

ANTIBIÓTICOS EM ATERROS SANITÁRIOS E MATRIZES ASSOCIADAS: OCORRÊNCIA, RISCO, TRANSPORTE E TRATAMENTO

Stefan Fabi Braga Bezerra¹, Najla Ysabela Rabelo Coelho Santos², Ricardo Luvizotto-Santos^{1,3}

¹*Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia Ambiental, Universidade Federal do Maranhão, São Luís/MA, Brasil (Stefan.Bezerra@ifma.edu.br)*

²*Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia Ambiental, Universidade Federal do Maranhão, São Luís/MA, Brasil*

³*Grupo de Ecotoxicologia Aquática, Universidade Federal do Maranhão, São Luís, MA, Brasil.*

Resumo: A presença de antibióticos em aterros sanitários representa uma preocupação ambiental devido ao potencial de contaminação de diferentes matrizes e à disseminação da resistência antimicrobiana. Este estudo teve como objetivo mapear os antibióticos investigados em pesquisas relacionadas a aterros sanitários e matrizes associadas. A análise foi realizada a partir de um corpus composto por 23 artigos, recuperados das bases Scopus e Web of Science, classificados quanto às classes de antibióticos, matrizes ambientais e abordagens de ocorrência, transporte, risco ecológico e tratamento. Sulfonamidas, fluoroquinolonas e tetraciclinas destacaram-se como as classes mais investigadas, enquanto o lixiviado foi a principal matriz estudada, seguido por águas subterrâneas e superficiais. Os resultados obtidos reforçam a necessidade de estratégias integradas de monitoramento, contribuindo para o aprimoramento da avaliação de risco e da gestão ambiental desses sistemas.

Palavras-chave: Antibióticos; Contaminantes emergentes; Lixiviado; Química ambiental; Resistência antimicrobiana

INTRODUÇÃO

A disposição de medicamentos vencidos ou não utilizados junto aos resíduos sólidos urbanos cria uma rota de entrada de fármacos em aterros sanitários. Durante a percolação da água através da massa de resíduos, compostos farmacêuticos podem ser mobilizados para o lixiviado e, posteriormente, alcançar sistemas de tratamento e/ou ambientes receptores. Em aterros de diferentes idades, antibióticos e outros fármacos foram detectados mesmo muitos anos após seu encerramento, demonstrando que a geração prolongada de lixiviado pode manter a emissão desses contaminantes por muito tempo (Adaryani e Keen, 2022).

Estudos em lixiviados chineses registraram sulfonamidas, fluoroquinolonas e tetraciclinas em concentrações mensuráveis, com riscos ecológicos elevados para determinados compostos e classes (Wang et al., 2022; Liu et al., 2025). Em áreas de disposição na Nigéria, ciprofloxacino, norfloxacino e ofloxacino também foram quantificados, com risco

crônico elevado associado ao norfloxacino (Ajibola et al., 2024).

A problemática amplia-se pela relação entre resíduos de antibióticos, bactérias resistentes e genes de resistência a antibióticos (ARGs). Em lixiviado concentrado, correlações entre antibióticos, ARGs e metais indicaram um cenário de exposição combinada, ampliando o risco ambiental (Liu et al., 2025). Em sistemas de lodo ativado alimentados com lixiviado, microplásticos alteraram a abundância e a trajetória de migração de genes *tet*, evidenciando que partículas presentes no sistema podem interferir na disseminação da resistência (Liu et al., 2023).

Apesar do crescente reconhecimento dos lixiviados de aterros sanitários como fontes potenciais de contaminantes emergentes, os estudos sobre a ocorrência de antibióticos nesses sistemas apresentam grande heterogeneidade quanto aos compostos, classes farmacológicas, matrizes ambientais e abordagens metodológicas. Essa diversidade dificulta

a consolidação do conhecimento sobre os principais antibióticos associados aos aterros sanitários, bem como a identificação de lacunas relacionadas ao monitoramento, avaliação de risco e desenvolvimento de estratégias de controle. Dessa forma, o mapeamento da produção científica, por meio de análises bibliométricas, torna-se uma ferramenta importante para compreender a evolução do campo de pesquisa, identificar tendências emergentes, lacunas de conhecimento e direcionar futuras investigações sobre a presença e o comportamento desses contaminantes no ambiente (Donthu et al., 2021).

