

Trabalho de Formatura

Curso de Graduação em Engenharia Ambiental

**ANÁLISE DA APTIDÃO À IMPLANTAÇÃO DE ATERROS SANITÁRIOS NA
REGIÃO METROPOLITANA DE PIRACICABA A PARTIR DE SÍNTESE POR
MULTICRITÉRIOS**

Helena Hermenegildo Barato

Prof. Dr. Danilo Marques de Magalhães

Rio Claro (SP)

2025

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Instituto de Geociências e Ciências Exatas

Câmpus de Rio Claro

HELENA HERMENEGILDO BARATO

ANÁLISE DA APTIDÃO À IMPLANTAÇÃO DE ATERROS
SANITÁRIOS NA REGIÃO METROPOLITANA DE
PIRACICABA A PARTIR DE SÍNTESE POR
MULTICRITÉRIOS

Trabalho de Formatura apresentado ao
Instituto de Geociências e Ciências Exatas -
Câmpus de Rio Claro, da Universidade
Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, para
obtenção do grau de Engenheiro Ambiental.

Rio Claro – SP

2025

B226a	Barato, Helena Hermenegildo Análise da aptidão à implantação de aterros sanitários na Região Metropolitana de Piracicaba a partir de síntese por multicritérios / Helena Hermenegildo Barato. -- Rio Claro, 2025 57 p. : il. Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado - Engenharia Ambiental) - Universidade Estadual Paulista (UNESP), Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Rio Claro Orientador: Danilo Marques de Magalhães 1. resíduos sólidos urbanos. 2. aterros sanitários. 3. análise de multicritérios. 4. tomada de decisão. 5. sistema de informações geográficas. I. Título.
-------	--

HELENA HERMENEGILDO BARATO

ANÁLISE DA APTIDÃO À IMPLANTAÇÃO DE ATERROS
SANITÁRIOS NA REGIÃO METROPOLITANA DE
PIRACICABA A PARTIR DE SÍNTESE POR
MULTICRITÉRIOS

Trabalho de Formatura apresentado ao
Instituto de Geociências e Ciências Exatas -
Câmpus de Rio Claro, da Universidade
Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, para
obtenção do grau de Engenheiro Ambiental.

Comissão Examinadora

Danilo Marques de Magalhães (Orientador)

Lucilia do Carmo Giordano

Maria Luisa Nerys de Moraes Carneiro

Rio Claro, 10 de Junho de 2025.

Assinatura do(a) aluno(a)

assinatura do(a) orientador(a)

AGRADECIMENTOS

Gostaria de expressar minha profunda gratidão a todos que contribuíram para a realização deste trabalho. Primeiramente, agradeço ao meu orientador Prof. Dr. Danilo Marques de Magalhães pela orientação e, por sempre ter sido muito atencioso e paciente ao longo deste tempo. Agradeço também os membros da banca, por dedicarem seu tempo e expertise na análise deste trabalho, contribuindo com valiosas sugestões e críticas construtivas.

Agradeço ao meu pai, Ricardo e à minha saudosa mãe, Lindomar, por todos os ensinamentos de vida que contribuíram para a construção dos valores morais que alicerçam minha vida, pelo apoio e amor incondicional. Aos meus irmãos, Cassiano e Leonardo, por todo carinho, apoio e companheirismo. E aos meus avós, Odete e Pércio, pelos exemplos de força, superação e pelo apoio.

Agradeço a república Na Boa e meus amigos, pela amizade genuína de longa data e por proporcionarem momentos incríveis e de muito aprendizado durante o curso, sobretudo pelo encorajamento e compreensão durante os desafios enfrentados.

Por fim, agradeço a Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" pela oportunidade de cursar a Graduação de Engenharia Ambiental e a todos os professores e funcionários que se dedicaram e contribuíram para minha formação.

Muito obrigada!

RESUMO

O crescimento da geração de resíduos sólidos urbanos no Brasil, especialmente na Região Sudeste, intensifica a necessidade de ampliação ou implantação de aterros sanitários. Neste contexto, o presente trabalho teve como objetivo identificar áreas aptas para a implantação de aterros sanitários na Região Metropolitana de Piracicaba (RMP), utilizando geoprocessamento e análise multicritério. Foram aplicadas as metodologias Processo Analítico Hierárquico (AHP) e Lógica Booleana, fundamentadas em critérios técnicos, ambientais e legais. Como resultado, apenas 22,3% do território da RMP foi considerado como área útil para essa finalidade, após a exclusão das áreas restritas. Desse restante, 9,76% (76.727,16 ha) correspondem as áreas contíguas e classificadas como boa, muito boa e ótima. Os cálculos realizados apontaram que a área mínima necessária de um aterro sanitário com vida útil de 25 anos para atender a RMP é de 85,67 ha. O mapa final de aptidão indicou que as áreas com maior potencial se concentram em regiões de uso antrópico, com solos argilosos, geologia favorável, declividade entre 1% e 8% e localizadas a distâncias seguras de recursos hídricos, áreas urbanas e de unidades de conservação. O estudo contribui para o planejamento territorial da RMP e pode subsidiar futuras revisões do Plano de Desenvolvimento Urbano Integrado (PDUI), além de orientar a formação de consórcios intermunicipais para gestão integrada de resíduos.

PALAVRAS-CHAVE: resíduos sólidos urbanos, aterros sanitários, análise de multicritérios, tomada de decisão, sistema de informações geográficas

ABSTRACT

The increase in municipal solid waste generation in Brazil, particularly in the Southeast Region, highlights the need to expand or implement sanitary landfills. In this context, the present study aimed to identify suitable areas for the installation of sanitary landfills in the Metropolitan Region of Piracicaba (RMP), using geoprocessing and multicriteria analysis. The Analytical Hierarchy Process (AHP) and Boolean Logic methodologies were applied, based on technical, environmental, and legal criteria. As a result, only 22,3% of the RMP territory was considered usable for this purpose after the exclusion of restricted areas. Of this remaining portion, 9,76% (76.727,16 ha) corresponds to contiguous areas classified as good, very good, or excellent. Calculations indicated that the minimum area required for a sanitary landfill with a 25-year lifespan to serve the RMP is 85,67 ha. The final suitability map showed that the most favorable areas are concentrated in anthropized regions, with clay soils, favorable geological formations, slopes between 1% and 8%, and located at safe distances from water resources, urban areas, and conservation units. This study contributes to the territorial planning of the RMP and may support future revisions of the Integrated Urban Development Plan (PDUI), as well as guide the formation of intermunicipal consortia for integrated waste management.

KEYWORDS: municipal solid waste, sanitary landfills, multi-criteria analysis, decision-making, geographic information system.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Localização da Área de Estudo.....	23
Figura 2: Fluxograma das etapas para sintetização do mapa final.	34
Figura 3: Mapa de Geologia e Uso e Ocupação do Solo na RMP.....	40
Figura 4: Mapa de Pedologia e Declividade na RMP.....	41
Figura 5: Mapa de Distância das Áreas Urbanas, Hidrografia e Áreas de Preservação Permanente.	42
Figura 6: Mapa da Distância das Vias de Acesso e delimitação das ASA e UC de Proteção Integral na RMP.....	43
Figura 7: Mapa de Aptidão para Implantação de Aterros Sanitários na RMP.....	46
Figura 8: Quantificação da área restrita e da área útil para instalação de aterro sanitário.	47

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Classificação, descrição e fonte dos critérios utilizados.....	24
Tabela 2: Classes de declividade proposto pela EMBRAPA, 1979.....	29
Tabela 3: Escala fundamental de comparação paritária do método AHP de Saaty (1991).....	31
Tabela 4: Matriz de comparação pareada.	32
Tabela 5: Índice Randômico	33
Tabela 6: Modelo matemáticos.....	35
Tabela 7: Dados do censos do IBGE e os modelos matemáticos utilizados para a projeção. .	36
Tabela 8: Pesos e notas atribuídas aos critérios escalonados.....	44
Tabela 9: Notas atribuídas aos critérios restritivos.	45
Tabela 10: Massa de resíduos sólidos gerados e área mínima para aterro sanitário.....	48

LISTA DE ABREVIACÕES

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABRELPE	Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais
ABREMA	Associação Brasileira de Resíduos e Meio Ambiente
AHP	Análise Hierárquica de Processos
APP	Área de Preservação Permanente
ASA	Área de Segurança Aeroportuária
CETESB	Companhia Ambiental do Estado de São Paulo
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
CPRM	Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais
DAEE	Departamento de Águas e Energia Elétrica
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa e Agropecuária
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IR	Índice Randômico
MMA	Ministério do Meio Ambiente
NBR	Norma Brasileira
NDVI	Índice de Vegetação por Diferença Normalizada
PCS	Programa de Cidades Sustentáveis
PDUI	Plano de Desenvolvimento Urbano Integrado
PNRS	Política Nacional de Resíduos Sólidos
RM	Região Metropolitana
RMP	Região Metropolitana de Piracicaba
RSU	Resíduos Sólidos Urbanos
SIG	Sistema de Informações Geográficas
SIAGAS	Sistema de Informações de Águas Subterrâneas
SNIS	Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento
SNUC	Sistema Nacional de Unidades de Conservação da Natureza
UC	Unidade de Conservação
UGRHI	Unidade de Gerenciamento de Recursos Hídricos

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	11
2 OBJETIVOS	13
3 REFERENCIAL TEÓRICO	14
3.1. Aspectos Legais e Normativos	14
3.2. Planejamento Territorial Regional	18
3.3. Tecnologias de Geoinformação e Análise de Multicritérios	20
4 MATERIAIS E MÉTODOS	22
4.1. Localização e Caracterização da Área de Estudo	23
4.2. Tratamento de Dados e Atribuição das Notas	24
4.3. Síntese por Multicritérios	30
4.4. Projeção da população, resíduos sólidos urbanos e cálculo da área mínima para Aterro Sanitário	35
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES	37
5.1. Mapeamento dos Critérios de Análise	38
5.2. Síntese por Análise de Multicritérios	44
6 CONCLUSÕES	50
REFERÊNCIAS	52

1 INTRODUÇÃO

Em 2023, o Brasil gerou cerca de 81 milhões de toneladas de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU), o que corresponde a mais de 221 mil toneladas por dia e aproximadamente 382 kg por habitante ao ano (ABREMA, 2024). A média nacional de geração per capita é de 1,047 kg por habitante ao dia, variando entre as regiões. A Região Sudeste se destaca com o maior índice de 1,237 kg por habitante ao dia (ABREMA, 2024).

Essa discrepância está relacionada ao maior desenvolvimento socioeconômico e às atividades predominantes na região, como é apontado por Soares (1999, p. 123), que afirma que “o lixo reproduz os valores de um grupamento social, sendo o reflexo de suas atividades cotidianas, demonstrando, em sua composição, o grau de desenvolvimento desse grupo.” Além disso, atualmente a sociedade se caracteriza pelo consumo desenfreado, em que a compra ocorre por impulso, por ansiedade, por busca da felicidade e desejo de acúmulo de bens materiais que consequentemente intensificam a problemática da geração de resíduo sólidos e seu descarte (Fernandes; Silva; Moura, 2016).

Do total de RSU gerados no país, a Região Sudeste é responsável por 49,3%, o que equivale aproximadamente a metade do volume total. Além dos hábitos de consumo, esse percentual é fortemente influenciado pela densidade populacional das regiões analisadas por uma relação de proporcionalidade, ou seja, maior número de pessoas tende a gerar mais resíduos sólidos (Blasius, 2023; Conceição; Teixeira, 2021).

