

Potencial da Modelagem Computacional Aplicada ao Pós-Licenciamento Ambiental: Suporte Técnico para Remediação de Áreas Contaminadas por Lixões

Herllaine de Almeida Rangel¹; Rosane Cristina de Andrade²; Luciana Maria Baptista Ventura¹; Daniel Chicharo Gonçalves¹; Alisson dos Santos¹; Márcio Roberto Schneider³

✉ herllaine.inea@gmail.com

1. *Diretoria de Pós-licença e Fiscalização Ambiental do Instituto Estadual do Ambiente. Centro – Rio de Janeiro – RJ.*
2. *Universidade do Estado do Rio de Janeiro*
3. *Universidade Federal de Santa Catarina*

Histórico do Artigo: O autor detém os direitos autorais deste artigo.

Recebido em: Outubro de 2025

Aceito em: Novembro de 2025

Publicado em: Dezembro de 2025

Resumo: Este trabalho discute os desafios relacionados à disposição inadequada de resíduos sólidos urbanos no Estado do Rio de Janeiro e destaca a necessidade de estratégias inovadoras para o gerenciamento de áreas contaminadas por lixões. A recuperação desses passivos ambientais exige o entendimento dos processos de contaminação, a análise qualitativa e quantitativa dos poluentes e a escolha de métodos adequados para mitigação dos impactos e proteção dos recursos hídricos. Nesse contexto, a modelagem computacional apresenta potencial como ferramenta de apoio ao processo decisório no pós-licenciamento ambiental, ao permitir melhor interpretação dos dados e otimização de recursos institucionais. O objetivo deste estudo foi avaliar, através da demonstração de uso, o potencial de ferramentas de modelagem no suporte técnico à gestão e ao acompanhamento pós-licença de áreas contaminadas, com foco no Sistema de Cadastro de Áreas Contaminadas e Reabilitadas (SCBR) e no software MKS Trend Analysis Tools. Foram elaborados fluxogramas que demonstram como a modelagem pode ser integrada às etapas do pós-licenciamento, além de estudos de caso utilizando dados reais de monitoramento para testar a aplicabilidade do MKS. Os resultados indicam aderência entre a modelagem estatística e as análises convencionais, evidenciando sua utilidade para priorizar ações de remediação. Conclui-se que a modelagem computacional tem potencial significativo para aumentar a eficiência operacional, reduzir custos e ampliar a confiabilidade do gerenciamento de áreas contaminadas no contexto do pós-licenciamento ambiental.

Palavras-chave: Modelagem Ambiental, Áreas Contaminadas, Resíduos Sólidos Urbanos, Gerenciamento Pós-Licença.

Potential Of Computational Modeling Applied To Post-Environmental Licensing: Technical Support For The Remediation Of Contaminated Areas In Former Open Dumps

Abstract: This study evaluated the residual concentrations of dichlorodiphenyltrichloroethane (DDT) and its metabolites (DDD and DDE) in Brazilian surface water sources during the first half of 2025, based on official data from the National Water Quality Surveillance System (SISAGUA). The objective was to assess current DDT contamination levels after its legal ban and compare them with national and international water quality standards. A qualitative-quantitative approach was adopted, combining secondary data analysis and literature review, given the scarcity of recent studies on organochlorine pesticides in aquatic environments in Brazil. A total of 228 records referring to surface waters from four Brazilian regions were identified. Detection Limit (DL) values ranged from 0.00001 to 0.1 µg/L, and Quantification Limit (QL) values from 0.00025 to 1.0 µg/L. The low concentrations observed, consistent with historical contamination and the long environmental half-life of DDT (4–30 years), indicate residual persistence rather than ongoing illegal use. No samples exceeded the limits established by CONAMA Resolution 357/2005 and GM/MS Ordinance 888/2021; however, some results approached the threshold of the European Directive 2020/2184 (0.1 µg/L). The absence of data from the North region and the uneven distribution of samples highlight the need to expand monitoring coverage. It is concluded that, although current levels do not represent an immediate risk, DDT persistence requires continuous surveillance, regionally adapted monitoring strategies, and periodic revision of national legislation.

Keywords: Water contamination, Environmental monitoring, Water quality, Water security.

Concentración Residual de Diclorodifeniltricloroetano (Ddt) en Fuentes de Agua Superficial Brasileñas

Resumen: Este estudio evaluó las concentraciones residuales de diclorodifeniltricloroetano (DDT) y de sus metabolitos (DDD y DDE) en fuentes de agua superficial brasileñas durante el primer semestre de 2025, con base en datos oficiales del Sistema de Información de Vigilancia de la Calidad del Agua para Consumo Humano (SISAGUA). El objetivo fue evaluar los niveles actuales de contaminación por DDT tras su prohibición legal y compararlos con los estándares nacionales e internacionales de calidad del agua. Se adoptó un enfoque cualitativo-cuantitativo, combinando análisis de datos secundarios y revisión de literatura, dada la escasez de estudios recientes sobre plaguicidas organoclorados en ambientes acuáticos del país. Se identificaron 228 registros correspondientes a aguas superficiales en cuatro regiones brasileñas. Los valores del Límite de Detección (LD) variaron de 0.00001 a 0.1 µg/L, y los del Límite de Cuantificación (LQ), de 0.00025 a 1.0 µg/L. Las bajas concentraciones observadas, compatibles con contaminación pasada y con la larga vida media ambiental del DDT (4–30 años), indican persistencia residual y no uso ilegal actual. Ninguna muestra superó los límites establecidos por la Resolución CONAMA n° 357/2005 ni por la Ordenanza GM/MS n° 888/2021; sin embargo, algunos valores se aproximaron al límite de la Directiva Europea 2020/2184 (0.1 µg/L). La ausencia de datos en la región Norte y la desigualdad en la distribución de las muestras refuerzan la necesidad de ampliar el monitoreo. Se concluye que, aunque los niveles actuales no representan un riesgo inmediato, la persistencia del DDT exige vigilancia continua, estrategias regionales de monitoreo y revisión periódica de la legislación nacional.

Palabras clave: Modelización Ambiental, Áreas Contaminadas, Residuos Sólidos Urbanos, Gestión Post-Licencia.

INTRODUÇÃO

A disposição de resíduos sólidos urbanos gera o lixiviado, ou chorume, proveniente da degradação biológica e físico-química dos resíduos e da infiltração da água da chuva no solo. Com composição química complexa, o lixiviado pode conter metais pesados, compostos orgânicos, microrganismos patogênicos e micropoluentes emergentes, configurando uma fonte

significativa de poluição capaz de contaminar o solo e os recursos hídricos, com riscos à saúde pública (FILHO; SILVA, 2019).

De acordo com o Sistema Nacional de Informações sobre a Gestão dos Resíduos Sólidos (SINIR, 2025), em 2019, 37% dos municípios brasileiros (2.073) adotaram destinação final adequada para seus resíduos, totalizando 39,3 milhões de toneladas, enquanto 32% (1.807) realizaram disposição inadequada, com 12,1 milhões de toneladas dispostas de forma irregular. Além disso, 30% dos municípios (1.690) não informaram suas práticas de destinação, gerando uma estimativa de 30,4 milhões de toneladas de resíduos sem declaração quanto à disposição final. O cenário do Estado do Rio de Janeiro reflete esse panorama nacional, apresentando dificuldades semelhantes no cumprimento das normas ambientais e na efetividade da fiscalização. Dos 92 municípios fluminenses, 61 (66%) destinaram corretamente seus resíduos, encaminhando cerca de 5,9 milhões de toneladas para aterros sanitários, enquanto 12 (13%) realizaram disposição inadequada, totalizando aproximadamente 295,1 mil toneladas, e 19 (21%) não forneceram informações, estimando-se que 1,1 milhão de toneladas tenham sido geradas sem declaração, quanto à destinação final (SINIR, 2025).

