

Geoprocessamento para destinação de resíduos sólidos urbanos: uma análise multicritério no consórcio Cicanastra

Geoprocessing for municipal solid waste disposal: a multicriteria analysis in the CICANASTRA consortium

Gabriel Soares da SILVA^{1*}, Pedro Luiz Teixeira de CAMARGO¹, Felipe da Silva ALVES¹

Artigo recebido em
22 de fevereiro de 2025

Versão final aceita em
18 de junho de 2026

Publicado em
23 de setembro de 2026

1 Instituto Federal de
Educação, Ciência e
Tecnologia de Minas Gerais
(IFMG), Belo Horizonte, MG,
Brasil.

* E-mail de contato:
gssilva@hotmail.com.br

Resumo: A gestão de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) representa um dos principais desafios ambientais da atualidade, alinhando-se às metas dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), que visam reduzir os impactos ambientais até 2030. Esse problema se agrava em municípios de pequeno porte, onde a ausência de fontes naturais exploráveis – e, consequentemente, a falta de royalties – limita os investimentos em infraestrutura para a destinação adequada dos resíduos. A disposição irregular de RSU causa impactos que exigem intervenções e soluções sustentáveis. Nesse cenário, a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), instituída pela Lei Federal nº 12.305/2010, estabelece diretrizes para a erradicação de lixões e incentiva a implantação de aterros sanitários por meio da cooperação intermunicipal, otimizando recursos e ampliando a vida útil dessas estruturas. Para garantir a escolha de locais adequados à instalação de aterros, o geoprocessamento otimiza a seleção de aterros integrando múltiplos critérios espaciais. A metodologia utilizou Sistemas de Informação Geográfica e lógica booleana para o cruzamento de critérios técnicos via classificação binária (1 – Apto; 0 – Inapto), atendendo às normas ABNT NBR 10004:2004 e NBR 13896:1997. Como as diretrizes determinam restrições absolutas, abdicou-se de métodos de ponderação multicritério, como Lógica Fuzzy ou AHP. A flexibilização dessas abordagens violaria o caráter excludente da legislação tornando a lógica booleana a abordagem coerente com a normativa. Sob essa premissa, foram analisados fatores como proximidade de núcleos urbanos, restrições ambientais e uso do solo. Os resultados indicam que apenas 5% da área total do Consórcio Intermunicipal Cicanastra atende aos critérios estabelecidos, com destaque para os municípios de Medeiros e São Roque de Minas. Além de demonstrar a eficácia do geoprocessamento na gestão sustentável de resíduos, o estudo resultou no desenvolvimento de um modelo gráfico automatizado, exportado para Python e disponibilizado no GitHub, promovendo a democratização da metodologia e sua replicação em outros contextos.

Palavras-chave: geoprocessamento; resíduos sólidos urbanos; análise multicritério; lógica booleana; Sistemas de Informação Geográfica.

Abstract: The management of Municipal Solid Waste (MSW) represents one of today's foremost environmental challenges, aligning with the targets of the Sustainable Development Goals (SDGs), which aim to reduce environmental impacts by 2030. This problem is compounded in small municipalities, where the absence of exploitable natural resources – and, consequently, the lack of royalty revenue – limits investment in infrastructure for proper waste disposal. Irregular MSW disposal causes impacts that call for sustainable interventions and solutions. Within this context, Brazil's National Solid Waste Policy, established by Federal Law No. 12,305/2010, sets out guidelines for eliminating open dumps and encourages the implementation of sanitary landfills through intermunicipal cooperation, optimizing resources and extending the operational lifespan of these facilities. To ensure the selection of sites suitable for landfill installation, geoprocessing optimizes landfill site selection by integrating multiple spatial criteria. The methodology employed Geographic Information Systems (GIS) and Boolean logic to cross-reference technical criteria through binary

of Technical Standards (ABNT) standards NBR 10004:2004 and NBR 13896:1997. Because these guidelines establish absolute restrictions, multi-criteria weighting methods such as Fuzzy Logic or the Analytic Hierarchy Process (AHP) were not used. Applying these more flexible approaches would undermine the exclusionary nature of the legislation, making Boolean logic the approach most consistent with the regulatory framework. Under this premise, factors such as proximity to urban centers, environmental restrictions, and land use were analyzed. The results indicate that only 5% of the total area of the CICANASTRA Intermunicipal Consortium meets the established criteria, with the municipalities of Medeiros and São Roque de Minas standing out. In addition to demonstrating the effectiveness of geoprocessing in sustainable waste management, the study led to the development of an automated graphical model, exported to Python and made available on GitHub, promoting the democratization of the methodology and its replication in other contexts.

Keywords: geoprocessing; municipal solid waste; multicriteria analysis; boolean logic; Geographic Information Systems.

1. Introdução

A gestão de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) no Brasil tem avançado com o desenvolvimento de normativas que buscam estabelecer diretrizes para a destinação ambientalmente adequada desses materiais. Um marco importante nesse processo foi a publicação, em 2002, do documento elaborado pela Comissão de Estudo Especial Temporária de Resíduos Sólidos (ABNT/CEET-00:001.34), que classificou os resíduos sólidos conforme sua natureza, contribuindo para práticas mais seguras e sustentáveis de descarte (ABNT NBR 10004:2004). Apesar desse avanço normativo, a implementação de soluções efetivas para a destinação dos resíduos ainda enfrenta desafios significativos, especialmente nas etapas finais do processo (Blasius et al., 2023).

A destinação final dos resíduos sólidos é uma das fases mais críticas da gestão ambiental, pois envolve a disposição definitiva dos materiais classificados conforme a ABNT NBR 10004:2004. No entanto, a caracterização dos resíduos, embora essencial, não garante que sua disposição seja feita de maneira ambientalmente correta. Na prática, a realidade brasileira ainda é marcada pelo uso de lixões e aterros controlados, contrariando as diretrizes da Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), instituída pela Lei Federal nº 12.305/2010, que, em seu Art. 7º, incisos II e V, estabelece como metas a ordem de prioridade na gestão dos resíduos – não geração, redução, reutilização e reciclagem – e a erradicação e recuperação de lixões, priorizando a destinação em aterros sanitários devidamente licenciados.

Mesmo após mais de uma década da promulgação da PNRS, práticas inadequadas de disposição de resíduos ainda persistem, principalmente em municípios de pequeno porte. Essa dificuldade não se restringe apenas à carência de recursos financeiros e técnicos, mas abrange também a ausência ou a inadequação dos Planos Municipais de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos (PMGIRS), exigidos pela própria legislação como condição para acesso a recursos federais; a escassez de quadros técnicos especializados nas administrações municipais; e as dificuldades de articulação institucional necessárias à formação e manutenção de consórcios intermunicipais (Ministério do Meio

Ambiente [MMA], 2022). Somam-se a isso resistências políticas à cooperação regional e a ausência de metodologias acessíveis que auxiliem gestores públicos na seleção de locais tecnicamente adequados para a destinação final dos resíduos, tornando a implementação da PNRS um desafio que vai além do financeiro e exige soluções integradas de planejamento territorial.

Esse cenário reforça a necessidade de abordagens mais eficazes que minimizem as incertezas na escolha de locais adequados e promovam maior viabilidade econômica para a implementação de aterros sanitários.

Nesse contexto, o geoprocessamento se destaca como uma ferramenta essencial para o planejamento territorial da gestão de resíduos sólidos urbanos. Por meio do uso de Sistemas de Informação Geográfica (SIG), aliado à lógica booleana, é possível analisar múltiplos critérios ambientais e normativos simultaneamente, garantindo uma tomada de decisão mais precisa e alinhada às diretrizes legais (Blasius et al., 2023; Elkhachy et al., 2023). Essa abordagem permite a identificação de áreas aptas para aterros sanitários ao integrar bases cartográficas digitais, modelagem matemática e análise espacial.

O uso do geoprocessamento para a gestão de resíduos sólidos não é exclusivo do Brasil e tem sido aplicado em diversos contextos internacionais. Estudos recentes demonstram sua eficiência na seleção de áreas para disposição de resíduos em diferentes realidades socioambientais, como os trabalhos de Añasco Quispe & Sánchez Vásquez (2022) em Azángoro, Peru; Elkhachy et al., (2023) em Najran, Arábia Saudita; e Macalam et al. (2023) em Butuan, Filipinas. Entretanto, a aplicabilidade dessa metodologia deve ser ajustada às especificidades locais, uma vez que a escolha dos critérios de análise depende das particularidades ambientais, sociais e econômicas de cada região.

Nos municípios de pequeno porte sem arrecadação por *royalties*¹, a falta de infraestrutura e recursos técnicos representa um desafio adicional para a gestão dos resíduos sólidos. Assim, as aplicações de ferramentas de geoprocessamento tornam-se ainda mais relevantes, pois oferecem suporte à tomada de decisão de forma sistemática e replicável.

Esse cenário é exemplificado pelo Consórcio Intermunicipal da Serra da Canastra, Alto São Francisco e Médio Rio Grande (CICANASTRA), localizado na região centro-oeste de Minas Gerais, composto por oito municípios de pequeno porte: Medeiros, São Roque de Minas, Vargem Bonita, Piumhi, Dorasópolis, Capitólio, Pimenta e Córrego Fundo, com população total de 75.786 habitantes e área de 5.548 km² (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística [IBGE], 2024), inseridos nas bacias hidrográficas do Alto São Francisco e do Médio Rio Grande, onde a maioria dos municípios ainda recorre a lixões ou aterros controlados, em desconformidade com as diretrizes da PNRS.

1 Royalties são compensações financeiras pagas por empresas ou indivíduos que exploram recursos naturais, como minerais, petróleo ou gás, ao detentor dos direitos sobre esses recursos (Moraes, 2023)

Com base nessa necessidade, este estudo tem como objetivo identificar e classificar, por meio de análise espacial com SIG e lógica booleana, as áreas com maior aptidão para a instalação de um aterro sanitário intermunicipal no território do CICANASTRA, considerando critérios ambientais, normativos, topográficos e de uso do solo estabelecidos pela NBR 13896/1997 e demais legislações pertinentes, com disponibilização de modelo gráfico automatizado, exportado para Python e publicado no GitHub, visando a replicação da metodologia em outros contextos.

