

Revisão sistemática do uso de dados de sensoriamento remoto e geoprocessamento para determinação de áreas de aterro sanitário

Systematic review of the use of remote sensing and geoprocessing data to determine landfill areas

Revisión sistemática del uso de datos de teledetección y geoprosesamiento para determinar áreas de vertederos

Gabriel Soares da Silva¹
Pedro Luiz Teixeira de Camargo²
Felipe da Silva Alves³

RECEBIDO EM 03/03/2025
ACEITO EM 26/05/2025

RESUMO

O uso intensivo de recursos fósseis vem aumentando drasticamente a produção de resíduos, especialmente em áreas urbanas. Assim, é crucial identificar locais apropriados para o descarte de resíduos sólidos urbanos, utilizando tecnologias avançadas como o geoprocessamento e os sistemas de informação geográfica. Este estudo realizou uma revisão sistemática de pesquisas acadêmicas em países em desenvolvimento, visando reunir, sintetizar e avaliar técnicas de geoprocessamento combinadas com métodos estatísticos, para identificar áreas adequadas à instalação de aterros sanitários. As evidências coletadas foram validadas com base em uma pergunta de pesquisa central, proporcionando uma compreensão clara do estado atual do conhecimento na área. Essa abordagem destaca a importância das geotecnologias na gestão eficaz de resíduos sólidos urbanos, promovendo sustentabilidade ambiental e melhorias na qualidade de vida das

¹ Instituto Federal de Minas Gerais, *Campus Piumhi*, Piumhi, MG, Brasil.
gssilva@hotmail.com.br - <https://orcid.org/0000-0001-6261-7477>

² Instituto Federal de Minas Gerais, *Campus Piumhi*, Piumhi, MG, Brasil.
pedro.camargo@ifmg.edu.br - <https://orcid.org/0000-0003-2652-4323>

³ Instituto Federal de Minas Gerais, *Campus Piumhi*, Piumhi, MG, Brasil.
felipe.alves@ifmg.edu.br - <https://orcid.org/0000-0003-4165-9912>

comunidades afetadas. Foram analisados 102 trabalhos, dos quais 49 atenderam aos critérios metodológicos e 28 responderam ao questionamento proposto. O método mais aplicado foi *Analytic Hierarchy Process*, frequentemente associado aos *softwares* ArcGIS e QGIS. Os resultados evidenciam a ampla aplicabilidade dessas tecnologias em países em desenvolvimento. Conclui-se que a integração das geotecnologias em ambientes de geoprocessamento é estratégica para a gestão de resíduos sólidos urbanos, apoiando decisões sustentáveis e contribuindo para a qualidade de vida.

PALAVRAS-CHAVE: gestão ambiental; StArt; resíduos sólidos; sustentabilidade urbana.

ABSTRACT

The intensive use of fossil resources has drastically increased waste production, especially in urban areas. Therefore, it is crucial to identify appropriate sites for urban solid waste disposal using advanced technologies such as geoprocessing and Geographic Information Systems (GIS). This study conducted a systematic review of academic research in developing countries, aiming to gather, synthesize, and evaluate geoprocessing techniques combined with statistical methods to identify suitable areas for landfill installation. The collected evidence was validated based on a central research question, providing a clear understanding of the current state of knowledge in the field. This approach highlights the importance of geotechnologies in the effective management of urban solid waste, promoting environmental sustainability and improving the quality of life in affected communities. One hundred and one works were analyzed, of which 49 met the methodological criteria and 28 responded to the proposed question. The most applied method was the Analytic Hierarchy Process (AHP), often associated with ArcGIS and QGIS software. The results demonstrate the broad applicability of these technologies in developing countries. It is concluded that the integration of geotechnologies within geoprocessing environments is strategic for urban solid waste management, supporting sustainable decision-making and contributing to improved quality of life.

KEYWORDS: environmental management; StArt; solid waste; urban sustainability.

RESUMEN

El uso intensivo de recursos fósiles ha incrementado drásticamente la producción de residuos, especialmente en zonas urbanas. Por lo tanto, es crucial identificar

sitios apropiados para la disposición de residuos sólidos urbanos, utilizando tecnologías avanzadas como el geoprocesamiento y los Sistemas de Información Geográfica. Este estudio realizó una revisión sistemática de investigaciones en países en desarrollo para recopilar y evaluar técnicas de geoprocesamiento y métodos estadísticos aplicados a la selección de áreas para rellenos sanitarios. La validación se basó en una pregunta central, permitiendo comprender el estado del conocimiento en el área. Se destaca la relevancia de las geotecnologías en la gestión de residuos, promoviendo sostenibilidad y bienestar social. Se analizaron 102 trabajos, de los cuales 49 cumplieron con los criterios metodológicos y 28 respondieron a la pregunta propuesta. El método más aplicado fue el *Analytic Hierarchy Process* (AHP), junto a softwares como ArcGIS y QGIS. Los resultados confirman su aplicabilidad en países en desarrollo. Concluye que integrar geotecnologías al análisis espacial es clave para una gestión eficiente y sostenible de residuos urbanos.

PALABRAS CLAVE: gestión ambiental; StArt; residuos sólidos; sostenibilidad. urbana.

1 Introdução

A sociedade contemporânea vive uma complexa e desequilibrada interação entre a atividade humana e o ambiente natural, gerando fenômenos globais que afetam profundamente o planeta (Rockström *et al.*, 2009). Esse impacto é evidenciado pelo consumo excessivo de recursos naturais, muitos dos quais são finitos e de fontes não renováveis (Barcelos *et al.*, 2021; Baierle *et al.*, 2016).

Os autores Clark (2007) e Sabartés (2009) destacam que a mecanização da indústria e o uso generalizado de recursos fósseis aceleraram os processos de produção, consolidando uma cultura de consumo baseada em produtos de vida curta e rápida substituição.

Como consequência, Bilgilioglu *et al.* (2022) ressaltam que o aumento na produção desses bens resultou no acúmulo de uma quantidade significativa de resíduos não recicláveis, formando grandes depósitos. Esses lixões são frequentemente encontrados em locais inadequados, onde os resíduos são

descartados de forma irregular, em desacordo com as regulamentações ambientais. Neves e Almeida (2022) e Bilgilioglu *et al.*, (2022) apontam que o manejo deficiente desses materiais gera graves problemas socioambientais, incluindo odores desagradáveis, atração de animais e insetos, contaminação do solo por líquidos percolados e poluição de fontes de água.

A urbanização acelerada, impulsionada pelo consumo de bens não duráveis, tem levado a um aumento significativo na geração de resíduos sólidos. Diante disso, a identificação de locais ambientalmente adequados para seu descarte tornou-se uma prioridade global (Bilgilioglu *et al.*, 2022; Lopes, 2022; Asori *et al.*, 2022).

