

Identificação de áreas com potencial para implantação de aterro sanitário consorciado nos municípios de Centenário do Sul, Florestópolis e Porecatu

RESUMO

Giovanni Vanzela Paiva
giovannivanzela@gmail.com
orcid.org/0000-0002-8851-2320
Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), Londrina, Paraná, Brasil.

Ligia Flávia Antunes Batista
ligia@utfpr.edu.br
orcid.org/0000-0002-2146-765X
Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), Londrina, Paraná, Brasil.

Tatiane Cristina Dal Bosco
tatiangebosco@utfpr.edu.br
orcid.org/0000-0002-2470-9853
Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), Londrina, Paraná, Brasil.

A Política Nacional de Resíduos Sólidos e o novo marco legal do saneamento básico estabeleceram o prazo máximo para o fim da disposição inadequada de resíduos sólidos urbanos como o ano de 2024, dependendo do porte do município. No Paraná, 98 municípios ainda possuem lixões ou aterros controlados (disposição inadequada), incluindo Centenário do Sul, Florestópolis e Porecatu. Portanto, o objetivo deste trabalho é selecionar áreas potenciais para a implementação de um aterro sanitário consorciado para esses municípios. Foram considerados critérios como distância de corpos hídricos, núcleos populacionais, rodovias, declividade e profundidade do lençol freático. A inferência fuzzy foi utilizada para atribuir valores de aptidão entre 0 e 1, de acordo com cada critério. Em seguida, aplicou-se o Processo Analítico Hierárquico para atribuir pesos às variáveis e gerar um mapa síntese da aptidão da área para a instalação do aterro. Identificaram-se cinco regiões com potencial de aptidão maior que 0,75, sendo a distância de corpos hídricos e profundidade do lençol freático os principais critérios para a seleção das áreas. A área mais ao centro (Área C) é a mais promissora, considerando a proximidade com residências isoladas, área de influência do manancial de abastecimento público e titularidade do terreno.

PALAVRAS-CHAVE: Resíduos Sólidos Urbanos. Disposição Final de Resíduos Sólidos. Inferência Fuzzy. Processo Analítico Hierárquico.

INTRODUÇÃO

O gerenciamento inadequado de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) pode causar a contaminação de recursos hídricos, enchentes, proliferação de vetores, como o mosquito da dengue, propagação de patógenos, poluição atmosférica e visual, além de grandes impactos sociais (LAGO; ELIS; GIACHETI, 2006).

Devido a essa problemática, no dia 2 de agosto de 2010, foi instituída a Política Nacional de Resíduos Sólidos - PNRS, que dispõe sobre os “princípios, objetivos e instrumentos, bem como sobre as diretrizes relativas à gestão integrada e ao gerenciamento de resíduos sólidos” (BRASIL, 2010, p.1). Entre todas as diretrizes estabelecidas pela PNRS, foi determinado o prazo para o fim da disposição final inadequada de resíduos sólidos (lixões e aterros controlados) para 2014 (BRASIL, 2010). Entretanto, muitos municípios não conseguiram atender a essa exigência e, por isso, em 2020, quando se atualizou o marco legal do saneamento básico, pela Lei nº 14.026 (BRASIL, 2020), determinou-se novos prazos para o fim dos lixões e aterros controlados no Brasil: 31 de dezembro de 2020 a 2 de agosto de 2024, dependendo do porte do município. O marco legal foi lembrado e enfatizado também no Plano Nacional de Resíduos Sólidos (PLANARES), publicado em 2022 (BRASIL, 2022a).

Em 2021, 2.826 municípios ainda utilizavam locais de disposição inadequada de resíduos sólidos, de acordo com a ABRELPE (2022), fazendo com que 29.706.226 toneladas de RSU fossem dispostas em lixões e aterros controlados, representando 39% do total de resíduos destinados no país. Dentre estes municípios estão Centenário do Sul, Florestópolis e Porecatu, na Região Metropolitana de Londrina, no Paraná (SNIS, 2021).

Luiz (2018) ressalta que uma das causas deste número de lixões no Brasil deve-se aos custos para implantação e operação, quando o município é de pequeno porte. Como solução para esta situação, Lisbinski et al. (2020) demonstraram que quando se amplia a escala dos empreendimentos de aterros sanitários, diminui-se em 30% os custos para a disposição final adequada.

Diante do exposto, a PNRS, no art. 8º (BRASIL, 2010, p. 5), apresenta os Consórcios Intermunicipais como instrumentos “com vistas à elevação das escalas de aproveitamento e à redução dos custos envolvidos” para o gerenciamento adequado dos resíduos em municípios pequenos. Suzuki e Gomes (2009) explicam que os Consórcios Intermunicipais promovem a redução dos custos operacionais e administrativos da disposição final, além de diminuir as chances de contaminação ambiental, visto que um único aterro sanitário é utilizado para atender mais de um município (SUZUKI; GOMES, 2009).

Diante das condições apresentadas, torna-se evidente a necessidade da regularização dos municípios brasileiros a respeito da disposição final de resíduos sólidos, para a melhoria e preservação da saúde pública, do meio ambiente e da sociedade.

Um dos desafios, neste sentido, é a determinação de áreas aptas para a implantação de aterros sanitários, de modo a atender a legislação ambiental vigente e viabilizar tais empreendimentos, considerando o contexto dos municípios consorciados. No Brasil, tem-se a norma NBR 13.896 (ABNT, 1997), que apresenta “condições mínimas exigíveis” para aterros sanitários e, no Paraná, a Resolução CEMA nº 94 (PARANÁ, 2014), que estabelece diretrizes e

