

LIXÕES DO BRASIL: TRANSFORMAR PASSIVOS AMBIENTAIS EM FRONTEIRAS DE ENERGIA LIMPA E DESENVOLVIMENTO LOCAL

Euclides Ademir Espíndola ⁽¹⁾, Késia Alves da Silva ⁽²⁾

(1) Alves Espíndola Engenharia e Consultoria, Florianópolis, Brasil. ORCID: 0009-0001-6574-6060

(2) Alves Espíndola Engenharia e Consultoria, Florianópolis, Brasil. ORCID: 0009-0004-9023-9433

Resumo

A deposição final inadequada de resíduos sólidos urbanos permanece um passivo ambiental, social e económico relevante no Brasil. Apesar do enquadramento legal consolidado, persistem lixões e aterros controlados, com impactos no solo, nas águas subterrâneas, nas emissões atmosféricas e na segurança geotécnica. Este artigo apresenta o programa “Lixões do Brasil” como proposta metodológica técnico-operacional para apoiar a transição de um paradigma de depósito para um modelo de processamento, remediação, valorização e rastreabilidade. A metodologia integra evidência de campo, sistema de informação geográfica, digitalização 3D com nuvem de pontos e Modelo Digital do Terreno, e Building Information Modelling, com governação da informação em ambiente comum de dados. O piloto metodológico no Lixão Fischer (Teresópolis, RJ), sítio desativado e em remediação, exemplifica a integração SIG-MDT-BIM para suportar diagnóstico, projeto executivo, contratação, planeamento 4D e quantificação 5D. Como contribuição, propõe-se uma cadeia de evidência digital e um conjunto de indicadores de desempenho (KPIs) para validar a abordagem, comparar sítios e apoiar decisões contratuais e operacionais.

1. Introdução

A erradicação de lixões e a substituição da deposição final inadequada por soluções ambientalmente adequadas constituem um desafio estrutural no Brasil. Para além da conformidade legal, o tema envolve saúde pública, proteção de recursos hídricos, estabilidade geotécnica, emissões atmosféricas, recuperação territorial e capacidade institucional de planejar, contratar e monitorizar intervenções complexas.

Entende-se por deposição final adequada a deposição de rejeitos em aterro sanitário (ou solução equivalente licenciada), com sistemas de engenharia e controlo, incluindo impermeabilização, drenagem e tratamento de lixiviados, drenagem e controlo de gases, drenagem de águas pluviais,

operação controlada e monitorização ambiental [4].

Em contraste, lixões e aterros controlados não asseguram o mesmo nível de proteção e controlo, mantendo riscos de contaminação, emissões e instabilidade. No contexto deste artigo, mantém-se o termo brasileiro “lixão”, equivalente à deposição final inadequada ou a lixeira a céu aberto, por corresponder à terminologia corrente nas políticas públicas e nos relatórios setoriais do Brasil.

A Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), instituída pela Lei n.º 12.305/2010, estabelece princípios, instrumentos e uma hierarquia de gestão que prioriza não geração, redução, reutilização, reciclagem e tratamento, relegando a deposição final para o último patamar, restrito aos rejeitos [4].

Apesar desse enquadramento, a remediação de passivos ambientais permanece limitada por informação fragmentada, baixa rastreabilidade entre diagnóstico, projeto, contratação e operação, e ausência de requisitos digitais padronizados. Neste contexto, o programa “Lixões do Brasil” propõe uma metodologia replicável para converter passivos em trajetórias de remediação, requalificação territorial e geração de valor por economia circular e energia limpa.

O objetivo do artigo é propor e discutir uma cadeia de evidência digital para apoio à remediação de áreas de deposição inadequada de resíduos sólidos urbanos, articulando SIG/GIS, digitalização 3D, Modelo Digital do Terreno (MDT/DTM), BIM e CDE. A questão orientadora é: de que forma a integração SIG-MDT-BIM, governada em CDE [7], pode reduzir incertezas, aumentar a rastreabilidade e apoiar a contratação baseada em desempenho em projetos de remediação de lixões? Um piloto demonstrativo no Lixão Fischer (Teresópolis, RJ) serve de referência metodológica para explicitar produtos, fases e indicadores de validação passíveis de replicação em outros passivos.