Para enfrentar esses desafios, a combinação de tecnologias como o Sensoriamento Remoto (SR) e o geoprocessamento tem se mostrado uma abordagem poderosa para a gestão de resíduos sólidos. O SR é definido como uma técnica de aquisição de informações sobre a superfície terrestre, sem contato físico direto, utilizando sensores a bordo de satélites, aeronaves ou drones. Essa técnica permite a coleta de dados, em larga escala, e em diferentes resoluções espaciais e temporais, sendo amplamente utilizada para monitoramento ambiental e mapeamento de recursos naturais (Souza, 2023; Aslam *et al.*, 2022).

Os recentes avanços tecnológicos (marcado pelo pós-segunda guerra mundial), aliados ao aumento do número de satélites disponíveis, têm impulsionado o desenvolvimento do Sensoriamento Remoto (SR), ampliando seu potencial de aplicação para localizar áreas mais adequadas à destinação de resíduos sólidos urbanos (Aslam *et al.*, 2022; Lopes, 2022; Neves; Almeida, 2022; Souza, 2023). Já o geoprocessamento refere-se ao conjunto de técnicas computacionais para coleta, armazenamento, análise e visualização de dados geográficos. Ele é fundamental para a análise de variáveis ambientais, socioeconômicas e técnicas (Neves; Almeida, 2022).

Essas técnicas são implementadas por meio de sistemas de Informação Geográfica (SIG), que permitem a integração de dados espaciais e atributos para a tomada de decisões. Diante da relevância ambiental do tema, esta revisão sistemática visa reunir, sintetizar e avaliar técnicas de geoprocessamento, associadas a métodos estatísticos, para identificar áreas aptas à instalação de aterros sanitários. A validação será orientada por uma pergunta de pesquisa central, permitindo compreender o estado da arte na área.

2 Material e Métodos

Para delinear o estado da arte, foram selecionados estudos com técnicas semelhantes de geoprocessamento, guiados por uma pergunta central de pesquisa: “Quais métodos de sensoriamento remoto são utilizados para identificar áreas aptas para implementação de aterros sanitários?”

No processo de investigação, foram definidos três elementos principais: palavras-chave, período de busca e bases de dados analisadas. As plataformas utilizadas para essa finalidade foram: *SciELO*, *Scopus*, *CAFe CAPES*, *Google Scholar* e *IBICT* (Tabela 1).

TABELA 1 – Critérios de busca dos periódicos acadêmicos.

Seleção de Estudos			
Repositório	Quantidade de artigos	Período de escolha	Palavra de busca
<i>SciELO.org</i>	1	-----	Remote Sensing Landfill
<i>Scopus</i>	67	> 2022	Remote AND sensing AND landfill
<i>CAFe capes</i>	6	> 2022	Remote Sensing Landfill place
<i>Google Scholar</i>	13	> 2022	“Sensoriamento Remoto” AND “Aterro Sanitário”
	7	> 2022	“Teledetección” AND “Relleno Sanitario”
<i>IBICT</i>	8	-----	Sensoriamento Remoto Aterro Sanitário Área
Total	102	-----	-----

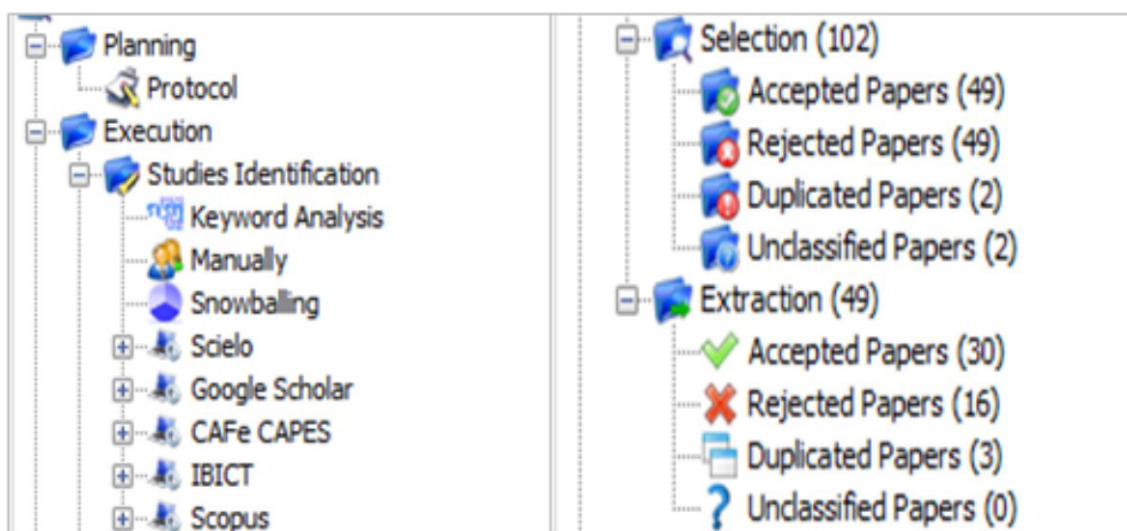
Fonte: elaborados pelos autores (2023).

Diante do alto volume de publicações, priorizaram-se estudos a partir de 2022, refletindo os avanços recentes do sensoriamento remoto e do geoprocessamento. Estudos mais recentes tendem a refletir os avanços mais significativos na área. No entanto, como os repositórios *SciELO* e *IBICT* não apresentaram artigos publicados após 2022. Assim, foi necessário flexibilizar o critério temporal, a fim de garantir uma análise abrangente do desenvolvimento e aprimoramento contínuo das metodologias.

Para garantir uniformidade, utilizaram-se palavras-chave em inglês, português e espanhol. As palavras-chave empregadas foram: *Sensoriamento Remoto*, *Aterro Sanitário e Área*, intercaladas entre os idiomas (Tabela 1). Nessa etapa de levantamento, foram realizados downloads de todos os trabalhos identificados, totalizando 102 documentos, incluindo artigos, livros, monografias, dissertações e teses (Tabela 1).

Para a organização e análise dos estudos, foi utilizado o *software livre State of the Art through Systematic Review (StArt)*, versão 2.3, desenvolvido pela Universidade Federal de São Carlos (UFSCar). Essa ferramenta possibilitou a sumarização dos estudos, a aplicação de critérios de inclusão e exclusão, a utilização de métodos estatísticos e a análise de artigos pagos (Figura 1).

FIGURA 1 – Planejamento e execução do estudo, utilizando a Ferramenta StArt 2.3.