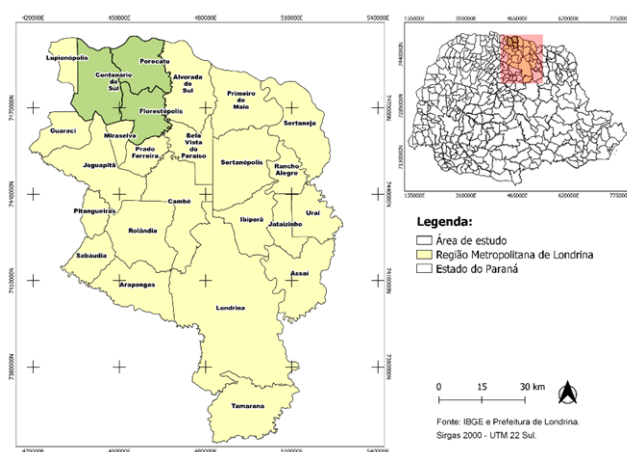
critérios para projeto, implantação e operação de aterros. Uma vez considerados os critérios e as exigências para a escolha de áreas potenciais, pode-se utilizar técnicas de geoprocessamento baseadas em inferência fuzzy (ZADEH, 1965) e Processo Analítico Hierárquico (SAATY, 1990) para combiná-los e, dessa forma, gerar informações objetivas para subsidiar a tomada de decisão em relação aos locais adequados para implantação de aterro.

Em vista disso, este estudo tem como objetivo identificar áreas potenciais para implantação de um aterro sanitário consorciado para os municípios de Centenário do Sul, Florestópolis e Porecatu, atendendo às exigências da legislação ambiental vigente.

MATERIAL E MÉTODOS

O estudo foi realizado para as cidades de Porecatu, Centenário do Sul e Florestópolis (Figura 1), municípios localizados na região metropolitana de Londrina, no norte do estado do Paraná. Observando a Figura 1, nota-se que os três municípios fazem fronteira entre si, o que facilita a projeção de um aterro sanitário em consórcio, na região.

Figura 1 – Área de estudo



Fonte: Autoria própria (2023).

Os municípios de Centenário do Sul, Florestópolis e Porecatu fazem parte do Consórcio de Desenvolvimento e Inovação do Norte do Paraná - CODINORP, que contempla 10 cidades: Cafeara, Centenário do Sul, Florestópolis, Guaraci, Jaguapitã, Lupionópolis, Miraselva, Pitangueiras, Porecatu e Prado Ferreira. Entretanto, apenas Lupionópolis possui disposição final ambientalmente adequada dos resíduos sólidos segundo o levantamento de 2019 do Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS). Ao todo, o CODINORP possui aproximadamente 70.048 habitantes, com uma geração média de 24.258 toneladas de resíduos por ano (SNIS, 2019).

Os municípios estudados possuem área e população relativamente próximas. Na Tabela 1 apresenta-se as populações, áreas dos municípios, métodos de disposição final utilizados e presença/ausência de coleta seletiva. Ressalta-se que os dados utilizados estão disponíveis no SINIR + (2022) e IBGE (2022).

Tabela 1 – Características demográficas e sanitárias dos municípios

Município	População declarada em 2019	Área (km ²)	Destinação Final	Coleta Seletiva
Centenário do Sul	9031	371,834	Lixão/Aterro Controlado	Não
Florestópolis	9911	246,331	Lixão/Aterro Controlado	Sim
Porecatu	12000	291,663	Aterro Controlado	Sim

Fonte: Autoria própria (2023).

DIMENSIONAMENTO DO ATERRO SANITÁRIO

Os dados utilizados para o dimensionamento do aterro foram:

- Série histórica da população dos três municípios: Obtida por meio do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) e utilizada para a projeção populacional para os próximos 15 anos de operação do aterro sanitário;
- Percentual da população atendida pela coleta de resíduos: Utilizou-se a Meta 3 do PLANARES (BRASIL, 2022a, p. 40), a qual refere-se à eliminação de práticas inadequadas de destinação final e estabelece metas para a universalização da coleta regular de RSU até 2036;
- Coleta Seletiva na região: Essa informação também foi obtida por meio do PLANARES, Meta 5, que objetiva assegurar que 100% da população do Sul do Brasil tenha acesso a coleta seletiva até 2040, de modo que ocorra um aumento da recuperação da fração seca dos RSU e se evite que resíduos recicláveis e orgânicos cheguem ao aterro sanitário;
- Geração per capita de resíduos sólidos: Foram utilizados dados do SNIS e do SINIR + (2022).

Para este estudo foi necessária uma projeção populacional para estimar o volume de RSU destinados ao aterro sanitário ao longo dos seus 15 anos de operação, sendo fator determinante para a obtenção do tamanho do aterro. Neste sentido, a projeção foi realizada por meio do método geométrico.

PROCEDIMENTO DE CÁLCULO E MÉTODO CONSTRUTIVO

O aterro sanitário foi dimensionado para duas hipóteses:

- Hipótese “real”: Considerou-se as Metas 3 e 6 do PLANARES. Sendo assim, esta hipótese leva em consideração a realidade brasileira de segregação e coleta dos RSU, entendendo que, em uma situação real, não haveria a separação correta de 100% dos resíduos e o sistema de coleta seletiva não atenderia a todos os habitantes desde o primeiro ano da operação do aterro. Portanto, resíduos recicláveis e orgânicos seriam aterrados junto aos rejeitos, entretanto haveria melhoria progressiva destes parâmetros ao longo dos anos.

- b) Hipótese “ideal”: Considerou-se que 100% dos habitantes teriam acesso à coleta seletiva e que realizariam a exata segregação dos resíduos, fazendo com que apenas os rejeitos fossem dispostos no aterro, o que atenderia aos critérios da PNRS (BRASIL, 2010) e do Decreto Federal nº 10.936 (BRASIL, 2022b).

A partir destas projeções foi possível comparar as hipóteses e demonstrar os impactos e a importância do correto gerenciamento dos RSU nos municípios estudados. Para ambas, o método construtivo utilizado foi o método de trincheiras.

O dimensionamento dos aterros consistiu, basicamente, na elaboração de duas planilhas de cálculos para cada município. Essas planilhas contemplaram dados para um aterro com 15 anos de vida útil, visto que a Resolução CEMA nº 094 (PARANÁ, 2014) estabelece este período como o mínimo aceitável para projetos desta natureza.