De acordo com o Censo de 2022, a região em questão concentra o maior número de habitantes em comparação às demais (IBGE, 2022). Além disso, com a publicação dos dados censo de 2022, realizado pelo IBGE, constatou-se que a população brasileira cresceu 6,5% desde o último levantamento demográfico realizado em 2010 (Bolzani; Martins, 2023). E ainda, as projeções do IBGE revelam que o crescimento populacional continuará até 2041, momento em que o Brasil atingirá o pico de 220 milhões de habitantes e, a partir de 2042 ocorrerá uma redução devido a queda da taxa de fecundidade (Cypreste, 2024).

Em consonância ao crescimento populacional, a geração de resíduos sólidos também tende a aumentar (Conceição; Teixeira, 2021). Vale destacar que a forma como a sociedade consome e a geração de seus resíduos está diretamente ligado ao seu grau de educação ambiental, assim, o volume pode variar para determinados indivíduos (Freitas, 2020).

Entretanto, os dados das edições recentes do Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil expressaram o acréscimo no índice de geração per capita, em que 2022 era 1,040 kg/hab./dia e passou a ser 1,047 kg/hab./dia em 2023. (ABREMA, 2023; ABREMA, 2024).

Nesse sentido, todo o volume de resíduos sólidos deve receber a destinação ambientalmente adequada (ABREMA, 2024). Os rejeitos, definidos pela Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) como resíduo sólido que não possui possibilidade de tratamento ou recuperação economicamente viável, ou seja, uma parcela não recuperável, deve ser encaminhado ao aterro sanitário (SNIS, 2022). Os resíduos úmidos como matéria orgânica podem ser encaminhados à compostagem ou biodigestores, enquanto os resíduos secos podem ser reciclados promovendo a economia circular, porém ainda grande parte deles são destinados no aterro sanitário junto com os rejeitos (SNIS, 2022; Brasil, 2010).

A PNRS, estabelecida pela Lei nº 12.315/2010 e regulamentada pelo Decreto nº 10.936/2022, considera o aterro sanitário adequado para a distribuição ordenada de rejeitos. Isso porque, o aterro sanitário é uma obra da engenharia que tem como principal objetivo dispor os resíduos sólidos no solo, de forma segura e controlada, garantindo a higiene e a saúde pública (Fonseca, 1999).

A destinação inadequada de resíduos sólidos caracteriza-se como uma problemática e causa danos ao meio ambiente, pois através do lixiviado produzido pela decomposição da matéria orgânica e dos gases emitidos, como o metano, podem contaminar o solo, a água, o ar e, consequentemente afetar a saúde pública (Andrade; Jesus; Lins, 2023).

Diante do exposto, os aterros sanitários são projetados para evitar a contaminação do solo, da água e do ar. Eles possuem sistemas de impermeabilização na base para impedir a infiltração de líquidos, sistemas de drenagem para o chorume e mecanismos de captação de gases. Isso garante o controle do chorume e dos gases e promove segurança aos recursos naturais (Perroni, 2021).

Embora o aterro sanitário possa trazer segurança e receber inúmeras toneladas de resíduos sólidos, um fato importante a ser destacado é a sua limitação da vida útil, que é reduzida conforme ocorre a disposição. Dessa maneira, existe a necessidade em ampliar os aterros sanitários já existentes para que funcionem e recebam resíduos por mais tempo ou instalar um novo aterro sanitário em uma nova área (Blasius, 2023).

Por conseguinte, para a instalação de um novo aterro sanitário, deve-se em primeiro momento escolher o local ideal (Pinheiro *et al.*, 2019). Os estudos de alternativas locais com uso dos Sistemas de Informação Geográfica (SIG) visam identificar e avaliar diferentes opções de localização para a implementação de empreendimentos ou projetos, considerando fatores ambientais, socioeconômicos e técnicos (Furlanetto, 2012).

O uso de SIG, apoiado por sensoriamento remoto e ferramentas de geoprocessamento possibilita a análise e integração de dados ambientais provenientes de diversas fontes. Isso permite a avaliação conjunta dos mesmos, proporcionando suporte ao processo de tomada de decisão da melhor alternativa locacional (Longley *et al.*, 2013).

Ademais, a literatura especializada demonstra que a utilização de análises multicritérios, em ambiente SIG, contribui para a identificação das zonas mais ou menos favoráveis à instalação de aterro sanitário, sendo valiosas ferramentas de suporte ao planejamento territorial. Cita-se o trabalho de Purificação (2020) que analisou a possibilidade de instalação de aterro sanitário, na Região Metropolitana de Salvador; Barros *et al.*, (2024) que aplicou o método Processo Analítico Hierárquico (AHP) combinado com a lógica booleana para o município Camaçari – BA; e Blasius (2023), por sua vez, combinou AHP e a lógica fuzzy para o mesmo objetivo em Araras-SP.

Diante do exposto, este trabalho propõe uma análise das áreas aptas da Região Metropolitana de Piracicaba para a instalação de aterros sanitários. Considerando que a região foi recentemente institucionalizada pela Lei Complementar nº 1.360, de 24 de agosto de 2021, acredita-se que este estudo possa contribuir para o planejamento e gestão territorial em relação à gestão dos resíduos sólidos. A escolha dessa área de estudo se justifica não apenas pelo fato de abrigar 1,5 milhão de habitantes e estar inserida na região em que apresenta o maior índice de geração de resíduos sólidos, mas, principalmente, pela ausência da indicação de localizações favoráveis para empreendimentos dessa tipologia no Plano de Desenvolvimento Urbano Integrado da RMP (PDUI, 2021; ABREMA, 2023). Como produto deste trabalho, é apresentado um mapa de aptidão para a implantação de aterros sanitários na RMP.

2 OBJETIVOS

O presente trabalho tem como objetivo principal identificar as áreas favoráveis para a implantação de aterro sanitário na Região Metropolitana de Piracicaba a partir da análise de fatores ambientais e legais que orientam a implantação de empreendimentos dessa tipologia.

Para alcançar esse propósito, busca-se, especificamente, estudar a aplicabilidade do método AHP e da Lógica Booleana por meio de ferramentas de geoprocessamento; organizar um banco de dados geoespaciais de modo a caracterizar os critérios essenciais envolvidos na escolha locacional de um aterro sanitário; atribuir notas e definir pesos aos critérios para qualificar a aptidão das áreas; e, calcular a área mínima necessária para a implantação de um aterro sanitário regional.

3 REFERENCIAL TEÓRICO

Este capítulo aborda o referencial teórico que sustenta a análise para a seleção de áreas aptas à instalação de aterros sanitários. A primeira seção trata dos aspectos legais e normativos que definem critérios técnicos e restrições legais utilizados.

A segunda está voltada planejamento territorial regional, destacando a importância de instrumentos como planos diretores, planos de desenvolvimento regional e consórcios intermunicipais, que orientam o uso e ocupação do território e promovem a gestão integrada de resíduos sólidos.

Por fim, a terceira discorre sobre as tecnologias da geoinformação, como os Sistemas de Informação Geográfica (SIG), o Sensoriamento Remoto e o Geoprocessamento, que desempenham papel estratégico na análise multicriterial para identificação de áreas favoráveis à instalação de aterros sanitários.

3.1. Aspectos Legais e Normativos

A ABNT NBR 13.896/1997 define um conjunto de critérios ambientais, infraestruturais e econômicos que orientam a criação de aterros sanitários. Dentre eles, merece destaque a topografia, que deve ter declividade superior a 1% e inferior a 30%, uma vez que é fator determinante na escolha dos métodos construtivos e nas obras de terraplanagem. Melo (2001) reforça essa noção ao observar que fatores topográficos podem influenciar em maiores problemas ambientais.

As áreas de alta declividade são consideradas complexas, pois dificultam o processo de construção e operação do aterro, além de contribuir para o escoamento superficial e intensificação dos processos erosivos (Rezende *et al.*, 2015). Além disso, Magalhães (2001),

explica que as áreas planas apresentam maior probabilidade de alagamento e inundações do que áreas escarpadas, o que indica que as áreas com declividades mínimas devem ser evitadas para a construção de aterros.

Nesse sentido, é relevante considerar a proposta da EMBRAPA (1976) para a classificação das formas de relevo para guiar a escolha dos cenários ideais para a implantação de aterros sanitários, já que há uma orientação bem clara da relação entre as formas de relevo e as faixas de declividade.

Além da topografia, a ABNT NBR 13.896/1997 apresenta outros fatores como geologia, pedologia, recursos hídricos, vegetação, acessos, distância mínima em relação a núcleos populacionais e restrições específicas relacionadas ao uso do solo que desempenham um papel fundamental na escolha de áreas adequadas para a implantação dessas estruturas.

A geologia e a pedologia da área influenciam diretamente na prevenção de contaminações ambientais (Melo, 2001; Azevedo; Barbosa, 2021). Segundo a norma, o local deve possuir um depósito natural e homogêneo, de baixa permeabilidade e zona não saturada com espessura superior a 3 metros para minimizar o risco de infiltração de lixiviados no solo e contato com a água subterrânea.

Assim, é importante incluir o nível do lençol freático e sua profundidade como um critério a ser analisado, de forma a garantir a segurança ambiental (Reichert *et al.*, 1998). Inclusive, alguns aterros sanitários, em suas fases iniciais de instalação, passam por procedimentos de rebaixamento do nível do lençol freático, para evitar o possível contato do recurso hídrico com o lixiviado (ib. id).

Ademais, as rochas e solos argilosos de baixa permeabilidade são preferíveis por sua capacidade de retenção de líquidos (Melo, 2001). Nesse contexto, salienta-se que o substrato arenoso, o qual é mais permeável e permite a rápida infiltração eleva o risco à contaminação e, portanto, se torna pouco interessante para o fim pretendido (Brady *et al.*, 2017)

Os recursos hídricos também representam um critério determinante, pois a proximidade de corpos d'água superficiais ou subterrânea pode elevar o risco de contaminação por chorume (Rezende; Leite; Carrielo, 2015). A norma estabelece que aterros sanitários não devem ser instalados em zonas úmidas ou próximos a cursos d'água, de forma a garantir a proteção da qualidade da água e estabelece a distância mínima de 200 m dos corpos hídricos. Ainda, Blasius

(2023) defende que, quanto maior a distância, mais adequado é a operação da atividade de disposição de resíduos bem como garante maior segurança do recurso em questão.

No que se refere à vegetação, segundo a norma, ela pode atuar favoravelmente na escolha de uma área quanto aos aspectos de redução do fenômeno de erosão, da formação de poeira e transporte de odores. Entretanto, torna-se relevante considerar que a área de estudo está situada nos Biomas de Mata Atlântica e Cerrado, os quais foram demasiadamente alterados pela ocupação antrópica e, atualmente, estão incluídos na lista de *hotspots* organizada pela *Conservation International*, que estabeleceu as regiões mais biodiversas e mais ameaçadas (SEDEMA, 2020).

Além do mais, de acordo com o IPT (2010), para a instalação de aterros sanitários é preferível áreas de baixa composição florestal, desflorestamento ou sob influência de processos antropogênicos. Dessa forma, para se identificar as áreas com vegetação, o estudo do uso e cobertura do solo é de suma importância e permite visão ampliada do terreno a ser analisado e as possíveis vulnerabilidades ambientais (Rezende *et al.*, 2015).

A infraestrutura de acessos é outro critério crucial a ser analisado para a escolha de um local adequado para a instalação de um aterro sanitário (Rezende; Leite; Carrielo, 2015). É importante que as vias sejam próximas ao empreendimento, para maior praticidade e redução de custos logísticos, uma vez que serão utilizadas diariamente durante a operação, porém também não devem ser muito próximas para minimizar impactos visuais e problemas no tráfego (ABNT, 1997; Azevedo; Barbosa, 2021).