Diante desse contexto, o objetivo deste trabalho foi mapear os antibióticos investigados em estudos relacionados aos aterros sanitários, identificando as classes e os compostos mais recorrentes, as matrizes analisadas e as principais abordagens ambientais, com ênfase em ocorrência, risco, transporte, tratamento e resistência antimicrobiana.

MATERIAL E MÉTODOS

A análise foi realizada a partir de um recorte de um corpus composto por 97 artigos originais sobre contaminantes emergentes em sistemas relacionados a aterros sanitários. A classificação manual dos contaminantes permitiu identificar 23 artigos associados ao grupo “antibiotics”, correspondendo a 23,7% do corpus. As categorias de contaminantes não foram consideradas mutuamente exclusivas, pois um mesmo artigo poderia investigar antibióticos e outros contaminantes.

A extração de dados baseou-se em metadados, resumos e informações bibliográficas disponíveis na base oficial do corpus, complementados pela análise dos textos completos dos artigos. Para cada estudo foram extraídos: ano, antibiótico ou classe explicitamente investigada, a matriz ambiental, a abordagem adotada e os principais resultados. Compostos citados apenas como contextualização, sem investigação direta, não foram considerados na análise.

As abordagens foram organizadas em cinco eixos: 1) ocorrência/monitoramento; 2) avaliação de risco; 3) transporte/comportamento; 4) tratamento/remoção; e 5) resistência antimicrobiana. As frequências foram calculadas por artigo, considerando uma ocorrência por categoria em cada estudo. Quando os resumos ou os textos completos não especificavam os analitos investigados, o estudo foi mantido na síntese geral, porém excluído das análises de frequência dos compostos individuais.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os 23 artigos foram publicados entre 2015 e 2025, com maior concentração a partir de 2021. O lixiviado foi investigado em 17 estudos (73,9%), seguido por águas subterrâneas e superficiais, com seis estudos cada (26,1%). Efluentes apareceram em três artigos, enquanto resíduo sólido, solo e lodo foram menos frequentes (Figura 1). Esse padrão confirma que o lixiviado permanece como a principal matriz para avaliar a liberação de antibióticos, mas também mostra a expansão das pesquisas para compartimentos receptores.

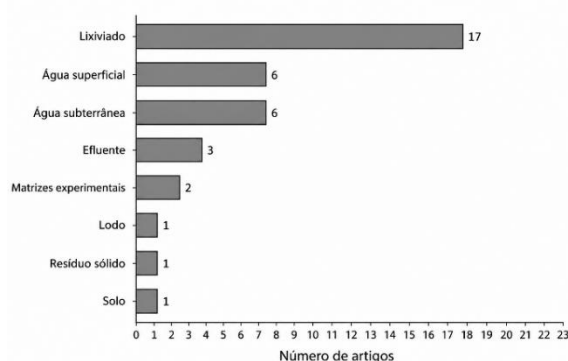


Figura 1. Matrizes investigadas nos 23 artigos (as categorias não são mutuamente exclusivas).

As classes mais recorrentes foram sulfonamidas, fluoroquinolonas e tetraciclina. As sulfonamidas foram explicitamente identificadas em oito artigos, enquanto fluoroquinolonas e tetraciclina apareceram em cinco estudos cada. Macrolídeos, lincosamidas, diaminopirimidinas, β -lactâmicos e anfenicóis apresentaram menor frequência (Figura 2). A distribuição indica que a literatura priorizou grupos compatíveis com análises multiclasses e com histórico de detecção em lixiviados e águas associadas.

