

# POTENCIAL DA MODELAGEM NO ACOMPANHAMENTO DE ÁREAS CONTAMINADAS POR LIXÕES NO PÓS-LICENCIAMENTO

*Data de aceite: 02/12/2023*

**Herllaine De Almeida Rangel**

**Luciana Maria Batista Ventura**

**Marcio Roberto Schneider**

**Ricardo Marcelo da silva**

**Rosane Cristina De Andrade**

**RESUMO:** O presente trabalho destaca os desafios enfrentados no Estado do Rio de Janeiro sobre a disposição inadequada de resíduos sólidos urbanos. A situação demanda uma abordagem inovadora, enfatizando estudos detalhados do solo, análises quantitativas e qualitativas dos poluentes, e a seleção criteriosa de métodos de recuperação do solo como oportunidades para a aplicação de tecnologias avançadas para a remediação das áreas contaminadas. A remediação destas áreas contaminadas requer a previsão fluxo e da dispersão da contaminação, análises abrangentes dos elementos poluentes e a seleção de métodos adequados para a recuperação do solo e aquíferos, além da avaliação dos riscos gerados. A ênfase recai sobre a urgência de controlar e minimizar os riscos dos lixões,

em relação à saúde humana, ao meio ambiente e ao patrimônio público e privado. O objetivo geral deste trabalho foi explorar a aplicação da modelagem no gerenciamento de áreas contaminadas por lixões, realçando sua utilidade, particularmente na fase pós-licença com a apresentação de diagramas e testes com softwares para destacar o potencial da modelagem. Os resultados demonstraram a aplicabilidade e benefícios da inserção da modelagem estatística no gerenciamento de áreas impactadas por resíduos sólidos urbanos e no estudo de caso foi evidenciada uma correlação positiva entre os resultados obtidos com o software MKS Trend Analysis Tools e a análise estatística, apontando sua eficácia na análise de dados. Concluiu-se que a modelagem é uma ferramenta poderosa, capaz de otimizar recursos financeiros e economizar tempo, melhorando a eficiência em todas as etapas do gerenciamento de áreas contaminadas, desde a identificação até o monitoramento no pós licença para o encerramento dos casos e reabilitação das áreas.

**PALAVRAS-CHAVE:** Gerenciamento; modelagem; lixões

**ABSTRACT:** This study highlights the challenges faced in the State of Rio de Janeiro regarding the restricted disposal of urban solid waste. The situation requires an innovative approach, emphasizing detailed soil studies, quantitative and qualitative analyzes of polluting substances, and a careful selection of soil recovery methods as opportunities for the application of advanced technologies for the remediation of contaminated areas. The remediation of these contaminated areas requires forecasting the flow and dispersion of contamination, comprehensive analyzes of polluting elements and a selection of appropriate methods for the recovery of soils and aquifers, in addition to the assessment of the risks generated. The emphasis is on the urgency of controlling and minimizing the risks of landfills, in relation to human health, the environment and public and private assets. The general objective of this work was to explore modeling modeling in the management of areas contaminated by landfills, highlighting its usefulness, especially in the post-license phase with the presentation of diagrams and software tests to highlight the modeling potential. The results obtained the applicability and benefits of statistical forecasting in the management of areas impacted by urban solid waste and in the case study a positive vision was evidenced between the results obtained with the MKS Trend Analysis Tools software and statistical analysis, pointing out its effectiveness in data analysis. It is concluded that modeling is a powerful tool, capable of optimizing financial resources and saving time, improving efficiency at all stages of contaminated area management, from inspection to post-license monitoring to case closure and rehabilitation. of the areas.

**KEYWORDS:** Management; modeling; open dumps.

## 1. INTRODUÇÃO:

A disposição de resíduos sólidos urbanos gera um líquido chamado lixiviado, popularmente conhecido como chorume, resultado da degradação biológica e físico-química dos resíduos, além da infiltração da água da chuva no solo. O lixiviado possui uma complexa composição química podendo conter uma variedade de contaminantes, como metais pesados, compostos orgânicos, microrganismos patogênicos e até mesmo micropoluentes emergentes, representando uma séria fonte de poluição, que pode contaminar o solo e mananciais superficiais e subterrâneos, prejudicando a saúde pública (FILHO, SILVA, 2019)