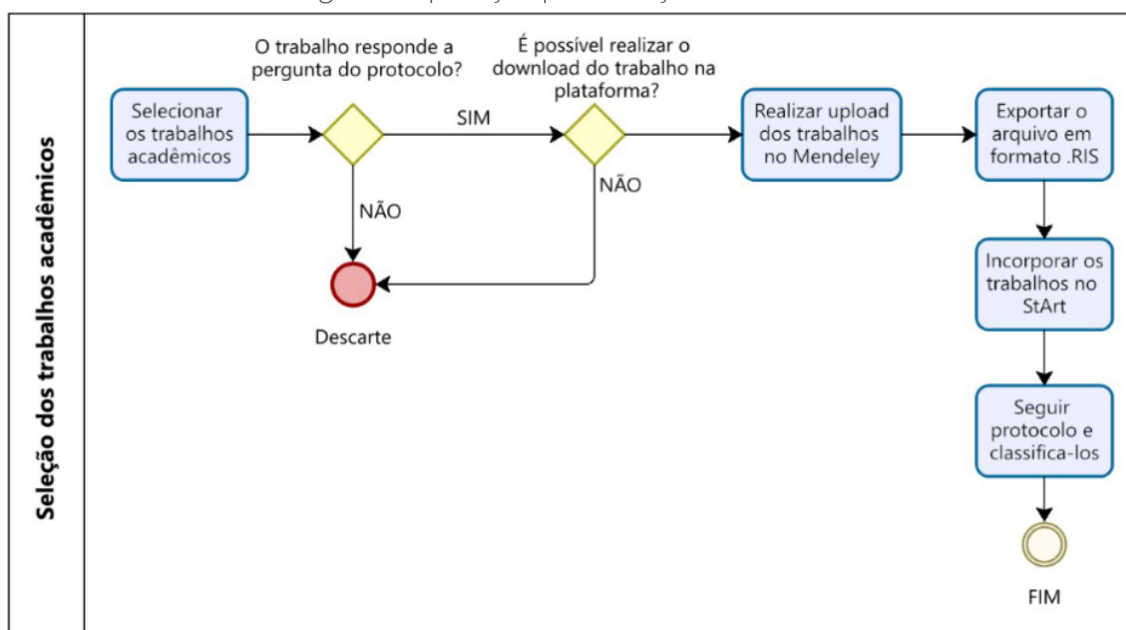


Fonte: elaborados pelos autores (2023).

A categorização dos periódicos no StArt 2.3 requer a inclusão do título, resumo e autoria dos artigos. Para essa etapa, é essencial o uso do *Mendeley Reference Manager*, um *software* que permite armazenar os artigos selecionados e exportá-los posteriormente no formato .ris, facilitando sua importação para o StArt e a elaboração dos resumos.

A Figura 2 ilustra o fluxo do processo adotado: (1) os 102 trabalhos selecionados foram exportados, em PDF, para o *Mendeley*; (2) no *software*, os arquivos foram organizados e convertidos para o formato *Research Information Systems* (.RIS), utilizado para citação bibliográfica; e (3) por fim, a base de dados foi incorporada ao StArt, permitindo a classificação e sumarização dos artigos analisados.

FIGURA 2 – Fluxograma: aplicação para seleção dos trabalhos acadêmicos



Fonte: elaborados pelos autores (2023).

Após a triagem inicial, os estudos selecionados foram submetidos a um conjunto de critérios para garantir a qualidade e a relevância das informações analisadas. Essa etapa teve como objetivo selecionar pesquisas metodologicamente aderentes e alinhadas ao escopo do estudo.

Foram considerados aspectos como a pertinência temática, a aplicação de técnicas de geoprocessamento e a disponibilidade de dados utilizados na análise. A Tabela 2 apresenta um resumo dos critérios aplicados na aceitação dos artigos selecionados.

TABELA 2 – Critérios de aceitação dos artigos selecionados.

Relevância Temática	Estudos que abordem explicitamente técnicas de sensoriamento remoto associadas à identificação de áreas aptas para instalação de aterros sanitários.
Métodos de Geoprocessamento	Pesquisas que utilizem SIG e operações estatísticas de análise espacial e comprovadamente aplicáveis ao tema.
Disponibilidade de Dados	Trabalhos que apresentem métodos de aquisição dos dados e descrevam processos de tratamento, validação ou integração dessas informações ao contexto de resíduos sólidos.

Fonte: elaborados pelos autores (2023).

Foi realizada uma categorização inicial dos artigos, classificando sua prioridade de leitura e determinando a necessidade de uma análise completa. Esse processo considerou a relevância do estudo, a originalidade metodológica e o impacto acadêmico da pesquisa, definida de acordo com quatro níveis: a) muito alta: artigos considerados fundamentais para o estudo, que abordam metodologias inovadoras, apresentam grande número de citações e ampla aplicabilidade no tema de sensoriamento remoto e geoprocessamento para aterros sanitários; b) alta: estudos relevantes, mas que podem apresentar limitações metodológicas ou menor impacto na área; c) baixa: pesquisas que abordam o tema de forma tangencial, com metodologias pouco aprofundadas e; d) muito baixa: artigos que possuem relação distante ao foco da pesquisa ou que apresentam fragilidades metodológicas significativas.

Os documentos classificados nas categorias “muito alta” ou “alta” prioridade foram analisados integralmente, contemplando as metodologias empregadas, os resultados obtidos e as conclusões apresentadas. Já os

artigos categorizados como de “baixa” ou “muito baixa prioridade” foram consultados apenas quando necessário, ou seja, caso fornecessem informações complementares ao estudo.

Desta forma, após a priorização, foi classificado o status de aprovação dos estudos: a) aceito: atende aos critérios estabelecidos e realiza técnica de detecção de área para aterros sanitários; b) rejeitado: não atende aos critérios estabelecidos ou não executa identificação de áreas; c) duplicado: o software identifica estudos repetidos, seja por similaridade com trabalhos do mesmo autor, seja por publicações em diferentes repositórios; d) sem classificação: pesquisas cujo resumo não deixa explícito o propósito do estudo.

Essa última etapa de filtragem permitiu identificar os artigos que melhor representavam o estado da arte sobre o tema central. Os resultados obtidos refletem tanto a qualidade quanto a quantidade dos trabalhos revisados, destacando as técnicas utilizadas, a origem geográfica dos estudos, os autores e o ano de publicação.

3 Resultados e Discussão

A Tabela 3 apresenta o quantitativo de artigos por plataforma de busca, totalizando 102 trabalhos. Para garantir rigor metodológico, priorizou-se a seleção dos estudos mais relevantes ao escopo da pesquisa. Esses trabalhos passaram por um processo de sumarização e categorização, sendo organizados conforme a prioridade de leitura e seu alinhamento temático com os objetivos do estudo.