A distância mínima de 500 metros de núcleos populacionais também deve ser respeitada, pois essa distância consegue minimizar a rejeição da sociedade, como também a desvalorização das propriedades, problemas com odores e vetores, além de impactos à saúde pública (Azevedo; Barbosa, 2021). Para Felicori *et al.*, 2016, a distância de aptidão máxima das áreas urbanas é de no máximo 10.000 m, sendo considerado o intervalo de 2.000 m a 8.000 m de melhor aptidão, pois maiores distâncias das fontes geradoras de resíduos, aumentam os custos logísticos.

Ainda, a norma apresenta outros critérios que entram no campo financeiro, bem como exigem trabalhos em campo para a verificação de parâmetros físicos do solo. Esses critérios, não são, portanto, considerados nesse trabalho, pois trata-se de uma investigação baseada em dados secundários e por meio de técnicas empregadas em SIG, o que nos permite indicar potenciais áreas aptas para a instalação de um aterro sanitário.

Além dos critérios apresentados pela ABNT NBR 13.896/1997, há áreas consideradas restritas a alocação do empreendimento por critérios legais (Carvalho *et al.*, 2019). Dessa maneira, a Lei nº 12.651, de 25 de maio de 2012, mais conhecida como o Código Florestal, define que são consideradas Áreas de Preservação Permanente (APP) as faixas de:

- 30 metros, para os cursos d'água de menos de 10 metros de largura; 50 metros, para os cursos d'água que tenham de 10 a 50 metros de largura; 100 metros, para os cursos d'água que tenham de 50 a 200 metros de largura; 200 metros, para os cursos d'água que tenham de 200 a 600 metros de largura; 500 metros, para os cursos d'água que tenham largura superior a 600 metros.

Para áreas ao entorno de lagos e lagoas naturais, largura mínima de:

- 100 metros, em zonas rurais, exceto para o corpo d'água com até 20 hectares de superfície, cuja faixa marginal será de 50 metros; 30 metros, em zonas urbanas; as áreas no entorno das nascentes e dos olhos d'água perenes, qualquer que seja sua situação topográfica, no raio mínimo de 50 metros; as encostas ou partes destas com declividade superior a 45°, equivalente a 100% na linha de maior declive; as áreas em altitude superior a 1.800 (mil e oitocentos) metros, qualquer que seja a vegetação. (Brasil, 2012).

Outra importante restrição se refere à proximidade de aeródromos, conforme estabelecido pela Resolução CONAMA nº 4, de outubro de 1995 que dispõe a proteção de áreas ao entorno de aeródromos da implantação de atividades de “foco de atração de pássaros”. E tendo em mente que os riscos associados aos aterros sanitário, quando mal gerenciados, como atrair animais em busca pelo alimento em decomposição, inclusive urubus e outras aves, restringe-se o uso para tal atividade (Silva, 2024).

Nesse sentido, define-se a Área de Segurança Aeroportuária Civil (ASA), uma área com restrição à ocupação, que são divididas em duas categorias:

- Raio de 20 Km para aeroportos que operam de acordo com as regras de voo por instrumento (IFR);
- Raio de 13 Km para os demais aeródromos.

Além desses dois critérios restritivos já apresentados, há a Lei nº 9.985 de 18 de Julho de 2000 que instituiu o Sistema Nacional de Unidades de Conservação (SNUC) e define as Unidade de Conservação como espaços territoriais, incluindo seus recursos naturais e águas jurisdicionais, com características relevantes, legalmente instituída pelo Poder Público com o objetivo de conservar sob o regime de administração, ao qual se aplicam garantias adequadas de proteção.

O SNUC separa as unidades de conservação em dois grupos a depender do seu uso, sendo as Unidades de Proteção Integral, as quais possuem regulamentos mais restritos e

voltadas para a pesquisa e conservação da biodiversidade e, as Unidades de Uso Sustentável, com menos restrições voltadas para visitação e atividade educativas, além de permitir atividades de exploração de recursos naturais de forma sustentável mediante licenciamento ambiental e autorização do órgão responsável (MMA, 2025).

Tais critérios abordados por leis e normas, contribuem para o planejamento territorial, pois regulamentam especificações a serem seguidas e respeitadas na necessidade de se utilizar determinada área para a instalação de um aterro sanitário, ou seja, há a regulação do uso do solo por meio delas.

3.2. Planejamento Territorial Regional

Souza e Rodriguês (2004) afirmam que o planejamento representa o meio pelo qual o ser humano busca antecipar o desenvolvimento de um fenômeno ou processo e, com base nesse entendimento, procura prevenir eventuais problemas e dificuldades. Para Rezende (2006), planejar é uma atividade complexa e multidisciplinar, principalmente quando se trata do espaço geográfico, moldado pela atuação de diversos agentes sociais, cujos interesses são, em grande parte, distintos e frequentemente conflitantes.

Pontes (2013) aponta que o planejamento é constituído por três elementos fundamentais: planos, programas e ações. Esses elementos oferecem suporte à tomada de decisões e à alocação de recursos, sobretudo, na infraestrutura para a população. Nesse contexto, é fundamental que haja planejamento voltado ao desenvolvimento urbano, especialmente no que diz respeito ao saneamento básico, à mobilidade e ao transporte, à redução da pobreza e à regulação do uso e ocupação do solo (Silva, 2016)

Destarte, torna-se evidente a necessidade de um planejamento eficaz para a gestão de resíduos sólidos, uma vez que está diretamente relacionado às questões de saneamento básico e saúde pública (Silva, 2016). A Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) destaca o planejamento como parte essencial na elaboração de planos de gestão, uma vez que enfatiza a necessidade de garantir uma localização adequada de unidades de tratamento e disposição final de rejeitos (Brasil, 2010)

Alguns autores já abordaram o conceito de planejamento territorial, como por exemplo o Vasconcellos (2000), o qual afirmou que o planejar define a forma como o espaço deve ser ocupado para os diversos fins. De forma complementar, Philippi Jr., Bruna e Silveira (2005),

explicam que o planejamento territorial possibilita maior compreensão do processo de ocupação do espaço e dos recursos de infraestrutura, como o saneamento básico. Essa característica fez com que o tema passasse a integrar agendas de pesquisa e políticas públicas no Brasil.

Reitera-se, portanto, que o planejamento territorial para políticas públicas deve adotar uma visão estratégica, visando à otimização dos recursos e dos esforços do poder público, de modo a assegurar o acesso e a oferta efetiva dos serviços básicos à população (Silva, 2016).

A visão do planejamento territorial abordada anteriormente por Vasconcellos (2000) dialoga com Constituição Brasileira de 1988, que definiu, dentre as competências da União, elaborar e executar planos nacionais e regionais de desenvolvimento e ordenamento do território, bem como designa competência aos municípios para promover ordenamento territorial mediante planejamento.

Nessa lógica, tem-se o Plano Diretor como instrumento para o ordenamento territorial de município que disciplina o parcelamento e uso e ocupação do solo, bem como estabelece o zoneamento, a fim de limitar as atividades econômicas por zonas municipais (PCS, 2020).

No que diz respeito a escala regional, seu planejamento busca integrar ações e solucionar problemas comuns que ultrapassam os limites municipais, como a gestão de resíduos sólidos, tendo como principal instrumento os planos de desenvolvimento regional e consórcios previstos na Constituição Federal e na Lei nº 11.107/2005 (Silva, 2020).

O plano de desenvolvimento regional constitui, dessa forma, um importante instrumento para o crescimento organizado do espaço, com o intuito de garantir o acesso aos serviços básicos aos cidadãos. Assim, as políticas públicas, a integração e cooperação intermunicipal ganham forças.

A RMP apresentou seu Plano Regional de Desenvolvimento Integrado em 2021, sendo sua última atualização em 2022. Esse plano, foi firmado em conjunto com as prefeituras dos municípios pertencentes à RM, bem como contou com a participação da população e de diferentes setores trabalhistas, de forma a promover justiça social e igualdade (PDUI, 2022). Além disso, o plano está baseado no Estatuto da Metrópole instituído pela Lei nº 13.089/2015 seu planejamento visa à proteção do patrimônio ambiental.

No que tange à gestão dos resíduos sólidos, deve-se ressaltar que a PNRS fortalece os princípios da gestão integrada e sustentável de resíduos, através do incentivo à formação de consórcios públicos intermunicipais como mecanismo para ampliar a capacidade de gestão dos

municípios (Brasil, 2010). Essa abordagem colaborativa também contribui de forma estratégica para a redução de custos operacionais por meio do compartilhamento de sistemas de coleta, tratamento e disposição final correta dos rejeitos (Blasius, 2023).

Os consórcios intermunicipais consistem em parcerias firmadas entre municípios com o objetivo de promover ações conjuntas, visando à melhoria da qualidade dos serviços públicos oferecidos à população. Essas associações resultam da iniciativa autônoma dos entes municipais, que optam por atuar de forma cooperativa na resolução de demandas comuns, otimizando recursos e fortalecendo a gestão pública local (Souza, 2023).

Nesse viés, o planejamento territorial em escala regional é importantíssimo para orientar a implantação de aterros sanitários, seja eles consorciados ou não (Brasil, 2010). Pode-se citar alguns estudos já elaborados para esse fim, como por exemplo Purificação (2020) e Moda (2017), que analisaram a viabilidade da implantação de aterros sanitários na RM de Salvador (BA) e na RM de Londrina (PR), respectivamente; e Souza (2023), que verificou a possibilidade de implantação de aterros sanitários mediante consórcio entre municípios da Mesorregião do Triângulo Mineiro e Alto Parnaíba. Vale ressaltar que esses autores, fizeram uso de SIG, haja vista a possibilidade de integrar diferentes dados de diferentes locais, sendo, portanto, uma das principais ferramentas para a análise integrada do território.

3.3. Tecnologias de Geoinformação e Análise de Multicritérios

O significativo avanço das tecnologias de geoinformação vem transformando o modo de planejar o território urbano (Freitas, 2020). Nesse contexto, destacam-se algumas áreas de pesquisa específicas que contribuem, significativamente, para a gestão e o planejamento territorial, tecnologias fundamentais no campo da geoinformação que vêm contribuindo significativamente para o planejamento territorial, como o Sensoriamento Remoto, os SIG e o Geoprocessamento.

O Sensoriamento Remoto pode ser definido como a arte e a ciência de obter informações sobre objetos ou áreas terrestre sem que haja contato físico direto entre sensor e objeto (Jensen, 2007). Seu uso se destaca pela possibilidade de acessar informações sobre o estado ou composição da superfície terrestre, que auxiliam na interpretação do uso e da cobertura do solo, sobretudo em extensas áreas, de difícil acesso e remotas (Silva, 2023).

Os Sistemas de Informação Geográfica podem ser definidos como um conjunto integrado por hardware, softwares, métodos, dados e usuários que permitem capturar, armazenar, consultar, manipular, analisar e visualizar dados referenciados espacialmente em relação à superfície da Terra (Maguire *et al.* 1991). Para Moura (2003), os SIG são ferramentas essenciais para o planejamento territorial, pois contribuem na sistematização de dados, já que ao buscar formas de trabalhar com as relações espaciais, tende-se a evoluir do descritivo para o prognóstico. Ressalta-se que a habilidade dos SIG em integrar grandes quantidades de informações sobre o ambiente e constituir um grande repertório de ferramentas analíticas, torna-os tão apelativo (Rosa, 2013).

Já o geoprocessamento é reconhecido por um conjunto de técnicas matemáticas e computacionais que operam sobre dados brutos e são capazes de transformá-los em informações relevantes (Câmara; Davis; Monteiro, 2001). Essa área do conhecimento é útil quando aplicada em estudos em que o componente espacial é fundamental para compreender sua relação com o contexto que o cerca e seus potenciais impactos nos demais elementos presentes no território. Ademais, essas metodologias permitem simular cenários futuros modelados a partir de uma coleção de informações, que podem dar apoio à tomada de decisão (Freitas, 2020).

