanitário e emissões de gases do efeito estufa por processos de tratamento de esgotos.

E-mail: [barbaracp90@gmail.com](mailto:barbaracp90@gmail.com)

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-2683-9886>

### J. L. da M. OLIVEIRA

Pesquisador em Saúde Pública do Departamento de Saneamento e Saúde Ambiental da Escola Nacional de Saúde Pública Sérgio Arouca da Fundação Oswaldo Cruz (Fiocruz). Licenciado em Ciências Biológicas, Mestre e Doutor em Microbiologia com ênfase em Ambiental pela Universidade Federal do Rio de



Janeiro (UFRJ). Áreas de pesquisa: cotratamento de lixiviado de aterros sanitários com esgoto doméstico com remoção simultânea de nitrogênio e fósforo, desenvolvimento de tratamento terciário de esgotos com vistas a remoção de micropoluentes emergentes e monitoramento de micropoluentes emergentes em água.

E-mail: [jaimel@ensp.fiocruz.br](mailto:jaimel@ensp.fiocruz.br)

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-0361-3457>

#### **A.L. NASCENTES**

Professor Associado da Área de Hidráulica e Recursos Hídricos da Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro (UFRRJ). Docente Permanente do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola e Ambiental (PGEAAmb/UFRRJ). Doutor em Engenharia de Processos Químicos e Bioquímicos pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), mestre em Saúde Pública pela Fundação Oswaldo Cruz (Fiocruz), com graduação em Engenharia Civil (Ênfase em Engenharia Sanitária) pela Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ). Áreas de pesquisa: tratamento de esgoto, tratamento de lixiviado de aterro sanitário e gestão de resíduos sólidos urbanos e agroindustriais.

E-mail: [alexandrelioi@gmail.com](mailto:alexandrelioi@gmail.com)

ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0002-3071-5969>

**Editor responsável:** Francioli Araújo



Submetido 23/10/2020

Aceito 27/11/2023

Publicado 27/12/2023