Os municípios do estado do Rio de Janeiro apresentam um cenário preocupante em relação à disposição de resíduos sólidos urbanos, similar a muitas outras cidades brasileiras com problemas com relação ao cumprimento das normas ambientais e atividades de fiscalização. Segundo a Associação Brasileira de Empresas de Tratamento de Resíduos e Efluentes (ABETRE), em 2019, de acordo com a pesquisa do Atlas da Destinação Final de Resíduos, dos 92 municípios do ERJ, 61 adotaram uma destinação apropriada para seus resíduos (totalizando 5,9 mil toneladas de lixo) enviadas à aterros. Por outro lado, 12 municípios realizaram uma disposição final inadequada (totalizando 259 mil toneladas de lixo) e, ao mesmo tempo, também aplicaram uma abordagem adequada (totalizando 140,3 mil toneladas de lixo). Cabe ressaltar que 19 municípios não apresentaram resposta quanto

às suas práticas de destinação final dos seus resíduos.

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 fica comprometida. Considerando a Resolução do Conselho Estadual do Ambiente do ERJ (CONEMA) nº 44, de 14 de dezembro de 2012, é relevante notar que, de acordo com o § 3º do artigo 8º, a constatação de fase livre ou resíduos em contato direto com o solo já é suficiente para classificar uma área como contaminada (AC). Portanto, os lixões podem ser considerados áreas contaminadas, representando uma ameaça iminente à vida humana, ao meio ambiente e ao patrimônio público e privado. Essa situação reforça a necessidade urgente de ações concretas para lidar com a criticidade da situação.

A remediação de áreas impactadas por lixões demanda a execução de etapas prévias, descritas na Resolução CONEMA nº 44 de 2012, de avaliação preliminar e investigação confirmatória, ações emergenciais de intervenção, investigação detalhada e avaliação de risco. Estas fases envolvem estudos sobre o solo, análises quali-quantitativas dos elementos agressores, da previsão da propagação da pluma de contaminação e da escolha dos métodos que estabeleçam o modelo de recuperação do solo e avaliação do impacto ambiental causado pela disposição inadequada de resíduos (WASHINGTON, 2008). E após deverá haver o monitoramento da eficácia das ações executadas, considerando o uso atual e futuro da área.

Dada a complexidade desse problema, a modelagem emerge como uma ferramenta valiosa para auxiliar em várias etapas do gerenciamento de áreas contaminadas, incluindo para os órgãos públicos, que podem oferecer suporte aos municípios na supervisão e avaliação da eficácia das medidas emergenciais, de intervenção e de monitoramento em relação aos lixões, a fim de reabilitar essas áreas, de forma a permitir que se dê um uso seguro para mesma.

## **2. OBJETIVO:**

Este trabalho tem como objetivo geral explorar o potencial da aplicação da modelagem no gerenciamento de áreas contaminadas por lixões, destacando suas diversas utilidades, desde a avaliação da extensão da contaminação e previsão do seu comportamento futuro até o planejamento de medidas de mitigação.

### **Objetivos específicos:**

- Apresentar a modelagem como uma ferramenta eficaz para órgãos públicos na fase de pós-licença e fiscalização, e no apoio às prefeituras, para análises preliminares, confirmatórias e de monitoramento de lixões, enfatizando seu papel na identificação de riscos e tomada de decisões embasadas em dados científicos.

- Demonstrar os benefícios práticos dessa abordagem por meio de estudo de caso, evidenciando a redução dos impactos ambientais e a proteção da saúde pública como resultados alcançados.

### 3. METODOLOGIA:

A metodologia empregada envolveu uma análise das principais funcionalidades e aplicações da modelagem no contexto das atividades de pós-licença, monitoramento e acompanhamento de áreas declaradamente contaminadas por lixões com base no § 3º do artigo 8º da Resolução CONEMA 44 de 2012 e nas etapas de gerenciamento de áreas contaminadas previstas. Essa análise considerou também a experiência do Inea com as demandas dos programas como o AROMA (Acompanhamento, Remediação, Otimização e Monitoramento de Aterros e PROGRIDE (Programa de Gestão de Resíduos e Desenvolvimento Sustentável), que oferecem inclusive suporte aos municípios no Rio de Janeiro. (INEA, 2023; SECRETARIA DE ESTADO DO AMBIENTE E SUSTENTABILIDADE, 2023)