Entre os 73 municípios do Estado do Rio de Janeiro que declararam informações ao SINIR, 65 (89%) utilizam aterros sanitários, 9 (12%) recorrem a aterros controlados, 3 (4%) ainda mantêm lixões e 2 (3%) dispõem de unidades de manejo de galhadas e podas. Apesar dos avanços, cerca de 20% dos municípios fluminenses não enviaram dados ao SINIR, o que compromete o monitoramento e a gestão eficiente dos resíduos sólidos. Além disso, a persistência de lixões irregulares evidencia a necessidade de ações corretivas e políticas públicas mais eficazes (PAINEL, 2019).

A subnotificação dos lixões, que frequentemente são áreas abandonadas, reforça a preocupante realidade evidenciada pelos estudos e coloca em evidência as necessidades de melhoria do sistema de monitoramento. Com a detecção, quase exclusivamente, dependente de denúncias aos órgãos ambientais, a eficácia das medidas corretivas permanece comprometida.

A Resolução CONEMA nº 44/2012 estabelece que a simples presença de fase livre ou resíduos em contato direto com o solo é suficiente para classificar uma área como contaminada (AC), enquadrando os lixões nessa categoria e evidenciando o risco à saúde humana, ao meio ambiente e ao patrimônio público e privado. A norma também define etapas prévias à remediação — avaliação preliminar, investigação confirmatória, ações emergenciais, investigação detalhada e avaliação de risco — que envolvem a caracterização do solo, análises quali-quantitativas dos contaminantes, modelagem da pluma de contaminação e definição dos

métodos de recuperação. Após as ações de remediação, é obrigatório o monitoramento da eficácia das medidas para assegurar a reabilitação segura e sustentável da área (CONEMA, 2012; WASHINGTON, 2008).

O tema dos lixões tem ganhado destaque nas políticas públicas recentes. No Rio de Janeiro, a Resolução SEAS nº 206/2024 define critérios para priorizar municípios que receberão apoio na elaboração de diagnósticos e projetos de remediação, no âmbito do programa Remedia RJ (ESTADO DO RIO DE JANEIRO, 2024). Em nível nacional, o programa Lixão Zero, do Ministério do Meio Ambiente e Mudança do Clima (MMA), integra a Agenda Nacional de Qualidade Ambiental Urbana e visa à erradicação dos lixões, conforme a Política Nacional de Resíduos Sólidos (Lei nº 12.305/2010). Suas ações incluem o encerramento de lixões e aterros controlados, ampliação da coleta seletiva, recuperação de áreas contaminadas, incentivo à logística reversa e ao aproveitamento energético dos resíduos. Desde sua criação, o programa já promoveu o fechamento de mais de 800 lixões no país, reduzindo significativamente a disposição inadequada de resíduos sólidos (MMA, 2022; SSC4C, 2024).

Diante da persistência dos lixões e da complexidade associada à contaminação do solo e das águas subterrâneas, a modelagem surge como uma ferramenta essencial para apoiar o gerenciamento dessas áreas. No contexto ambiental, segundo a CETESB (2017), a modelagem representa processos reais por meio de equações e algoritmos capazes de simular o comportamento de variáveis ambientais ao longo do tempo e do espaço. Essa abordagem permite gerar prognósticos quantitativos e avaliar cenários futuros com base em hipóteses bem definidas, além de oferecer suporte técnico a órgãos públicos na supervisão e avaliação da eficácia de medidas emergenciais, de intervenção e de monitoramento, contribuindo para a reabilitação e o uso sustentável das áreas afetadas.

Segundo Ciampi *et al.* (2022), a modelagem em áreas contaminadas integra diferentes fontes de dados, diretas e indiretas, para construir uma representação conceitual única e realista do local, unificando informações em distintas escalas e profundidades. Assim, constitui um processo de refinamento contínuo, indispensável para compreender a dinâmica da contaminação e subsidiar decisões no gerenciamento ambiental.

Embora existam diferentes modelos numéricos capazes de simular plumas de contaminação, este estudo não tem como objetivo realizar modelagem hidrogeológica nem apresentar a extensão da pluma em áreas contaminadas. O foco está em demonstrar o potencial da modelagem computacional como ferramenta de suporte técnico no pós-licenciamento ambiental, evidenciando como essas ferramentas podem auxiliar órgãos públicos na

interpretação de dados, na priorização de ações e na otimização de recursos. O estudo concentra-se no uso do Sistema de Cadastro de Áreas Contaminadas e Reabilitadas (SCBR) e do software MKS Trend Analysis Tools, demonstrando de que maneira a modelagem pode apoiar etapas como avaliação preliminar, análise de tendência, acompanhamento da eficácia de medidas de remediação e tomada de decisão baseada em evidências. A partir de fluxogramas explicativos e de um estudo de caso com dados reais de monitoramento, busca-se evidenciar os benefícios práticos desse tipo de abordagem, como maior confiabilidade na análise, redução de tempo e custos operacionais, além de suporte às ações de fiscalização ambiental. Assim, o estudo mostra que a modelagem computacional apresenta potencial significativo para aprimorar o gerenciamento público de áreas contaminadas, contribuindo para a efetividade das ações de remediação e para a proteção ambiental.

MATERIAL E MÉTODOS

A metodologia adotada baseou-se na análise das principais funcionalidades da modelagem ambiental no contexto das atividades de pós-licença, monitoramento e acompanhamento de áreas contaminadas por lixões, conforme o §3º do artigo 8º da Resolução CONEMA nº 44/2012, e nas etapas de gerenciamento de áreas contaminadas previstas na legislação vigente. Essa análise também considerou a experiência do Instituto Estadual do Ambiente (INEA-RJ) em programas como o AROMA (Acompanhamento, Remediação, Otimização e Monitoramento de Aterros) e o PROGRIDE (Programa de Gestão de Resíduos e Desenvolvimento Sustentável), que oferecem suporte técnico e institucional aos municípios do Estado do Rio de Janeiro (INEA, 2023; SECRETARIA DE ESTADO DO AMBIENTE E SUSTENTABILIDADE, 2023, RANGEL *et al.*, 2023).

Com o objetivo de demonstrar o potencial da modelagem como ferramenta de apoio à gestão pública, foram selecionadas duas ferramentas computacionais que adotam diferentes abordagens metodológicas.

A primeira delas é o SCBR (Solução Corretiva Baseada no Risco), software desenvolvido pela PETROBRAS em parceria com a Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) e registrado no Instituto Nacional da Propriedade Industrial (INPI). Trata-se de um simulador matemático bidimensional aplicado ao gerenciamento de áreas impactadas, à avaliação de risco à saúde humana e à definição de estratégias de remediação em locais com atividades potencialmente poluidoras (JUNIOR *et al.*, 2019).