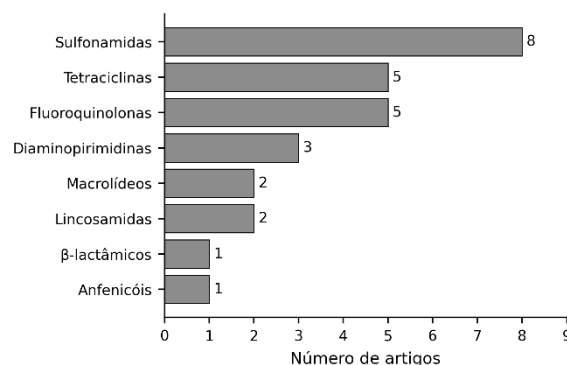


Figura 2. Frequência das classes de antibióticos explicitamente identificadas nos resumos dos artigos.

O monitoramento de Wang et al. (2022) exemplifica a diversidade de sulfonamidas e tetraciclina em lixiviados. Sete antibióticos foram detectados em 56 amostras de sete aterros: tetraciclina, oxitetraciclina, doxiciclina, sulfadiazina, sulfamerazina, sulfametazina e sulfametoxazol. O sulfametoxazol apresentou a maior concentração média, seguida por oxitetraciclina e sulfadiazina. Sulfamerazina, sulfametazina e sulfametoxazol foram associadas a risco elevado, enquanto as tetraciclina representaram menor risco no conjunto analisado.

As fluoroquinolonas apresentaram resultados particularmente relevantes. Ajibola et al. (2024) investigaram ciprofloxacino, norfloxacino e ofloxacino em lixiviados de três áreas de disposição na Nigéria, registrando ofloxacino em concentrações de até 796 µg L⁻¹. O norfloxacino apresentou risco crônico elevado para algas, *dáfnias* e peixes. Em lixiviado concentrado na China, as fluoroquinolonas também apresentaram os maiores quocientes de risco entre as classes avaliadas (Liu et al., 2025).

Os estudos mostraram que a contaminação não se restringe ao lixiviado bruto. Mu et al. (2025) detectaram sulfadiazina, sulfametazina e ofloxacino em águas superficiais e subterrâneas e modelaram o transporte da sulfadiazina. A barreira geossintética com bentonita reduziu o fluxo do contaminante em cerca de seis vezes e prolongou o tempo de estabilização em relação à barreira de argila com bentonita, destacando a importância do controle hidráulico na dispersão dos antibióticos.

No nível dos compostos individuais, sulfametazina, ofloxacino, tetraciclina, sulfametoxazol e trimetoprima estiveram entre os mais recorrentes (Tabela 1). A presença desses compostos em diferentes matrizes e abordagens indica que a seleção de analitos não foi homogênea: alguns estudos utilizaram painéis extensos, enquanto outros avaliaram grupos específicos ou compostos-alvo. Yu et al. (2024), por exemplo, analisaram 66 fármacos, dos quais 45 eram antibióticos, em lixiviados de diferentes regiões da China.

Tabela 1. Antibióticos mais recorrentes identificados nos artigos analisados.

Antibiótico	Classe	n
Sulfametazina	Sulfonamidas	4
Ofloxacino	Fluoroquinolonas	3
Tetraciclina	Tetraciclina	3

Sulfametoxazol	Sulfonamidas	3
Trimetoprima	Diaminopirimidinas	3
Azitromicina	Macrolídeos	2
Sulfadiazina	Sulfonamidas	2
Sulfamerazina	Sulfonamidas	2
Doxiciclina	Tetraciclina	2
Lincomicina	Lincosamidas	2

A variabilidade entre aterros foi uma característica constante. No estudo de Yu et al. (2024), as concentrações de fármacos diferiram regionalmente, e o tamanho da população atendida foi apontado como o principal fator associado às diferenças observadas; composição dos resíduos e carga de disposição também contribuíram. Em quatro aterros norte-americanos de diferentes idades, doxiciclina foi detectada mesmo em plantas encerradas, reforçando a persistência da liberação por lixiviado (Adaryani e Keen, 2022).