Utilizou-se as estimativas de geração per capita de RSU específicas de cada município, de acordo com o levantamento do SNIS de 2019, aplicando a porcentagem de rejeitos da composição gravimétrica da geração de resíduos conforme o Panorama da ABRELPE (2020). Em relação ao volume compactado dos resíduos, considerou-se 700 kg m⁻³, para a hipótese “ideal”, o mesmo coeficiente utilizado por Viana et al. (2020) e, para o cenário “real”, aplicou-se um coeficiente de compactação moderado de 550 kg m⁻³.

Ainda para o dimensionamento do aterro, atribuiu-se o percentual de cobertura do solo de 20%, uma vez que Obladen e De Barros (2009) indicam cobertura variando de 10 a 20%, visto que ao final da jornada de trabalho no aterro sanitário, é necessário a cobertura dos resíduos compactados com uma camada de solo, como explicitado pela Resolução CEMA nº94 de 2014, no art. 15 (PARANÁ, 2014) e pela NBR 8419 de 1992 (ABNT, 1992).

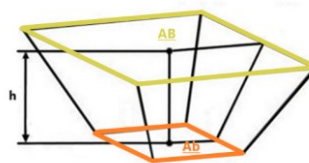
Por fim, a partir do volume de projeto, obtido pelas planilhas de dimensionamento, projetou-se as trincheiras necessárias.

O volume das trincheiras foi calculado com base nas variáveis apresentadas na Figura 2 e conforme a equação 1, apresentada por Andrade (2013) em um trabalho sobre o cálculo do volume de pirâmide com métodos didáticos.

$$V = h/3 \times (AB + \sqrt{(AB \times Ab)}) + Ab \quad (1)$$

onde, V é o volume da trincheira; h é a profundidade da trincheira; AB é a área da base maior e Ab é a área da base menor.

Figura 2 – Geometria das trincheiras



Fonte: Autoria própria (2023).

Considerou-se o tamanho da trincheira capaz de atender o volume do maior ano de geração de resíduos (2037), replicando essa trincheira o número de vezes necessárias para comportar o volume total de resíduos em 15 anos. Dessa forma, foi possível estipular o tempo de vida útil de cada célula e a porcentagem de contribuição de cada ano para o preenchimento de cada trincheira.

SELEÇÃO DE ÁREAS POTENCIAIS

O processo metodológico deste estudo, inicia-se com a definição de critérios ambientais, utilizados na Inferência fuzzy. Esses critérios são: distância de corpos hídricos (ANA, 2017), de núcleos populacionais (GOOGLE, 2021), de rodovias (IAT, 2019), declividade (SRTM, 2011) e profundidade do lençol freático (SIAGAS, 2022). Ressalta-se que além destes, a proximidade com residências isoladas, a área de influência do manancial de abastecimento públicos e titularidade do terreno foram analisadas, após a definição das áreas potenciais.

Os dados obtidos para hidrografia e rodovias foram camadas vetoriais de linhas; para profundidade do lençol freático, camada vetorial de pontos; e para a declividade uma camada matricial.

Primeiramente, fez-se o pré-processamento dos dados georreferenciados, pela conversão de todos os critérios para o sistema de referência geodésico oficial do Brasil, SIRGAS 2000, e para a projeção cartográfica UTM, zona 22 do hemisfério Sul. Assim, pôde-se desenvolver os mapas no fuso da região de estudo com unidade de medida em metros, sendo possível aplicar análises de proximidade. Essas análises, realizadas no Software QGIS (versão 3.24.1), possibilitam a geração de mapas de distância de cada critério, resultando em arquivos matriciais (raster) com intervalos de distâncias.

INFERÊNCIA FUZZY

De acordo com Moreira et al. (2001), pode-se entender o conjunto fuzzy como:

Uma metodologia de caracterização de classes, que por várias razões não têm ou não podem ser definidas por limites rígidos (bordas). Essas classes definidas de maneira inexata são chamadas de conjunto Fuzzy (MOREIRA et al., 2001, p.3).

A lógica fuzzy utiliza o intervalo $[0,1]$ como base. Assim, assume o valor 1 caso haja compatibilidade completa entre o conjunto e o objeto estudado, atribui o valor 0 em caso de nenhuma compatibilidade e assume valores entre 0 e 1 em casos em que a compatibilidade é parcial (ZADEH, 1965; MOREIRA et al., 2001).

Dessa forma, pode-se observar transição gradual entre os valores (EASTMAN, 2001).

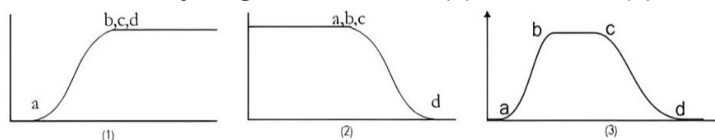
O conjunto fuzzy permite uma representação mais próxima da realidade, tanto para resolução de problemas quanto para tomadas de decisão (EASTMAN, 2001), uma vez que inclui faixas de transição entre as classes. Nesse contexto, de acordo com Eastman (2001), os tipos de funções matemáticas mais utilizadas são: sigmoidal, linear e J-Shaped. Esse trabalho abordará apenas as funções sigmoidais, crescente e decrescente, definidas pelas expressões (2) e (3) (EASTMAN, 1999).

$$\mu = \cos^2[1 - (x - a)/(b - a)] \cdot \pi/2 \quad \text{se } x > b, \mu = 1 \quad (2)$$

$$\mu = \cos^2[(x - c)/(d - c)] \cdot \pi/2 \quad \text{se } x < c, \mu = 1 \quad (3)$$

Nas fórmulas, os valores “a”, “b”, “c” e “d” são os pontos de controle (pontos de inflexão), necessários para que o resultado seja coerente, variando de acordo com o que está sendo representado; x está associado aos valores de distância e μ indica o valor fuzzy gerado. Na Figura 3 pode-se observar o comportamento das funções sigmoidais crescente, decrescente e simétrica, bem como dos seus respectivos pontos de controle.

Figura 3 –Gráficos da função sigmoidal crescente (1), decrescente (2) e simétrica (3)



Fonte: Adaptado de Eastman (2001, p. 32) e Samizava (2008, p. 49).