A metodologia adotada envolveu uma avaliação preliminar das possíveis aplicações do SCBR nas fases de pós-licença e fiscalização de áreas contaminadas por lixões, mediante a proposição de fluxogramas representativos das etapas de gerenciamento indicadas pela ferramenta e das principais temáticas associadas aos vazadouros. Os fluxogramas foram elaborados a partir da adaptação das perguntas da Seção 1.2 do manual do usuário do SCBR ao contexto específico de áreas contaminadas por lixões, buscando avaliar sua pertinência. Complementarmente, foram executados os exercícios constantes no referido manual, os quais permitiram compreender, de forma prática, a aplicação do software por meio de etapas passo a passo que abordam desde o georreferenciamento, amostragem, simulação de fluxos e fontes, até a aplicação de técnicas de remediação, possibilitando a identificação das potencialidades do SCBR para o gerenciamento dessas áreas. (SCHNEIDER; LANG, 2023).

A segunda ferramenta selecionada foi o MKS Trend Analysis Tools, um software gratuito, de uso em ambiente Windows®, desenvolvido para realizar análises estatísticas monotônicas não paramétricas de parâmetros ambientais, como como DBO_5 , DQO, condutividade elétrica, nutrientes (como nitrogênio amoniacal e nitrato), metais, sais dissolvidos e demais indicadores de qualidade do chorume e das águas superficiais e subterrâneas associadas, ao longo do tempo. Sua interface em língua portuguesa facilita a aplicação por órgãos públicos e instituições de controle ambiental. O programa permite identificar tendências de aumento ou redução de concentrações em séries temporais, estimar níveis de confiança para hipóteses de redução de contaminantes e avaliar a viabilidade de otimização das campanhas de monitoramento, sendo amplamente recomendado como instrumento de apoio à tomada de decisão (SCHNEIDER; LANG, 2023).

Para avaliar a aplicabilidade prática das análises estatísticas monotônicas propostas pelo MKS Trend Analysis Tools, foi realizado um estudo de caso comparativo com base em dados de concentração de DBO_5 e DQO em lixiviados provenientes de lixões e aterros sanitários, bem como em dados de concentração de nitrato em águas subterrâneas de diferentes localidades brasileiras. Os dados foram extraídos de três estudos representativos: (i) Cintra et al. (2002), que apresentou resultados de amostragem e análises laboratoriais realizadas em Bauru (SP) – cidade de médio porte, com solo predominantemente arenoso –, em um aterro controlado sem impermeabilização eficiente, onde a qualidade do chorume foi avaliada por seis meses pelo Laboratório de Análises de Águas Residuárias do convênio DAE-FE/UNESP; (ii) Araújo et al. (2020), que estudaram o Aterro Sanitário de Maceió (AL), localizado na parte alta da cidade, com área aproximada de 114 hectares e operação iniciada em 2010 após o encerramento do antigo

lixão municipal; e (iii) Silva et al. (2020), que investigaram a contaminação por nitrato em águas subterrâneas no município de Juazeiro do Norte (CE), a partir de amostragens realizadas entre 2013 e 2019 em 48 poços pertencentes à Bacia Hidrográfica do rio Salgado, cuja principal fonte de abastecimento hídrico é o manancial subterrâneo. O objetivo foi verificar a consistência entre as tendências identificadas nos estudos originais e os resultados obtidos com o MKS Trend Analysis Tools, validando sua eficácia como ferramenta de modelagem estatística aplicada à análise de dados ambientais.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A análise inicial concentrou-se na representação das etapas do Gerenciamento de Áreas Contaminadas (GAC) previstas na Resolução CONEMA nº 44/2012, associadas aos principais questionamentos enfrentados durante a investigação de passivos ambientais e às funcionalidades de um software de modelagem compatível com cada fase do processo. Essa abordagem buscou ilustrar conceitualmente como a modelagem pode ser utilizada desde a avaliação preliminar até o monitoramento pós-remediação, apoiando o planejamento e a tomada de decisão por parte dos órgãos ambientais.

A Figura 1 apresenta um mapa de correlação entre as etapas do Gerenciamento de Áreas Contaminadas (GAC), as principais necessidades de apuração técnica e as funcionalidades correspondentes da ferramenta de modelagem SCBR. Para a elaboração do fluxograma, considerou-se um cenário de lixiviação de resíduos sólidos urbanos (RSU), no qual o software foi empregado como instrumento de apoio à tomada de decisão. A modelagem está inserida diretamente na estrutura do fluxograma por meio dos módulos do SCBR – Estudo, Ambiente, Amostragem, Risco, Remediação e Resultados –, representados em coloração azul nos boxes do mapa conceitual. Esses módulos permitem ao usuário configurar o cenário a ser simulado, definir parâmetros de entrada e avaliar os resultados obtidos. A disposição dos módulos segue a ordem lógica das etapas do gerenciamento ambiental de uma área contaminada, possibilitando a simulação do comportamento da pluma de contaminação no solo e nas águas subterrâneas, a avaliação do potencial de migração de poluentes e a estimativa da eficácia de diferentes estratégias de remediação.



Figura 1 – Mapa de correlação das perguntas para tomada de decisão, fases do GAC de lixões e funcionalidades da modelagem.

Fonte: Autores, 2025.

Os resultados do fluxograma indicam que o uso do SCBR pode ser incorporado de forma transversal em todas as etapas do gerenciamento ambiental, contribuindo para otimizar recursos, restringir incertezas analíticas e subsidiar a elaboração de planos de intervenção. Essa integração entre modelagem e gestão pública representa um avanço metodológico, especialmente no contexto do pós-licenciamento ambiental, em que é necessário avaliar continuamente a eficiência das medidas corretivas implementadas com base nas condicionantes da Licença Ambiental de Recuperação (LAR).

A Figura 2 ilustra a análise conceitual do potencial de uso da modelagem como ferramenta de apoio aos programas AROMA e PROGRIDE, ambos voltados ao acompanhamento e remediação de aterros e lixões no Estado do Rio de Janeiro. O fluxograma demonstra como o

uso sistemático da modelagem pode fortalecer a capacidade dos municípios em identificar riscos emergentes, planejar ações corretivas e acompanhar a evolução das condições ambientais ao longo do tempo.

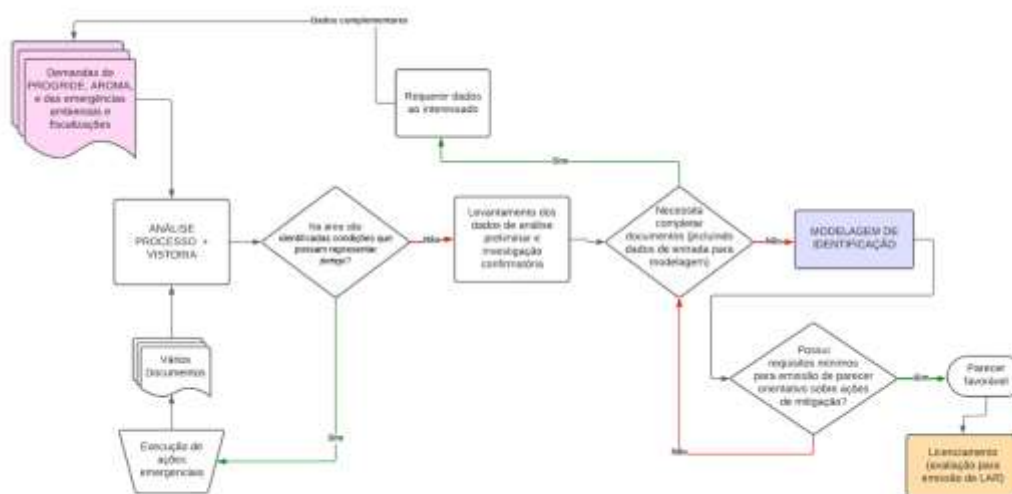


Figura 2 – Fluxograma de processo dos programas AROMA e PROGRIDE em apoio os municípios do Estado do Rio de Janeiro, adotando a ferramenta de modelagem para recuperação de lixões. **Fonte:** Autores, 2025.