2. Metodologia

2.1. Caracterização do local do estudo

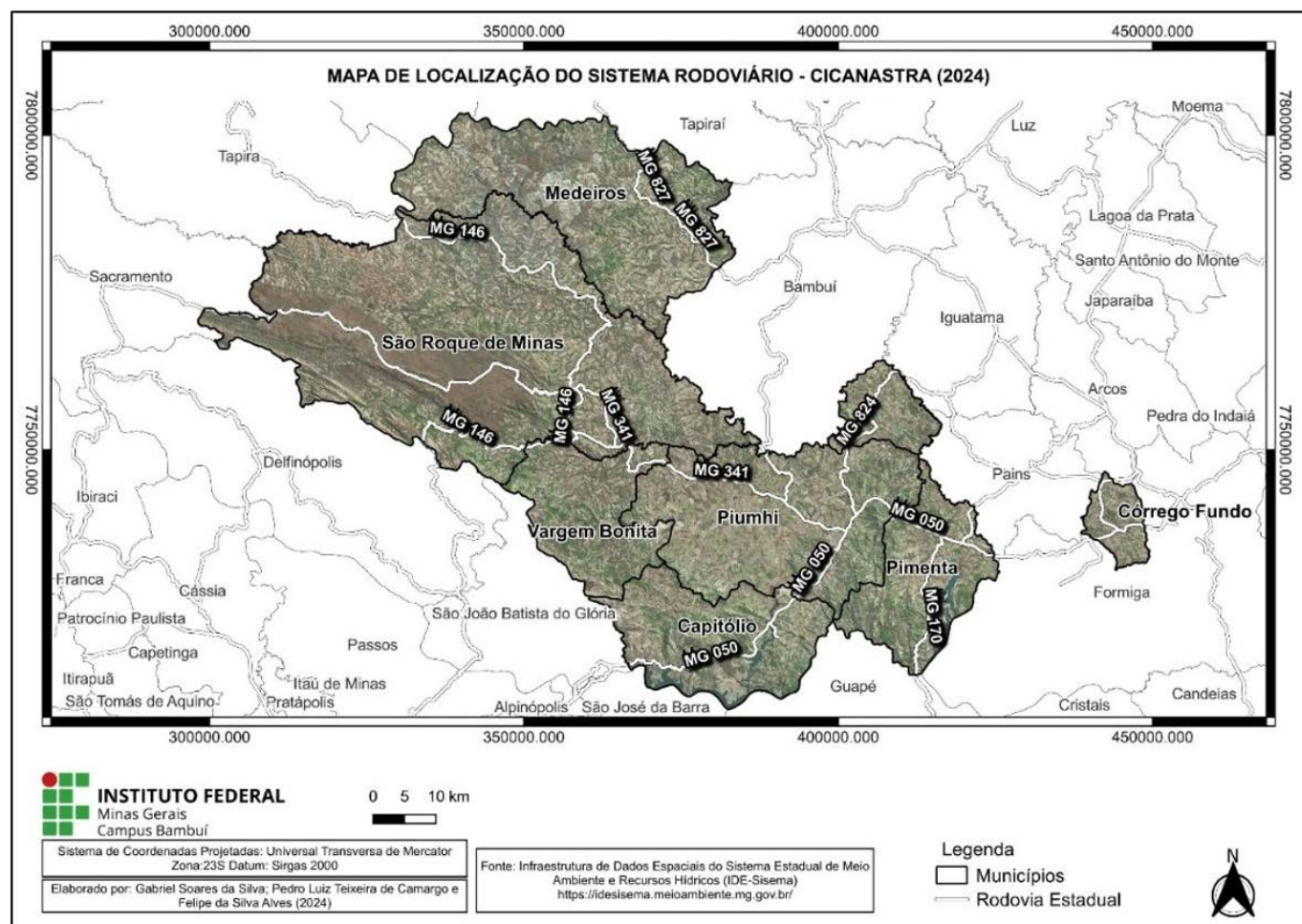
A área de estudo compreende o território do Consórcio Intermunicipal CICANASTRA, com 5.548,099 km², cujos limites geográficos e sistema rodoviário regional estão representados na Figura 1.

A escolha dessa região fundamenta-se em sua relevância ecológica e nos desafios ambientais que enfrenta, descritos a seguir.

O território abriga o bioma Cerrado, reconhecido como *hotspot* de biodiversidade, com fauna e flora ameaçadas de extinção (MMA, 2024). Parte da

Figura 1

Limite geográfico e sistema rodoviário do consórcio CICANASTRA.



área está inserida no Parque Nacional da Serra da Canastra (PNSC) e inclui a recentemente criada Área de Proteção Ambiental (APA) Serras e Águas de Piumhi, na divisa entre os municípios de Piumhi e Pimenta, reforçando a necessidade de diretrizes rigorosas para ocupação e uso do solo. A presença do Rio Grande, que abastece a Usina Hidrelétrica de Furnas (UHE Furnas), impõe restrições adicionais à localização de aterros sanitários, exigindo distanciamento mínimo de corpos d’água, conforme a NBR 13896/1997.

A economia regional é impulsionada pela agropecuária, com destaque para o Queijo Canastra, e pelo ecoturismo, fatores que contribuíram para um crescimento populacional de 17,5% entre 2000 e 2022 (IBGE, 2022). Apesar desse crescimento, os municípios consorciados não dispõem de arrecadação por *royalties*, o que limita investimentos em infraestrutura de saneamento. Esse cenário é evidenciado na Tabela 1, que demonstra que a maioria dos municípios ainda recorre a lixões ou aterros controlados, em desconformidade com a Lei 12.305/2010, gerando um volume aproximado de 34.425 toneladas de resíduos sólidos por ano.

2.2. Ferramentas e processamentos de dados

O geoprocessamento tem se consolidado como ferramenta essencial para a análise e modelagem espacial em diversas áreas da gestão territorial, do planejamento urbano ao monitoramento ambiental (Câmara & Ortiz, 1998), sendo sua aplicação na seleção de áreas para aterros sanitários amplamente documentada na literatura nacional e internacional (Blasius et al., 2023; Elkhachy et al., 2023).

Neste estudo, a análise espacial foi conduzida no ambiente QGIS, com dados organizados em dois formatos: vetorial, para elementos discretos como limites municipais, rodovias e infraestruturas; e *raster*, para dados contínuos como altitude e uso do solo (Quoos & Figueiró, 2023). A Figura 2 ilustra a distinção entre os dois modelos. Os dados foram estruturados em cinco grupos temáticos: núcleos populacionais, zoneamento ambiental, infraestrutura de transporte, dados topográficos e uso e ocupação do solo.

Tabela 1 Destinação dos RSU nos municípios do consórcio CICANASTRA (2021).

Município	Destinação dos RSU
Capitólio	Aterro controlado
Córrego Fundo	Aterro sanitário (pequeno porte)
Doresópolis	Aterro controlado
Medeiros	Lixão
Pimenta	Aterro controlado
Piumhi	Aterro controlado
São Roque de Minas	Aterro controlado
Vargem Bonita	Lixão

FONTE: Adaptado de Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS, 2021).

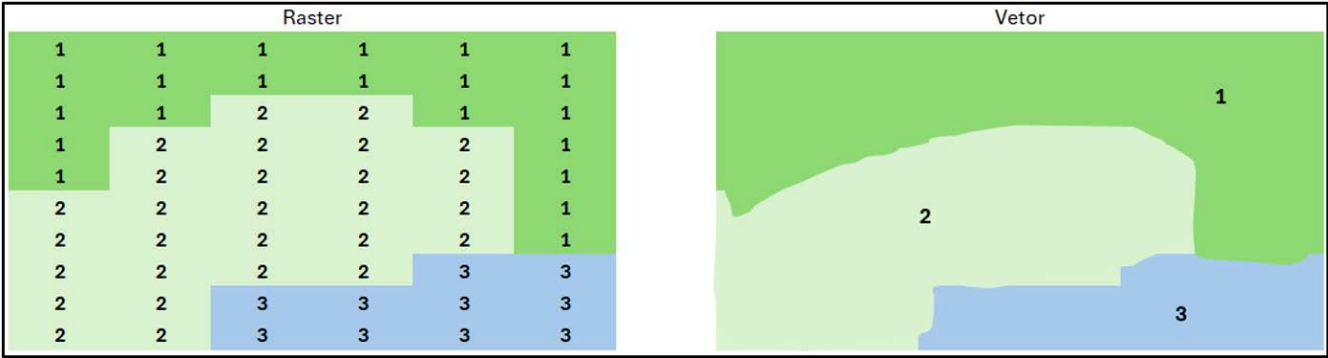


Figura 2
Comparação entre os modelos raster e vetorial.

Para a combinação dos critérios restritivos, adotou-se a lógica booleana, abordagem matemática baseada em operadores lógicos – AND, OR e NOT – que classifica cada área de forma binária: apta (1) ou inapta (0) (Ibrahim, 2021). Essa abordagem foi escolhida por ser a mais coerente com o caráter excludente das normas aplicáveis, em especial a NBR 13896/1997, cujas restrições são absolutas e não admitem compensação entre critérios, o que inviabiliza o uso de métodos de ponderação multicritério, como Lógica *Fuzzy* ou AHP. Todo o processamento foi automatizado por meio do modelador gráfico do QGIS, exportado para Python (PyQGIS) e disponibilizado no GitHub (GitHub, 2024).

2.3. Critérios de restrição e seleção de áreas

Os critérios de exclusão foram definidos com base nas normas ambientais e legislações federais vigentes, conforme a Tabela 2. Para cada critério foram gerados mapas temáticos que constituem os *inputs* cartográficos da análise espacial, apresentados a seguir.

A Figura 3 apresenta a distribuição dos núcleos populacionais cujas sedes municipais, vilas e aglomerados rurais definem o buffer de exclusão de 500 metros estabelecido pela NBR 13896/1997. A Figura 4 apresenta a hidrografia regional, com destaque para rios, córregos e a nascente do Rio São Francisco, determinando o afastamento mínimo de 200 metros da calha (Lei nº 12.651/2012).

Tabela 2 Critérios e restrições para seleção de áreas aptas.