Elaborou-se assim um mapa para cada critério ambiental estabelecido. Considerando-se a Inferência fuzzy, a escolha da equação foi realizada de acordo com a adequabilidade da área em função de cada critério, bem como seus respectivos pontos de controle, que são os valores utilizados (a, b, c, d) nas equações 2 e 3. Esses valores seguem os limites da legislação, normas técnicas e outros estudos. No Quadro 1 apresenta-se os valores utilizados neste estudo e suas respectivas referências.

Foram então elaborados os mapas fuzzy, os quais apresentam o potencial de aptidão da área para cada variável, conforme a Resolução CEMA N° 94 (PARANÁ, 2014) e NBR 13.896 (ABNT, 1997). Em seguida, pesos foram atribuídos a cada critério, por meio do Processo Analítico Hierárquico, a fim de definir os graus de relevância entre eles.

Quadro 1 – Pontos de controle utilizados nas equações sigmoidais

Critério	Equação	a	b	c	d	Fonte
Distância de corpos hídricos	Sigmoidal Crescente	200	500	-	-	Resolução CEMA N° 94 e Samizava (2006)
Distância de núcleos populacionais	Sigmoidal Crescente	1500	15000			Resolução CEMA n° 94 e Gomes (2003)
Distância de rodovias	Sigmoidal Simétrica com patamar	0	1000	2000	3000	Gomes (2003)
Profundidade do lençol freático	Sigmoidal Crescente	5	15			NBR 13.896 (1997) e Samizava (2006)
Declividade	Sigmoidal Decrescente			1%	30%	NBR 13.896 (1997)

Fonte: Autoria própria (2023).

PROCESSO ANALÍTICO HIERÁRQUICO

Analytic Hierarchy Process (Processo Analítico Hierárquico) (AHP) é um método utilizado para auxiliar na determinação de pesos para cada fator (ou mapa) envolvido na análise. Esse método se baseia em comparar os fatores de forma pareada, ou seja, dois a dois (SAATY, 1990; MOREIRA et al., 2001). Dessa forma, pode-se dizer quanto um fator é mais importante do que outro.

Esse processo pode ser realizado por meio de uma matriz de comparação pareada. Essa matriz é $n \times n$, sendo n o número de critérios estabelecidos. Assim, compara-se o elemento da linha com o elemento da coluna (SAATY, 1990). Após a comparação, determina-se os pesos relativos a cada critério analisado (SAATY, 1990).

Neste estudo, aplicação do AHP se iniciou pela atribuição de pesos a cada critério estabelecido, o que delimitou os graus de relevância entre eles. Os pesos da matriz de comparação pareada foram os mesmos usada por Samizava et al. (2008) (Tabela 2).

Tabela 2 – Matriz de comparação pareada das variáveis

Critérios	Prof. Nível d'água	Declividade	Dist. Cursos d'água	Dist. Rede Viária	Dist. Área Urbana
Prof. Nível d'água	1				
Declividade	1	1			
Dist. Cursos d'água	1	2	1		
Dist. Rede Viária	1/4	1/4	1/4	1	
Dist. Área Urbana	1/2	1/2	1/2	3	1

Fonte: Adaptado de Samizava et. al (2008, p. 52).

Para esta etapa utilizou-se o Plugin “Easy AHP”, disponível no software QGIS, por meio do qual obtém-se os autovalores a partir dos pesos da matriz.

Por fim, multiplicou-se os autovalores, correspondentes aos pesos, pelos respectivos mapas fuzzy, o que resultou em um mapa final, reunindo as cinco variáveis estudadas e apresentando o potencial de aptidão da área de estudo.

As áreas potenciais para implementação de aterro sanitário na região, encontradas pelo mapa final, foram analisadas e comparadas. Com base nos resultados do dimensionamento, verificou-se a área mínima para atender o aterro sanitário consorciado.

Além disso, apresentou-se imagens de satélite das áreas potenciais, bem como a análise de titularidade do terreno, proximidade do manancial de abastecimento público e presença de residências isoladas, com o objetivo de estabelecer as áreas mais aptas para o desenvolvimento do projeto. Ressalta-se que a proximidade com o manancial e a presença de residências isoladas são critérios estabelecidos pela Resolução CEMA nº 94 (PARANÁ, 2014), enquanto o número de proprietários dos terrenos é analisado para verificar a facilidade de aquisição ou desapropriação da área e a eventual morosidade envolvida no processo.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A partir das planilhas de cálculo mencionadas no tópico 2.2 foi possível estimar o volume de resíduos compactados mais a camada de cobertura de solo para cada município, conforme a hipótese “real” e “ideal”. Aliado a este resultado e à projeção populacional, calculou-se a área mínima necessária para implementação do aterro, por meio da área superficial das trincheiras dimensionadas (Tabela 3).

Tabela 3 –Comparação entre área e volume das trincheiras

Parâmetro	Hipótese "real"	Hipótese "ideal"
Volume do aterro (m ³)	107.646,72	53.709,76
Quantidade de trincheiras	13	14
Área ocupada pelas trincheiras (m ²)	52.156	28.196

Fonte: Autoria própria (2023).

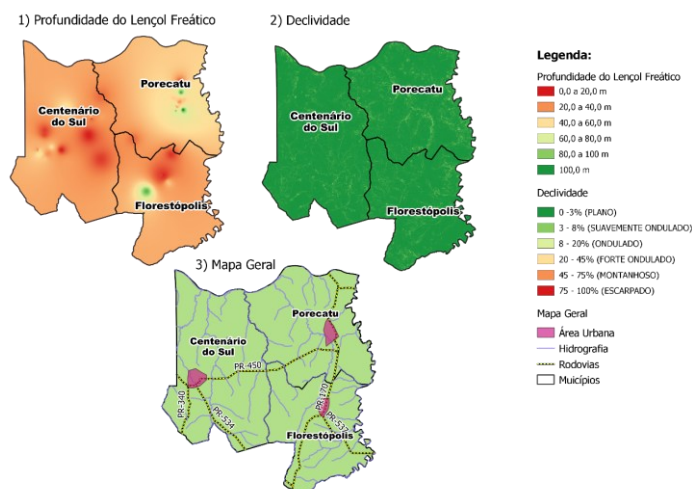
Observa-se que a área necessária para a hipótese “ideal” (28.196 m²) é cerca de 1,85 vezes menor que a “real” (52.156 m²). Isso impacta diretamente na complexidade para a escolha da área potencial, no investimento necessário e nos impactos ambientais decorrentes da disposição final de resíduos no solo.