Além disso, a Figura 3 propõe um modelo conceitual para utilização da modelagem em processos de pós-licença, destacando sua relevância no monitoramento da eficácia das ações de recuperação e no suporte às atividades de fiscalização dos órgãos ambientais. A modelagem é aplicada para acompanhar a efetividade das ações realizadas após a obtenção da Licença Ambiental de Recuperação (LAR) e de outros instrumentos de controle ambiental, fornecendo embasamento técnico e respaldo científico aos pareceres de acompanhamento emitidos pela equipe de pós-licença. O fluxograma representa os possíveis desdobramentos desses pareceres – favoráveis ou desfavoráveis à conclusão da recuperação –, os quais podem resultar, respectivamente, na concessão do termo de encerramento da atividade, conforme a Diretriz para Encerramento de Atividades Potencialmente Poluidoras ou Degradoras do Meio Ambiente (FEEMA, 2008), ou na renovação da licença, permitindo prazo adicional para o atendimento dos requisitos técnicos exigidos. Assim, esses pareceres, elaborados com base nos resultados da modelagem, são encaminhados ao setor de licenciamento para subsidiar a decisão final do órgão ambiental, em consonância com o modelo de estrutura organizacional e de atuação adotado pelo Estado do Rio de Janeiro (INEA, 2023).

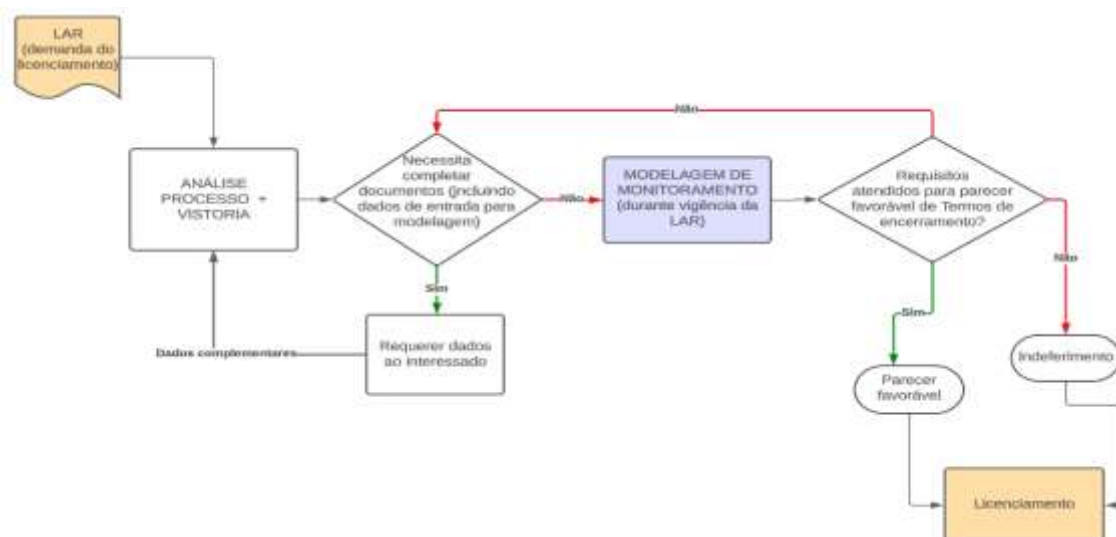


Figura 3 – Fluxograma de processo a ser adotado pelo órgão público que adote a ferramenta de modelagem para monitorar a eficácia das ações realizadas após a obtenção de Licença Ambiental de Recuperação (LAR) e outros instrumentos de controle ambiental.

Fonte: Autores, 2025.

Em conjunto, os fluxogramas apresentados (Figuras 1, 2 e 3) evidenciam que a modelagem ambiental não apenas proporciona uma visão preditiva do comportamento dos contaminantes, mas também atua como um instrumento integrador entre as esferas técnica e de gestão pública, fortalecendo a governança ambiental e a eficiência das políticas de controle e recuperação de áreas degradadas por lixões. Torna-se, portanto, necessária a ampliação da abordagem avaliativa para aplicação prática do SCBR em cenários representativos de lixões, de modo a permitir a simulação do fluxo de contaminantes na área, a análise do comportamento da pluma de contaminação no solo e nas águas subterrâneas, bem como a avaliação da eficácia de diferentes estratégias de remediação.

Estudos de caso de lixões com a adoção da ferramenta

A fim de demonstrar os benefícios concretos das análises estatísticas monotônicas para acompanhamento da recuperação de lixões, foram verificados os resultados de três estudos de caso específicos sobre contaminação no contexto de resíduos sólidos urbanos.

De acordo com o estudo realizado no Aterro Controlado de Bauru-SP por Cintra, Hamada e Castilho Filho (2002), foram avaliadas possíveis tendências nos níveis de concentração de contaminantes do chorume em associação a parâmetros climatológicos, com ênfase nos períodos de chuva. As análises demonstraram que as variações significativas nos valores de DBO_5 e DQO estavam diretamente relacionadas ao regime pluviométrico observado ao longo de seis

meses, evidenciando a influência das condições meteorológicas sobre o comportamento desses parâmetros.

A aplicação do software MKS Trend Analysis Tools (Figuras 4A e 4B) mostrou que tanto a DBO_5 quanto a DQO não apresentaram tendência estatisticamente significativa (nível de confiança – $\text{NC} < 90\%$). Apenas a relação DBO_5/DQO exibiu $\text{NC} > 90\%$, o que permitiu sua avaliação quanto à tendência, a qual se mostrou ascendente. Esse resultado está em consonância com os dados originais da relação DBO_5/DQO apresentados por Cintra *et al.* (2002), confirmando o mesmo comportamento de aumento progressivo.