Foi adotada uma abordagem com fluxogramas para destacar o potencial e a eficácia da modelagem no apoio aos órgãos públicos durante a fase de pós-licença e outras atividades, como por exemplo, a fiscalização de áreas contaminadas por lixões

Uma das ferramentas de modelagem selecionadas foi o SCBR, software de propriedade da PETROBRAS e da UFSC com registro no Instituto Nacional de Propriedade Industrial (INPI), que para ser utilizado requer um arquivo de licença para habilitar o uso do software. Trata-se de um simulador matemático bidimensional de apoio ao gerenciamento de áreas impactadas, avaliação de riscos à saúde humana e remediação, ou em áreas onde são desenvolvidas atividades potencialmente poluidoras. (JUNIOR et al., 2019)

O outro software selecionado foi o MKS Trend Analysis Tools, ferramenta gratuita em ambiente Windows®, que realiza análises estatísticas monotônicas não paramétricas de parâmetros ambientais ao longo do tempo, facilitando seu uso em órgãos públicos nacionais, além de ter sua versão em língua portuguesa. Desenvolvido para auxiliar analistas ambientais na avaliação de tendências monotônicas em dados de concentração, massa ou volume obtidos em programas de monitoramento ambiental. O MKS permite responder a questões importantes, como identificar tendências de crescimento ou redução das concentrações em séries temporais, determinar níveis de confiança em hipóteses de redução de contaminantes e avaliar se é possível reduzir campanhas de monitoramento em áreas contaminadas. É uma ferramenta valiosa para apoiar decisões ambientais. (SCHNEIDER; LANG, 2023)

Para avaliar a utilidade da ferramenta modelagem, foi conduzido um estudo de caso comparando os resultados da análise de concentração de DBO5 e DQO em lixiviados de dois municípios, provenientes de disposições de resíduos sólidos urbanos em lixões

e aterros, de artigos publicados em periódicos: Simpósio Ítalo Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental. (2002) e Araújo et al. (2020). O objetivo foi verificar se as tendências identificadas pelos autores eram consistentes com as análises fornecidas pelo software. Foi adotada para ambos os casos, como ferramenta de modelagem estatística, o software MKS Trend Analysis Tools.

## **4. RESULTADOS:**

### **Fluxogramas de processo com a adoção da ferramenta**

A figura 1 apresenta um mapa de correlação entre as fases de gerenciamento de áreas contaminadas previstas na Resolução Conema nº44 de 2012, os principais questionamentos e necessidades de apuração durante a análise de investigação de um passivo ambiental e aplicação das funcionalidades de um software de modelagem específico de GAC para estas respostas. Para a elaboração do fluxograma foi considerado um cenário de lixiviação de RSU numa área e o uso do SCBR como modelador de suporte à tomada de decisões.