Por conta da legislação ambiental vigente, a hipótese escolhida para realizar a seleção de áreas potenciais foi a “ideal”.

SELEÇÃO DE ÁREA POTENCIAIS

Antes da aplicação da inferência Fuzzy, realizou-se o pré-processamento dos dados, os quais foram obtidos de fontes públicas, explicitadas no tópico 2.3 (Figura 4).

Figura 4 – Resultados do pré-processamento



Fonte: Autoria própria (2023).

Quanto à profundidade do lençol freático (Figura 4), os valores predominantes estão na faixa entre 20 e 40 metros, sendo recomendada a profundidade mínima de 5 metros para considerar-se adequada à implantação de aterro sanitário (SAMIZAVA et al., 2008).

Em relação à declividade, o mapa (Figura 4) demonstra que a região de estudo é predominantemente plana (0 a 3%), com poucos trechos de relevo suavemente ondulado (3 a 8%) ou ondulado (8 a 20%) (EMBRAPA, 2018). Segundo a NBR 13.896 (ABNT, 1997) a topografia é determinante para a escolha do método construtivo do aterro sanitário, sendo recomendada a declividade entre 1 e 30%.

As áreas urbanas foram delimitadas por meio da sobreposição da região estudada com imagens de satélite do Google Earth. Em relação às rodovias da região, estão presentes a PR-090, PR-170, PR-340, PR-450, PR-534 e PR-537 (Figura 4 – Mapa Geral).

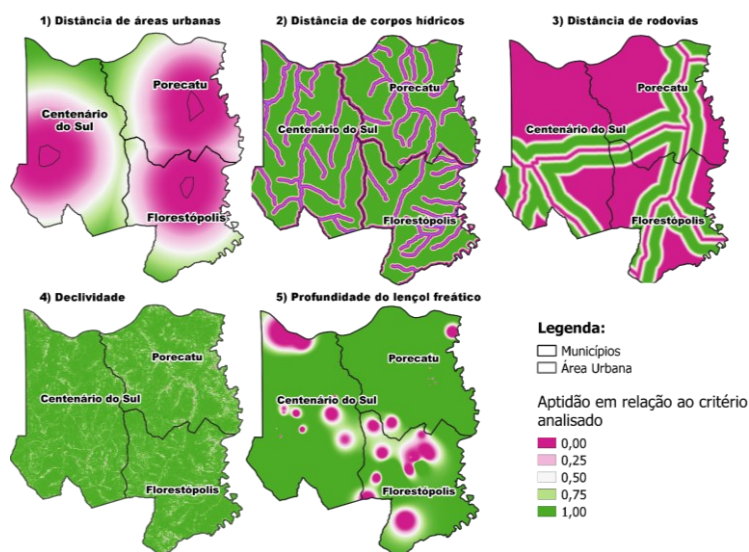
No que se refere à hidrografia, a região apresenta vários cursos d'água (Figura 4 – Mapa Geral), todos integrantes da Bacia do Rio Paranapanema, mais especificamente no Pontal do Paranapanema (CBH, 2022). A quantidade de corpos hídricos na região impacta na seleção das áreas, uma vez que a distância mínima permitida é 200 metros (PARANÁ, 2014).

Depois da geração dos mapas apresentados do pré-processamento, pôde-se realizar análises de proximidade para os critérios de distância de áreas urbanas, distância de rodovias e distância de cursos d'água.

MAPAS FUZZY

A partir da aplicação das funções sigmoidais crescente, decrescente e simétrica, apresentadas por Eastman (2001), gerou-se cinco mapas, que apresentam o potencial de aptidão da área de estudo para a implementação de um aterro sanitário de acordo com cada critério (Figura 5).

Figura 5 – Mapas fuzzy referente aos critérios: (1) Distância de áreas urbanas, distância de corpos hídricos (2), Distância de rodovias (3), Declividade (4) e Profundidade do lençol freático (5).



Fonte: Autoria própria (2023).

Em relação à distância das áreas urbanas dos municípios de Centenário do Sul, Porecatu e Florestópolis, percebe-se que a região de maior aptidão se encontra na divisa entre os três municípios, visto que, de acordo com a Resolução CEMA n° 94 de 2014 (PARANÁ, 2014), o aterro sanitário deve respeitar a distância mínima de 1.500 m dos núcleos populacionais, ou seja, as regiões dentro deste limite apresentaram aptidão nula.

No que se refere à distância de corpos hídricos todas as regiões com menos de 200 m de distância de cursos d'água são consideradas inaptas (PARANÁ, 2014). Evidencia-se como este critério é um fator limitante para a escolha de áreas potenciais, devido à hidrografia da região. Mesmo assim, existem áreas com potencial de aptidão máximo.

O potencial de aptidão em relação à distância de rodovias foi definido como máximo entre as distâncias de 1000 a 2000 m (função sigmoideal simétrica com patamar), de modo que o aterro não fique muito próximo, mas também não muito distante das vias, o que tornaria os custos de transporte maiores.

A declividade foi o critério com o menor número de áreas com potencial de aptidão nulo, pois como já foi explicitado, a região é predominantemente plana, com declividade entre 0 e 3%. Sendo assim, a maior parte da região possui aptidão entre 0,75 e 1,0.

Por fim, o critério de profundidade do lençol freático apresentou potencial máximo em grande parte dos municípios, exceto em pontos específicos (onde há registro do nível estático da água mais raso) há áreas inaptas em relação a esse critério. Porecatu foi o município que apresentou maior área com aptidão máxima na região.