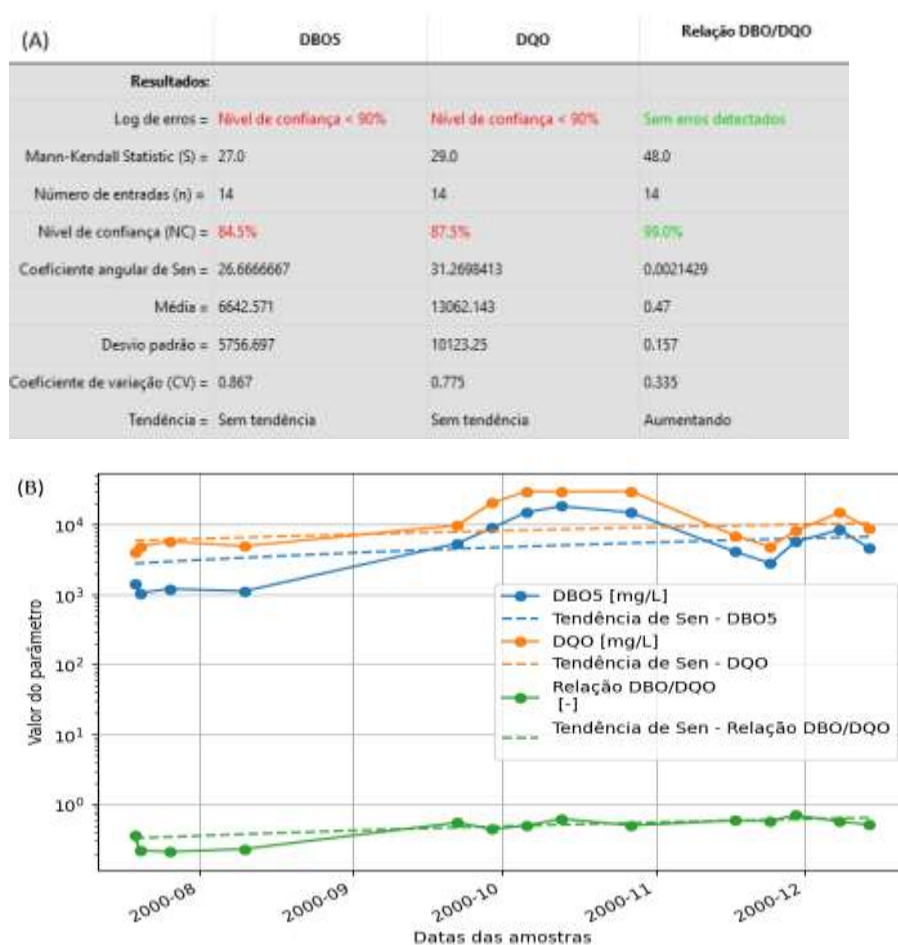


Figura 4 (A) e (B) – Resultados da modelagem estatística das concentrações de DBO_5 e DQO no lixiviado do Aterro Controlado de Bauru-SP obtidos pelo software MKS Trend Analysis Tools.

Fonte: Autores, 2025; Adaptado de Cintra *et al.*, 2002.

Cabe destacar que os resultados obtidos com o MKS corroboram a hipótese de que a variabilidade dos parâmetros em função das chuvas e a insuficiência de dados analíticos podem comprometer a robustez estatística das análises, resultando em informações limitadas para a identificação de tendências confiáveis nos dados de concentração de contaminantes.

A análise temporal dos parâmetros DBO_5 e DQO no lixiviado do aterro sanitário de Maceió-AL, Brasil, conduzida por Araújo *et al.* (2020) em seu estudo que considerou a análise dos períodos extremos (maior estiagem e maior chuva) e tratamento estatístico simples com média, desvio padrão e coeficiente de variação, mostrou uma redução de 80% e 76%, respectivamente, em relação ao primeiro ano de operação do aterro. Durante épocas de chuvas intensas, houve um aumento relativo desses parâmetros, sugerindo maior lixiviação de materiais sólidos com matéria orgânica. A relação DBO_5/DQO indicou uma idade intermediária e degradação biológica mediana do aterro.

Ao inserir os mesmos dados de DBO_5 e DQO no software MKS Trend Analysis Tools (Figuras 5A, 5B, 6A e 6B), os resultados confirmaram que durante o período de chuvas, as concentrações desses parâmetros não mostraram tendência significativa (Mann-Kendall Statistic $S > 0$), com um nível de confiança inferior a 90%, devido à variabilidade dos dados nesse período. Por outro lado, em períodos com pouca chuva, as concentrações de DBO_5 e DQO apresentaram uma tendência de redução significativa (Mann-Kendall Statistic $S < 0$), com um nível de confiança superior a 100%, devido ao maior número de dados e espaçamento temporal adequado.

Conforme demonstrado por Koliyabandara et al. (2020), que avaliaram o lixão a céu aberto de Karadiyana – localizado em Thumbovila, na região de Piliyandala, Província Ocidental do Sri Lanka, com área aproximada de 25 acres e situado nas proximidades do sistema úmido Weras Ganga-Bolgoda Lake – a disposição inadequada de resíduos sólidos municipais em áreas abertas, prática ainda recorrente em países em desenvolvimento, configura importante fonte de contaminação ambiental. No estudo, os autores investigaram a qualidade da água do canal Meda Ela, que recebe lixiviado do lixão, e de poços de monitoramento de água subterrânea adjacentes, evidenciando que esses empreendimentos representam séria ameaça tanto aos recursos hídricos superficiais quanto ao aquífero raso, em razão do aporte contínuo de lixiviados e do transporte de poluentes ao longo do sistema hídrico.

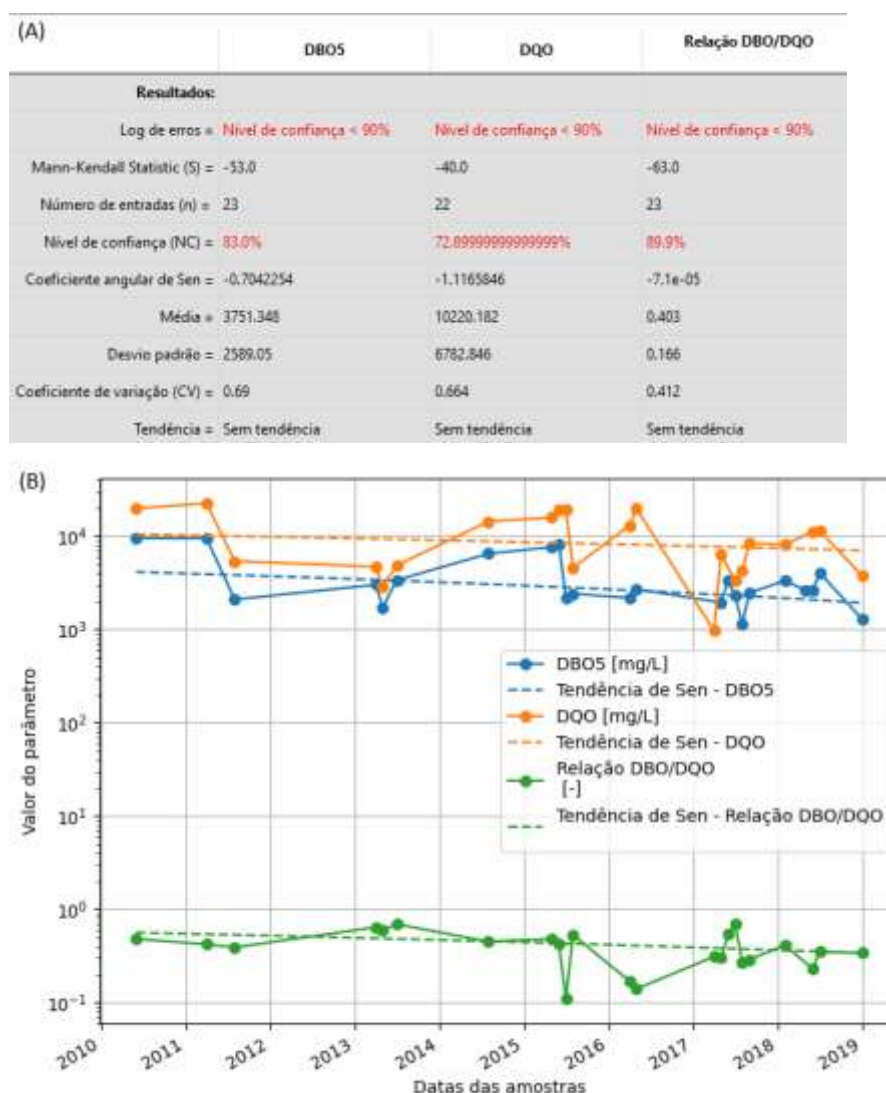


Figura 5 (A) e (B) – Resultados do MKS para as concentrações de DBO₅ e DQO no lixiviado do Aterro Sanitário de Maceió-AL – período de junho de 2010 a janeiro de 2019, índice de maiores chuvas.