As águas subterrâneas constituíram um compartimento relevante. Em um aterro municipal encerrado e sem impermeabilização, foram detectados até 54 PPCPs (*pharmaceuticals and personal care products*) na água subterrânea; sulfamerazina esteve entre os compostos de maior risco e persistência, e as maiores concentrações ocorreram abaixo da base do aterro (Slosarczyk e Dabrowska, 2025). Em monitoramento de dez anos nas proximidades de uma instalação de tratamento de resíduos sólidos, azitromicina e claritromicina foram detectadas em águas subterrâneas, e os autores destacaram a preocupação com a seleção de resistência antimicrobiana (Simarro-Gimeno et al., 2025).

A relação entre antibióticos e resistência foi abordada por estudos de campo e tratamento. You et al. (2018) analisaram fluoroquinolonas, β-lactâmicos e ARGs em lixiviados de sete aterros. He et al. (2021) avaliaram a contaminação por resistência em quatro aterros italianos com diferentes idades.

Liu et al. (2023) demonstraram que microplásticos alteraram a abundância e a migração de genes *tet* em sistema de lodo ativado alimentado com lixiviado. Esses resultados sustentam a necessidade de integrar análises químicas e microbiológicas.

Os processos de tratamento apresentaram resultados expressivos, mas foram avaliados em condições e matrizes distintas. Na ozonização catalisada por carvão ativado granular, as remoções de



ofloxacino, enoxacino, azitromicina e tetraciclina foram de 95,7%, 83,6%, 98,5% e 100%, respectivamente; genes *erm35*, *ermB*, *tetL* e *dfrA1* também foram reduzidos em aproximadamente 80-100% (Wang et al., 2022). Em sistema eletro-Fenton heterogêneo, cloranfenicol foi um dos contaminantes degradados, enquanto a aplicação em lixiviado real também foi testada para outros CECs (*Contaminants of Emerging Concern*) (Qu et al., 2025).

A literatura incluiu ainda sistemas de tratamento em escala real. Yi et al. (2017) avaliaram a remoção conjunta de PPCPs, desreguladores endócrinos e ARGs em *wetlands* construídos tratando lixiviado. Wu et al. (2021) desenvolveram e aplicaram um método multirresíduos para 70 PPCPs em lixiviados e efluentes pecuários, permitindo identificar compostos indicadores. Esses estudos mostram que a avaliação de desempenho depende de métodos capazes de cobrir diferentes classes e de relacionar remoção química e persistência de determinantes de resistência.

Os dados de resíduos sólidos ampliam a interpretação do aterro como reservatório de longo prazo. Yu et al. (2023) analisaram amostras de resíduos em diferentes idades e profundidades e estimaram a massa de fármacos armazenada no aterro. Embora nem todos os antibióticos tenham sido discriminados no resumo, o estudo demonstra que a massa aterrada pode reter fármacos e alimentar sua liberação gradual para o lixiviado.

A avaliação de risco foi heterogênea, variando conforme composto, organismo e matriz. Nos estudos nigerianos, norfloxacino e algumas fluoroquinolonas apresentaram riscos relevantes em lixiviados (Ajibola et al., 2022; Ajibola et al., 2024). Em lixiviados chineses, sulfonamidas específicas também foram classificadas como de alto risco (Wang et al., 2022), enquanto no lixiviado concentrado as fluoroquinolonas apresentaram-se críticos (Liu et al., 2025). Assim, a frequência de detecção não deve ser interpretada isoladamente como medida de risco.

A síntese também evidencia limitações. Parte dos artigos descreveu painéis de antibióticos sem listar todos os compostos no resumo; outros investigaram ambientes sujeitos a múltiplas fontes, como esgoto, agricultura, hospitais e resíduos dispostos. Além disso, os estudos utilizaram diferentes limites analíticos, períodos de amostragem e metodologias de risco, o que impede comparar diretamente as concentrações entre todos os locais.

Ainda assim, o conjunto de evidências converge em quatro pontos: (i) o lixiviado é a principal via investigada; (ii) sulfonamidas, fluoroquinolonas e tetraciclinas concentram grande parte da atenção; (iii) águas subterrâneas e superficiais podem receber resíduos de antibióticos; e (iv) a presença simultânea de antibióticos, ARGs, metais e microplásticos exige avaliações integradas. Esses achados são diretamente sustentados pelos estudos do corpus e pelos textos completos analisados.