Critério	Parâmetro Considerado	Referência
Núcleos Populacionais	≥ 500m de distância de áreas urbanas	NBR 13896/1997
Infraestrutura de Transportes	≥ 15m de rodovias estaduais e ≥ 20km de aeródromos	Lei nº 13.913/2019; Lei nº 12.725/2012
Zoneamento Ambiental	Exclusão de Áreas de Proteção Ambiental (APA) e Unidades de Conservação	Lei nº 9.985/2000
Declividade	Entre 1% e 30%	NBR 13896/1997
Uso e Ocupação do Solo	Exclusão de áreas agrícolas, mineração e vegetação nativa	MAPBIOMAS (2021)

Figura 3 Mapa dos núcleos populacionais, sede e aglomerados rurais.

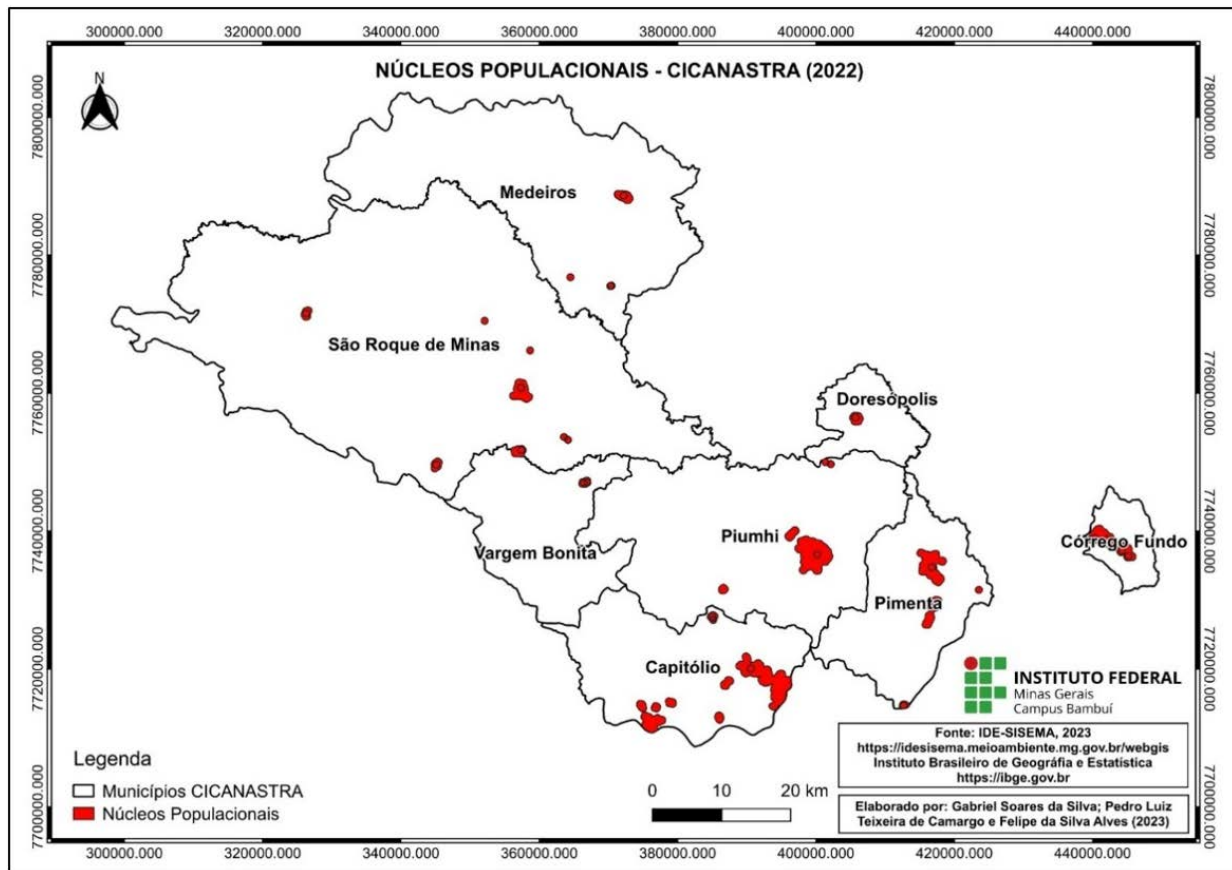
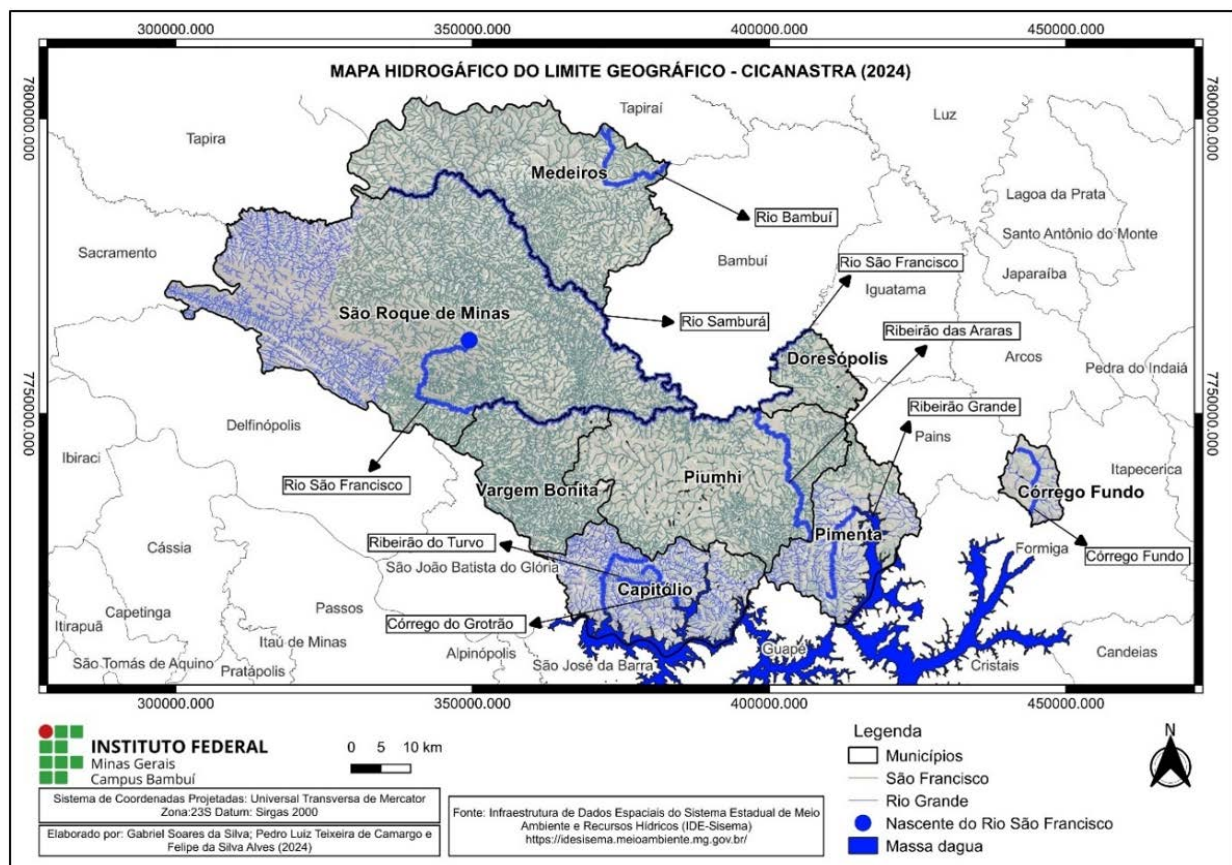


Figura 4 Mapa hidrográfico do limite geográfico do Consórcio CICANASTRA.



As Figuras 5, 6 e 7 apresentam, respectivamente, os mapas de infraestrutura de transportes, zoneamento ambiental e dados topográficos cujas restrições estão detalhadas na Tabela 2 supracitada.

A Figura 8 apresenta o mapa de uso e ocupação da terra, onde foram classificadas como inviáveis as áreas de floresta, savana, corpos d'água, mineração e zonas urbanas, enquanto pastagens e áreas não vegetadas apresentaram maior potencial para instalação do aterro (Silva et al., 2023).

2.4. Estimativa de densidade Kernel

Após a aplicação da lógica booleana, as áreas classificadas como aptas (valor 1) tiveram seus centroides extraídos, convertendo os polígonos resultantes em feições pontuais. Sobre esse conjunto de pontos, aplicou-se o algoritmo de Estimativa de Densidade Kernel (KDE), parametrizado com raio de busca de 2.000 metros e resolução de saída de 30 metros, gerando uma superfície contínua que expressa a intensidade de concentração espacial das áreas viáveis, ou seja, regiões com maior densidade de pontos aptos representam zonas de maior aptidão agregada para a instalação do aterro sanitário.

Os valores contínuos resultantes da superfície Kernel foram posteriormente classificados em cinco intervalos por meio do método de quebras naturais por quantil, traduzindo a intensidade de concentração em cinco categorias qualitativas de viabilidade: Inviável, Inadequado, Aceitável, Adequado

Figura 5
Mapa da infraestrutura de transportes.