2. Enquadramento: contexto brasileiro, geração e destino de RSU

Relatórios setoriais indicam que a geração nacional anual de resíduos sólidos urbanos (RSU) permanece elevada, com ordem de grandeza superior a 80 milhões de toneladas por ano e geração per capita próxima de 1 kg/habitante/dia [1][2].

No mesmo período, parcela relevante do fluxo segue para deposição final inadequada, evidenciando a necessidade de acelerar investimentos, regionalização logística, fortalecimento de instrumentos económicos e adoção de tecnologias e instrumentos de governação [1][2].

O Sistema Nacional de Informações em Saneamento Básico (SINISA) define “rota tecnológica” como o conjunto de processos e fluxos desde a geração até à destinação final, podendo incluir tecnologias com ou sem valorização energética [3].

Esta perspetiva sustenta uma abordagem modular, em que programas e soluções são combinados conforme o estágio do passivo (ativo, encerrado ou em remediação), as condicionantes territoriais e o nível de maturidade institucional do titular do serviço.

Clarificação operacional: do diagnóstico à execução

A transição de um passivo para uma solução executável exige: (i) diagnóstico territorial e ambiental; (ii) projeto com quantificação e faseamento; (iii) contratação com requisitos

verificáveis; e (iv) operação e monitorização com dados auditáveis. O eixo central do programa é ligar estas etapas por meio de dados consistentes, atualizáveis e rastreáveis, evitando que cada fase produza entregáveis isolados e de difícil verificação.

3. Metodologia do programa “Lixões do Brasil”

A metodologia foi desenhada para reduzir incerteza desde a fase preliminar e criar um fluxo contínuo de informação entre diagnóstico, projeto, execução e operação. Integra evidência de campo, SIG/GIS, digitalização 3D e BIM para assegurar rastreabilidade, padronização de entregáveis e comparabilidade entre sítios [7][8]. A Tabela 1 sintetiza a lógica operacional da proposta, distinguindo entradas, processos, entregáveis e uso digital em cada fase, ilustrada na Figura 1.

Tabela 1: Síntese operacional da metodologia proposta.

Fase	Entradas principais	Processo	Entregável	Uso digital
Diagnóstico	Dados históricos, visita técnica, entrevistas e registos georreferenciados	Caracterização preliminar e identificação de pontos críticos	Linha de base territorial e ambiental	SIG/GIS
Digitalização	Drone, LiDAR, laser scanning, pontos de controlo	Nuvem de pontos, MDT/DTM e simulações preliminares	Modelo territorial e superfícies de referência	SIG + MDT/DTM
Investigação	Sondagens, amostras e evidência de subsuperfície	Estimativa de volume/massa e estratigrafia do depósito	Modelo do passivo e incertezas associadas	SIG + BIM
Projeto	Requisitos técnicos, restrições e soluções de engenharia	Modelação, coordenação e validação de requisitos	Modelo executivo e peças de contratação	BIM + CDE
Execução	Cronograma, medições, quantidades e evidências de campo	Planeamento 4D, controlo 5D e atualização de evidências	Controlo físico-financeiro e registos auditáveis	BIM 4D/5D + CDE
Operação	Monitorização ambiental, inspeções e indicadores	Atualização do modelo e verificação de desempenho	Histórico auditável e KPIs por sítio	CDE + SIG/BIM



Figura 1: Metodologia do programa "Lixões do Brasil".