Desse total, 49 artigos atenderam aos critérios estabelecidos (Tabela 2) e continham a técnica de detecção de área para aterro sanitário, os quais foram status aceito (Tabela 4).

TABELA 3 – Sumarização dos trabalhos identificados nas plataformas de busca.

Fonte	Número de trabalhos (%)
SciELO	1 (1)
Google Scholar	20 (20)
CAFe CAPES	6 (6)
IBICT	8 (8)
SCOPUS	67 (65)
Total	102 (100)

Fonte: elaborados pelos autores (2023).

TABELA 4 – Prioridade de leitura e status de aprovação.

Prioridade de leitura	Frequência (%)
Muito alta	30 (29)
Alta	14 (14)
Baixa	32 (32)
Muito baixa	26 (25)
Status de aprovação	Número de trabalhos (%)
Aceito	49 (48)
Rejeitado	49 (48)
Duplicado	2 (2)
Sem classificação	2 (2)

Fonte: elaborados pelos autores (2023).

Após a seleção dos trabalhos, com base no status de prioridade de leitura e aprovação, realizou-se a extração dos documentos que responderam à pergunta central: *Quais métodos de Sensoriamento Remoto são utilizados para identificar áreas adequadas à implementação de aterros sanitários?*

Os 49 artigos com status de aprovação aceito (Tabela 4), foram analisados integralmente. Destes, 28 (57%) responderam ao questionamento proposto na pesquisa e cumpriram os critérios metodológicos estabelecidos (Tabela 2). Dezoito trabalhos (37%) foram rejeitados por não atenderem aos requisitos estabelecidos, e três (6%) apresentaram duplicações na base de dados.

A relação de cada artigo, com os respectivos *softwares* utilizados, locais de aplicação, autores, ano, finalidade e insumos utilizados pode ser observada na Tabela 5. As pesquisas compreenderam uma ampla diversidade geográfica, com estudos conduzidos em países como Gana, Nigéria, Síria, Turquia, Índia, Arábia Saudita, Filipinas, Peru, Irã, Marrocos, Paquistão, Iraque, Etiópia, Bangladesh, México e Brasil.

Destacou-se como aspecto comum entre esses estudos o foco em países em desenvolvimento ou integrantes do “Sul Global”, conceito que abrange nações marcadas por desigualdades estruturais e inserção periférica no sistema internacional. Nesse contexto, a gestão de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) emergiu como tema central, com ênfase no uso de técnicas avançadas para enfrentar desafios como o descarte irregular, prática recorrente nessas regiões devido a limitações infraestruturais e socioeconômicas.

A pesquisa sobre Sensoriamento Remoto (SR) e geoprocessamento para gestão de RSU revelou-se um campo vasto e dinâmico. A análise dos artigos selecionados evidenciou as principais técnicas aplicadas e os softwares mais utilizados na área.

TABELA 5 – Trabalhos selecionados com metodologias aderentes, aplicações e insumos utilizados.

Softwares, locais, autores e ano	Aplicação	Insumos utilizados
Software ArcMap 10.6, aplicado em: Ashanti Region Ghana (Asori et al., 2022).	Técnicas de Sistema de Informação Geográfica (SIG) e do Analytic Hierarchy Process (AHP).	Base de dados: hidrológico; físico-ambiental; sociocultural; clima; economia e tecnologia.
Software ArcMap 10.2, aplicado em: Edo, Nigeria (Owoseni, 2023).	AHP e Análise de Decisão Multicritério (MCDA), utilizando SIG.	Mapa digital do terreno, uso do solo, áreas construídas, zonas de buffer da rede viária, zonas de buffer da localização do aeroporto, geologia, meio de solo, zonas de buffer de lineamentos, zonas de buffer de água superficial e profundidade até o lençol freático, gerados.
Software ArcGIS, aplicado em: Tartous, Syria (Abdo et al., 2023).	Técnicas de SIG e AHP.	Inclinação, elevação, drenagens, permeabilidade, falhas, assentamentos, abastecimento de água, lagos, estradas, centros turísticos, centros arqueológicos, centros religiosos.

Apenas metodológico, aplicado em: Mersin, Turkey (Bilgilioglu <i>et al.</i> , 2022).	AHP e MCDA, utilizando SIG.	Topográfico; hidrológico e geomorfológico; infraestrutura e auxiliar.
Software ArcMap 10.5, aplicado em: Southeastern Anatolia Project, Turkey (Karabulut <i>et al.</i> , 2022).	AHP e método de Simple Additive Weighting (SAW).	Elevação e modelo digital de elevação; estradas; área protegida; irrigação; transporte; aquífero; geologia; drenagem.
Software ArcMap 10.2, aplicado em: Calangute/ Saligao, India (Kadu <i>et al.</i> , 2022).	Técnica AHP.	Topografia; geomorfologia; solo e geologia; uso e cobertura da terra; lenço freático; corpo d'água e transporte.
Apenas metodológico, aplicado em: Coimbatore District, India (Aishwarya; Shaik; Dodamani, 2022).	Técnicas de SIG e AHP.	Densidade populacional, inclinação, geologia, geomorfologia, uso e cobertura do solo, e proximidade de estradas, rios, ferrovias e aeroportos. Utilizou-se a sobreposição ponderada, uma ferramenta de análise espacial que reclassifica mapas raster.
Software ArcMap 10.7.1, aplicado em: Shik, India (Ahire <i>et al.</i> , 2022).	Técnica AHP para tomada de decisão (MCDA).	Geomorfologia, hidrogeologia, distância até a estrada, densidade de drenagem, densidade de lineamentos, inclinação, distância até corpos d'água, densidade populacional.
Software ArcMap 10.7, aplicado em: Najran City, Saudi Arabia (Elkhrachy; Alhamami; Alyami, 2023).	Técnicas do AHP e conjuntos fuzzy.	Densidade de drenagem, profundidade do lençol freático, uso do solo, tipo de solo, rede viária, elevação da superfície, inclinação da superfície, distância de áreas residenciais e distância de áreas protegidas foram selecionados, visto que estudos mais similares haviam utilizado e recomendado esses fatores.
Software ArcMap 10.7, aplicado em: Najran City, Saudi Arabia (Elkhrachy, 2022).	Técnica AHP para MCDA.	Camadas temáticas usadas, distância até o aeroporto, uso/ cobertura do solo, inclinação da superfície, densidade de drenagem, distância das estradas e dados do solo.
Softwares ENVI 5.5 software. ArcGIS 8.8 software, aplicado em: Abha-Khamis, Saudi Arabia (Arshad <i>et al.</i> , 2023).	Técnica AHP para MCDA.	Redes viárias, inclinações, vegetação, tipo de solo e litologia, vilas, áreas urbanas, uso do solo, padrões de drenagem, bacias hidrográficas no SIG.
Softwares ArcGIS e Geomatica, aplicado em: Butuan City, Philippines (Macalam; Arreza, 2023).	Técnica AHP para MCDA.	Econômico; ambiental; físico.
Software ArcGIS 10.5 e QGIS 3.10 aplicado em: Chachapoyas e Huancas, Peru (Lopes, 2022).	Técnica AHP para MCDA.	Físico; ambiental; socioeconômico.
Software ArcGIS 10.3, aplicado em: Provincia Azángaro, Perú (Añasco Quispe; Sánchez Vásquez, 2022).	Procedimento MCDA e AHP integrando-o a um SIG.	Localização; topografia; hidrologia; área natural protegida; falhas geológicas; centros povoados.