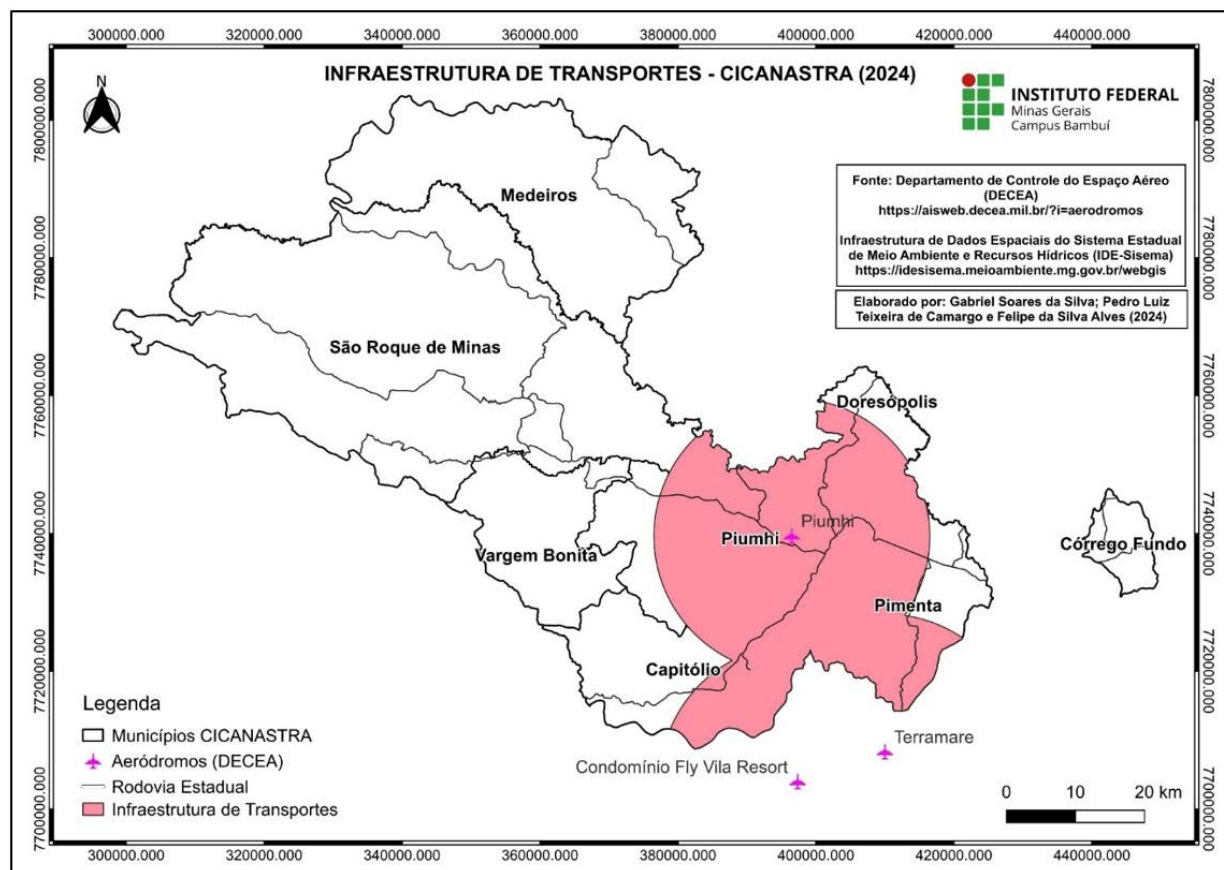


Figura 6 Mapa do zoneamento ambiental.

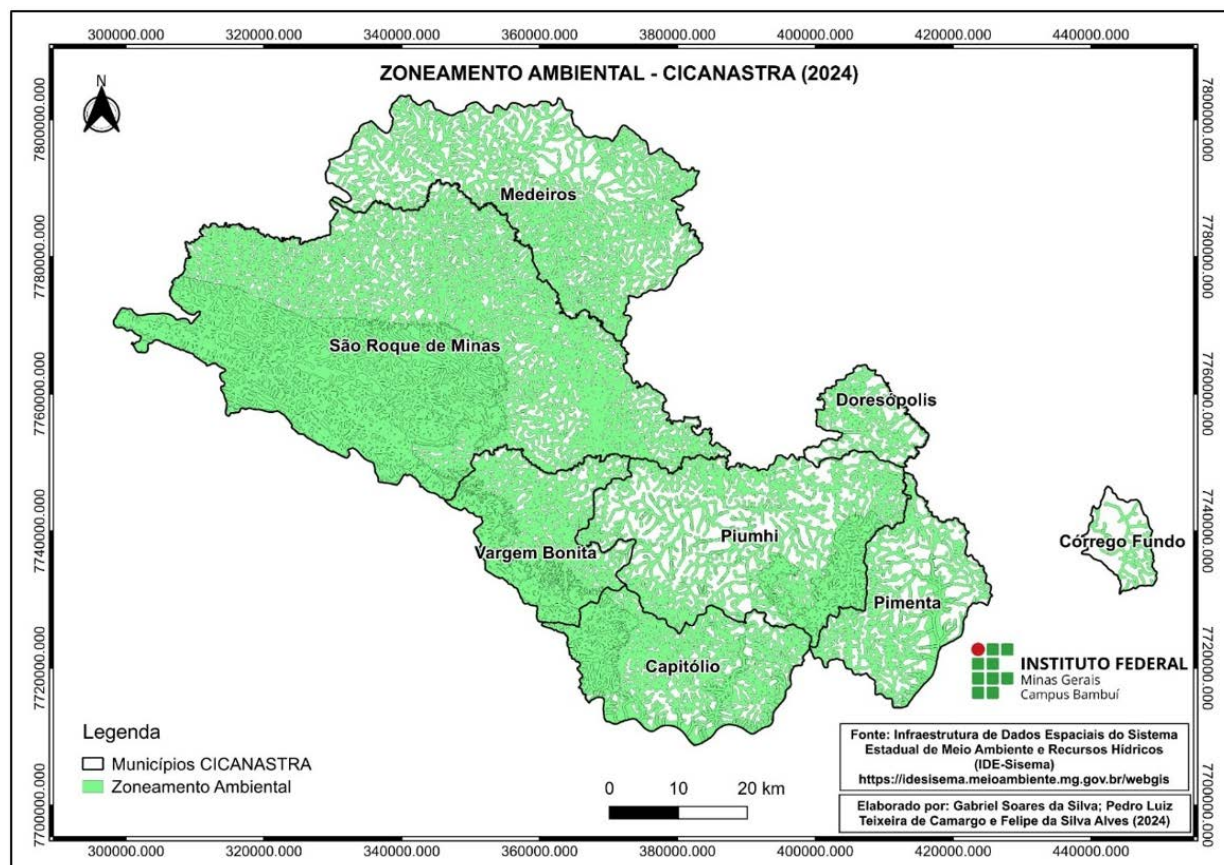
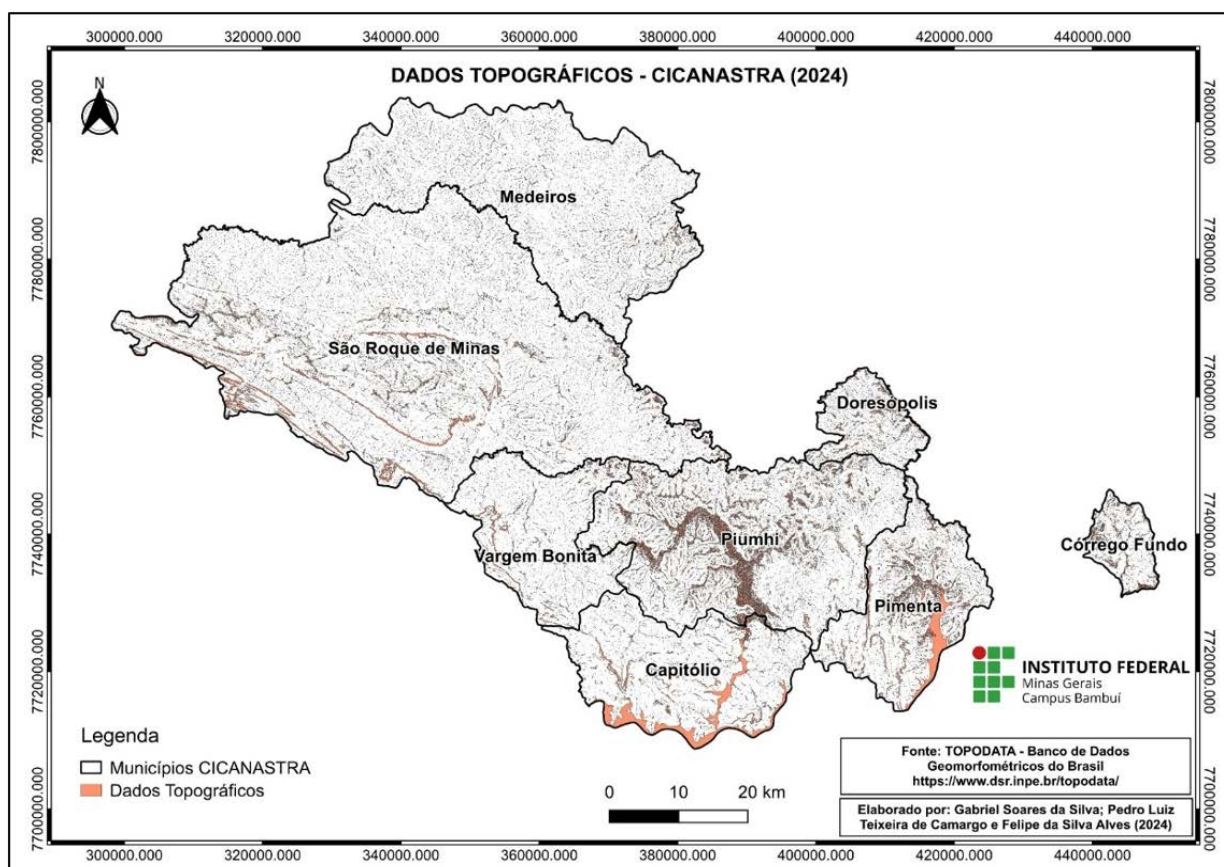
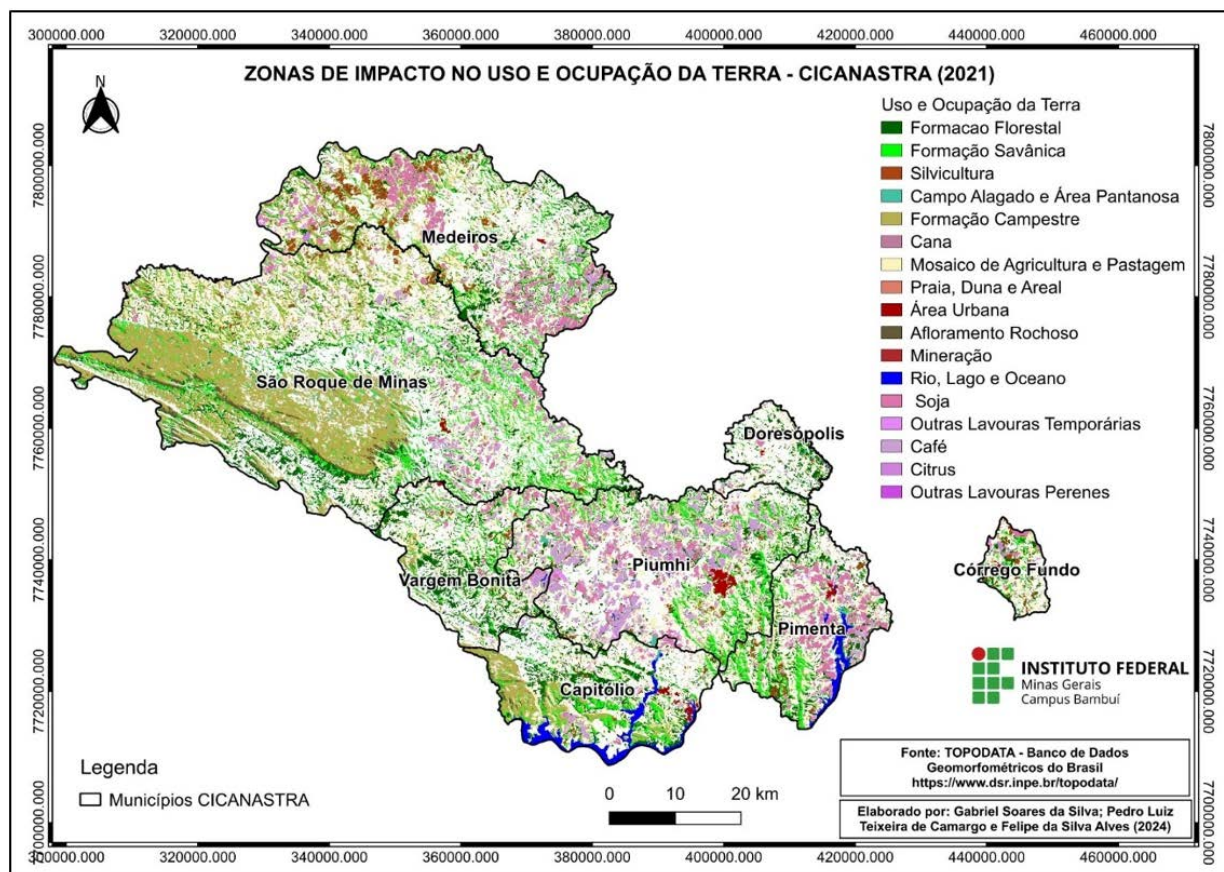