Fonte: Autores, 2025; Adaptado de Araújo *et al.*, 2020.

Considerando o Brasil, também um país em desenvolvimento que enfrenta desafios críticos relacionados aos resíduos sólidos urbanos e à qualidade das águas, foi selecionado um estudo para avaliar a aplicabilidade da ferramenta de modelagem estatística MKS como instrumento de acompanhamento das concentrações de contaminantes e confirmação de contaminação. O estudo selecionado foi o de Silva *et al.* (2020), que avaliou a qualidade da água subterrânea que abastece Juazeiro do Norte – CE, considerando sua relação com cobertura de esgoto e densidade populacional.

(A)	DBO5	DQO	Relação DBO/DQO
Resultados:			
Log de erros =	Sem erros detectados	Sem erros detectados	Sem erros detectados
Mann-Kendall Statistic (S) =	-217.0	-246.0	-133.0
Número de entradas (n) =	31	38	31
Nível de confiança (NC) =	100.0%	99.8%	97.5%
Coefficiente angular de Sen =	-1.4267892	-1.6547945	-8.71e-05
Média =	2507.839	5944.579	0.356
Desvio padrão =	2537.967	5846.549	0.151
Coefficiente de variação (CV) =	1.012	0.984	0.425
Tendência =	Decrescendo	Decrescendo	Decrescendo

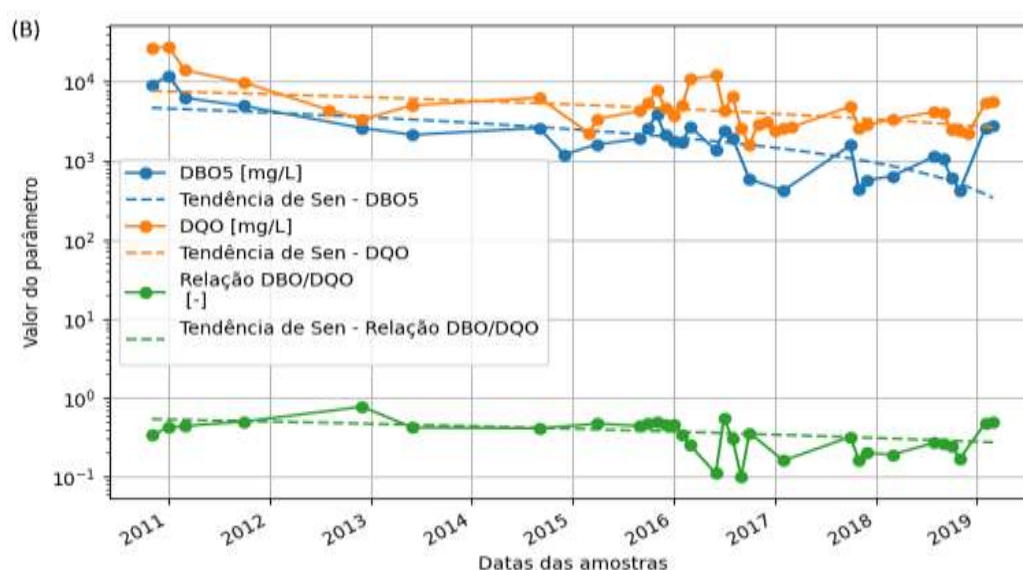


Figura 6 (A) e (B) – Resultados do MKS para as concentrações de DBO₅ e DQO no lixiviado do Aterro Sanitário de Maceió – período de novembro de 2010 a fevereiro de 2019, índice de menores chuvas.

Fonte: Autores, 2025; adaptado de Araújo *et al.*, 2020.

Para a análise, foram selecionados os dados de nitrato, indicador de contaminação de águas subterrâneas conforme previsto na CONAMA 420/09, utilizando como referência o valor de investigação de 10 mg/L para água subterrânea. As amostragens semestrais abrangeram o período de maio de 2013 a maio de 2019, com pontos de monitoramento PT-2 e PT-4. Ambos os pontos estão localizados em áreas com lixões, elevada densidade populacional, rede de esgoto e drenagem de águas pluviais.

A aplicação do software MKS Trend Analysis Tools (Figuras 7A, 7B, 8A e 8B) mostrou que os pontos PT-2 e PT-4 apresentaram inicialmente concentrações acima do limite de investigação da CONAMA 420/09. Apenas o PT-4 apresentou redução das concentrações para valores abaixo desse limite. O PT-2 apresentou grande variabilidade ao longo dos semestres de coleta, não

apresentando tendência estatisticamente significativa (nível de confiança – NC < 90%). O estudo original não discute essas discrepâncias, que podem ser atribuídas a variações climatológicas, intervenções de obras de drenagem, posição relativa à descarga de efluentes, ou até mesmo a inconsistências nos ensaios de campo ou laboratoriais.

Apesar das variações nos dados, o MKS foi capaz de acompanhar os resultados, seja para os casos com NC > 90% (PT-4) ou para aqueles com grande variabilidade e NC < 90% (PT-2), demonstrando a confiabilidade do método de análise estatística avaliado para monitoramento da contaminação de águas subterrâneas.