Nesse sentido, a análise de multicritérios permite integrar múltiplos fatores (critérios) para avaliar alternativas locais. No âmbito dos SIG, a análise de multicritérios ocorre a partir do cruzamento de diferentes planos de informação, que são ponderados conforme o conhecimento de especialistas. Isso promove transparência e clareza no processo de tomada de decisão e permite identificar áreas com aptidão para diversos fins (Moura, 2010). Schmidt (2016, p. 55) afirma que “a integração de SIGs e do método multicriterial é uma das ferramentas mais difundidas no apoio à tomada de decisão e apresenta um enorme potencial para a análise da aptidão de áreas adequadas para implantação de aterro sanitário”.

Para a realização de análises multicriteriais, pode-se utilizar o método de Processo Analítico Hierárquico (AHP) combinado, ou não, com a Lógica Booleana. O método AHP foi desenvolvido por Thomas Saaty, a partir de 1970, com base em um modelo matemático, em que o avaliador define prioridades para seleção da melhor alternativa congruente ao seu objetivo (Saaty, 1977). Através de comparações, aos pares, em cada nível da hierarquia baseadas na escala de prioridades do AHP, desenvolvem-se pesos relativos, chamados de prioridades, para diferenciar a importância dos fatores (Grandzol, 2005).

Segundo Saaty (1994), o benefício do método é que, como os valores dos julgamentos das comparações paritárias são baseados em experiência, intuição e em dados físicos, o método pode lidar com aspectos qualitativos e quantitativos de um problema de decisão. Por outro lado, Dalfi *et al.* (2013) alerta que a metodologia pode sofrer influência direta do pesquisador no momento de atribuir os valores aos fatores, dificultando a comparação com outros trabalhos realizados a partir de outros métodos.

Já a Lógica Booleana foi desenvolvida por George Boole no século XIX, sendo recomendada para casos em que há para restrições legais, que limitam as alternativas em “aptas” e “não aptas” (Courseuil, 2006). O modelo gera resultados que são expressos em uma lógica binária, com valores “0” para as áreas restritas e “1” para aquelas sem restrição legal, por exemplo (Barros *et al.* 2024).

4 MATERIAIS E MÉTODOS

O presente trabalho foi desenvolvido em quatro etapas. A primeira etapa consistiu em uma pesquisa bibliográfica abrangendo livros, artigos científicos e teses que apresentam e demonstram o método Processo Analítico Hierárquico e a Lógica Booleana. Além disso, essa fase incluiu o estudo e definição dos critérios que norteiam a instalação de aterros sanitários.

Na segunda etapa, foram coletados dados espaciais de diversas fontes e elaborado o mapeamento dos critérios de análise no software ArcGIS Pro 3.2.2 desenvolvido pela ESRI – (*Environmental Systems Research Institute*). A terceira etapa envolveu a atribuição de notas às classes dos critérios, bem como definiu-se os pesos dos critérios a partir de cálculos matemáticos necessários na aplicação do método AHP (Saaty, 1991) em tabelas, utilizando o software Excel. As notas são pontuações que representam a adequação da alternativa analisada à instalação do aterro sanitário, enquanto os pesos são valores que representam a importância relativa de cada critério na tomada de decisão.

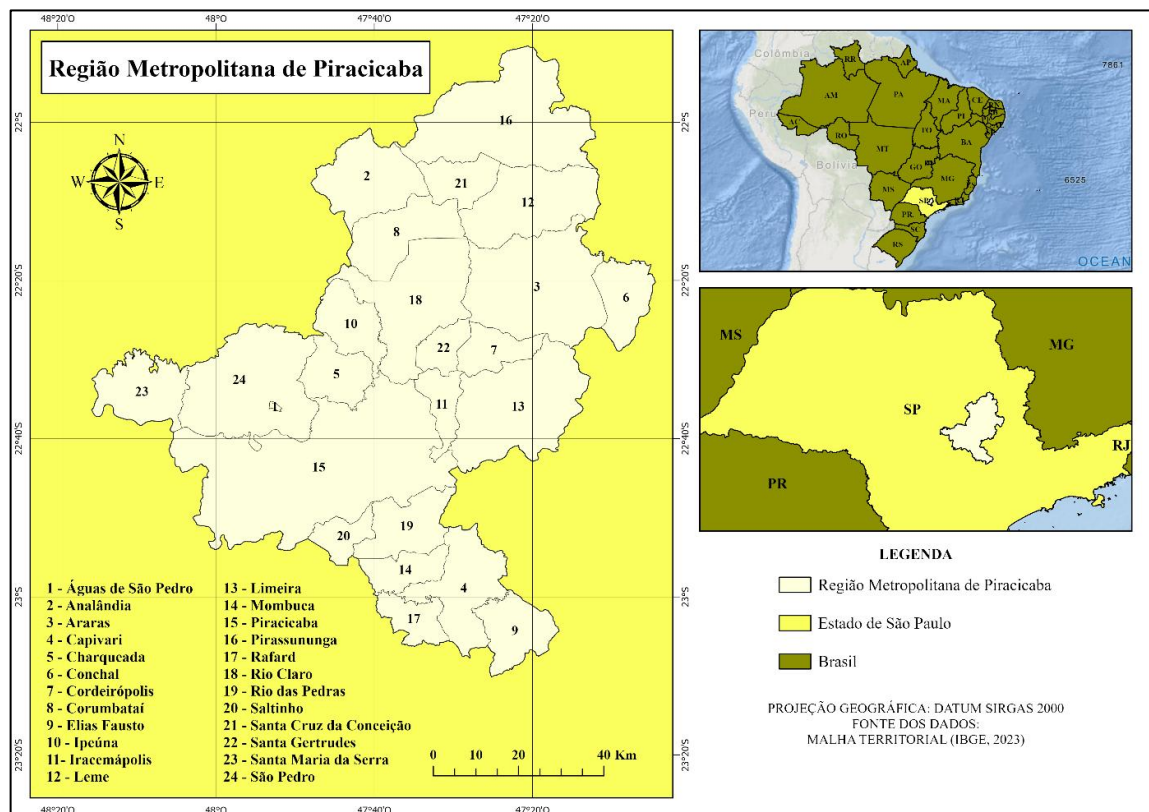
Na quarta etapa, utilizou-se o software ArcGIS Pro 3.2.2. mais uma vez para a integração dos dados por meio das ferramentas de geoprocessamento, a fim de gerar o mapa de aptidão à implantação de aterro sanitário da RMP. E, por fim, na última etapa realizou-se os cálculos necessários para a identificação da área mínima de um aterro sanitário que atenda a RMP.

4.1. Localização e Caracterização da Área de Estudo

A Região Metropolitana de Piracicaba está localizada na região administrativa de Campinas, no Estado de São Paulo, ocupa uma área de aproximadamente 7.860,85 Km² e abrange 24 municípios, conforme apresenta a Figura 1. Do ponto de vista ecológico, a RMP faz parte dos Biomas Mata Atlântica e Cerrado que compõe o Estado de São Paulo (IBGE, 2019).

Sua vegetação encontra-se intensamente alterada em razão das atividades antrópicas iniciadas no século XVI, com a chegada dos colonizadores portugueses ao Brasil, e que se intensificaram ao longo do século XX, sobretudo com a expansão da agropecuária e o crescimento das áreas urbanas (SEDEMA, 2020).

Figura 1: Localização da Área de Estudo.



Fonte: Autor (2025).

Em relação a hidrografia, abarca quatro bacias hidrográficas que são Bacia Hidrográfica PCJ – Piracicaba, Capiravari, Jundiaí (URGHI 5), Bacia Hidrográfica Do Rio Mogi-Guaçu (URGHI 9), Bacia Hidrográfica do Rio Sorocaba e Médio Tietê (URGHI 10) e Bacia Hidrográfica do Rio Tietê-Jacaré (URGHI 13).

O clima predominante na região é classificado como mesotérmico Cwa, segundo a tipologia de Köppen, caracterizado por verões quentes e úmidos e invernos frios e secos. O regime de chuvas indica que o mês mais seco apresenta precipitação inferior a 30 mm, enquanto no mês mais quente a temperatura ultrapassa 22°C, e no mês mais frio, fica abaixo de 18°C (SEDEMA, 2020).

4.2. Tratamento de Dados e Atribuição das Notas

Os critérios para a escolha de áreas para a implantação de Aterros Sanitários foram classificados em duas formas: os restritivos e os escalonados, sendo ambos fundamentados em leis, normas ou trabalhos publicados. Após estabelecer os critérios de análise, os arquivos espaciais foram organizados e tratados no software ArcGIS Pro 3.2.2. A Tabela 1 apresenta os critérios de análise e as referências utilizadas para a sua interpretação.

Tabela 1: Classificação, descrição e fonte dos critérios utilizados.

Critério	Tipo	Descrição	Fonte
Declividade	Restritivo e Escalonado	Áreas com declividade inferior a 1% e superior a 30% restritas; Preferências por declividades intermediárias.	ABNT NBR 13.896/1997, Magalhães, 2001 e Rezende <i>et al.</i> , 2015.
Pedologia e Geologia	Escalonado	Preferência por material argiloso, profundo e pouco permeável.	ABNT NBR 13.896/1997 e Melo, 2001.
Hidrografia	Restritivo e Escalonado	Restrição para distância mínima de 200 m de qualquer curso d'água ou coleção hídrica; Preferência por maiores distâncias.	ABNT NBR 13.896/1997 e Blasius, 2023.
Uso e Ocupação do Solo	Escalonado	Preferência às áreas sob influência de processos antropogênicos.	IPT, 2010.
Vias de Acesso	Escalonado	Preferência por pequenas distâncias e maior que 200 m.	ABNT NBR 13.896/1997 e Blasius, 2023.
Área Urbana	Restritivo e Escalonado	Restrição para distância mínima de 500 m de áreas urbanas; Preferência por distâncias entre 2.000 m até 8.000 m.	ABNT NBR 13.896/1997, Azevedo; Barbosa, 2012 e Felicori <i>et al.</i> , 2016.
APP	Restritivo	Restrição nas faixas marginais estabelecidas para cursos d'água e demais APP.	Lei nº 12.651/2012
ASA	Restritivo	Restrição em áreas com raio de 20 km para aeroportos e 13 km aeródromos.	CONAMA 4/1995
UC	Restritivo	Restrição em UCs de Proteção Integral	Lei nº 9.985/2020 e CONAMA 428/2010.

Fonte: Autor (2025).

A seguir, apresentam-se em maior detalhe os critérios de análise destacados na tabela, incluindo as respectivas fontes de dados, os procedimentos adotados para o mapeamento e a justificativa para a atribuição das notas. Ressalta-se que, para os critérios restritivos, aplicou-se a Lógica Booleana — atribuindo nota 0 às áreas inaptas e nota 1 às áreas aptas. Já os critérios escalonados, avaliados por meio do método AHP, receberam notas variando de 0 (péssima aptidão) a 1 (ótima aptidão), com intervalos regulares de 0,2.

De modo geral, essas notas foram pensadas de forma a minimizar os possíveis impactos inerentes ao empreendimento, reduzir os custos operacionais, além de respeitar as especificações, em partes, abordadas pela ABNT NBR 13.896/1997.

Distância da Hidrografia e APP

Elaborado a partir dados vetoriais de trechos de drenagem e águas superficiais disponibilizados pela CETESB/DAEE (2017). Para delimitar as APPs dos cursos d'água com diferentes larguras, sobretudo para identificar aqueles mais caudalosos, como o Rio Piracicaba, foi realizado o Índice de Água por Diferença Normalizada, gerado a partir de imagens do sensor WPM, do satélite CBERS 4A, com 2 m de resolução espacial. As imagens utilizadas são do verão de 2023, período de maior precipitação, para poder identificar o leito maior do rio.