<i>Software</i> ArcGIS 10.5 e QGIS 3.26.17, aplicado em: Puno, Peru (Chuctaya, 2023).	Análise Espacial Multicritério (AEMC), bem como o processo de AHP, sendo aplicado em um Sistema de Informação Geográfica (GIS).	Centros populados, inclinação, rios, falhas geológicas, lagos, rede viária, cobertura vegetal e geologia.
Apenas metodológico, aplicado em: Kermanshah, Iran (Karimi <i>et al.</i> , 2022).	Técnica AHP.	Distância de vilas, distância de áreas urbanas, distância de rios, distância de aquíferos, distância de poços, distância de falhas, distância de estradas, distância de habitats, inclinação, textura do solo, abaixo do nível do lençol freático, geologia e distância de geração.
<i>Software</i> PCI Geomatica 2016 software e ArcGIS 10.5, aplicado em: Ouarzazate, Marocco (Abdelouhed <i>et al.</i> , 2022).	Técnica AHP por MCDA.	Elevação e declividade; geologia; qualidade do solo e pedologia; hidrologia; fator social e econômico; estrada.
<i>Software</i> ArcMap, aplicado em: Faisalabad, Pakistan (Aslam <i>et al.</i> , 2022).	Técnica AHP por MCDA.	Área; NDVI; NDWI; NDBI; população; estradas; curso d'água.
<i>Software</i> ArcGIS 10.8, aplicado em: Kirkuk, Iraq (Mitab; Hamdoon; Sayl, 2023).	SIG e AHP.	Distâncias; engenharias; meio ambiente; socioeconômico.
<i>Software</i> ERDAS Imagine 2015; Arc-GIS 10.5; MS Office 2015; Garmin, aplicado em: Bonga Town, Ethiopia (Debalke; Endalew Admas, 2021).	SIG e AHP.	Usado para combinar uso do solo, cobertura do solo, inclinação, elevação, distância de estradas principais, distância do rio, distância da área protegida, características geológicas, tipo de solo, falha, distância de áreas residenciais/construídas principais e pontos de poços como fatores para a localização de aterros sanitários.
<i>Software</i> ArcMap 10.6.1, aplicado em: Rangpur, Bangladesh (Guha <i>et al.</i> , 2023).	AHP por MCDA.	Modelo digital de Elevação; Image Satellite; Shapefile malha rodoviária e curso d'água.
<i>Software</i> ILWIS, aplicado em: Cuitzeo, México (Delgado; Mendoza; Granados, 2005).	Lógica booleana.	Profundidade do manto freático; zona de recarga; zona de fratura; solo; matéria de permeabilização; corpo d'água; centro populacional e via de acesso; drenagem; topografia; preservação; intermunicipalidade.
<i>Software</i> QGIS, aplicado em: Belém, Pará, Brasil (Aguar, 2022).	AHP utilizado para determinar os pesos relativos dos critérios.	Distância de núcleos populacionais, distância de recursos hídricos, distância de rodovias, tipos de solo, uso e ocupação do solo, declividade.
<i>Software</i> QGIS 3.10.12, aplicado em: Região Geoadministrativa de Pombal, Paraíba, Brasil (Medeiros <i>et al.</i> , 2022).	AHP utilizado para determinar os pesos relativos dos critérios.	Proximidade a curso d'água; sistema de aquíferos; declividade; uso do solo; solo; falha geológica; caracterização do climatológica; critério econômico; distância de vias; critério social; proximidade a núcleo residencial urbano.

Software QGIS 3.16.11, aplicado em: Santo Estêvão, Bahia, Brasil (Souza; Osorto; De Souza, 2022).	ABNT/NBR 13896:1997	Uso e ocupação do solo; pedologia; declividade; hidrografia; corpo d'água área urbana; solo exposto.
Software QGIS 3.4 e 3.10, aplicado em: Uberlândia, Minas Gerais, Brasil (Lopes, 2022).	ABNT/NBR 13896:1997 Lógica booleana	Topografia; geologia; tipos de solos existentes; recursos hídricos; vegetação; acessos; tamanho disponível; vida útil custos; distância mínima de núcleos; áreas sujeitas à inundação; populacionais.
Software QGIS 3.14, aplicado em: Consórcio triângulo Mineiro, Minas Gerais, Brasil (Souza, 2023).	A lógica booleana.	Shapefile dos limites territoriais, Shapefile de corpos d'água, drenagem, unidades de conservação, sistema de transportes, núcleos populacionais e segurança aeroportuária, modelo digital de elevação, topografia, recursos hídricos, acessos, tamanho disponível e vida útil, distância mínima a núcleos populacionais, segurança aeroportuária.
Região metropolitana, Recife, Brasil (Azevedo, 2021).	A lógica booleana. ABNT/NBR 13896:1997	Declividade; recursos hídricos; estradas e rodovias; perímetro urbano; unidade de conservação; pedologia e solos; geologia e litologia; uso do solo; área de segurança aeroportuária; regiões geradoras; profundidade do lençol freático; área disponível e vida útil; gasoduto.

Fonte: elaborados pelos autores (2023).

A Tabela 5 evidencia como as adaptações variam conforme a região em que são aplicadas, considerando fatores geográficos, tecnológicos e regulatórios. No entanto, é evidente que, nos 16 países listados, há similaridades, como o uso de *softwares* SIG e métodos estatísticos.

No que se refere aos programas utilizados, não há distinção significativa na qualidade gráfica dos mapas gerados, independentemente de sua complexidade operacional. Tanto ferramentas livres quanto pagas são amplamente empregadas no campo do geoprocessamento, sendo que a principal diferença entre elas está na interface, no suporte técnico disponível e na necessidade de habilidades específicas para operar cada tipo de ferramenta (Tabela 6).

TABELA 6 – *Software* de Sistema de Informação Geográfica (SIG) identificados nos estudos aceitos.