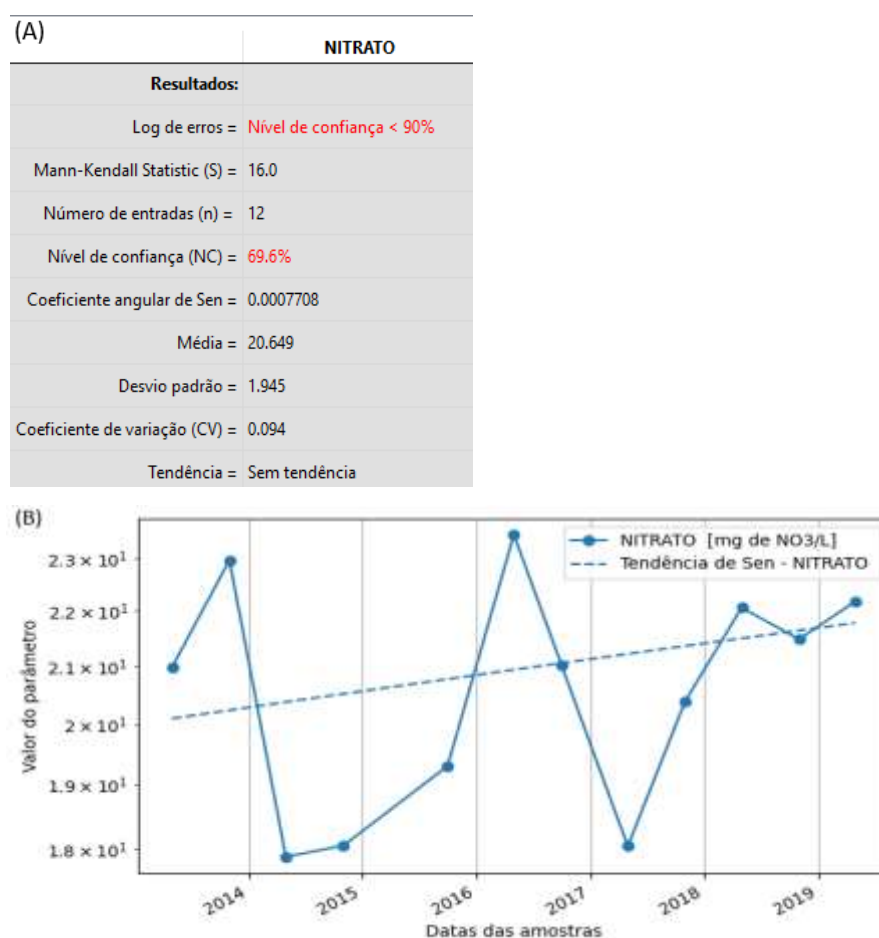


Figura 7 (A) e (B) – Resultados do MKS para as concentrações de Nitrato nas águas subterrâneas que abastecem Juazeiro do Norte no PT-02.

Fonte: Autores, 2025; Adaptado de Silva *et al.*, 2020.

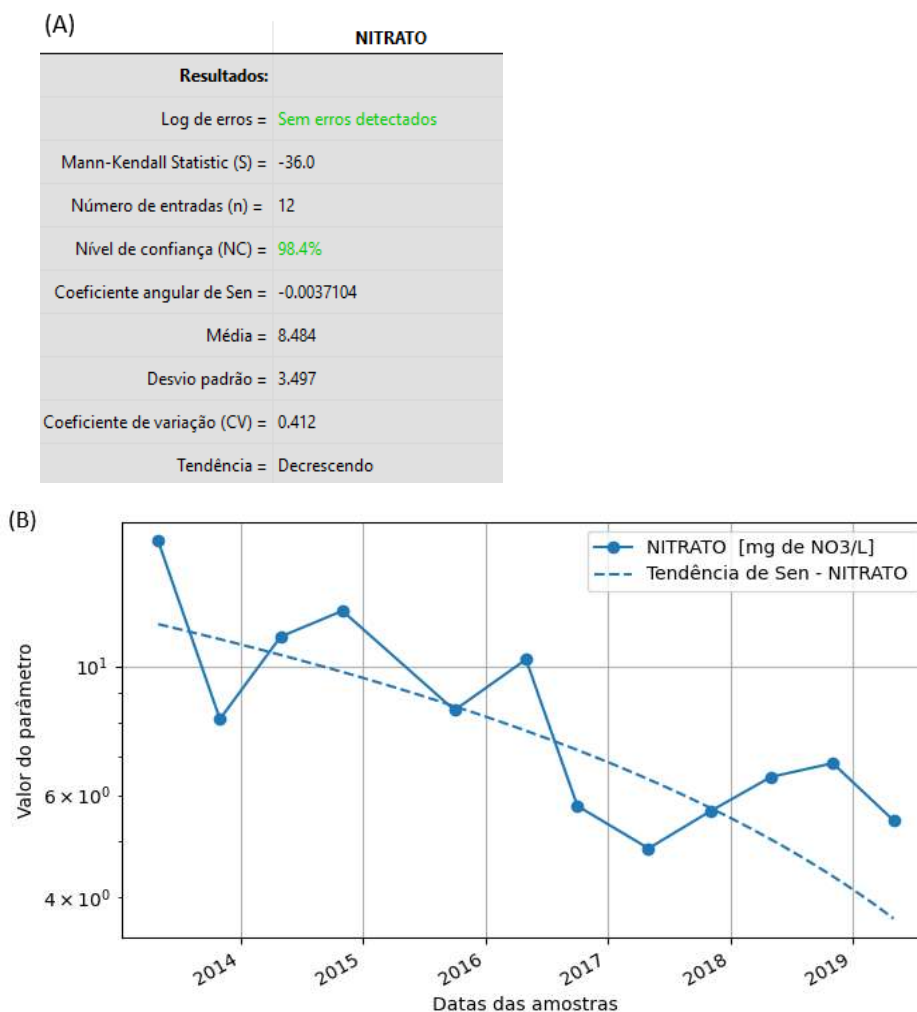


Figura 8 (A) e (B) – Resultados do MKS para as concentrações de Nitrato nas águas subterrâneas que abastecem Juazeiro do Norte no PT-04.

Fonte: Autores, 2025; Adaptado de Silva *et al.*, 2020.

A correlação positiva entre os resultados obtidos por meio do software MKS Trend Analysis Tools e a análise estatística simples realizada pelos autores demonstra a eficácia da modelagem estatística na análise de dados. Isso confirma os benefícios, precisão e rapidez proporcionados pela modelagem na avaliação de tendências e comportamentos de parâmetros ambientais.

Por fim, esses estudos ilustram como a adoção dessa ferramenta de modelagem pode contribuir de forma positiva para a avaliação dos dados e consequente gestão de áreas contaminadas por lixo.

CONCLUSÃO

Os resultados obtidos evidenciam o potencial da modelagem ambiental como ferramenta estratégica de apoio técnico e decisório no gerenciamento de áreas contaminadas por resíduos sólidos urbanos. A utilização combinada do SCBR e do MKS Trend Analyses Tools demonstrou que abordagens numéricas e estatísticas podem atuar de forma complementar no diagnóstico, monitoramento e acompanhamento pós-licença de lixões, integrando dados ambientais e oferecendo subsídios consistentes para decisões mais precisas e eficazes.

Embora robusta, a modelagem representa uma simplificação da realidade e não captura integralmente a complexidade dos sistemas hidrogeológicos. Incertezas associadas à heterogeneidade litológica, à anisotropia dos aquíferos, às zonas preferenciais de fluxo, à dispersão de contaminantes e à variabilidade pluviométrica podem influenciar a interpretação dos resultados. No presente estudo, por não se tratar de uma modelagem hidrogeológica completa, não foram realizadas análises de sensibilidade nem definidos cenários alternativos. Essas limitações, contudo, foram parcialmente mitigadas pela aplicação de modelagem estatística e análise de tendências em séries históricas, permitindo avaliar o comportamento dos parâmetros sem depender da representação espacial detalhada da pluma de contaminação, com foco no suporte ao pós-licenciamento.