Após a identificação dos cursos d'água, utilizou-se o pacote de extensão XTools Pro que possibilita, com o uso da ferramenta “Segmentação de Margens” e “Linha de Centro”, inferir a largura dos canais em todo o comprimento do curso hídrico. Esses resultados permitiram o cálculo das APPs com base no Código Florestal Brasileiro.

Para as águas superficiais isoladas, como Lagoas e Lagos Naturais, conforme o inciso II do Art. 4º da Lei 12.651/2012, aplicou-se uma margem de 100 metros de APP para aquelas identificadas com área maior que 20 hectares e localizadas em zonas rurais; margem de 50 metros de APP para aquelas identificadas com área menor que 20 hectares e localizadas em zonas rurais; e para o restante das águas superficiais localizadas em áreas urbanas a margem de 30 metros de APP. E para as nascentes identificadas, aplicou-se a ferramenta para uma margem de 50 metros de APP de acordo com o inciso IV.

Adicionalmente, aplicou-se a ferramenta “Distância Euclidiana” para calcular a distância dos corpos hídricos. O resultado foi classificado nos intervalos de: ≤ 200 m; 200 m – 300 m; 300 m – 400 m; 400 m – 500 m; 500 m – 600 m e ≥ 600 m, conforme Blasius (2023).

Nesse sentido, ao prezar por maior segurança ambiental, as notas atribuídas para a distância dos corpos hídricos levaram em consideração que quanto mais distante se localizar o aterro sanitário dos recursos hídricos, menores serão os riscos de contaminação dos mesmos, assim, a menor nota, sendo 0, que representa péssima aptidão foi dada as áreas identificadas em uma faixa menor ou igual a 200 m, de forma que essa nota cresce conforme aumenta a distância.

Por fim, as áreas de preservação permanente foram classificadas como inaptas à instalação de aterros sanitários e receberam nota 0, conforme a lógica booleana, assim como a faixa menor ou igual a 200 m já abordada, pois também é considerada restrita conforme a ABNT NBR 13.896/1997

Distância das Áreas Urbanas

Esse dado foi produzido a partir do mapeamento do Uso e Ocupação do Solo pelo MapBiomas (2022). Foi realizada uma reclassificação do raster para se obter a delimitação das áreas urbanas e, em seguida, utilizou-se a ferramenta “Distância Euclidiana” para calcular a distância das áreas urbanas. O resultado foi classificado nos intervalos de: ≤ 500 m; 500 m – 2.000 m; 2.000 m – 8.000 m; 8.000 m – 10.000 e > 10.000 m.

A atribuição de notas para as distâncias das áreas urbanas considerou que a maior aptidão está entre 2.000 m e 8.000 m, conforme Felicori *et al.*, 2016, pois distâncias menores podem provocar rejeição da população próxima e distâncias maiores da fonte geradora dos resíduos sólidos contribui para o aumento dos custos operacionais e, portanto, recebeu nota 1, equivalente a ótima aptidão.

Distâncias iguais ou inferiores a 500 m, bem como aquelas superiores a 10.000 m, foram classificadas como de péssima aptidão - nota 0, por estarem associadas, respectivamente, à maior probabilidade de rejeição social e à elevação dos custos operacionais. Para as distâncias entre 500 m e 2.000 m e entre 8.000 m e 10.000 m, atribuiu-se a nota 0,4 - aptidão regular, pois podem apresentar limitações operacionais ou de aceitabilidade da sociedade. Por fim, para a lógica booleana, a distância menor ou igual a 500 m é restrita e recebeu nota 0 – inaptidão, quanto as demais distâncias, nota 1 – aptidão.

Formações Geológicas

Para elaboração, foi utilizado o Mapa Geológico do Estado de São Paulo, produzido pelo CPRM (2006) e disponibilizado no DataGEO em formato vetorial.

A Unidade Depósito Aluvionares recebeu nota 0, por sua composição de materiais inconsolidados como areia, cascalho, silte, argilas e turfas, comumente encontrados em margens de canais e planícies de inundação. A mesma nota foi atribuída às Coberturas Detríticas Indiferenciadas, constituídas predominantemente por areias finas a grossas, e aos Depósitos Colúvio-Eluvionares, que compreendem espessas coberturas areno-argilosas sobre substrato arenoso (CPRM, 2006)

Atribuiu-se nota 0,2 para as Formações Botucatu, Itaqueri e Pirambóia por serem em sua essência compostas por arenitos que variam de finos a grossos e com pouca argila (CPRM, 2006). Ainda, enquadra-se a Formação Rio Claro nesse mesmo grupo, pois ainda que se constitua de arenitos argilosos e argilitos intercalados, também contém muito arenito e arenitos conglomeráticos (CPRM, 2006).

As formações Aquidauana e Itararé receberam nota 0,4, que representa aptidão “Regular”, haja vista a constituição diversa para ambos, com presença de arenitos, siltitos, folhelhos, diamictitos que variam em diferentes granulometrias (CPRM, 2006; Schneider *et al.* 1974). Tatuí foi a única formação a receber nota 0,6, já que é composta em sua essência por siltitos e siltitos arenosos, mas ainda há níveis de arenito fino, quartzoso bem como médio a grosseiro e imaturo (Aboarrage; Lopes, 1986; CRPM, 2006).

A formação Serra Geral também foi a única a receber nota 1, em vista do agrupamento de rochas magmáticas basálticas, em que os derrames basálticos intrudem nas rochas sedimentares e formas dique de diabásios e soleiras (CPRM, 2006; Perinotto; Zaine, 2008). Por fim, a Formação Teresina recebeu nota 0,8, por ser composta por argilitos, siltitos e arenitos finos, assim como as Formações Irati e Corumbataí, constituídas por folhelhos e siltitos e siltitos, argilitos e lentes de arenito, respectivamente (ib. id).

Uso e Ocupação do Solo

Para a análise de Uso e Ocupação do Solo, foi utilizado o mapeamento promovido pelo MapBiomas (2022). A análise do dado, em comparação com imagens Landsat-8 (OLI) do mesmo ano, evidenciou alguns erros na classificação do uso e cobertura da terra. Para minimizar esses erros, realizou-se a correção das classes utilizando a ferramenta "Edição de Pixel" do software ArcGIS Pro. Essa correção foi aplicada, sobretudo às áreas alagadas da Represa de Barra Bonita, que foram originalmente classificadas como pastagem ou mosaico de uso.

Para a atribuição das notas, priorizou-se como maior aptidão as classes que já estão sob influência de processos antropogênicos, como agricultura e pastagem, de forma a preservar a composição da vegetação dos biomas Cerrado e Mata Atlântica. Por conseguinte, Agricultura, Mosaico de Usos e Pastagem receberam nota 1, por serem altamente antropizadas e não necessitarem de supressão de vegetação nativa.

As classes Outras áreas não vegetadas e Floresta Plantada receberam nota 0,4; Vegetação Herbácea nota 0,2; Vegetação Arbórea nota 0 e Área Urbana, Campo Alagado e Água Superficial nota 0 por não serem compatíveis com especificações das normas para a instalação de aterro sanitário.

Pedologia

Para a análise da pedologia, utilizou-se o Mapa Pedológico do Estado de São Paulo elaborado por Rossi (2017) e disponibilizado no DataGEO em formato vetorial. Os solos tipo Gleissolos e Planossolos receberam nota 0 por estarem em áreas com nível freático pouco profundo, em condições de excesso de umidade, comportando-se como solos hidromórficos (EMBRAPA, 2021); os solos tipo Cambissolo e Neossolo receberam nota 0,2 por serem pouco profundos ou pouco evoluídos (EMBRAPA, 2018);

Chernossolo recebeu nota 0,4, pois mesmo que tenha horizonte B subsuperficial rico em matéria orgânica e argilominerais, costumam ser pouco profundos e permeáveis; Luviossolo e Nitossolo, ainda que variem de bem drenado a imperfeitamente drenado, receberam nota 0,6 por serem profundos, possuírem horizonte B com textura argilosa, além de não serem hidromórficos (EMBRAPA, 2021). Por fim, os solos tipo Argissolo e Latossolo receberam nota 1, por serem muito profundos com baixa permeabilidade e ricos em argilominerais.

Declividade

A declividade, calculada em porcentagem, foi gerada a partir do Modelo Digital de Elevação SRTM disponibilizado pelo INPE/TOPODATA (2008). Em seguida, aplicou-se a ferramenta “Reclassificar” com a finalidade de padronizar as classes de declividade de acordo com a Metodologia da EMBRAPA (1979), como apresenta a Tabela 2. Além disso, calculou-se também a declividade, em graus, para identificação das áreas com declividade maior de 45°, as quais são definidas como APP.

Tabela 2: Classes de declividade proposto pela EMBRAPA, 1979.

Classes de Declividade	Limites Percentuais (%)
Plano	0 – 3
Suave Ondulado	3 – 8
Ondulado	8 – 20
Forte Ondulado	20 – 45
Montanhoso	45 – 75
Escarpado	> 75

Fonte: Embrapa (1979).

A atribuição das notas para as classes de declividade, considerou que relevos planos tendem ao acúmulo de água, assim como áreas com maior declividade dificultam a operação, além de favorecer o escoamento superficial, sendo esses cenários não desejados para a proposta do empreendimento analisado. Nessa lógica, áreas mapeadas com declividade menor que 1% e acima de 30% receberam nota 0; aquelas que estão entre 1% e 8% nota 1 e as demais, situadas entre os intervalos de 8% até 20% e de 20% até 30% receberam notas inferiores, sendo 0,8 e 0,6 respectivamente.

Por fim, para a lógica booleana, a APP e as áreas em desconformidade com os parâmetros de declividade estabelecidos pela NBR 13.896/1997 receberam nota 0 – inaptas, por serem restritas, enquanto as áreas remanescentes receberam nota 1 – aptas.

Distância das Vias de Acesso

A partir do georreferenciamento do Mapa Rodoviário da DR 13, disponibilizado pelo Departamento de Estradas e Rodagem (2025), delimitou-se as vias de acesso. Em seguida, aplicou-se a ferramenta “Distância Euclidiana” a fim de calcular a distâncias das vias de acesso. O resultado foi classificado nos seguintes intervalos: ≤ 200 m; 200 m – 1.000 m; 1.000 – 2.000 m; 2.000 m – 3.000 m; 3.000 m – 5.000 m; 5.000 m – 10.000 m e > 10.000 m, conforme Blasius, 2023.

A atribuição de notas considerou que a proximidade com o aterro sanitário reduz os custos logísticos e que uma distância excessiva tenderia a ser mais custoso. Por outro lado, uma proximidade muito reduzida pode causar problemas no tráfego e impactos visuais. Com base nessa premissa, foram atribuídas as seguintes notas: para as distâncias menores ou igual a 200 m e superior a 10.000 m receberam nota 0; de 5.000 m a 10.000 m, nota 0,2; de 3.000 m a 5.000 m, nota 0,4; de 2.000 m a 3.000 m, nota 0,6; de 1.000 m a 2.000 m, nota 0,8 e de 200 m a 1.000

m, receberam nota 1 por apresentarem a condição mais favorável para a implantação do aterro sanitário.

Áreas de Segurança Aeroportuária e UCs de Proteção Integral

Para delimitar as Áreas de Segurança Aeroportuária (ASA), utilizou-se o banco de dados da Agência Nacional de Aviação Civil (2021), disponibilizado pelo DataGEO. Empregou-se a ferramenta “Buffer” apenas com raio de 13 km, uma vez que não há aeroportos na Região Metropolitana de Piracicaba.

Para a delimitação das UCs de Proteção Integral foi realizada a partir da inserção do arquivo vetorial das Unidades de Conservação do Estado de São Paulo, disponibilizado pelo SIGAM (2022).