# Mapa de correlação das fases do GAC de lixões, funcionalidades da modelagem e perguntas para tomada de decisão

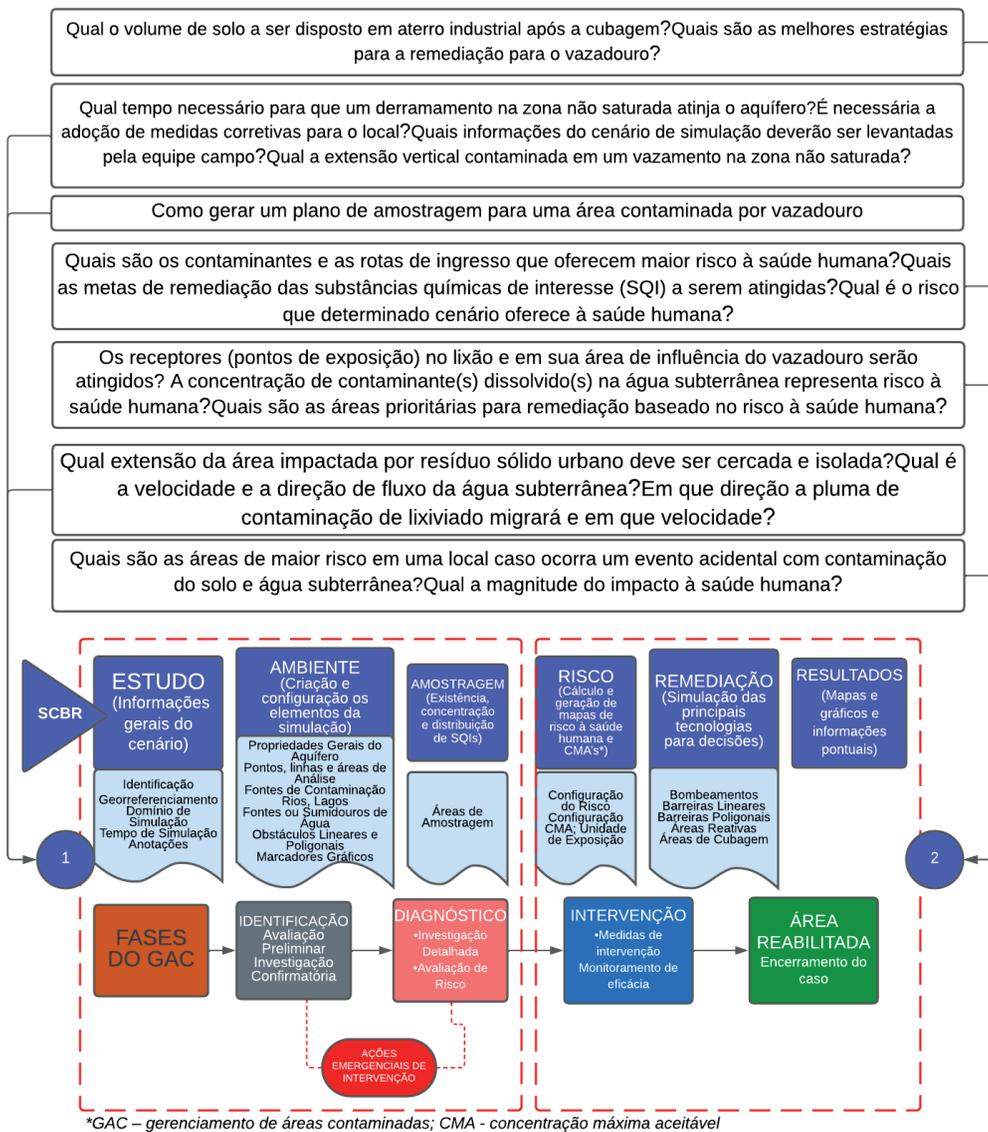


Figura 1 – Mapa de correlação das perguntas para tomada de decisão, fases do GAC de lixões e funcionalidades da modelagem (autor, 2023)

A figura 2 ilustra como a modelagem pode ser uma ferramenta importante para análise das solicitações oriundas dos programas AROMA e PROGRIDE e em apoio aos municípios do Estado do Rio de Janeiro para mitigação dos impactos dos lixões.

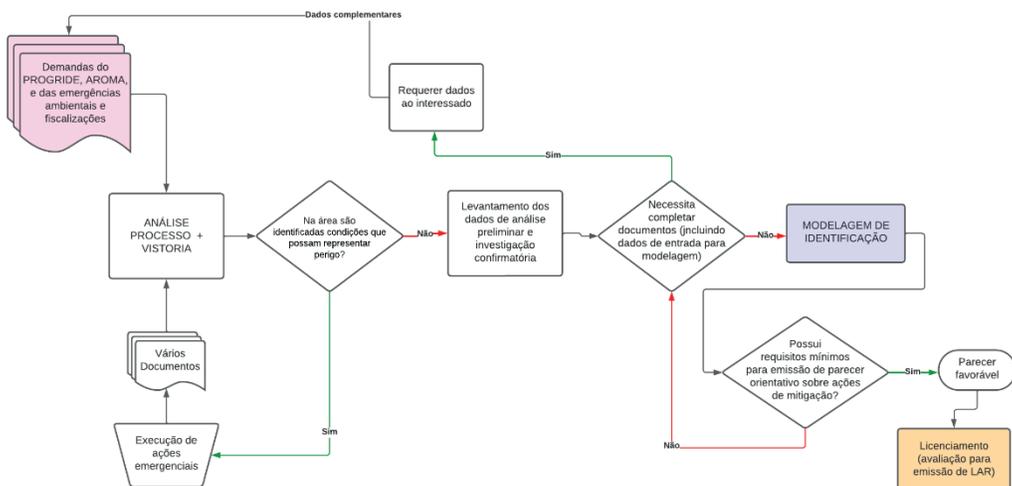


Figura 2 – Fluxograma de processo dos programas AROMA e PROGRIDE em apoio os municípios do Estado do Rio de Janeiro, adotando a ferramenta de modelagem para recuperação de 'lixões' (autor, 2023)