3.1 Etapa 1 — Monitorização e caracterização preliminar no terreno

A caracterização inicial do sítio é realizada por monitorização direta da área, com recolha de evidência operacional, ambiental e social. Procedimentos típicos incluem entrevistas semiestruturadas com atores locais, observação direta do funcionamento ou das condições remanescentes, e registo fotográfico/georreferenciado de áreas ativas, acessos, zonas de escorrência e pontos de risco. O objetivo é produzir uma linha de base mínima, mapear pontos críticos e definir o plano de levantamentos de maior precisão.

3.2 Etapa 2 — Inventário geoespacial e digitalização 3D (SIG/GIS + MDT/DTM)

Consolida-se um inventário georreferenciado em SIG/GIS com delimitação por polígonos e camadas territoriais, incluindo hidrografia, declives, ocupação do solo, acessos, restrições e bens a proteger. Em seguida, realizam-se levantamentos de alta precisão, por fotogrametria, LiDAR/drone ou varrimento laser terrestre, gerando nuvem de pontos e Modelo Digital do Terreno (MDT/DTM), base para simulações de drenagem, contenções, volumetria e implantação de infraestruturas.

3.3 Etapa 3 — BIM e CDE: projeto executável, 4D/5D e auditoria

A etapa BIM (Building Information Modelling) transforma a evidência territorial em projeto executável. Os modelos suportam coordenação, extração de quantidades (5D), planeamento faseado (4D), verificação de requisitos e rastreabilidade entre soluções propostas, medições e evidências. A definição do LOIN (Level of Information Need) deve ser compatível com o uso

previsto do modelo em cada fase, evitando tanto a insuficiência como o excesso de informação [8]. A governação da informação assenta num CDE (Common Data Environment), com controlo de versões, rasto de auditoria, regras de acesso e estados de aprovação, garantindo continuidade mesmo em mudanças contratuais. Conteúdos mínimos incluem: terreno georreferenciado (MDT/DTM), drenagens e contenções, vias e plataformas, sistemas de controlo de lixiviados, requisitos de troca de informação e parâmetros mínimos para medições, validação e verificação.

3.4 Etapa 4 — Portefólio de soluções e programas associados

A seleção de soluções é feita por sítio, combinando escala, logística, composição do resíduo, risco geotécnico, sensibilidade ambiental e viabilidade institucional. O portefólio modular inclui encerramento técnico e recuperação ambiental, reorganização de recolha e triagem, aproveitamento energético, usos pós-encerramento, inclusão socioprodutiva e integração com cadeias industriais e da construção civil [3].

4. Piloto de aplicação e replicabilidade — Lixão Fischer (Teresópolis, RJ)

O Lixão Fischer é adotado como piloto metodológico do programa, com vista à replicação em outros passivos. O sítio localiza-se nas margens do km 75 da Rodovia BR-116 (Estrada Rio-Bahia), no bairro Fischer, nas coordenadas 22°22'52.7" S e 42°56'46.7" O, ilustrado na Figura 2. A operação iniciou-se na década de 1980, com mais de 40 anos de funcionamento. Até 2023, quando a área foi desativada e passou a operar como estação de transbordo, estima-se que recebia 180 a 200 toneladas/dia de resíduos.

O parecer técnico do Departamento de Recursos Minerais do Rio de Janeiro (DRM-RJ) descreve ocorrência de deslizamento associado a corrida de lixo (2018) e recomenda fiscalização e monitorização de feições de instabilidade, bem como implantação de drenagem eficiente para remediação de lixiviados, enquadrando o cenário como de risco elevado [5].

4.1 Adaptação da Etapa 1 e estimativa do passivo por sondagens

Por se tratar de sítio desativado e com remediação iniciada em 2026, a caracterização inicial deixa de privilegiar contagem de viaturas e passa a focar-se em reconhecimento de campo, levantamento histórico/documental e planeamento de investigação de subsuperfície. A estimativa de volume e massa de resíduos remanescentes deve ser suportada por sondagens do solo e amostragem, integradas com o MDT/DTM para modelar a geometria do depósito, reduzir incerteza e apoiar o faseamento das intervenções.