Em seguida, foram estabelecidos os pesos conforme cada variável, para elaboração do mapa que apresente o potencial de aptidão final da região, considerando todos os critérios simultaneamente, por meio do Processo Analítico Hierárquico (AHP).

PROCESSO ANALÍTICO HIERÁRQUICO

Iniciou-se o AHP, método desenvolvido por Saaty (1990), pela determinação da matriz de comparação. Neste caso, a matriz utilizada foi a mesma utilizada foi baseada na proposta de Samizava et al. (2008), conforme Tabela 2.

Os autovetores calculados para cada variável, ou seja, o peso de cada critério, estão listados na Tabela 4.

Tabela 4 – Pesos finais de cada critério analisado

Critério	Peso
Distância de cursos d'água	0,304
Profundidade do Lençol Freático	0,262
Declividade	0,231
Distância de áreas urbanas	0,143
Distância de rodovias	0,061

Fonte: Autoria própria (2023).

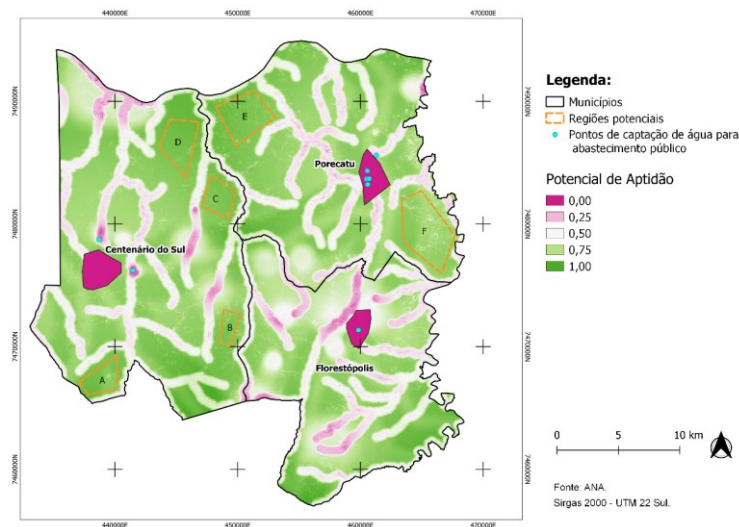
Nota-se que o critério com maior grau de importância é a distância de corpos hídricos, seguido pela profundidade do lençol freático, devido à matriz de comparação utilizada. Já a distância de rodovias foi o critério com menor peso.

Outros estudos semelhantes também utilizaram o método AHP para determinação de áreas potenciais para aterros sanitários. No trabalho de Andrade e Barbosa (2015), o critério de maior relevância foi a distância de núcleos populacionais, seguido da permeabilidade do solo. Weber e Hasenack (2000) obtiveram a declividade como variável de maior peso no projeto e a distância de rodovias como critério menos importante.

Batista, Dal Bosco e Moda (2018), Calijuri et al. (2002) e Samizava et al. (2008) são estudos em que a distância de corpos hídricos também prevaleceu como critério mais relevante. Essas referências exemplificam como a matriz de comparação e os critérios escolhidos podem influenciar na decisão para seleção de áreas potenciais a partir do método AHP.

Por fim, o último passo foi soma dos mapas fuzzy ponderada pelos pesos de cada critério. Esse processo resultou em um mapa final, sendo possível selecionar seis regiões, destacadas com polígonos de "A" a "F" na Figura 6, que possuem as maiores áreas e maiores potenciais de aptidão.

Figura 6 – Mapa final de potencial de aptidão e regiões potenciais



Fonte: Autoria própria (2023).

Realizou-se a análise das regiões a partir de imagens de satélite (Figura 7). Observa-se, em verde claro, as propriedades rurais dos municípios, obtidas por meio do Cadastro Ambiental Rural (CAR). Está presente também a área ocupada pelas trincheiras do aterro sanitário proposto, em escala. Nota-se que todas as regiões suportariam a área utilizada pelas trincheiras. Ressalta-se que essa representação do aterro considera apenas a área de disposição de resíduos, mas um aterro sanitário necessita de espaço para funcionários, refeitório, portaria, isolamento, balança, espaço para veículo, entre outros. Mesmo assim, por se tratar de grandes propriedades, todas as regiões estão aptas em termos de área para receber o aterro sanitário em questão.

Em relação à titularidade, as regiões que apresentam menor número de proprietários são as regiões C e B. A quantidade de proprietários dificulta a instalação do aterro sanitário, visto que quanto mais proprietários forem envolvidos, mais terrenos precisariam ser comprados, mais complexo é o processo de desapropriação, maior a burocracia de aquisição, entre outros fatores que elevam o custo de instalação de um aterro sanitário e podem resultar em maior morosidade. Segundo Júnior et. al (2003) a obtenção do local para instalar o aterro sanitário é um dos custos mais significativos associados à fase de planejamento de um aterro sustentável. Com o intuito de reduzir os gastos desta etapa de viabilização, a seleção de áreas prioriza terrenos pertencentes à prefeitura ou locais com baixo valor econômico.

As regiões E, F e B possuem grandes parcelas de vegetação nativa. Dessa forma, caso os municípios optassem por essas regiões haveria áreas que não poderiam ser utilizadas para a instalação do aterro sanitário, ou ainda requereriam processos de autorização para a supressão da vegetação. Nota-se também, que em nenhuma das regiões há a presença de moradias isoladas.

No que diz respeito à distância dos centros populacionais, as áreas apresentam as características listadas na Tabela 5. As áreas B e C apresentam maior equilíbrio em relação às distâncias, conforme a coluna de soma. A área F está muito distante de Centenário do Sul, que é o município com maior geração

de resíduos. Sendo assim, isso poderia inviabilizar essa área em função dos custos com o deslocamento dos resíduos.

Figura 7 – Mapa final de potencial de aptidão e regiões potenciais



Fonte: Autoria própria (2023).

Tabela 5 - Distância das áreas potenciais dos centros populacionais

Área	Distância de Centenário do Sul (km)	Distância de Florestópolis	Distância de Porecatu	Soma das distâncias
A	8,71	21,09	27,05	56,85
B	11,81	10,87	16,90	39,58
C	11,72	15,29	12,83	39,84
D	12,60	21,44	16,56	50,6
E	17,38	19,88	11,91	49,17
F	28,55	9,94	6,30	44,79

Fonte: Autoria própria (2023).