Para análise da modelagem após a obtenção de licença ambiental de recuperação e outros instrumentos de controle ambiental, a figura 3 ilustra um fluxograma que sugere como um órgão público pode usar a modelagem para monitorar a eficácia das ações, incluindo a avaliação da eficiência e eficácia do sistema de remediação, das medidas de controle de engenharia e de controle institucional, assegurando a execução conforme o projeto aprovado no plano de intervenção, bem como o monitoramento no pós licença para encerramento na área em processo de monitoramento para reabilitação, verificando a manutenção da situação após a execução do plano de intervenção.

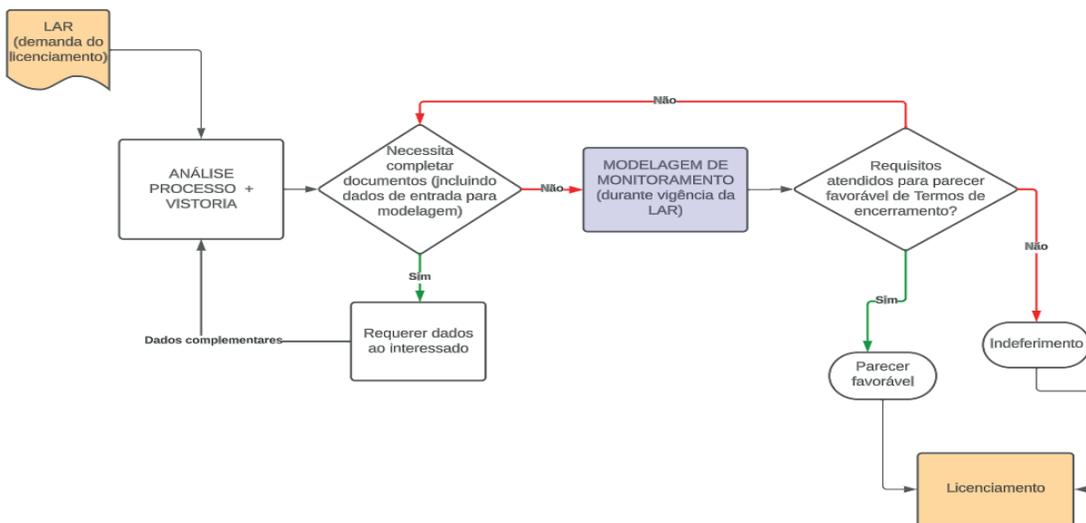


Figura 3 – Fluxograma de processo a ser adotado pelo órgão público que adote a ferramenta de modelagem para monitorar a eficácia das ações realizadas após a obtenção de licença ambiental de recuperação e outros instrumentos de controle ambiental (Fonte: Autores, 2023)

Os fluxogramas indicam que a modelagem pode desempenhar um papel fundamental em todas as fases do GAC, com destaque na avaliação inicial e confirmatória de lixões, possibilitando a compreensão do fluxo de água subterrânea, a previsão da migração de contaminantes e a simulação de seu comportamento no solo e na água subterrânea. Isso é essencial para conter a fonte de contaminação, planejar intervenções e minimizar impactos ambientais imediatos, independentemente do tempo decorrido desde a disposição dos resíduos. Além disso, o suporte a tomada de decisões também contempla o atendimento às demandas de emergências ambientais e de fiscalizações, inclusive para áreas sem responsável legal identificado ou com recursos para investigações e intervenções.

## Estudos de caso de lixões com a adoção da ferramenta

A fim de demonstrar os benefícios concretos da aplicação da modelagem para recuperação de lixões, foi verificado os resultados de dois estudos de caso específicos sobre lixiviado de resíduos sólidos urbanos que adotaram o software MKS Trend Analysis Tools, como ferramenta de acompanhamento.