Figura 7 Mapa dos dados topográficos.





e Viável. Essa etapa de classificação não altera os critérios de exclusão estabelecidos pela lógica booleana que permanecem absolutos e binários, mas permite identificar, dentro das áreas aptas, as zonas com maior concentração de potencial, subsidiando a priorização de estudos de campo. Todo esse processamento, incluindo a extração de centroides, a estimativa de densidade e a classificação por quantil, está integrado ao modelo gráfico automatizado disponibilizado no GitHub.

2.5. Dimensionamento da área necessária

A legislação ambiental exige vida útil mínima de 10 anos para aterros sanitários (NBR 13896/1997), e a Deliberação Normativa COPAM nº 244/2022 estabelece 15 anos para Minas Gerais. Este estudo adotou 30 anos como horizonte de projeto, superando os prazos mínimos estabelecidos pela NBR 13896/1997 (10 anos) e pela Deliberação Normativa COPAM nº 244/2022 (15 anos). Essa decisão fundamenta-se em critérios técnicos e estratégicos: a ampliação da vida útil reduz a necessidade de identificação, licenciamento e implantação de nova área em curto prazo – processo que, conforme demonstrado neste estudo, é complexo e restrito dado que apenas 5% do território do CICANASTRA atende aos critérios de aptidão. Em municípios de pequeno porte sem arrecadação por royalties, a viabilização de um novo aterro em 15 anos representaria um desafio financeiro e institucional significativo. A opção por 30 anos implica, contudo, maior volume acumulado de chorume

Figura 8

Mapa de uso e ocupação da terra.

e exige sistema de impermeabilização de base, drenagem e tratamento de lixiviado dimensionados para esse horizonte temporal, aspectos que deverão ser detalhados nas etapas de projeto executivo e licenciamento ambiental, conforme exigências da NBR 13896/1997 e da legislação estadual vigente. O dimensionamento partiu da projeção populacional calculada com base nos censos do IBGE (2000, 2010 e 2022), aplicando os modelos de crescimento aritmético, geométrico e taxa decrescente (Tabela 3), formulações descritas por Tsutiya (2006) e Qasim (1985), amplamente empregadas na literatura técnica de engenharia sanitária para o dimensionamento de sistemas de destinação de resíduos sólidos. O modelo geométrico foi adotado por apresentar maior aderência à dinâmica regional (Messias, 2018), sendo consideradas as seguintes variáveis: população atendida, vida útil do aterro, produção diária de resíduos *per capita* na região Sudeste, massa específica dos resíduos compactados e altura de empilhamento dos RSU.

3. Resultados e Discussões

3.1. Análise dos resultados

Os resultados obtidos neste estudo são fundamentais para compreender a viabilidade da implantação de um aterro sanitário no consórcio intermunicipal CICANASTRA. A metodologia aplicada, baseada em técnicas geoespaciais e modelagens matemáticas, possibilitou a identificação de áreas com poten-

Tabela 3 Métodos de cálculo para projeção de crescimento populacional.

Modelo de projeção	Descrição	Fórmula aplicada	Autor
Crescimento aritmético	Abordagem simples para estimar a população futura. Presume-se que a população crescerá a uma taxa constante ao longo do tempo.	$P = Pi + Ka * (t - ti)$ $Ka = \frac{p2 - p1}{t2 - t1}$	(Tsutiya, 2006)
Crescimento geométrico	Considera que a população cresce a uma taxa percentual constante ao longo do tempo. Modelo para áreas urbanas ou semiurbanas em desenvolvimento.	$P = Pi * e^{Kg*(t-ti)}$ $Kg = \frac{\ln p2 - \ln p1}{t2 - t1}$	(Tsutiya, 2006)
Taxa decrescente de crescimento	Modelo de projeção populacional que considera a diminuição gradual da taxa de crescimento ao longo do tempo, relevante em contextos onde a população inicia com crescimento elevado, mas desacelera devido a fatores sociais, econômicos ou ambientais.	$Ps = \frac{2 * P0 * P1 * P2 - (P1^2) * (P0 + P2)}{P0 * P2 - P1^2}$ $P = P0 + (PS - P0) * [1 - e^{-Kd*(t-t0)}]$ $Kd = \frac{-\ln [(PS - P2)/(PS - P0)]}{t2 - t0}$ $\frac{dP}{dt} = kd * (Ps - P)$	(Qasim, 1985)

P = população estimada no ano; **Pi** = População inicial; **Ka; Kg; Kd** = coeficientes; **t** = Ano estimado; **ti** = Ano inicial; **P0;P1;P2** = populações nos anos base **t0;t1;t2**; **Ps**= População de saturação; **dP/dt** = taxa de crescimento da população em função do tempo.

cial para receber essa infraestrutura essencial à gestão de resíduos sólidos. A análise considerou aspectos como crescimento populacional, uso e ocupação do solo, zoneamento ambiental, infraestrutura de transportes e restrições topográficas. A seguir, são discutidos os principais achados, utilizando como suporte as representações cartográficas elaboradas no estudo.

3.2. Projeção populacional e geração de resíduos

O primeiro fator analisado foi o crescimento populacional, determinante para a estimativa da demanda futura de gestão de resíduos sólidos. A Figura 9 ilustra a projeção demográfica até 2054, considerando diferentes métodos de cálculo. Segundo a projeção geométrica, a população do consórcio atingirá aproximadamente 100.432 habitantes em 2054, o que impactará diretamente na geração de resíduos sólidos urbanos (RSU).

Com base nesses dados, a Tabela 4 apresenta a estimativa de produção de RSU ao longo dos próximos 30 anos. A projeção indica um volume acumulado de 1.320.813 toneladas de resíduos sólidos até 2054. No entanto, considerando que cerca de 20,3% desses resíduos serão destinados à coleta seletiva (Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais [ABRELPE], 2023), o volume final a ser encaminhado para o aterro sanitário será de 1.052.688 toneladas.

O crescimento projetado de 32,5% na geração de resíduos ao longo de 30 anos – de 35.275 ton/ano em 2024 para 50.855 ton/ano em 2054 – evidencia a urgência de soluções estruturais para a gestão dos RSU no consórcio. Em municípios de pequeno porte sem arrecadação por *royalties*, esse aumento progressivo representa uma pressão crescente sobre os orçamentos municipais e sobre o meio ambiente, uma vez que a ausência de destinação adequada implica riscos de contaminação do solo, dos recursos hídricos e da biodi-

Figura 9
Taxa de crescimento populacional.

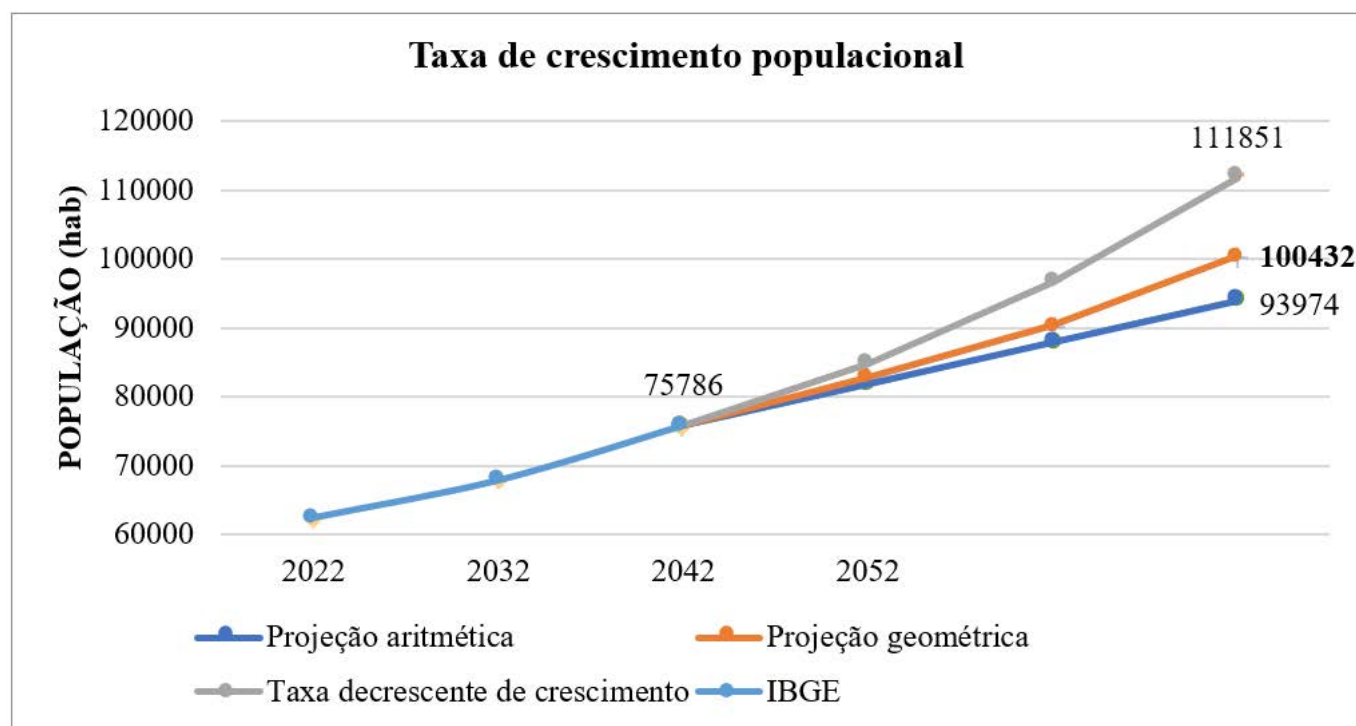


Tabela 4 Produção dos RSU ao ano.