4.2 Integração SIG-MDT/DTM-BIM (cadeia de evidência)

A integração prática é organizada como pipeline técnico: o SIG/GIS consolida enquadramento territorial, restrições e bens a proteger; a digitalização 3D produz nuvem de pontos e MDT/DTM para simulações; as sondagens fornecem geometria e estratigrafia do depósito; e o BIM materializa o projeto executável (4D/5D), com governação e auditoria no CDE [7][8]. Esta cadeia de evidência suporta decisão técnica, contratação baseada em requisitos e acompanhamento do desempenho ao

longo do ciclo de vida da remediação.

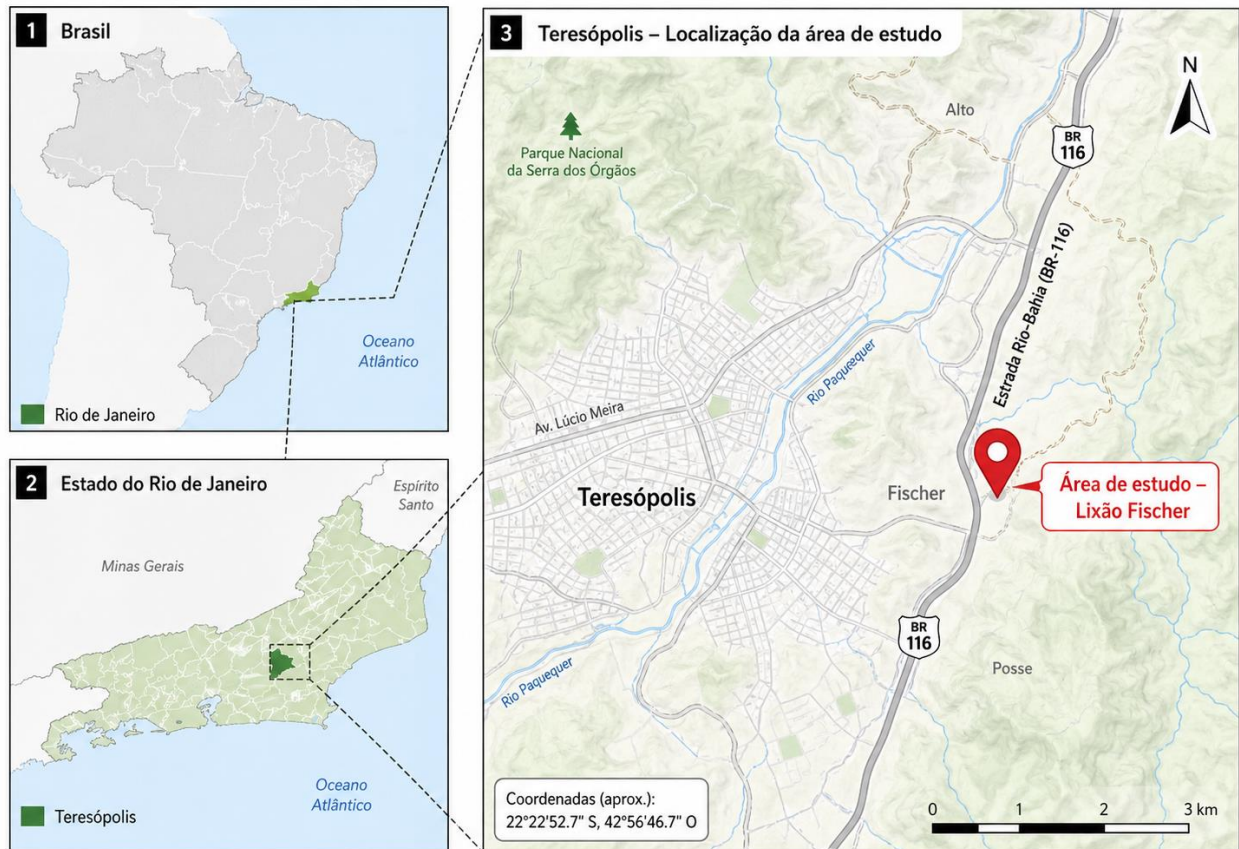


Figura 2: Localização da área de estudo – Lixão Fischer, bairro Fischer, Teresópolis, Rio de Janeiro, Brasil.