Para avaliar a utilidade da ferramenta da modelagem estatística, estudos sobre o Aterro Controlado de Bauru constataram que as variações significativas de  $DBO_5$  e DQO estavam relacionadas ao índice pluviométrico ao longo de seis meses. A análise no software MKS Trend Analysis Tools (figura 4) revelou que a  $DBO_5$  e DQO não apresentam tendência significativa (NC < 90%), devido à variabilidade dos parâmetros em função das chuvas e dados insuficientes para indicação de tendência. (SIMPÓSIO ÍTALO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 2002)



Figura 4 – Adaptado de Simpósio Ítalo Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2002

A análise temporal dos parâmetros  $DBO_5$  e DQO no lixiviado do aterro sanitário de Maceió, Brasil, conduzida por Araújo et al. (2020), 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 (figura 5 e 6), 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.

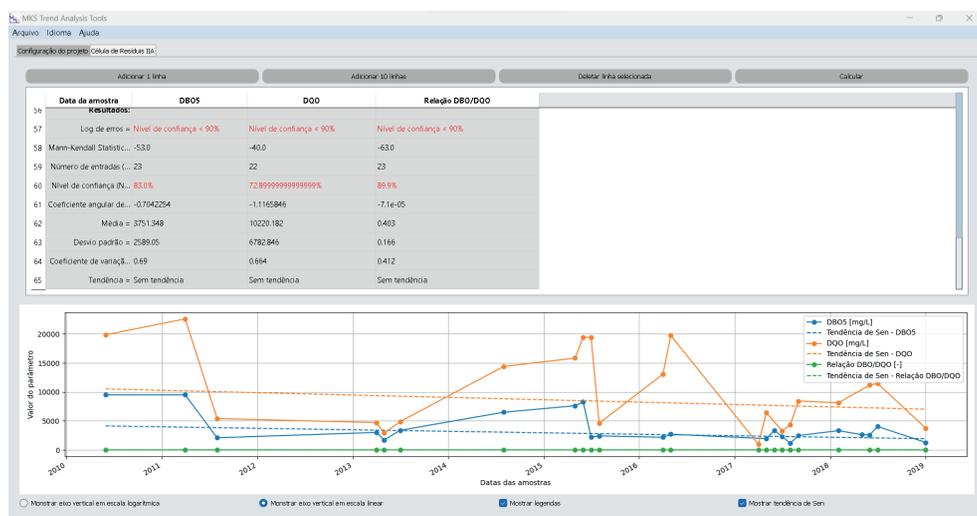


Figura 5 – Fonte: Adaptado de Araújo et al., 2020

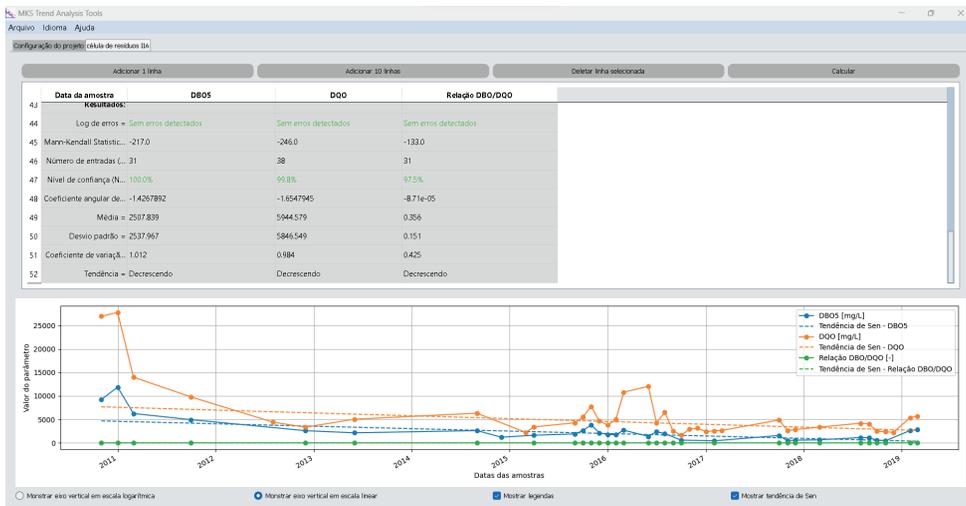


Figura 6 – Fonte: Adaptado de Araújo *et al.*, 2020

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.