Geração de RSU (ton/ano) no Consórcio Intermunicipal CICANASTRA							
2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031
35275	35708	36146	36589	37038	37493	37953	38418
2032	2033	2034	2035	2036	2037	2038	2039
38889	39367	39849	40338	40833	41334	41841	42355
2040	2041	2042	2043	2044	2045	2046	2047
42874	43400	43933	44472	45017	45569	46128	46694
2048	2049	2050	2051	2052	2053	2054	Acumulado em 30 anos
47267	47847	48434	49028	49630	50238	50855	1.320.813

versidade do Cerrado, bioma já ameaçado presente em todo o território do CICANASTRA (MMA, 2024). Nesse sentido, o dimensionamento apresentado não é apenas um exercício técnico, mas o fundamento quantitativo para uma decisão de política pública com impactos ambientais e sociais de longo prazo.

A Figura 10 apresenta a simulação da área necessária para o aterro sanitário, considerando o volume total de resíduos gerados. A Equação 1 calcula o dimensionamento necessário para ocupar o volume de resíduo calculado.

Equação 1 – Cálculo do volume de resíduos

$$V_{RSU} = \frac{P_{RSU}}{\gamma}$$

Onde:

V_{RSU} = Volume de resíduos destinado ao aterro

P_{RSU} = 1.052.688ton (massa total de RSU em 30 anos)

γ = 9,3 kN/m³ (peso específico do resíduo compactado, convertido de kN/m³ para ton/m³)

Equação 2 – Cálculo do volume de solo para cobertura

$$V_{solo} = 0,3 * V_{RSU}$$

Onde:

V_{RSU} = é o volume calculado no item anterior

O fator 0,3 corresponde a 30% do volume dos resíduos, que será destinado para a cobertura de solo.

Equação 3 – Volume total de resíduos e solo

$$V_{total} = V_{RSU} + V_{solo}$$

O valor obtido corresponde a um volume esperado de 147.150 m³ em 30 anos.

Para o cálculo da área requerida, foi considerada uma vala com altura máxima de 5 metros.

Equação 4 – Área necessária considerando altura da pilha

$$A = \frac{V_{total}}{h}$$

Onde:

$h = 5 \text{ m}$ é a altura da pilha

A é a área em metros quadrados. Para converter para hectares: 1 hectare=10.000 m²

Assim, a área calculada de 29.430 m² equivale a aproximadamente 3 hectares, considerada ideal para a implantação do aterro sanitário. A análise indica que, para atender à demanda futura, será necessário um espaço mínimo de 3 hectares, com altura de deposição de 5 metros.

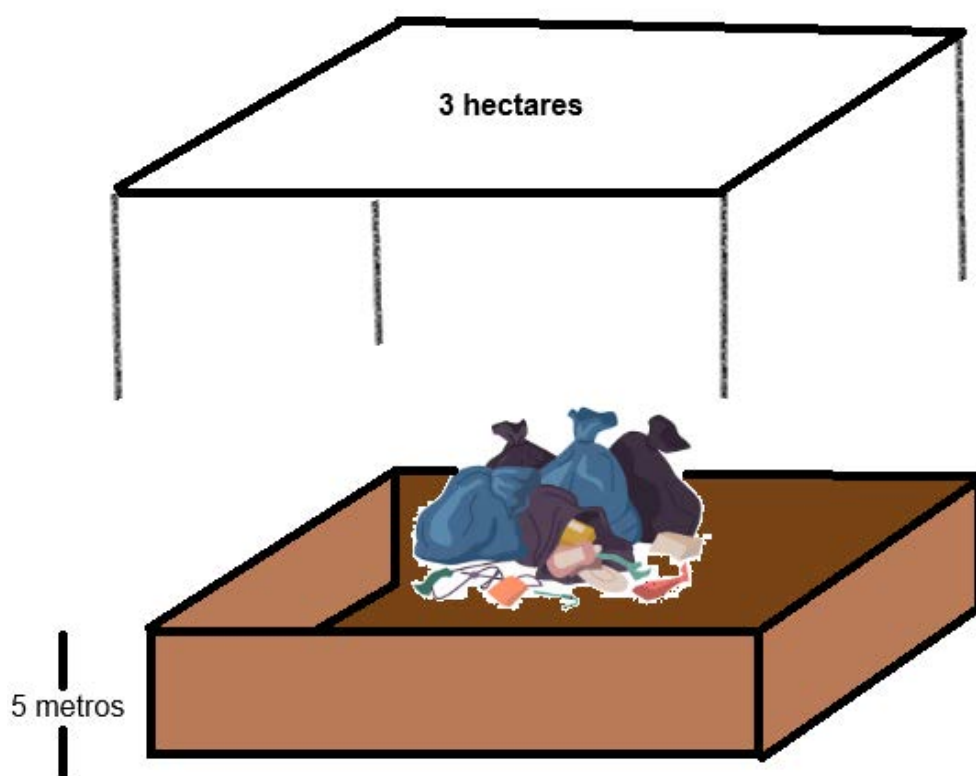
3.3. Restrições ambientais e urbanas

A aplicação dos critérios restritivos estabelecidos na Tabela 2 resultou na exclusão de parcelas significativas do território do CICANASTRA. A análise dos mapas temáticos apresentados na seção 2.3 permite compreender a contribuição de cada critério para a configuração final das áreas inaptas.

O critério de proximidade a núcleos populacionais (Figura 3) revelou que

Figura 10

Área mínima necessária para implementação do aterro sanitário.



a distribuição dispersa de povoados e aglomerados rurais ao longo do território impõe restrições expressivas, especialmente nas porções mais densamente ocupadas dos municípios de Piumhi e Capitólio, onde a sobreposição de buffers urbanos reduziu substancialmente as áreas disponíveis.

O mapa de infraestrutura de transportes (Figura 5) evidenciou que a presença de rodovias estaduais – em especial a MG-050 e a MG-341 – e a existência de aeródromos na região geraram zonas de exclusão relevantes, particularmente nos corredores viários que atravessam o consórcio no sentido leste-oeste.

A análise do zoneamento ambiental (Figura 6) demonstrou que a presença do Parque Nacional da Serra da Canastra e da APA Serras e Águas de Piumhi representa uma das restrições de maior abrangência territorial, inviabilizando extensas porções nos municípios de São Roque de Minas e Vargem Bonita.

Os dados topográficos (Figura 7) indicaram que as áreas com declividade superior a 30% ou inferior a 1% – inadequadas por problemas de drenagem e estabilidade do solo – concentram-se nas regiões serranas, contribuindo para a eliminação de áreas nos municípios limítrofes ao PNSC.

Por fim, o mapa de uso e ocupação da terra (Figura 8) revelou que as formações de Cerrado, matas ciliares e áreas de savana, distribuídas de forma fragmentada pelo território, somadas às zonas urbanas e de mineração, compuseram o critério com maior distribuição espacial de restrições. As áreas de pastagem e solo exposto, concentradas principalmente em Medeiros e São Roque de Minas, foram as que apresentaram maior potencial remanescente após a aplicação desse critério.

A combinação de todos esses critérios via operadores booleanos AND resultou no mapa consolidado de aptidão apresentado na seção seguinte.

3.4. Identificação das áreas aptas

A análise espacial indicou que 95% da área do consórcio é inapropriada para a instalação do aterro sanitário, devido às restrições ambientais, urbanas e topográficas. Apenas 5% da área total foi considerada apta, totalizando aproximadamente 28.821,879 hectares.

A Figura 11 representa a distribuição dessas áreas, destacando que os municípios de Medeiros e São Roque de Minas possuem maior quantidade de locais adequados. Esse fato pode estar relacionado a fatores como menor densidade populacional e menor presença de infraestruturas que inviabilizam a instalação de aterros.

A Figura 12 reforça essa análise ao ilustrar a separação entre áreas inaptas (vermelho) e aptas (verde). Observa-se que a maior parte do território do consórcio é inviável para o empreendimento, sendo necessária uma avaliação criteriosa para a escolha do melhor local.

Para aprofundar a análise, foi gerado um mapa de calor, utilizando a técnica de interpolação Kernel. Esse mapa permitiu classificar as áreas aptas em diferentes níveis de viabilidade, conforme os critérios apresentados na

Figura 11 Mapa com áreas aptas para implementação de aterro sanitário.