5. Soluções e programas associados

As soluções são selecionadas por sítio e fase de intervenção. Em sítios ativos, a prioridade é interromper a deposição inadequada e estruturar rotas de tratamento e valorização. Em sítios desativados, a prioridade é remediação, estabilização, drenagens, controlo de lixiviados e requalificação territorial [3].

A economia circular é suportada por triagem, reciclagem e compostagem, articuladas com logística (transbordo e transporte) e com instrumentos económicos locais.

No eixo energético, considera-se biogás e biometano em aterros sanitários e áreas com potencial de captação; em áreas requalificadas, considera-se aproveitamento para geração solar e, quando viável, eólica de pequeno porte; e hubs híbridos como estratégia de uso pós-encerramento [1][2].

No eixo social, prevê-se inclusão socioproductiva e qualificação de cooperativas, com segurança e

formalização. No eixo ambiental, objetiva-se reduzir risco geotécnico, controlar lixiviados e gases, e estabelecer condições mínimas para a recuperação ecológica e urbanística do território.

Integração com a construção civil e gestão de RCD

A integração com a construção civil considera o fluxo de resíduos de construção e demolição (RCD) e a possibilidade de absorção de materiais recuperados, quando tecnicamente viável e conforme requisitos de qualidade, fortalecendo a economia circular e reduzindo pressão sobre áreas de deposição [6].

6. Indicadores de desempenho (KPIs) para validação e replicabilidade

A validação e replicabilidade da abordagem requerem indicadores consistentes entre sítios. Propõe-se um conjunto mínimo de KPIs, organizado por fase, com foco em completude de dados, qualidade geométrica, redução de incerteza, rastreabilidade, controlo 4D/5D e melhoria de risco. A Tabela 2 apresenta os indicadores como instrumentos de verificação e evidência no CDE.

Tabela 2: KPIs propostos para validação e replicabilidade da metodologia.

Código	Indicador	Critério/Fórmula	Fase	Evidência no CDE
KPI-SIG-1	Completude	% de camadas essenciais disponíveis e atualizadas (hidrografia, declives, uso do solo, acessos, restrições e bens a proteger).	Diagnóstico	Inventário SIG aprovado.
KPI-SIG-2	Georreferenciação	Consistência de datum/projeção e erro máximo admissível em pontos de controlo.	Diagnóstico	Relatório geodésico e pontos de controlo.
KPI-DTM-1	Cobertura 3D	% da área do polígono coberta por nuvem de pontos válida.	Digitalização	Nuvem de pontos e relatório de cobertura.
KPI-DTM-2	Precisão	Resolução/erro vertical estimado do MDT/DTM e conformidade com o objetivo do projeto.	Digitalização	MDT/DTM validado.
KPI-INV-1	Investigação	Densidade de sondagens por hectare e % do plano executado.	Investigação	Boletins de sondagem e amostragem.

Código	Indicador	Critério/Fórmula	Fase	Evidência no CDE
KPI-INV-2	Redução de incerteza	Variação do intervalo de confiança do volume/massa estimada antes/depois das sondagens.	Investigação	Modelo do passivo e memória de cálculo.
KPI-BIM-1	Rastreabilidade	% de requisitos técnicos com evidência no modelo e registo de aprovação no CDE.	Projeto	Matriz de requisitos e aprovações.
KPI-BIM-2	Consistência 5D	Divergência entre quantidades extraídas e medições de referência.	Projeto/execução	Mapa de quantidades e relatório de verificação.
KPI-4D	Planeamento	% de atividades críticas ligadas a elementos modelados e cronograma validado.	Execução	Modelo 4D e cronograma aprovado.
KPI-RES	Risco	Evolução do nível de risco geotécnico e ocorrência de pontos críticos antes/depois das medidas de drenagem.	Operação	Relatórios de inspeção e monitorização.