Software	Utilização
ArcMap e ArcGIS	19
QGIS	7
ILWIS	1
Não informado	3

Fonte: elaborados pelos autores (2023).

De todo modo, percebe-se que os softwares pagos, como ArcMap e ArcGIS, são os mais utilizados. Por outro lado, IDRISI e ERDAS, embora citados na literatura, tiveram baixa representatividade nos estudos analisados. Essa menor adoção pode estar relacionada à comunidade de usuários mais restrita, o que dificulta a aprendizagem e a resolução de problemas, especialmente em contextos com suporte técnico e recursos de treinamento limitados.

Além disso, esses programas podem exigir o uso de outras ferramentas complementares para atingir os mesmos objetivos, aumentando a complexidade do processo. Em contrapartida, ArcGIS e QGIS, por serem mais populares, acessíveis e abrangentes, acabam sendo preferidos por pesquisadores e profissionais.

Há uma distinção entre softwares livres e pagos, principalmente no que se refere à curva de aprendizado e à complexidade de uso. Estudos como os de Souza (2023) e Neves e Almeida (2022) indicam que o QGIS, por exemplo, pode apresentar uma curva de aprendizado mais acentuada que programas proprietários, devido à necessidade de maior familiaridade com seus algoritmos e processos de análise. Isso torna essencial a adoção de metodologias bem definidas para garantir sua aplicação eficaz.

No que diz respeito aos métodos estatísticos, a abordagem predominante é o Processo Analítico Hierárquico (AHP - no original, *Analytical Hierarchical Process*), amplamente utilizado para a tomada de decisões com base em

critérios previamente estabelecidos. Entre os exemplos citados na Tabela 5, destacam-se os trabalhos de Asori *et al.* (2022), Owoseni (2023), Abdo *et al.* (2023), Bilgilioglu *et al.* (2022), Karabulut *et al.* (2022), Kadu *et al.* (2022) e Aishwarya; Shaik; Dodamani (2022), que adotaram o AHP como principal ferramenta de análise multicritério. Em alguns casos, a lógica *Fuzzy* foi empregada como complemento ao AHP, como observado em Elkhachy; Alhamani; Alyami (2023), conferindo maior flexibilidade à ponderação dos critérios.

A técnica Booleana foi aplicada com menor frequência, aparecendo em apenas três artigos identificados na Tabela 5 (Lopes, 2022; Azevedo, 2021; Delgado; Mendoza; Granados, 2005; Souza, 2023), por meio de operações lógicas (AND, OR, NOT) para delimitar áreas favoráveis ou não à instalação de aterros sanitários.

As técnicas de interpolação desempenham papel fundamental no tratamento de dados provenientes do sensoriamento remoto. O AHP se destaca por estruturar a tomada de decisões considerando múltiplos critérios e alternativas. Segundo Saaty (2004, p.1, tradução nossa), trata-se de um método que "envolve critérios e alternativas para escolher. Geralmente, os critérios têm diferentes graus de importância e, por sua vez, as alternativas diferem em nossa preferência por elas em cada critério" (Saaty, 2004, p.1, tradução nossa).

O segundo método mais empregado foi a lógica *Fuzzy*, que permite atribuir valores graduais às variáveis analisadas, evitando a rigidez dos sistemas binários tradicionais. Conforme Gomide e Gudwin (1994, p. 97), "na lógica *fuzzy*, o valor verdade de uma proposição pode ser um subconjunto *fuzzy* de qualquer conjunto parcialmente ordenado, ao contrário dos sistemas lógicos binários, onde o valor verdade só pode assumir dois valores: verdadeiro (1) ou falso (0)".

Já a técnica Booleana, menos citada nos estudos revisados, baseia-se em operações lógicas simples para determinar áreas favoráveis ou não à

destinação de resíduos sólidos. Amaral e Lana (2017, p. 368) explicam que esse método "emprega as operações lógicas AND (interseção), OR (união), NOT (negação) e XOR (exclusão), gerando resultados binários: '0' (não favorável) e '1' (favorável), sem possibilidade de um valor intermediário". Essa abordagem é particularmente útil quando todos os critérios avaliados possuem o mesmo peso na decisão final, sendo coerente em cenários onde há diretrizes bem estabelecidas por legislações específicas.

No Brasil, há normativas que orientam a classificação e definição de critérios mínimos para a escolha de locais ambientalmente adequados para a destinação de resíduos sólidos urbanos. A norma brasileira intitulada "Aterros de resíduos não perigosos: critérios para projeto, implantação e operação" (ABNT/NBR 13896, 1997) estabelece as diretrizes essenciais para garantir a segurança ambiental e sanitária dessas áreas. Segundo a norma:

"Condições mínimas exigíveis para projeto, implantação e operação de aterros de resíduos não perigosos, de forma a proteger adequadamente as coleções hídricas superficiais e subterrâneas próximas, bem como os operadores destas instalações e populações vizinhas" (ABNT/NBR 13896, 1997, p.1).

Em síntese, a aplicação de ferramentas de sensoriamento remoto e geoprocessamento, alinhada às diretrizes da ABNT/NBR 13896 (1997), fortalece as práticas de seleção de locais para aterros sanitários ao integrar critérios ambientais, sociais e econômicos. Essa abordagem otimiza a análise de múltiplas variáveis, incluindo recursos hídricos, geologia e uso do solo, além de viabilizar a adoção de métodos estatísticos como o AHP, a lógica *Fuzzy* e a lógica Booleana, esta última especialmente eficaz quando as normas estabelecem critérios binários bem definidos. Assim, o cumprimento dos requisitos mínimos de segurança ambiental e sanitária torna-se mais eficaz, assegurando a proteção dos recursos hídricos, a saúde das comunidades adjacentes e a viabilidade sustentável dos projetos de disposição de resíduos sólidos.

4 Conclusão

Seguindo o delineamento metodológico, este trabalho concentrou-se na pergunta-chave: quais métodos de sensoriamento remoto são empregados na identificação de áreas apropriadas para a instalação de aterros sanitários? Para responder a essa questão, foram selecionados estudos relevantes mediante mecanismos de busca em diferentes bases de dados, os quais passaram por um processo rigoroso de classificação na ferramenta StArt. Esse procedimento garantiu a transparência e a sistematização da revisão dos artigos, possibilitando uma análise estruturada das metodologias adotadas pelos pesquisadores.

Os resultados obtidos por meio dessa triagem evidenciam a diversidade de abordagens metodológicas, bem como as variações geográficas no uso de técnicas de sensoriamento remoto para aterros sanitários. Tais diferenças decorrem das especificidades ambientais, sociais e regulatórias de cada região, o que reforça a necessidade de adaptação dos parâmetros em função do contexto local. Além disso, a constante evolução das ferramentas tecnológicas tem aprimorado a precisão e a aplicabilidade dos produtos gerados, beneficiando tanto a pesquisa científica quanto sua implementação em campo.