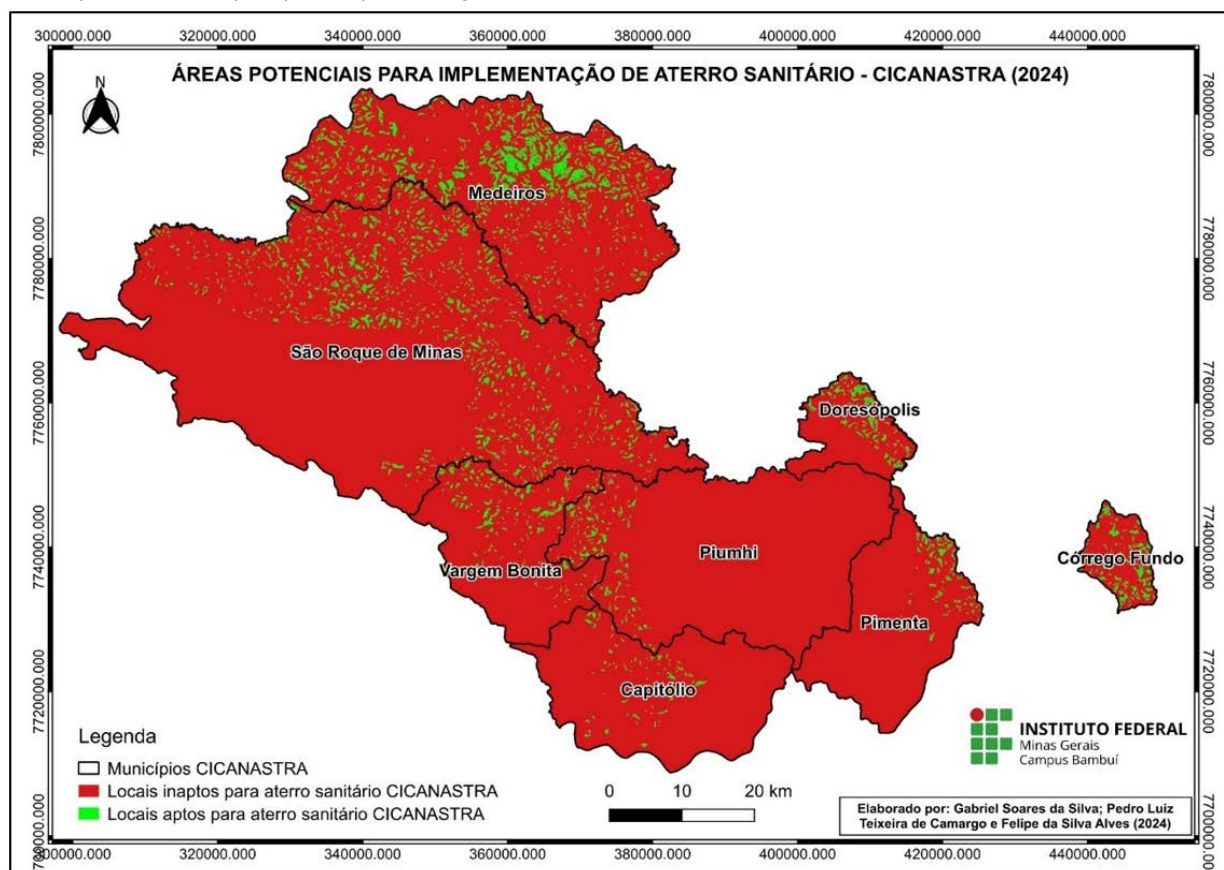


Figura 12 Mapa de localização das áreas ideais e adequadas.

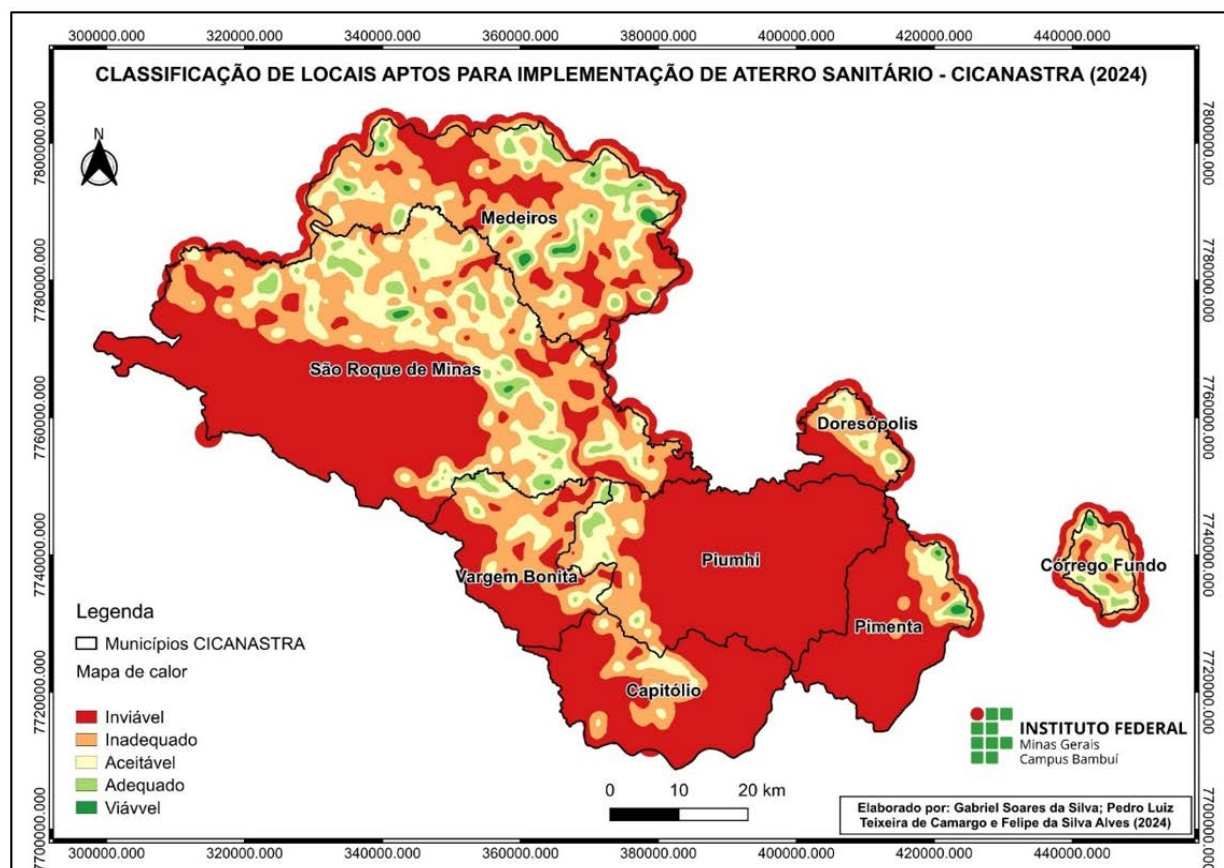


Figura 12. As categorias foram organizadas em cinco níveis de densidade espacial, definidos pelo método de classificação por quantil aplicado sobre a superfície contínua gerada pelo KDE a partir dos centroides dos polígonos aptos identificados pela lógica booleana:

Inviável (vermelho): Regiões fora do alcance de concentração dos centroides aptos, correspondendo às áreas excluídas pela lógica booleana

Inadequado (laranja): Baixíssima densidade de centroides aptos, indicando isolamento espacial dos polígonos viáveis

Aceitável (amarelo): Densidade moderada de centroides, com presença de áreas aptas dispersas sem concentração expressiva

Adequado (verde-claro): Alta densidade de centroides aptos, indicando agrupamento espacial favorável à implantação

Viável (verde-escuro): Máxima concentração de centroides aptos, representando os hotspots prioritários para estudos de campo e avaliações presenciais.

Observa-se na Figura 11 que menos de 2% do território do consórcio pode ser classificado como “Ideal”, evidenciando a necessidade de um planejamento detalhado, participativo e conjunto para a escolha do local mais adequado.

3.5. Classificação final e planejamento estratégico

A análise logística do consórcio revela uma assimetria territorial relevante: enquanto os municípios de Medeiros e São Roque de Minas concentram a maior parte das áreas aptas identificadas, municípios como Capitólio, Piumhi e Córrego Fundo estão em posição periférica em relação a essas zonas, implicando maiores distâncias de transporte. Essa condição deve ser considerada no planejamento operacional do aterro, especialmente no dimensionamento da logística intermunicipal.

Esse aspecto ganha peso quando confrontado com a realidade atual de destinação dos resíduos na região. O município de Piumhi, integrante do CICANASTRA, contrata empresa privada que atende 31 municípios da região para a destinação de seus RSU (Prefeitura de Piumhi, 2026), enquanto municípios vizinhos do mesmo contexto regional – como Dolores do Indaia – destinam seus rejeitos ao Aterro Sanitário Integração Resíduos (Integração Resíduos, 2024), localizado na BR-354 em Bambuí (Silva et al., 2024), a distâncias consideravelmente maiores do que as que separam os municípios do CICANASTRA das áreas aptas identificadas neste estudo.

Segundo dados da FIPE/Abetre, o custo de destinação em aterros de pequena escala gira em torno de R\$ 269,00 por tonelada, enquanto aterros regionais de maior capacidade operam por R\$ 85,64 por tonelada (Agência Minas, 2021). Considerando o volume gerado pelo CICANASTRA de aproximadamente 34.425 toneladas por ano, a diferença entre o modelo privado individualizado e o modelo consorciado pode representar uma economia expressiva para os cofres municipais – recursos que, em municípios sem arrecadação por *royalties*, poderiam ser redirecionados para outras demandas de infraestrutura.

Nesse sentido, a implantação do aterro intermunicipal nas áreas identificadas neste estudo representa não apenas uma solução ambiental, mas uma alternativa economicamente mais eficiente e soberana para a gestão dos resíduos sólidos do consórcio.

A Figura 12 apresenta a classificação final das áreas aptas, organizando-as de acordo com o nível de viabilidade para implementação do aterro sanitário. A aplicação da técnica de interpolação Kernel permitiu identificar os locais com maior densidade de pontos viáveis, sendo essas regiões as mais indicadas para estudos de campo e avaliações presenciais.

Por fim, foi apresentada a distribuição das áreas aptas por município, indicando que Medeiros e São Roque de Minas possuem as melhores condições para a implantação do aterro sanitário intermunicipal. No entanto, a proximidade de rodovias estaduais, como MG-050 e MG-341, também deve ser considerada para otimização da logística de transporte de resíduos.