7. Discussão

A ausência de requisitos digitais explícitos em iniciativas de remediação pode resultar em entregáveis heterogêneos, menor auditabilidade e dificuldade de comparação entre sítios. A proposta do programa é padronizar entregas e integrar SIG/GIS, MDT/DTM e BIM para reduzir incerteza, melhorar transparência e apoiar contratos orientados a desempenho.

No ciclo de vida, a integração BIM-SIG facilita a continuidade: o SIG/GIS preserva o contexto territorial e as restrições; o BIM concentra o projeto, os requisitos e as quantidades; o CDE garante o rasto de auditoria; e a digitalização 3D fornece evidência para verificação e atualização do modelo. Este encadeamento é especialmente relevante em obras de remediação, nas quais alterações de escopo, equipas e condicionantes de campo são frequentes. Como limitação, reconhece-se que a proposta ainda exige validação empírica completa em diferentes contextos territoriais, sendo o piloto do Lixão Fischer uma aplicação metodológica inicial.

8. Conclusões

O programa “Lixões do Brasil” estrutura uma metodologia replicável para transição de deposição inadequada para modelos de processamento e remediação com rastreabilidade. A articulação entre SIG/GIS, digitalização 3D, nuvem de pontos, MDT/DTM, sondagens e BIM/CDE cria uma cadeia de evidência que suporta projeto executivo, contratação e operação. O piloto no Lixão Fischer demonstra a adaptação das etapas a um sítio desativado e em remediação, com foco na estimativa do passivo por investigação de subsuperfície e na gestão de risco geotécnico e de lixiviados [5].

O conjunto de KPIs proposto permite validar resultados e comparar desempenho entre sítios, reforçando escalabilidade e governação, e criando condições para evolução do programa em portefólio nacional de projetos com entregáveis padronizados e auditáveis. A principal contribuição do artigo é demonstrar que a remediação de lixões pode ser tratada não apenas como obra ambiental, mas como processo de gestão da informação ao longo do ciclo de vida, com requisitos digitais, evidência verificável e suporte à tomada de decisão.

Referências

- [1] ABREMA, “*Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2025*”, Associação Brasileira de Resíduos e Meio Ambiente, São Paulo, SP, Brasil, 2025. (Online). Disponível em: abrema.org.br
- [2] ABREMA, “*Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2024*”, Associação Brasileira de Resíduos e Meio Ambiente, São Paulo, SP, Brasil, 2024. (Online). Disponível em: abrema.org.br.
- [3] BRASIL, “*Relatório dos Serviços de Limpeza Urbana e Manejo de Resíduos Sólidos – SINISA 2025: ano de referência 2024*”, Ministério das Cidades, Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental (SNSA), Brasília, DF, Brasil, 2025. (Online). Disponível em: www.gov.br
- [4] BRASIL, “*Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010: Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos*”, Presidência da República, Casa Civil, Brasília, DF, Brasil, 2010. (Online). Disponível em: planalto.gov.br
- [5] DRM-RJ, “*Avaliação de Risco de Deslizamento em Teresópolis: Parecer Técnico*”, Departamento de Recursos Minerais do Estado do Rio de Janeiro, Niterói, RJ, Brasil, Jul. 01, 2022.
- [6] ALTO URUGUAI, “*Plano Municipal de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos – PMGIRS: Teresópolis - RJ, Produto 07 - Relatório Síntese*”, Alto Uruguai Engenharia & Planejamento de Cidades, Concórdia, SC, Brasil, 2017.
- [7] *Organization of Information About Construction Works - Information Management Using Building Information Modelling - Part 1: Concepts and Principles*, ISO Standard 19650-1:2018, 2018.
- [8] *Organization of Information About Construction Works - Information Management Using Building Information Modelling - Part 2: Asset Delivery Phase*, ISO Standard 19650-2:2018, 2018.