De forma geral, a gestão de resíduos sólidos em países em desenvolvimento continua sendo um desafio significativo, evidenciando a importância do sensoriamento remoto como suporte à tomada de decisão na escolha de locais adequados para aterros sanitários. Ao proporcionar respostas ágeis e inovadoras, essa tecnologia contribui para mitigar impactos ambientais críticos, com efeitos diretos sobre a sustentabilidade e a qualidade de vida das populações afetadas.

Por fim, estudos que integram sensoriamento remoto, geoprocessamento e métodos estatísticos mostraram-se fundamentais para embasar decisões

estratégicas no contexto da gestão de resíduos. O contínuo aperfeiçoamento dessas técnicas reafirma a relevância de pesquisas futuras direcionadas ao aperfeiçoamento de metodologias e à padronização de critérios para a seleção sustentável de áreas destinadas a aterros sanitários. Assim, este trabalho atinge seu objetivo de elucidar como diferentes métodos de sensoriamento remoto e geoprocessamento são aplicados na determinação de locais propícios, contribuindo para avanços científicos e práticos na área.

Agradecimentos

Agradecemos ao Programa de Mestrado Profissional em Sustentabilidade e Tecnologia Ambiental (MPSTA) do Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia de Minas Gerais (IFMG) e ao apoio promovido pelo Grupo de Pesquisa em Ciências Ambientais registrado no CNPq.

Referências

ABDELOUAHED, F. *et al.* GIS and remote sensing coupled with analytical hierarchy process (AHP) for the selection of appropriate sites for landfills: a case study in the province of Ouarzazate, Morocco. **Journal of Engineering and Applied Science**, v. 69, n. 1, p. 19, 2022. Disponível em: <https://jeas.springeropen.com/articles/10.1186/s44147-021-00063-3>. Acesso em: 04 jul. 2025.

ABDO, H. G. *et al.* Sanitary municipal landfill site selection by integration of GIS and multi-criteria techniques for environmental sustainability in Safita area, Tartous governorate, Syria. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 30, p. 30834-30854, 2023.

AGUIAR, A. F. **Aptidão de áreas para implantação de aterro sanitário na Região Metropolitana de Belém (PA): análise de multicritérios**. 2022. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Agronomia) – Universidade Federal Rural da Amazônia, Campus Belém, 2022. Disponível em: <https://bdta.ufra.edu.br/jspui/handle/123456789/2615>. Acesso em: 04 jul. 2025.

AHIRE, V. *et al.* Potential landfill site suitability study for environmental sustainability using GIS-based multi-criteria techniques for nashik and environs. **Environmental Earth Sciences**, v. 81, n. 6, p. 178, 2022.

AISHWARYA, V.; SALMA, S.; DODAMANI, B. M. Identifying municipal solid waste dumping site location using AHP and GIS techniques: a case study of Coimbatore District, India. **Journal of the Indian Society of Remote Sensing**, v. 50, n. 12, p. 2337-2357, 2022.

AMARAL, D. G. P.; LANA, C. E. Uso de geoprocessamento para indicação de áreas favoráveis à construção de aterro sanitário no município de Ouro Preto (MG). **Caderno de Geografia**, v. 27, n. 49, 368 - 3382, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.5752/p.2318-2962.2017v27n49p368>. Acesso em: 04 jul. 2025.

AÑASCO QUISPE, R. P. SÁNCHEZ VÁSQUEZ, M. M. **Automatización de un modelo mediante análisis multicriterio como alternativa para identificar áreas óptimas de un relleno sanitario caso Provincia Azángaro, 2022**. Tesis (Ingeniería Ambiental) - Universidad César Vallejo, Perú, 2022. Disponível em: <https://hdl.handle.net/20.500.12692/111937>. Acesso em: 02 de nov. 2024.

ARSHAD, M. *et al.* Sustainable landfill sites selection using geospatial information and AHP-GDM approach: A case study of Abha-Khamis in Saudi Arabia. *Heliyon*, v. 9, n. 6, 2023. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405844023036393>. Acesso em: 04 jul. 2025.

ASLAM, B. *et al.* Identificação e classificação de aterros sanitários para gestão de resíduos sólidos municipais: Uma abordagem integrada de sensoriamento remoto e GIS. **Buildings**, v. 12, n. 5, p. 605, 2022.

ASORI, M. *et al.* Application of GIS-based multi-criteria decision making analysis (GIS-MCDA) in selecting locations most suitable for siting engineered landfills—the case of Ashanti Region, Ghana. **Management of Environmental Quality**, v. 33, n. 3, p. 800-826, 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13896**: Aterros de resíduos não perigosos: Critérios para projeto, implantação e operação. Rio de Janeiro: ABNT, 1997.

AZEVEDO, A. M. **Identificação de áreas restritas à implantação de aterros de resíduos sólidos na região metropolitana do Recife**. 2021. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Instituto Federal de Pernambuco, Campus Recife, Recife, 2021. Disponível em: <https://repositorio.ifpe.edu.br/xmlui/handle/123456789/278>. Acesso em: 02 nov. 2024.

BAIERLE, B. *et al.* Seleção de área adequada para a implantação de aterro sanitário no município de Marmeleiro-PR, através de técnicas de geoprocessamento. **Engenharia Ambiental**, v. 13, n. 2, p. 110-127, 2016.

BARCELOS, T. S. *et al.* A valoração ecossistêmica da área afetada pela barragem 1 da Vale AS-Brumadinho/MG: uma análise pautada na teoria da sociedade de risco e do decrescimento. **DRd-Desenvolvimento Regional em debate**, v. 11, p. 21-47, 2021. Disponível em: <https://www.periodicos.unc.br/index.php/drd/article/view/2876>. Acesso em: 07 jul. 2025.

BILGILIOGLU, S. S. *et al.* A GIS-based multi-criteria decision-making method for the selection of potential municipal solid waste disposal sites in Mersin, Turkey. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 29, n. 1, p. 1-17, 2022.

CHUCTAYA, J. E. H. **Aplicación del software QGIS para la ubicación óptima de un relleno sanitario en el distrito de Ayaviri-Puno. 2023**. Tesis (Bachiller en Ingeniería Ambiental) – Universidad Privada San Carlos, Puno, 2023. Disponível em: <http://repositorio.upsc.edu.pe/handle/UPSC/556>. Acesso em: 02 nov. 2024.

CLARK, G. Política Econômica e Estado. **Scientia Iuris**, v. 11, p. 73-84, 2007. Disponível em: <https://ojs.uel.br/revistas/uel/index.php/iuris/article/view/4148>. Acesso em: 07 jul. 2025.