O último parâmetro analisado foi a proximidade dos mananciais de abastecimento público. Nota-se que todas as regiões estão distantes dos mananciais, conforme a Figura 7 e dados obtidos do SINIRH (ANA, 2022). Os pontos negativos e positivos de cada área estão sintetizados no Quadro 2.

Por fim, considerando-se as informações de distâncias da Tabela 5 e os pontos positivos e negativos listados no Quadro 2, entende-se que a área com maior potencial para implantação de um aterro sanitário consorciado para os municípios de Centenário do Sul, Florestópolis e Porecatu é a área C.

Quadro 2 –Pontos positivos e negativos das áreas selecionadas

Área	Pontos positivos	Pontos negativos
A	Ausência de vegetação e de moradias isoladas	Distante de Florestópolis e Porecatu.
B	Baixo número de proprietários, equilíbrio entre as distâncias dos municípios e ausência de moradias isoladas.	Presença de vegetação nativa que precisaria ser suprimida para atender às necessidades do projeto
C	Baixo número de proprietários, equilíbrio de distância dos municípios, ausência de vegetação e moradias isoladas	-
D	Ausência de vegetação e moradias isoladas.	Grande número de proprietários, distante de Florestópolis.
E	Ausência de moradias isoladas.	Grande número de proprietários, presença de vegetação nativa que precisaria ser suprimida para atender às necessidades do projeto, distante de Centenário do Sul e Florestópolis.
F	Ausência de moradias isoladas.	Grande número de proprietários, presença de vegetação nativa que precisaria ser suprimida para atender às necessidades do projeto, distante de Centenário do Sul.

Fonte: Autoria própria (2023).

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Constatou-se que o objetivo do trabalho foi atingido, visto que foram identificadas seis áreas potenciais, que atendem aos limites, exigências e orientações da Resolução CEMA nº 94 de 2014 (PARANÁ, 2014), NBR 13.896 (ABNT, 1997). Além disso, dimensionou-se a área necessária para disposição ambientalmente adequada dos RSU dos municípios, bem como fez-se uma comparação entre duas situações (real e ideal) de dimensionamento, a qual evidenciou a importância do correto gerenciamento dos resíduos para o aumento da vida útil do aterro sanitário, chegando à seleção das áreas potenciais anteriormente mencionadas.

Verificou-se que a aplicação dos métodos propostos permitiu a identificação de regiões com potencial de aptidão à implementação de um aterro sanitário, com base em múltiplos critérios, definidos de acordo com a projeção populacional, geração de resíduos e fatores ambientais definidos nas normas técnicas.

Para pesquisas futuras, recomenda-se a utilização de mais critérios durante a etapa da inferência fuzzy e AHP, a fim de complementar as exigências da legislação com conhecimentos geológicos, hidrogeológicos e de planejamento financeiro dos municípios.

Destaca-se que os dados geográficos utilizados são de pequena escala, ou seja, informações que abrangem grandes regiões, o que pode interferir na exatidão dos dados. Para maior precisão, recomenda-se trabalhar com ortofotos,

mapas com escalas maiores ou ainda com mapeamento topográfico aéreo, a partir da utilização de imagens de drones.

Por fim, ressalta-se que são necessários trabalhos de campo, prospecções de solo, determinação do lençol freático in loco, entre outras técnicas de engenharia, com o objetivo de definir com maior exatidão as áreas para a implementação do aterro sanitário.

Identification of areas with potential for the implementation of a consortium landfill in the municipalities of Centenário do Sul, Florestópolis, and Porecatu

ABSTRACT

The National Solid Waste Policy and the new legal framework for basic sanitation have established a maximum deadline for the end of improper disposal of urban solid waste by the year 2024, depending on the size of the municipality. In Paraná, 98 municipalities still have open dumps or controlled landfills (improper disposal), including Centenário do Sul, Florestópolis, and Porecatu. Therefore, the aim of this study is to select potential areas for the implementation of a consortium sanitary landfill for these municipalities. Criteria such as distance from water bodies, population centers, highways, slope, and groundwater depth were considered. Fuzzy inference was used to assign suitability values ranging from 0 to 1 for each criterion. Then, the Analytic Hierarchy Process was applied to assign weights to the variables and generate a synthesis map of the area's suitability for the landfill installation. Five regions with potential suitability greater than 0.75 were identified, with distance from water bodies and groundwater depth being the main criteria for area selection. The area more towards the center (Area C) shows the highest promise, considering its proximity to isolated residences, the area of influence of the public water supply, and land ownership.

KEYWORDS: Urban Solid Waste. Final Disposal of Solid Waste. Fuzzy Inference. Analytic Hierarchy Process.

REFERÊNCIAS

ABRELPE - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DAS EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS. Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2020. Disponível em: <https://abrelpe.org.br/panorama-2020/>. Acesso em: 09 maio. 2023.

ABRELPE - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DAS EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS. Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2023. Disponível em: <https://abrelpe.org.br/panorama/>. Acesso em: 09 maio. 2023.

ANDRADE, A. J. B.; BARBOSA, N. P. P. Combinação do método AHP e SIG na seleção de áreas com potenciais para a instalação de aterro sanitário: caso da ilha do fogo, na república de cabo verde. **Revista de Geografia (UFPE)**, Recife, 16 fev. 2015. v. 32, n. 2, p. 1–19. Disponível em: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/revistageografia/article/view/229156>.

ANDRADE, Sandro Antônio Godeiro. A pirâmide e seu volume. 2013. Dissertação (Mestrado Profissional em matemática) - Rede Nacional PROF MAT CCEN-UFPB, João Pessoa, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 13.896: Aterros de resíduos não perigosos - Critérios para projeto, implantação e operação. Rio de Janeiro: ABNT, 1997.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 8419: Apresentação de projetos de aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos. Rio de Janeiro: ABNT, 1992.