A ausência de um antibiótico na síntese não significa que ele não tenha sido analisado em materiais suplementares ou em listas analíticas não descritas nos documentos consultados. As frequências representam atenção científica no subconjunto, não ocorrência ambiental global.

Para o monitoramento ambiental, os resultados apoiam painéis que combinem compostos representativos de diferentes classes com ARGs e variáveis auxiliares. Também indicam que aterros encerrados e águas subterrâneas próximas não devem ser excluídos das campanhas amostrais, pois estudos recentes demonstraram emissão persistente e risco ambiental. Para tratamento, a remoção dos compostos parentais deve ser interpretada conjuntamente com a redução de ARGs e a avaliação química/toxicológica dos efluentes resultantes.

CONCLUSÃO

A análise dos 23 artigos mostrou que os antibióticos em sistemas associados a aterros sanitários foram investigados principalmente em lixiviados, seguidos por águas subterrâneas e superficiais. Sulfonamidas, fluoroquinolonas e tetraciclinas foram as classes mais recorrentes, com destaque para sulfametazina, ofloxacino, tetraciclina, sulfametoxazol e trimetoprima.

Os estudos demonstraram ocorrência, persistência, transporte, risco ecológico e remoção de antibióticos, além de associações com ARGs, metais e microplásticos. A diversidade dos resultados indica que o monitoramento deve integrar classes químicas, matrizes receptoras e indicadores microbiológicos. Aterros ativos e encerrados podem permanecer como fontes de contaminação, justificando o monitoramento prolongado do lixiviado e das águas adjacentes.

AGRADECIMENTOS

Ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia Ambiental – PPGC&Tamb/UFMA.