4. Considerações finais

Este estudo demonstrou a eficácia do geoprocessamento como ferramenta de suporte à decisão para a seleção de áreas aptas à implantação de aterros sanitários, aplicada ao contexto do Consórcio Intermunicipal CICANASTRA. A integração de critérios normativos, ambientais, topográficos e de uso do solo por meio de lógica booleana e estimativa de densidade Kernel resultou na identificação e classificação espacial das áreas com maior aptidão para o empreendimento, fornecendo subsídio técnico objetivo para o planejamento da gestão de resíduos sólidos na região.

Os resultados demonstram que apenas 5% da área total do consórcio apresenta condições favoráveis para a instalação do aterro sanitário intermunicipal, totalizando aproximadamente 28.821,879 hectares, com maior concentração nos municípios de Medeiros e São Roque de Minas. O mapa de calor gerado pela interpolação Kernel, aplicada sobre os centroides dos polígonos aptos, reforça essa constatação ao identificar os *hotspots* de maior densidade de áreas viáveis, subsidiando a priorização de estudos de campo.

Contudo, a viabilidade final dessas áreas ainda requer validação *in loco*, incluindo análises geológicas e hidrogeológicas para garantir a estabilidade do solo, a profundidade adequada do lençol freático e a permeabilidade compatível com os requisitos de impermeabilização do aterro. A implementação prática dependerá de etapas complementares de vistoria técnica, estudos ambientais específicos e atendimento aos requisitos de licenciamento ambiental. Ressalta-se ainda que o dimensionamento de 3 hectares para 30 anos considera uma taxa de desvio para coleta seletiva de 20,3% – caso essa meta não seja atingida, a área necessária será proporcionalmente maior, aspecto que deverá ser reavaliado no projeto executivo com base no desempenho real dos programas de reciclagem municipais.

Outro aspecto crucial é a dimensão social e de governança envolvida na

implementação do aterro sanitário intermunicipal. A seleção de áreas por critérios técnicos, embora necessária, não é suficiente para garantir a viabilidade do empreendimento – estudos sobre gestão de resíduos em contextos de pequenos municípios demonstram que a aceitação social das comunidades próximas às áreas selecionadas, a participação comunitária nos processos decisórios e a observância dos princípios de justiça ambiental são determinantes para o sucesso de projetos dessa natureza. Nesse sentido, recomenda-se que as etapas subsequentes a este estudo incluam processos de consulta pública e engajamento das populações locais, especialmente nos municípios de Medeiros e São Roque de Minas, onde se concentram as áreas com maior aptidão identificadas. O planejamento participativo, aliado ao alinhamento com as políticas públicas da PNRS e ao fortalecimento da estrutura de governança do consórcio CICANASTRA, será essencial para a viabilização financeira, operacional e socialmente legítima do aterro sanitário intermunicipal. Além disso, ações complementares, como programas de educação ambiental e incentivo à coleta seletiva, devem ser promovidas para reduzir o volume de resíduos destinados ao aterro.

Por fim, um dos principais legados deste estudo é o desenvolvimento de um modelo gráfico automatizado que integra a lógica booleana de exclusão de áreas e a estimativa de densidade Kernel para classificação de viabilidade, exportado para Python e disponibilizado no GitHub. Essa ferramenta permite a replicação completa da metodologia – desde a classificação binária até a geração do mapa de calor por quantil – em outros consórcios e municípios, contribuindo para a democratização do acesso a tecnologias de geoprocessamento aplicadas à gestão de resíduos sólidos.

Agradecimentos

Gostaríamos de expressar nossos agradecimentos ao Grupo de Pesquisa em Ciências Ambientais, registrado no CNPq e ao programa de mestrado MPSTA pelo apoio essencial no fomento da ciência e da tecnologia, bem como pela promoção de estudos acadêmicos que contribuem para o avanço do conhecimento e suas aplicações práticas.

Referências

- Agência Minas Gerais. (2021). *Destinação regular de resíduo atende mais de 70% da população urbana de MG*. Governo de Minas Gerais. <https://www.agenciaminas.mg.gov.br/noticia/destinacao-regular-de-residuo-atende-mais-de-70-da-populacao-urbana-de-mg>
- Añasco Quispe, R. P., & Sánchez Vásquez, M. M. (2022). *Automatización de un modelo mediante análisis multicriterio como alternativa para identificar áreas óptimas de un relleno sanitario caso Provincia Azángaro*. [Tese de graduação, Universidad César Vallejo].

- Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais. (2023). *Panorama dos resíduos sólidos no Brasil 2023*. ABRELPE. <https://abrelpe.org.br/panorama/>
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. (1997). *NBR 13896:1997 – Aterros de resíduos não perigosos: Critérios para projeto, implantação e operação*. ABNT.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2004). *NBR 10004:2004 – Resíduos sólidos: Classificação*. ABNT.
- Blasius, J. P., Toledo, A. C. de, & Garcia, M. L. (2023). Dimensionamento de área para instalação de aterro sanitário e proposta de gerenciamento consorciado de RSU na região de Araras-SP. *Revista Brasileira de Meio Ambiente & Sustentabilidade*, 3(4), 104–131. <https://rbmaes.emnuvens.com.br/revista/article/view/347>
- Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. (2010). Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos. Diário Oficial da União. http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2007-2010/2010/Lei/L12305.htm
- Lei nº 12.651, de 25 de maio de 2012. (2012). Dispõe sobre a proteção da vegetação nativa. Diário Oficial da União. https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2011-2014/2012/lei/l12651.htm
- Câmara, G., & Ortiz, M. J. (1998). Sistemas de informação geográfica para aplicações ambientais e cadastrais: uma visão geral. In *Congresso brasileiro de engenharia Agrícola: cartografia, sensoriamento e geoprocessamento* (pp. 1–18). <http://www.dpi.inpe.br/gilberto/papers/analise.pdf>
- Elkhrachy, I., Alhamami, A., & Alyami, S. H. (2023). Landfill site selection using multi-criteria decision analysis, remote sensing data, and geographic information system tools in Najran City, Saudi Arabia. *Remote Sensing*, 15(15), 3754. <https://doi.org/10.3390/rs15153754>
- GitHub. (2024). *AplicaGIS: Geoprocessamento aplicado à seleção de áreas para aterros sanitários*. <https://github.com/GSoaresSilva/AplicaGIS>
- Ibrahim, G. R. F. (2021). Optimal site selection for landfill using the Boolean-analytical hierarchy process. *Environment, Development and Sustainability*, 23(4), 6066–6083. <https://doi.org/10.1007/s10668-020-00862-3>
- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. (2000). *Censo demográfico 2000*. <https://www.ibge.gov.br>
- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. (2010). *Censo demográfico 2010*. <https://www.ibge.gov.br>
- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. (2022). *Censo demográfico 2022*. <https://www.ibge.gov.br>
- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. (2024). *IBGE Cidades*. <https://www.ibge.gov.br/pt/inicio.html>
- Integração Resíduos. (2024). *Sobre nós*. Integração de Resíduos Parque de Transformação Ambiental Ltda. <https://www.integracaoresiduos.com.br/paginas/sobre-nos/1>
- Macalam, F. J., Arreza, K., Magpantay, A., & Rabaño, K. (2023). Landfill site suitability assessment using geographic information system (GIS) and analytic hierarchy process (AHP) in Butuan City, Philippines. *Journal of Environmental & Earth Sciences*, 5(1), 95–107. <https://doi.org/10.30564/jees.v5i1.5381>
- MapBiomass. (2021). *Projeto de Mapeamento Anual de Cobertura e Uso do Solo do Brasil*. <https://mapbiomas.org>

- Messias, C. G. (2018). Transformações demográficas e espaciais nos municípios que compõem o Parque Nacional da Serra da Canastra, entre 1950 e 2010. *Simpósio Nacional de Geografia e Gestão Territorial e Semana Acadêmica de Geografia da Universidade Estadual de Londrina*, 1, 1726–1741.
- Ministério do Meio Ambiente. (2022). *Consórcios públicos*. <https://antigo.mma.gov.br/cidades-sustentaveis/residuos-solidos/consorcios-publicos.html>
- Ministério do Meio Ambiente. (2024). *Cerrado*. <https://www.gov.br/mma/pt-br/assuntos/biodiversidade-e-biomas/biomas-1/cerrado>
- Moraes, T. R. (2023). *A compensação financeira pela exploração mineral nos municípios do estado do Pará* [Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Pará]. <https://repositorio.ufpa.br/jspui/handle/2011/16359>
- Prefeitura de Piumhi. (2026). *Piumhi reestrutura a cobrança do serviço de lixo*. <https://prefeiturapiumhi.mg.gov.br/piumhi-reestrutura-a-cobranca-do-servico-de-lixo-para-garantir-sustentabilidade-e-qualidade-na-prestacao/>
- Qasim, S. R. (1985). *Wastewater treatment plants: Planning, design, and operation*. Holt, Rinehart and Winston.
- Quoos, J. H., & Figueiró, A. S. (2023). Cartografia e geodesign para interpretação da paisagem e geodiversidade na Área de Proteção Ambiental da Baleia Franca (SC). *Physis Terrae – Revista Ibero-Afro-Americana de Geografia Física e Ambiente*, 5(1), 45–63. <https://doi.org/10.21814/physisterrae.4635>
- Silva, A. R. C., Santos, F. L. S., Menezes, A. N., Nascimento, A. F. do, & Vasconcelos, F. C. W. (2024). Percepção ambiental sobre a gestão de resíduos sólidos: um estudo de caso do município de Dores do Indaiá/MG. *Revista FT*, 28(135). <https://revistaft.com.br/percepcao-ambiental-sobre-a-gestao-de-residuos-solidos-um-estudo-de-caso-do-municipio-de-dores-do-indaia-mg/>
- Silva, G. S., Camargo, P. L. T., & Silva Alves, F. (2023). Utilização de sensoriamento remoto para cálculo de uso e ocupação no córrego do Grotão, Capitólio–Minas Gerais. *Revista de Ciência e Inovação*, 9(1), 1–17.
- Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento. (2021). *Diagnóstico temático: manejo de resíduos sólidos urbanos*. Ministério do Desenvolvimento Regional, Secretaria Nacional de Saneamento. <https://www.gov.br/cidades/pt-br/aceso-a-informacao/acoes-e-programas/saneamento/snis/produtos-do-snis/diagnosticos-snis>
- Tsutiya, M. T. (2006). *Abastecimento de água* (3. ed.). Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária da Escola Politécnica da USP.