BATISTA, L. F. A.; MODA, R. F.; DAL BOSCO, T. C. Estimativa de geração de resíduos sólidos e uso de técnicas de geoprocessamento para identificação de áreas potenciais de disposição final. In: ANAP (Ed.). Saneamento e o Ambiente. 1. ed. Tupã: ANAP, 2018. p. 165–181.

BRASIL. Decreto nº 10.936, de 12 de janeiro de 2022b. Regulamenta a Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010, que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos. Diário Oficial da República Federativa do Brasil: Poder executivo, Brasília, 12 jan. 2022. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2019-2022/2022/Decreto/D10936.htm. Acesso em: 24 maio 2022.

BRASIL. Lei n.º 12.305. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos. Diário Oficial da República Federativa do Brasil, Poder Executivo, Brasília, DF, 2 ago.2010. 2010. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm. Acesso em: 17 maio. 2022.

BRASIL. Lei nº 14.026, de 15 de junho de 2020. Atualiza o marco legal do saneamento básico. Diário Oficial da República Federativa do Brasil: Poder executivo, Brasília, 15 jun. 2020. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2019-2022/2020/lei/l14026.htm. Acesso em: 24 maio 2022.

BRASIL. Plano Nacional de Resíduos Sólidos. 1. ed. Brasília: Ministério do Meio Ambiente e Secretaria de Qualidade Ambiental, 2022a.

CBH – COMITÊ DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO PARANAPANEMA. Caracterização Geral. CBH. Disponível em < <https://www2.paranapanema.org/abacia/mapas/#>>. Acesso em: 10 de outubro de 2022.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DE MUNICÍPIOS. Observatório dos lixões, 2022. Página Inicial. Disponível em:< <http://www.lixoes.cnm.org.br/>> Acesso em: 24/05/2022.

EASTMAN, J. Ronald. IDRISI 32: Guide to GIS and image processing. Clark University, 1999.

EASTMAN, J. Ronald. IDRISI 32: Guide to GIS and image processing. Clark University, 2001.

JUNIOR, C.; BORGES, A. Resíduos sólidos urbanos: aterro sustentável para municípios de pequeno porte. Projeto Prosab, 2003.

LAGO, A. L.; ELIS, V. R.; GIACHETI, H. L. Aplicação integrada de métodos geofísicos em uma área de disposição de resíduos sólidos urbanos em Bauru-SP. **Revista Brasileira de Geofísica**, v. 24, n. 3, set. 2006.

LUIZ, G. C. Política nacional de resíduos sólidos: uma análise da gestão em municípios de pequeno porte. Santa Maria. Disponível em: <https://repositorio.ufsm.br/handle/1/15232>. Acesso em: 09 maio. 2023.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. SINIR +, 2022. Página Inicial. Disponível em: <https://sinir.gov.br/>. Acesso em: 24 de maio de 2022.

MOREIRA, F. R. et al. Inferência geográfica e suporte à decisão. São José dos Campos. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2001.

OBLADEN, N. L.; OBLADEN, N. T. R.; DE BARROS, ALIM. K. R. Guia para Elaboração de Projetos de Aterros Sanitários para Resíduos Sólidos Urbanos. 1. ed. Conselho Regional de Engenharia e Agronomia do Paraná, 2009. v. 3.

PARANÁ. Resolução CEMA nº 094, de 04 de novembro de 2014. Casa Civil do Governo do Estado do Paraná, Curitiba, PR. Disponível em: https://celepar7.pr.gov.br/sia/atosnormativos/form_cons_ato1.asp?Codigo=2880. Acesso em: 09 de maio de 2023.

SAATY, T. L. How to make a decision: The analytic hierarchy process. **European Journal of Operational Research**, v. 48, n. 1, p. 9–26, set. 1990.

SAMIZAVA, T. M. et al. SIG aplicado à escolha de áreas potenciais para instalação de aterros sanitários no município de Presidente Prudente - SP. **Revista Brasileira de Cartografia**, n. 60, p. 43–55, abr. 2008.

SANTOS, H. G. et al. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 5. ed. Brasília: EMBRAPA, 2018.

SNIS. **Diagnóstico Temático Manejo de Resíduos Sólidos Urbanos**. 1. ed. Brasília: Ministério do Desenvolvimento Regional, 2021. v. 1

SUZUKI, J. A. N.; GOMES, J. Consórcios intermunicipais para a destinação de RSU em aterros regionais: estudo prospectivo para os municípios no Estado do Paraná. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 14, n. 2, p. 155–158, jun. 2009.

VIANA, F. L. F. M. et al. Proposta de pré-projeto de dimensionamento de aterro sanitário para o município de Esperantinópolis – MA. **Brazilian Journal of Development**, v. 6, n. 3, p. 11862–11891, 2020.

ZADEH, L.A. Fuzzy sets. **Information and Control**, v. 8, n. 3, 1965. p.338-353.

SAMIZAVA, Tiago Matsuo et al. SIG aplicado à escolha de áreas potenciais para instalação de aterros sanitários no município de Presidente Prudente – SP. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 1, n. 60, p. 43-55, 2008. Disponível em: <https://www.revistas.usp.br/revistacartografia/article/view/131312>. Acesso em: 09 maio 2023.

Recebido: 05 ago. 2023

Aprovado: 05 jun. 2024

DOI: 10.3895/rbgeo.v12n1.17419

Como citar: PAIVA, G. V.; BATISTA, L. F. A.; BOSCO, T. C. D.. Identificação de áreas com potencial para implantação de aterro sanitário consorciado nos municípios de Centenário do Sul, Florestópolis e Porecatu.

R. bras. Geom., Curitiba, v. 12, n. 1, p. 119-139, jan./jun. 2024. Disponível em:

<<https://periodicos.utfpr.edu.br/rbgeo>>. Acesso em: XXX.

Correspondência:

Giovanni Vanzela Paiva

Av. dos Pioneiros, 3131, CEP 86036-370, - Londrina, Paraná, Brasil.

Direito autoral: Este artigo está licenciado sob os termos da Licença Creative Commons-Atribuição 4.0 Internacional.