A atribuição das notas se deu exclusivamente pela lógica booleana e, portanto, as ASA e as UCs de Proteção Integral receberam nota 0 – inaptas, em função das restrições legais à implantação de aterros sanitários. As demais áreas da RMP que não enquadram nessas restrições, receberam nota 1 – aptas.

4.3. Síntese por Multicritérios

Os pesos de cada critério escalonado, que indicam importância relativa aos demais serão calculados com base no método de Análise Hierárquica de Processos (AHP). Para isso, foi desenvolvida a Matriz de Comparação Pareada utilizando a escala fundamental de comparação paritária desenvolvida por Saaty (1991), conforme apresenta a Tabela 3, a qual possibilita a comparação dos critérios em pares, resultando em uma hierarquização dos critérios em ordem de prioridade para a implantação de aterros sanitários.

A matriz de comparação é definida conforme a Equação 1, onde a corresponde ao valor da escala de comparação, quando os critérios C_i e C_j são comparados, sendo que i e j representam as linhas e colunas, respectivamente.

$$A = (a_{ij}) \quad (\text{Equação 1})$$

Tabela 3: Escala fundamental de comparação paritária do método AHP de Saaty (1991).

Grau de Importância	Definição	Explicação
1	Igual importância	Ambos os critérios possuem a mesma importância
3	Fraca importância	Um critério é um pouco mais importante que o outro
5	Forte importância	Um critério é fortemente mais importante que o outro
7	Muito forte importância	Um critério é muito fortemente mais importante que o outro
9	Importância absoluta	Um critério é extremamente mais importante que o outro
2,4,6,8	Valores intermediários	-

Fonte: Adaptado de Saaty (1991)

Para a avaliação pareada, seguiu-se as seguintes especificações:

- Se $C_i \neq C_j$, então $a_{ij} = a$ e $a_{ji} = \frac{1}{a}$, $a \neq 0$;
- Se $C_i = C_j$, então $a_{ij} = a_{ji} = 1$

Cada elemento da matriz indica quanto o critério C_i é mais importante em relação a cada critério C_j . Logo, quando um fator (critério) é confrontado com ele mesmo, o único resultado possível é 1, pois possui igual importância.

No julgamento, atribuiu-se maior importância à hidrografia, seguida pelos critérios de pedologia, geologia e declividade, considerando a necessidade de proteção das águas superficiais e subterrâneas, especialmente devido à alta densidade de canais na área de estudo. Além disso, tendo em mente que a pedologia e a geologia têm papel fundamental na retenção de contaminantes e que os solos apresentam propriedades inerentes à sua formação geológica, ambos critérios assumiram igual importância.

Por outro lado, embora critérios como a área urbana, via de acesso e uso e ocupação do solo sejam relevantes para a escolha de áreas aptas à instalação de aterros sanitários, receberam menor grau de importância quando comparados aos critérios diretamente relacionados à segurança ambiental. A síntese do julgamento está apresentada na Tabela 4.

Tabela 4: Matriz de comparação pareada.

Crítérios	Hidrografia	Pedologia	Geologia	Declividade	Área Urbana	Vias de Acesso	Uso e Ocupação do Solo
Hidrografia	1	2	2	3	5	7	9
Pedologia	1/2	1	1	3	5	5	7
Geologia	1/2	1	1	3	5	5	7
Declividade	1/3	1/3	1/3	1	3	4	5
Área Urbana	1/5	1/5	1/5	1/3	1	2	3
Vias de Acesso	1/7	1/5	1/5	1/4	1/2	1	2
Uso e Ocupação do Solo	1/9	1/7	1/7	1/5	1/3	1/2	1

Fonte: Autor (2025).

Em seguida, o cálculo para obter os pesos relativos foram realizados em três etapas: somou-se os valores de cada coluna; dividiu-se cada elemento da matriz pelo total de sua coluna para obter a matriz normalizada; por fim, realizou-se o cálculo da média dos elementos de cada linha da matriz normalizada. Os resultados obtidos se referem aos pesos relativos, comumente denominados como Autovetores de Prioridade (W).

Na sequência, obteve-se os Autovetores de Prioridade Normalizados (Aw) através da multiplicação da Matriz de Comparação Pareada (A) pela Matriz dos Autovetores de Prioridade (W). Os resultados foram aplicados na Equação 2 para se obter os Autovetores (λ) e, os Autovetores, por sua vez, foram aplicados na Equação 3 para calcular o Autovalor Máximo ($\lambda_{\text{máx}}$).

$$\text{Autovetor} = \lambda_i = \frac{\sum_{j=1}^n [Aw]_{ji}}{w_i} \quad (\text{Equação 2})$$

$$\text{Autovalor Máximo} = \lambda_{\text{máx}} = \frac{\sum_{j=1}^n \lambda_j}{n} \quad (\text{Equação 3})$$

O passo seguinte consistiu no cálculo do Índice de Consistência (IC) determinado por Saaty (1991), calculado a partir do autovalor máximo e do número de critérios (n), conforme a Equação 4.

$$IC = \frac{(\lambda_{\text{máx}} - n)}{(n-1)} \quad (\text{Equação 4})$$

O Índice Randômico, apresentado na Tabela 5, foi estabelecido por Saaty (1990) para aplicação da metodologia apresentada e representa o valor de inconsistência esperado para uma

matriz aleatória de tamanho n. Para este estudo, foi utilizado o valor de $IR = 1,32$, que foi aplicado na Equação 5 para obter a Razão de Consistência (RC)

Tabela 5: Índice Randômico

Nº Critérios	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
IR	0,00	0,00	0,00	0,58	0,9	1,12	1,24	1,32	1,41	1,45	1,49	1,51	1,48

Fonte: Saaty (1991)

A Razão de Consistência permitiu avaliar a coerência dos julgamentos realizados na comparação pareada. Caso $RC < 0,1$, os julgamentos são considerados consistentes e caso $RC > 0,1$, os julgamentos são inconsistentes, indicando a necessidade de revisão e ajuste (Saaty, 1990).

$$RC = \frac{IC}{IR} \quad (\text{Equação 5})$$

Com os cálculos realizados, pesos obtidos e razão de consistência julgada consistente, a seguinte etapa ocorreu pela aplicação das técnicas de geoprocessamento no ArcGIS Pro, com o objetivo de prepará-los para gerar o mapa final de aptidão para a implantação de aterros sanitários na Região Metropolitana de Piracicaba.

Os critérios restritivos em camada do tipo shapefile foram transformados em camadas do tipo raster através da ferramenta ‘Polígono para Raster’. Observa-se que esse processo não foi necessário para os demais critérios restritivos que já estavam em formato raster. Na sequência, todos os critérios foram reclassificados pelos valores: 0 e 1. Por fim, foram combinados por meio da ferramenta ‘Calculadora Raster’ e como resultado, obteve-se uma nova camada raster que integra as áreas classificadas como restritas (inaptas, com valor 0) e as áreas aptas (satisfatórias para a análise, com valor 1).

Para os critérios escalonados, especificamente aqueles em camada do tipo shapefile, os valores de suas respectivas notas foram inseridos na tabela de atributos por meio da adição de uma nova coluna. Em seguida, foram transformados para camadas do tipo raster que variam de 0 a 1 em intervalos regulares de 0,2, conforme a ponderação estabelecida. Os demais critérios escalonados em camada do tipo raster, receberam suas notas através da reclassificação realizada com o uso da ferramenta ‘Reclassificar’.

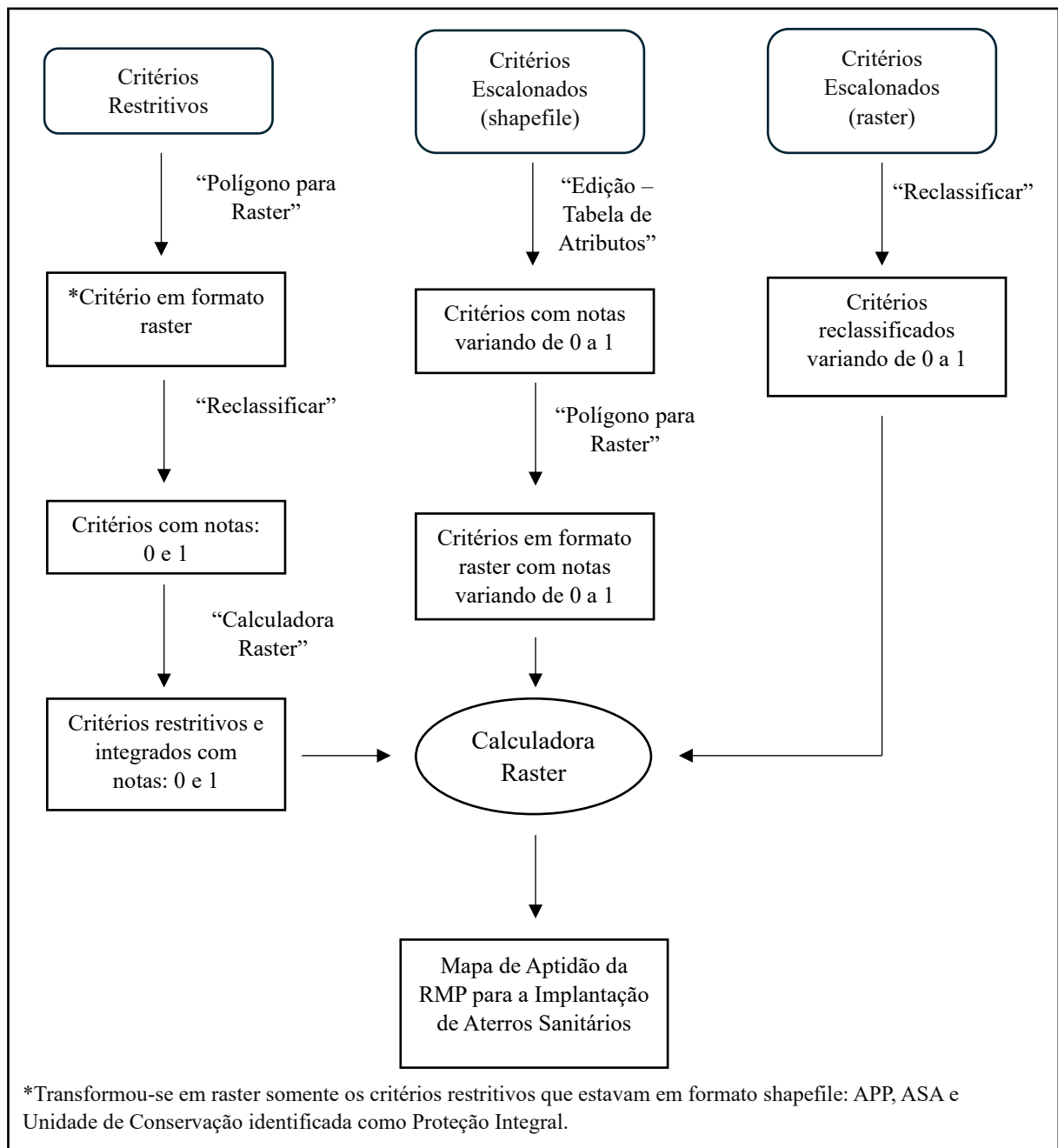
O último passo ocorreu mediante o cálculo da Equação 7, realizado na ‘Calculadora Raster’, para processar as informações dadas às camadas dos critérios escalonados e critérios restritivos, a fim de gerar o mapa final de aptidão à implantação de aterro sanitário.

Adicionalmente, a Figura 2 se trata de um fluxograma das etapas percorridas para a sintetização desse produto.

$$Aptidão = (P1 * C1 + P2 * C2 + P3 * C3 ... Pn * Cn) * (CR \neq 0) \quad (\text{Equação 6})$$

Onde, P corresponde aos pesos dos critérios obtidos com o método AHP; C corresponde aos critérios analisados para tal objetivo; e CR corresponde a combinação dos critérios restritivos.