De modo geral, quando associada à experiência técnica dos profissionais e a dados de campo consistentes, a modelagem ambiental potencializa a tomada de decisão, orienta a definição de instrumentos de controle, fortalece programas de recuperação de áreas impactadas por lixões e otimiza o uso de recursos financeiros e operacionais. Os estudos de caso analisados indicaram boa concordância entre os resultados da modelagem estatística e as análises convencionais, reforçando a confiabilidade dessa abordagem no acompanhamento de áreas contaminadas, ainda que se recomende cautela na interpretação de séries temporais curtas ou bases de dados reduzidas. Assim, a modelagem consolida-se como ferramenta robusta para promover diagnósticos mais eficientes, apoiar ações de remediação e contribuir para a reabilitação sustentável de áreas degradadas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABETRE – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE TRATAMENTO DE RESÍDUOS E EFLUENTES. Atlas de destinação final ABETRE: mapas estáticos elaborados com informações sobre a destinação final de resíduos sólidos urbanos. [S. l.], 2023. Disponível em: <<https://sinir.gov.br/mapas/abetre/>>. Acesso em: 21 set. 2023.

ARAÚJO, Liz Geise Santos de et al. Análise temporal de parâmetros ambientais do lixiviado do aterro sanitário de Maceió-AL, Brasil. *Research, Society and Development*, [s. l.], v. 9, n. 7, 2020.

Potencial da Modelagem Computacional Aplicada ao Pós-Licenciamento Ambiental: Suporte Técnico para Remediação de Áreas Contaminadas por Lixões

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Paineis de destinação final de resíduos sólidos urbanos. Disponível em: <<https://sinir.gov.br/paineis/destinacao/>>. Acesso em: 7 out. 2025.

CETESB – COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO. Decisão de diretoria nº 038/2017/C, de 07 de fevereiro de 2017: procedimento para gerenciamento de áreas contaminadas. São Paulo: CETESB, 2017. Disponível em: <<https://cetesb.sp.gov.br/wp-content/uploads/2014/12/DD-038-2017-C.pdf>>. Acesso em: 8 out. 2025.

CINTRA, F. H.; HAMADA, J.; CASTILHO FILHO, G. S. Fatores que afetam a qualidade do chorume gerado em aterro controlado de resíduos sólidos urbanos. In: SIMPÓSIO ÍTALO-BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 6., 2002, Vitória. Anais [...]. Rio de Janeiro: ABES, 2002. 7 p.

CONSELHO ESTADUAL DE MEIO AMBIENTE DO RIO DE JANEIRO (CONEMA). Resolução CONEMA nº 44, de 14 de dezembro de 2012. Dispõe sobre a obrigatoriedade da identificação de eventual contaminação ambiental do solo e das águas subterrâneas no processo de licenciamento ambiental estadual. Diário Oficial do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 14 dez. 2012.

ESTADO DO RIO DE JANEIRO. Secretaria de Estado do Ambiente e Sustentabilidade (SEAS). Resolução SEAS nº 206, de 19 de dezembro de 2024. Define regras para priorização na elaboração de diagnósticos e projetos para remediação de lixões no âmbito do Programa Remedia RJ. Diário Oficial do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 19 dez. 2024.

FILHO, Aricelso Maia Limaverde; SILVA, Luiz André. Estudo de tratamentos aplicados a lixiviado de aterros sanitários. Boletim do Observatório Ambiental Alberto Ribeiro Lamego, Campos dos Goytacazes, v. 13, n. 1, p. 24–42, jan./abr. 2019.

FUNDAÇÃO ESTADUAL DE ENGENHARIA DO MEIO AMBIENTE (FEEMA). DZ-0077.R-0 – Diretriz para encerramento de atividades potencialmente poluidoras ou degradadoras do meio ambiente. Aprovada pela Resolução CONEMA nº 2, de 7 out. 2008. Publicada no Diário Oficial do Estado do Rio de Janeiro, 22 out. 2008. Disponível em: <<https://www.inea.rj.gov.br/wp-content/uploads/2019/10/DZ-0077.R-0.pdf>>. Acesso em: 11 nov. 2025.

INEA – INSTITUTO ESTADUAL DO AMBIENTE (Rio de Janeiro). Regimento interno. In: Boletim de Serviço do Instituto Estadual do Ambiente, n. 50, 22 mar. 2023. Rio de Janeiro: INEA, 2023. Anexo da Resolução INEA nº 272. Disponível em: <https://extranet.inea.rj.gov.br/wp-content/uploads/2023/03/Boletim-de-Serviço-50.2023_Regimento-interno.pdf>. Acesso em: 11 nov. 2025.

INEA – INSTITUTO ESTADUAL DO AMBIENTE (Rio de Janeiro). Resolução nº 285, de 31 de agosto de 2023. Dispõe sobre o monitoramento de aterros e lixões no Estado do Rio de Janeiro – Programa AROMA. Diário Oficial do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 4 set. 2023.

JUNIOR, Clovis Raimundo Maliska et al. SCBR – Solução Corretiva Baseada no Risco: versão 3.25. Guia do usuário. [S. l.: s. n.], out. 2019. 167 p.

KOLIYABANDARA, S. M. P. A. et al. Assessment of the impact of an open dumpsite on surface water quality deterioration in Karadiyana, Sri Lanka. Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management, v. 14, p. 100371, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.enmm.2020.100371>>. Acesso em: 8 out. 2025.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE E MUDANÇA DO CLIMA (MMA). Programa Lixão Zero: erradicação de lixões no Brasil. Brasília: MMA, 2022. Disponível em: <<https://www.gov.br/mma/pt-br/assuntos/agendaambientalurbana/lixao-zero>>. Acesso em: 7 out. 2025.

RANGEL, Herllaine de Almeida; VENTURA, Luciana Maria Batista; SCHNEIDER, Marcio Roberto; SILVA, Ricardo Marcelo da; ANDRADE, Rosane Cristina de. Potencial da modelagem no acompanhamento de áreas contaminadas por lixões no pós-licenciamento. In: CONGRESSO INTERNACIONAL DE RESÍDUOS SÓLIDOS, 1., 2023, Búzios. Anais [...]. Ponta Grossa: Atena Editora, 2023. p. 209–219. Trabalho 23. Aceito em: 02 dez. 2023.

SCHNEIDER, Marcio Roberto; LANG, Gusttav Bauermann. MKS Trend Analysis Tools 1.0.5: guia do usuário. [S. l.: s. n.], jun. 2023. 18 p.

SECRETARIA DE ESTADO DO AMBIENTE E SUSTENTABILIDADE (SEAS). Decreto Estadual n.º 42.930, de 18 de abril de 2011. Institui o PROGUIDE – Programa Estadual de Gestão de Resíduos Integrada e Desenvolvimento Sustentável. Diário Oficial do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 18 abr. 2011.

SILVA, Lindamar Bezerra da. Qualidade da água subterrânea que abastece Juazeiro do Norte – CE: relação com cobertura de esgoto e densidade populacional. 2020. 177 f. Dissertação (Mestrado Profissional em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos) – Universidade Federal de Campina Grande, Sumé, 2020.

SSC4C – SAFE SANITATION AND CLEAN CITIES. Programa Lixão Zero: boas práticas em WASH. 2024. Disponível em: <<https://ssc4c.org.br/central-de-conhecimento/boas-praticas-em-wash/programa-lixao-zero>>. Acesso em: 7 out. 2025.

WASHINGTON, Maria Georgina Muniz. Modelagem numérica e análise probabilística da propagação da pluma de contaminação do lixão de São Pedro da Aldeia. 2008. 162 f. Tese (Doutorado) – Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2008. Disponível em: <<https://www.bdt.d.uerj.br:8443/handle/1/13655>>. Acesso em: 8 ago. 2023.