REFERÊNCIAS

- ADARYANI, A. R.; KEEN, O. Occurrence of pharmaceuticals and plasticizers in leachate from municipal landfills of different age. *Waste Management*, v. 141, p. 1-7, 2022. DOI: 10.1016/j.wasman.2022.01.023.
- AJIBOLA, A. S. et al. QuEChERS-based analysis and ecotoxicological risk of select antibiotics in dumpsite leachates, hospital wastewater and effluent receiving water in Ibadan, Nigeria. *Journal of Environmental Science and Health, Part A*, v. 57, p. 709-722, 2022. DOI: 10.1080/10934529.2022.2104064.
- AJIBOLA, A. S. et al. Occurrence and ecotoxicological impacts of fluoroquinolone antibiotics in leachates from three Nigerian dumpsites. *Chemistry Africa*, v. 7, p. 443-453, 2024. DOI: 10.1007/s42250-023-00748-7.
- BRANCHET, P. et al. Anthropogenic impacts on Sub-Saharan urban water resources through their pharmaceutical contamination (Yaounde, Center Region, Cameroon). *Science of the Total Environment*, v. 660, p. 886-898, 2019. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.12.256.
- CAPPARELLI, M. V. et al. Emerging contaminants in the Northeast Andean foothills of Amazonia: the case of study of the city of Tena, Napo, Ecuador. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, v. 107, p. 2-10, 2021. DOI: 10.1007/s00128-021-03275-8.
- CHAFI, S.; AZZOUZ, A.; BALLESTEROS, E. Occurrence and distribution of endocrine disrupting chemicals and pharmaceuticals in the river Bouregreg (Rabat, Morocco). *Chemosphere*, v. 287, p. 132202, 2022. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2021.132202.
- CLARKE, B. O. et al. Investigating landfill leachate as a source of trace organic pollutants. *Chemosphere*, v. 127, p. 269-275, 2015. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2015.02.030.
- DONTHU et al., 2021. How to conduct a bibliometric analysis: An overview and guidelines. *Journal of Business Research*, v. 133, p. 285-296, 2021. DOI: 10.1016/j.jbusres.2021.04.070.
- HE, P. et al. Antibiotic resistance contamination in four Italian municipal solid waste landfill sites spanning 34 years. *Chemosphere*, v. 266, p. 129182, 2021. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2020.129182.
- LIU, W. et al. Co-occurrence and risk emission potential of antibiotics, antibiotic resistance genes, and heavy metals in concentrated leachate in China. *Waste Management*, v. 201, p. 114797, 2025. DOI: 10.1016/j.wasman.2025.114797.
- LIU, H. et al. Alteration of the migration trajectory of antibiotic resistance genes by microplastics in a leachate activated sludge system. *Environmental Pollution*, v. 333, p. 121981, 2023. DOI: 10.1016/j.envpol.2023.121981.
- MU, L. et al. Contaminant transport in a municipal solid waste landfill: on-site assessment and numerical modelling of vertical barrier wall effectiveness. *Waste Management*, v. 205, p. 114978, 2025. DOI: 10.1016/j.wasman.2025.114978.
- QU, S. et al. The Fe-doped biochar cathode-modified electro-Fenton formed through one-pot pyrolysis of two solid wastes holds the potential to degrade emerging contaminants in actual wastewater: singlet oxygen plays a dominant role. *Separation and Purification Technology*, v. 371, p. 133288, 2025. DOI: 10.1016/j.seppur.2025.133288.
- SIMARRO-GIMENO, C. et al. Ten years of monitoring pharmaceuticals and pesticides in the aquatic environment nearby a solid-waste treatment plant: historical data, trends and risk assessment. *Environmental Pollution*, v. 366, p. 125496, 2025. DOI: 10.1016/j.envpol.2024.125496.
- SŁOSARCZYK, K.; DĄBROWSKA, D. A closed municipal landfill as a source of emerging contaminants in adjacent groundwater: pharmaceuticals, personal care products occurrence, and environmental risk assessment. *Journal of Hydrology*, v. 654, p. 132829, 2025. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2025.132829.
- WANG, H. et al. Simultaneous degradation of refractory organics, antibiotics and antibiotic resistance genes from landfill leachate concentrate by GAC/O₃. *Journal of Cleaner Production*, v. 380, p. 135016, 2022. DOI: 10.1016/j.jclepro.2022.135016.
- WANG, Y. et al. Sulfonamide and tetracycline in landfill leachates from seven municipal solid waste landfills: seasonal variation and risk assessment. *Science of the Total Environment*, v. 825, p. 153936, 2022. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2022.153936.
- WU, D. et al. Identification of indicator PPCPs in landfill leachates and livestock wastewaters using multi-residue analysis of 70 PPCPs: analytical method development and application in Yangtze River Delta, China. *Science of the Total Environment*, v. 753, p. 141653, 2021. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.141653.
- YI, X. et al. Removal of selected PPCPs, EDCs, and antibiotic resistance genes in landfill leachate by a full-scale constructed wetlands system. *Water Research*, v. 121, p. 46-60, 2017. DOI: 10.1016/j.watres.2017.05.008.
- YOU, X. et al. Fluoroquinolones and β -lactam antibiotics and antibiotic resistance genes in autumn leachates of seven major municipal solid waste landfills in China. *Environment International*, v. 113, p. 162-169, 2018. DOI: 10.1016/j.envint.2018.02.002.



- YU, X. et al. A picture of pharmaceutical pollution in landfill leachates: occurrence, regional differences and influencing factors. *Waste Management*, v. 184, p. 20-27, 2024. DOI: 10.1016/j.wasman.2024.05.019.
- YU, X. et al. Estimating the mass of pharmaceuticals harbored in municipal solid waste landfills by analyzing refuse samples at various ages and depths. *Environmental Science & Technology*, v. 57, p. 6063-6071, 2023. DOI: 10.1021/acs.est.2c09455.
- ZHANG, N. et al. Emerging contaminants in landfill leachate and groundwater: a case study of hazardous waste landfill and municipal solid waste landfill in northeastern China. *Water*, v. 16, 2575, 2024. DOI: 10.3390/w16182575.
- ZHANG, Z. et al. Occurrence and pollution risk assessment of emerging contaminants in groundwater in the vicinity of a typical municipal landfill in northeastern China. *Journal of Hydrology*, v. 648, 132408, 2025. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2024.13