## 5. CONCLUSÕES:

A modelagem demonstrou um potencial significativo no gerenciamento de áreas contaminadas por resíduos sólidos urbanos. Ela se revela uma ferramenta útil ao longo de diversas etapas do processo, desde a identificação e investigação detalhada, avaliação de riscos à saúde humana até a definição de estratégias de remediação, visando proteger o meio ambiente e a saúde pública. Além disso, os modelos quando combinados com a experiência do usuário e dados de campo de qualidade, podem modelagem apoiar na apoiar a tomada de decisões, na elaboração de instrumentos de controle ambiental e de programas de recuperação de áreas impactadas por lixões.

Através dos estudos de caso sobre lixões e aterros, confirmou-se a correlação positiva entre os resultados obtidos por modelagem e análise estatística simples. Isso reforça a eficácia dessa abordagem no acompanhamento de áreas contaminadas por lixões no pós-licença. Portanto, a modelagem emerge como uma ferramenta robusta, capaz de otimizar recursos financeiros e economizar tempo, aumentando a eficiência ao longo de todo o processo de gerenciamento, desde a identificação até o encerramento dos casos.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARAÚJO, Liz Geise Santos de; FERREIRA, Riadny Patrícia de Souza; NORBERTO, Alison de Souza; MARIANO, Maria Odete Holanda; CALLADO, Nélia Henriques. 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.

ATLAS de Destinação Final ABETRE: Mapas estáticos elaborados pela ABETRE - Associação Brasileira de Empresas de Tratamento de Resíduos e Efluentes - com informações sobre a Destinação Final de Resíduos Sólidos Urbanos. **Atlas de Destinação Final ABETRE**, [s. l.], 21 set. 2023. Disponível em: <https://sinir.gov.br/mapas/abetre/>. Acesso em: 21 set. 2023.

CONSELHO ESTADUAL DE MEIO AMBIENTE DO RIO DE JANEIRO (Rio de Janeiro). Dispõe sobre a obrigatoriedade da identificação de eventual contaminação ambiental do solo e das águas subterrâneas por agentes químicos, no processo de licenciamento ambiental estadual. RESOLUÇÃO, 44, 14/12/2012. Resolução CONEMA Nº 44 DE 14/12/2012, Rio de Janeiro: DOERJ, n. 44, 2012.

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.

INEA (Estado do Rio de Janeiro). Nº 285, de 31 de agosto de 2023. Monitoramento de Aterros e Lixões no Rio de Janeiro – Programa AROMA, Rio de Janeiro: Diário Oficial, ano 2023, 4 set. 2023.

JUNIOR, CLOVIS RAIMUNDO MALISKA; ZADROZNY, FÁBIO; CORSEUIL, HENRY XAVIER; SCHNEIDER, MARCIO ROBERTO; LUCIANETTI, RODRIGO MACHADO. **SCBR - Solução Corretiva Baseada no Risco Versão 3.25**: Guia do Usuário. Santa Catarina: [s. n.], out 2019. 167 p.

SCHNEIDER, Marcio Roberto; LANG, Gusttav Bauermman. MKS Trend Analysis Tools 1.0.5: GUIA DO USUÁRIO. Florianópolis: [s. n.], jun 2023. 18 p. SCHNEIDER, Marcio Roberto; LANG, Gusttav Bauermman. **MKS Trend Analysis Tools 1.0.5**: GUIA DO USUÁRIO. Florianópolis: [s. n.], jun 2023. 18 p.

SECRETARIA DE ESTADO DO AMBIENTE E SUSTENTABILIDADE. Decreto Estadual 42.930, de 18 de abril de 2011. PROGUIDE: Programa Estadual de Gestão de Resíduos Integrada e Desenvolvimento Sustentável, Rio de Janeiro, ano 2023, 10 maio 2023.

SIMPÓSIO ÍTALO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, VI., 2002, Vitória. **FATORES QUE AFETAM A QUALIDADE DO CHORUME GERADO EM ATERRO CONTROLADO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS** [...]. [S. l.]: ABES, 2002. 7 p.

WASHINGTON, Maria Georgina Muniz. **Modelagem numérica e análise probabilística da propagação da pluma de contaminação do lixão de São Pedro da Aldeia**. Orientador: Marcus Peigas Pacheco. 2008. 162 f. TESES (DOUTORADO) - Universidade do Estado do Rio de Janeiro, RIO DE JANEIRO, 2008. Disponível em: <https://www.btd.uerj.br:8443/handle/1/13655>. Acesso em: 8 ago. 2023.