Figura 2: Fluxograma das etapas para sintetização do mapa final.



Fonte: Autor (2025).

Após a elaboração do mapa de aptidão, foi realizada uma análise estatística no ArcGIS Pro com o objetivo de quantificar as áreas consideradas úteis e aquelas classificadas como “boa”, “muito boa” e “ótima” para a implantação de aterros sanitários. Essa análise buscou avaliar o potencial locacional da RMP sob uma perspectiva mais conservadora, priorizando maior segurança dos recursos ambientais. Além disso, procedeu-se à identificação e exclusão de pixels isolados através da vetorização, a fim de considerar apenas as áreas contíguas.

4.4. Projeção da população, resíduos sólidos urbanos e cálculo da área mínima para Aterro Sanitário

Para o cálculo da área mínima para a instalação de um aterro sanitário na Região Metropolitana de Piracicaba foi considerado as projeções de crescimento populacional e da geração de RSU, uma vez que o crescimento populacional implica diretamente na produção de resíduos. Na execução deste cálculo, utilizou-se como referências os estudos de Blasius (2023) e Felizardo *et al.* (2021) e empregou-se um horizonte de projeto de 25 anos.

A projeção da população de cada município foi estimada a partir de dados dos censos do IBGE referente aos anos de 2000, 2010 e 2022, e foram empregados os seguintes modelos matemáticos: aritmético, geométrico, mínimos quadrados.

Tabela 6: Modelo matemáticos.

Método	Fórmula Projeção	Coefficientes
Aritmético	$P_t = P_2 + K_a \cdot (t - t_2)$	$K_a = \frac{P_2 - P_0}{t_2 - t_0}$
Geométrico	$P_t = P_2 \cdot e^{K_g \cdot (t - t_2)}$	$K_g = \frac{\ln P_2 - \ln P_0}{t_2 - t_0}$
Mínimos Quadrados	$P_t = (a \cdot t) + b$	$a = \frac{\sum ti \sum Pi - M \sum tiPi}{(\sum ti)^2 - M \sum (ti)^2}$ $b = \frac{\sum ti \sum tiPi - \sum Pi \sum (ti)^2}{(\sum ti)^2 - M \sum (ti)^2}$

P_0, P_1, P_2 : populações nos anos t_0, t_1, t_2 (hab); P_t : população estimada no ano t (hab.); K_a, K_g coeficientes de cada método; a : coeficiente angular da reta; b : coeficiente linear da reta; P_i : população identificada nos anos t_i ; M : número de censos disponíveis.

Fonte: Adaptado de Pereira (2018).

O uso de diferentes modelos para projetar a população de cada município possibilita a comparação entre os resultados obtidos, contribuindo para uma análise mais robusta das estimativas. Nesse sentido, foi verificado o coeficiente R^2 para cada projeção populacional estimada pela aplicação de cada modelo matemático, que representa uma medida de ajustamento de um modelo estatístico generalizado, em relação aos valores reais e permite identificar qual modelo é mais adequada para a projeção de cada município, sendo que quanto mais próximo o valor de R^2 for de 1, mais adequado é a projeção estimada.

Dessa forma, nos cálculos para se estimar a massa de resíduos sólidos urbanos, diretamente relacionados com a quantidade de habitantes, se considerou a projeção populacional em que o modelo matemático apresentou o maior R^2 para cada município, conforme demonstrado na Tabela 7.

Tabela 7: Dados dos censos do IBGE e os modelos matemáticos utilizados para a projeção.

Municípios	População (habitantes) dos últimos Censos			Modelo Matemático
	2000	2010	2012	
Águas de São Pedro	1.883	2.703	3.097	Mínimos Quadrados
Analândia	3.582	4.289	4.577	Mínimos Quadrados
Araras	104.196	118.898	131.300	Mínimos Quadrados
Capivari	41.468	48.573	50.954	Mínimos Quadrados
Charqueada	13.037	15.086	15.739	Mínimos Quadrados
Conchal	22.676	25.242	28.184	Geométrico
Cordeirópolis	17.591	21.085	26.585	Geométrico
Corumbataí	3.794	3.874	4.667	Geométrico
Elias Fausto	13.888	15.796	17.832	Mínimos Quadrados
Ipeúna	4.340	6.016	7.538	Mínimos Quadrados
Iracemópolis	15.555	20.047	21.768	Mínimos Quadrados
Leme	80.757	91.804	97.516	Mínimos Quadrados
Limeira	249.046	276.010	305.169	Mínimos Quadrados
Mombuca	3.107	3.266	3.724	Geométrico
Piracicaba	329.158	364.872	434.432	Geométrico
Pirassununga	64.864	70.138	73.436	Mínimos Quadrados
Rafard	8.360	8.624	9.333	Geométrico
Rio Claro	168.218	186.299	206.950	Mínimos Quadrados
Rio das Pedras	23.494	29.508	31.503	Mínimos Quadrados
Saltinho	5.799	7.059	8.353	Mínimos Quadrados
Santa Cruz da Conceição	3.531	3.998	4.179	Mínimos Quadrados
Santa Gertrudes	15.906	21.644	23.721	Mínimos Quadrados
Santa Maria da Serra	4.673	5.418	5.753	Mínimos Quadrados
São Pedro	27.897	31.688	38.991	Geométrico

Fonte: Autor (2025).

Na sequência, foi calculado a massa total de resíduos sólidos urbanos gerada por cada município ao longo dos 25 anos, através da Equação 7.

$$M_{RSU} = \frac{P_i \cdot Coef \cdot 365}{1000} \quad (\text{Equação 7})$$

Sendo que M_{RSU} se refere a massa de resíduos sólidos urbanos a ser destinado no aterro sanitário (t/ano); P_i se refere população de determinado município estimada no ano i (hab.); $Coef$ se refere ao coeficiente de geração per capita de RSU de determinado município (kg/hab./ano), tendo como referência os dados da CETESB (2022); 365 se refere ao número de dias de um ano; 1000 se refere ao fator de conversão de 1000 quilogramas para uma tonelada.

Em seguida, após a obtenção da massa de resíduos sólidos, calculou-se o volume de RSU a ser destinado no aterro sanitário, considerado o peso específico da massa de resíduos após a compactação, além do acréscimo do volume de recobrimento das células.

$$V_{RSU} = \frac{M_{RSU}}{C_{RSU}} \cdot (1 + V_R) \quad (\text{Equação 8})$$

Sendo que V_{RSU} se refere ao volume de resíduos sólidos urbanos destinados ao aterro sanitário (m³); C_{RSU} se refere ao peso específico da massa de resíduos após a compactação de 0,75 t/m³ e V_R se refere ao volume de recobrimento de 20% (IPT; CEMPRE, 2018).

Por fim, calculou-se a área mínima necessária para a implantação de um aterro sanitário em cada município e para a Região Metropolitana de Piracicaba através da equação 9.

$$A_{min} = \frac{V_{RSU}}{h} \cdot (1 + A_I) \quad (\text{Equação 9})$$

Onde A_{min} se refere a área mínima (m²); h se refere a altura do aterro sanitário (m) e A_I se refere a área de infraestrutura para as demais estruturas de gerenciamento de resíduos, segundo estimativa de Ni-bin *et al.* (2008).

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Após seguir os passos da metodologia descrita no capítulo anterior, foi possível confeccionar os mapas em função dos diversos critérios abordadas nesse trabalho que compõem a base para a síntese de multicritérios e o mapa final que categoriza os níveis de aptidão para a implantação de aterros sanitários, utilizando as técnicas de geoprocessamento no ArcGIS, além de identificar a área mínima necessária para atender a Região Metropolitana de Piracicaba.

5.1. Mapeamento dos Critérios de Análise

A Figura 3 apresenta a distribuição das formações geológicas e do uso e ocupação do solo na Região Metropolitana de Piracicaba (RMP). Observa-se que a ocupação antrópica predomina na região, com a atividade agrícola abrangendo 39,6% da área total, seguida pelo Mosaico de Usos (27,9%) e pela Pastagem (12,8%).

As classes de Vegetação Arbórea e Vegetação Herbácea correspondem a 10,7% e 0,1% da área, respectivamente. Essa distribuição evidencia a insuficiência na preservação da vegetação dos biomas Cerrado e Mata Atlântica. Além disso, ao correlacionar esses dados com a declividade do terreno (Figura 4), verifica-se que a vegetação remanescente está concentrada em áreas de relevo forte ondulado, montanhoso e escarpado, cujas inclinações acentuadas dificultam a ocupação antrópica.

Em relação às formações geológicas, quatro se destacam na área de estudo: Pirambóia (24,3%), Itararé (20,0%), Corumbataí (17,5%) e Serra Geral (17,5%). Nota-se que a maior parte da formação Serra Geral é ocupada por atividade agrícola, que muito provável, é favorecida pela fertilidade das rochas basálticas características dessa formação.

As classes de solo predominantes na RMP são Latossolos (43,3%) e Argissolos (36,6%), conforme apresentado na Figura 4. O Latossolo ocorre principalmente em áreas planas, devido ao seu desenvolvimento rápido, enquanto o Argissolo ocupa terrenos com diferentes níveis de inclinação, variando de plano a forte ondulado. Adicionalmente, observa-se uma forte relação entre a declividade e a distribuição do Gleissolo, um solo hidromórfico presente em áreas planas sujeitas à inundação.

De maneira geral, a análise topográfica da RMP indica que grande parte da região é adequada para a instalação de aterros sanitários, uma vez que 48,61% da área apresenta relevo Suave Ondulado, 33,17% é classificada como Plano, 16,49% como Ondulado, 1,59% como Forte Ondulado, 0,12% como Montanhoso e 0,02% como Escarpado.

A Figura 5 apresenta a APP e as Distâncias a partir da Hidrografia, assim como a Distância das Áreas Urbanas. Observa-se que a drenagem possui padrão dendrítico e se configura como um sistema semelhante a uma árvore, com vários afluentes convergindo para rios principais. Esse cenário demonstra grande ocupação da RMP pela hidrografia e consequente limitação para a instalação de aterros sanitários.