DEBALKE, D. B.; ENDALEW ADMAS, T. Solid waste dumping site analysis using GIS and remote sensing: Bonga Town, Southwestern Ethiopia. **Waste Management & Research**, v. 40, n. 7, p. 953-968, 2021. Disponível em: <https://journals.sagepub.com/doi/10.1177/0734242X211060608>. Acesso em: 02 nov. 2024.

DELGADO, O. B.; MENDOZA, M.; GRANADOS, E. L. Análisis comparativo de tres modelos de soporte de decisiones espaciales en la selección de sitios para rellenos sanitarios en la cuenca del lago de Cuitzeo, México. **Investigaciones geográficas**, n. 57, p. 199, 2005. Disponível em: https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0188-46112005000200003. Acesso em 02 nov. 2024.

ELKHRACHY, I. Solid waste assessment and management using remote sensing data and GIS tools: A case study of Najran City, KSA. *In: IOP CONFERENCE SERIES: EARTH AND ENVIRONMENTAL SCIENCE*. 2022. IOP Publishing, p. 012041, 2022.

ELKHRACHY, I.; ALHAMAMI, A.; ALYAMI, S. H. Landfill site selection using multi-criteria decision analysis, remote sensing data, and geographic information system tools in Najran City, Saudi Arabia. **Remote Sensing**, v. 15, n. 15, p. 3754, 2023. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2072-4292/15/15/3754>. Acesso em: 07 jul. 2025.

GOMIDE, F. A. C.; GUDWIN, R. R. Modelagem, controle, sistemas e lógica fuzzy. **SBA controle & Automação**, v. 3, pág. 97-115, 1994.

GUHA, B. *et al.* Estimating solid waste generation and suitability analysis of landfill sites using regression, geospatial, and remote sensing techniques in Rangpur, Bangladesh. **Environmental Monitoring and Assessment**, v. 195, n. 54, p. 54, 2023. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1007/s10661-022-10695-4>. Acesso em: 07 jul. 2025.

KADU, S. B. *et al.* Geospatial Techniques for Suitable Site Determination for Municipal Solid Waste: A Case Study of Calangute/Saligao, Goa, India. 2022. **Journal of Environmental Informatics Letters**, v. 7, n. 2, 69-79, 2022. Disponível em: DOI 10.3808/jeil.202200093. Acesso em: 02 nov. 2024.

KARABULUT, A. *et al.* Landfill siting for municipal solid waste using remote sensing and geographic information system integrated analytic hierarchy process and simple additive weighting methods from the point of view of a fast-growing metropolitan area in GAP area of Turkey. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 29, n. 3, p. 4044-4061, 2022. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11356-021-15951-7>. Acesso em: 02 nov. 2024.

KARIMI, H. *et al.* Site selection and environmental risks assessment of medical solid waste landfill for the City of Kermanshah-Iran. **International Journal of Environmental Health Research**, v. 32, n. 1, p. 155-167, 2022. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/09603123.2020.1742876>. Acesso em: 02 nov. 2024.

LOPES, R. C. **Uso de sig na análise para implantação de aterro sanitário no município de Uberlândia – MG**. 2022. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Ambiental e Sanitária) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2022.

MACALAM, F. J. T.; ARREZA, K. Avaliação de adequação de aterro sanitário usando sistema de informação geográfica (GIS) e processo de hierarquia analítica (AHP) na cidade de Butuan, Filipinas. **Journal of Environmental & Earth Sciences**, v. 5, n. 01, 2023.

MITAB, B. T.; HAMDOON, R. M.; SAYL, K. N. Assessing potential landfill sites using GIS and remote sensing techniques: a case study in Kirkuk, Iraq. **International Journal of Design & Nature and Ecodynamics**, v. 18, n. 3, p. 643-652, 2023. Disponível em: <https://www.iieta.org/journals/ijdne/paper/10.18280/ijdne.180316>. Acesso em: 07 jul. 2025.

MEDEIROS, J. L. S. *et al.* Identificação de áreas favoráveis a implantação de aterros sanitários entre municípios do sertão no Estado da Paraíba, Brasil. **Revista AIDIS de ingeniería y ciencias ambientales: Investigación, desarrollo y práctica**, v. 15, n. 3, p. 1240–1266, 2022. DOI: 10.22201/

iingen.0718378xe.2022.15.3.81177. Disponível em: <https://revistas.unam.mx/index.php/aidis/article/view/81177>. Acesso em: 8 jul. 2025.

NEVES, S. J. R.; ALMEIDA, T. T. S. **Identificação da aptidão de áreas à instalação de aterro sanitário no município de Prainha-PA utilizando avaliação multicritério e geotecnologias**. 2022. Trabalho de Curso (Bacharelado em Engenharia Sanitária e Ambiental) – Faculdade de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal do Pará, Tucuruí, 2022. Disponível em: <https://bdm.ufpa.br/items/c85e4f92-b42d-4fe1-8bec-f924079f68cf>. Acesso em: 02 de nov. 2024.

OWOSEN, J. O. Landfill site suitability mapping for rational development planning: a GIS-based multi-criteria evaluation in Edo State, Nigeria. **GeoJournal**, v. 88, n. 5, p. 4603-4624, 2023. Disponível em: <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2023GeoJo..88.4603O/abstract>. Acesso em: 07 jul. 2025.

ROCKSTRÖM, J. *et al.* A safe operating space for humanity. **Nature**, v. 461, p. 472 - 475, 2009.

SAATY, T. L. Decision making – The analytic hierarchy and network processes (AHP/ANP). **Journal of Systems Science and Systems Engineering**, v. 13, p. 1-35, 2004. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11518-006-0151-5>. Acesso em: 07 jul. 2025.

SABARTÉS, M. P. Fabricants, comerciants i bankers: les estructures comercials de la indústria cotonera catalana en el mercat espanyol (1840-1936). **Butlletí de la Societat Catalana d'Estudis Històrics**, n. 18, p. 205-212, 2009.

SOUZA, K. H. G. **Uso da Análise Multicritério para Identificação das Zonas Compatíveis a Implantação de Aterro Sanitário em Consórcio Intermunicipal**. 2023. Dissertação (Mestrado em Meio Ambiente e Qualidade Ambiental) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia 2023. Disponível em: <http://doi.org/10.14393/ufu.di.2023.8057>. Acesso em: 10 nov. 2024.

SOUZA, M. P.; OSORTO, M. R. R.; DE SOUZA, N. M. Identificação de áreas aptas à instalação de aterros sanitários utilizando SIG no Município de Santo Estêvão-Bahia. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA, 10., 2022. **Anais [...]**. São Paulo: ABMS, 2022..