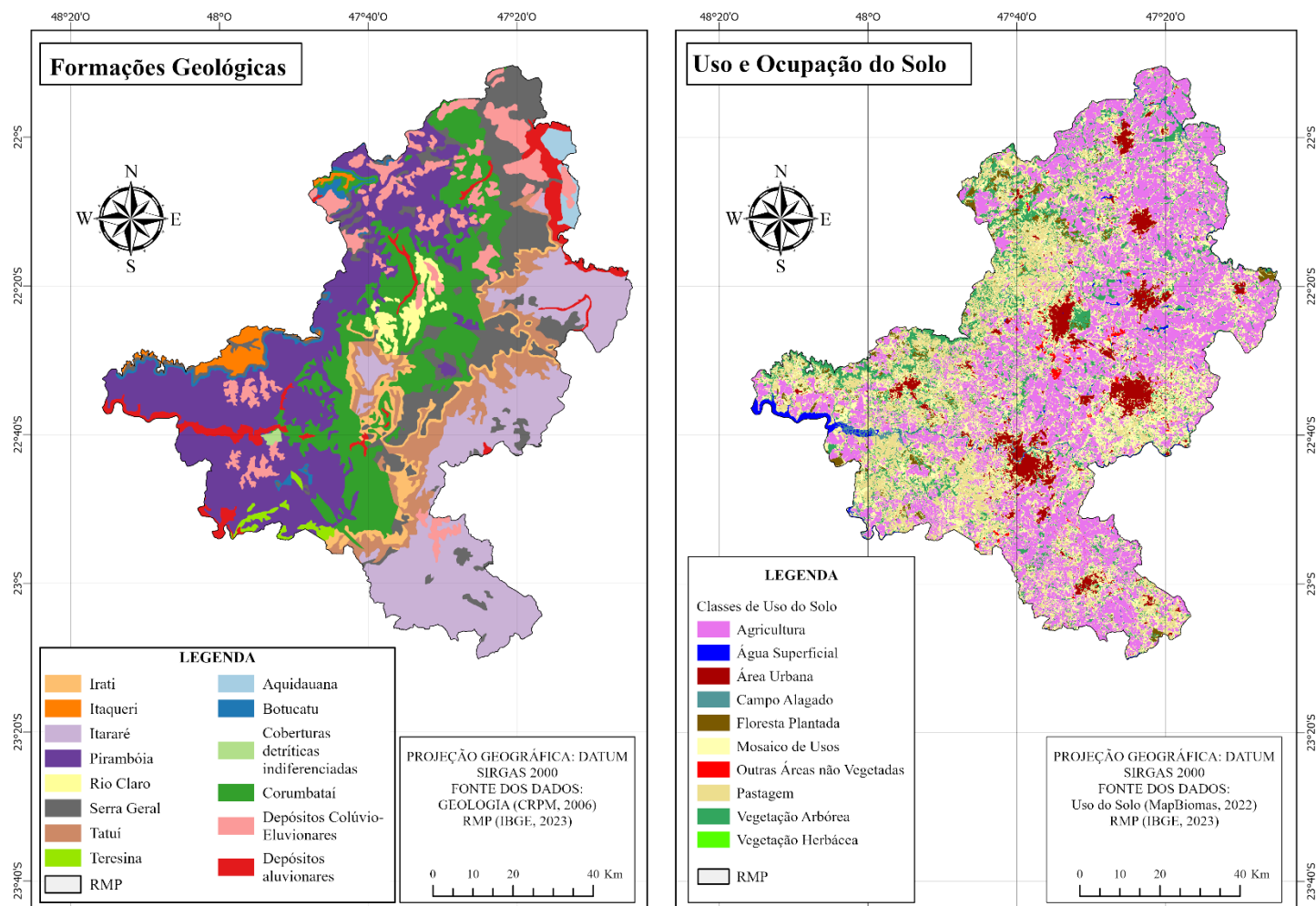
Ainda nessa perspectiva, destaca-se maior concentração de afluentes nas extremidades sul da RMP, mais especificamente nos municípios de Capivari, Elias Fausto e Rafard, pois estão próximos do Rio Capivari. Na região norte da RMP, os municípios Analândia e Corumbataí também apresentam concentração de afluentes devido a presença do Rio Corumbataí.

A análise da distância da área urbana revela que a faixa de 500 metros de restrição é mais significativa nos municípios de Araras, Leme, Limeira, Piracicaba, Pirassununga e Rio Claro, em função da maior extensão das áreas urbanizadas. Ressalta-se que Piracicaba, o município com maior extensão territorial na RMP, concentra sua área urbana na região leste, indicando maior aptidão da porção oeste para a implantação de aterros sanitários.

Por fim, a Figura 6 também apresenta as Distâncias das Vias de Acesso assim como as ASA e a UC de Proteção Integral. As Vias de Acesso estão presentes em todos os municípios, porém São Pedro, Santa Maria da Serra e a zona oeste de Piracicaba possuem menor densidade viária, tal como Corumbataí, Santa Cruz da Conceição e Analândia. Assim, os demais municípios tendem a apresentar menores custos logísticos para a operação de aterros sanitários. Ademais, verifica-se uma correlação entre áreas urbanizadas e disponibilidade de vias de acesso, dado que os municípios mais urbanizados possuem maior concentração de infraestrutura viária.

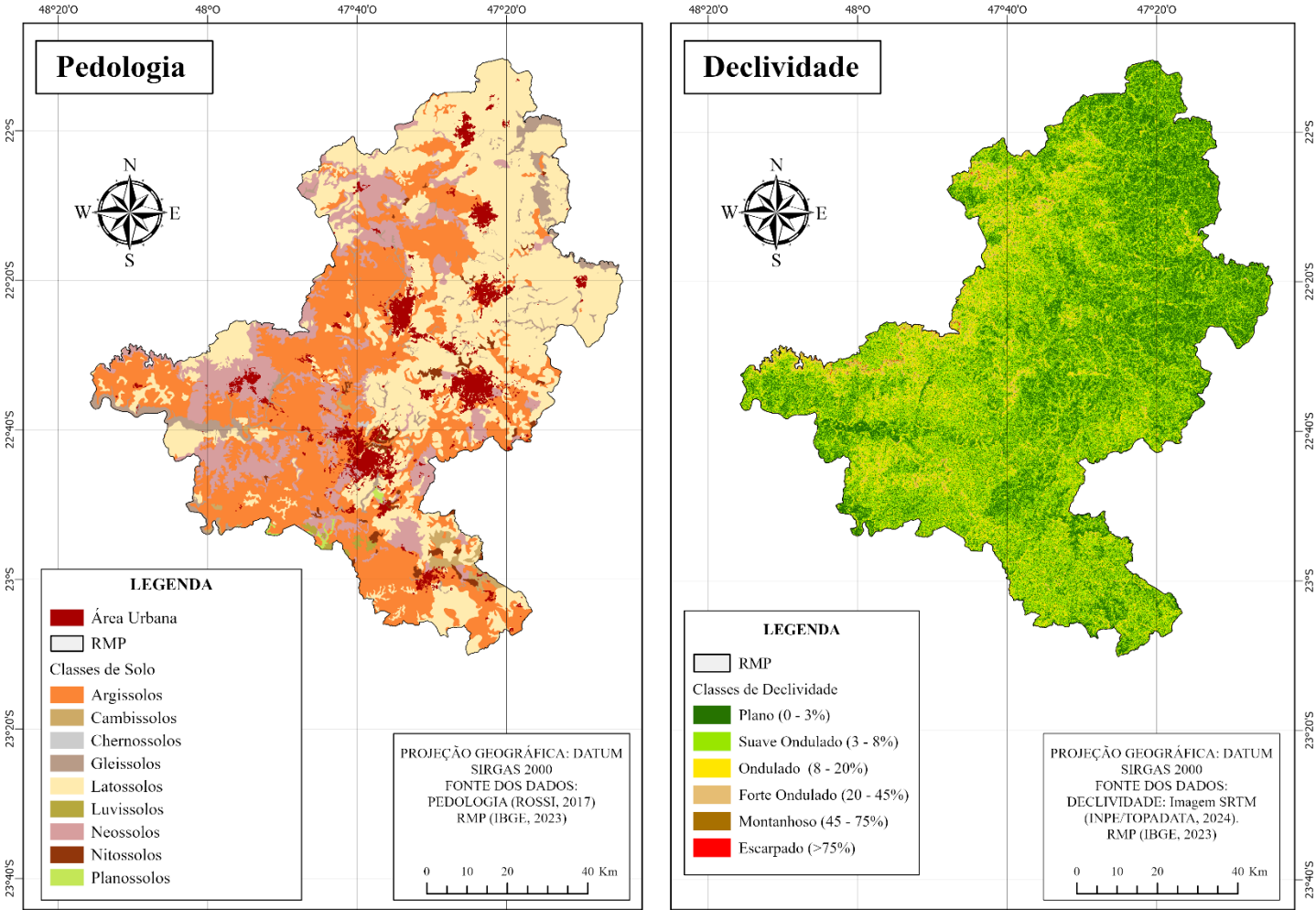
Por fim, a ASA classifica uma área significativa de 4.124 km² como inapta, devido aos aeródromos presentes nos municípios Analândia, Araras, Elias Fausto, Ipeúna, Leme, Piracicaba, Pirassununga e Rio Claro. Em compensação, a UC de Proteção Integral, restringe apenas 0,76 km².

Figura 3: Mapa de Geologia e Uso e Ocupação do Solo na RMP.



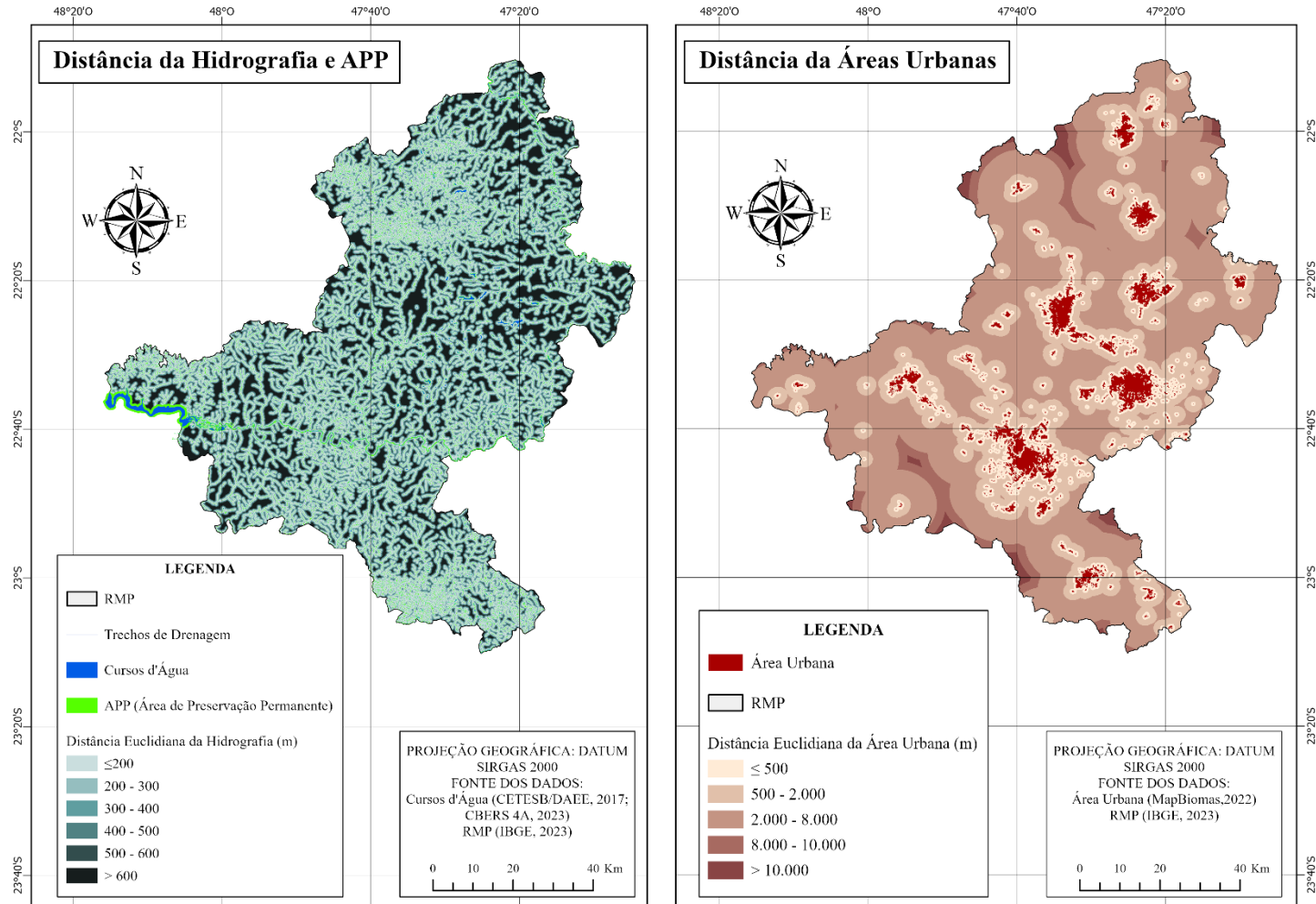
Fonte: Autor (2025).

Figura 4: Mapa de Pedologia e Declividade na RMP.



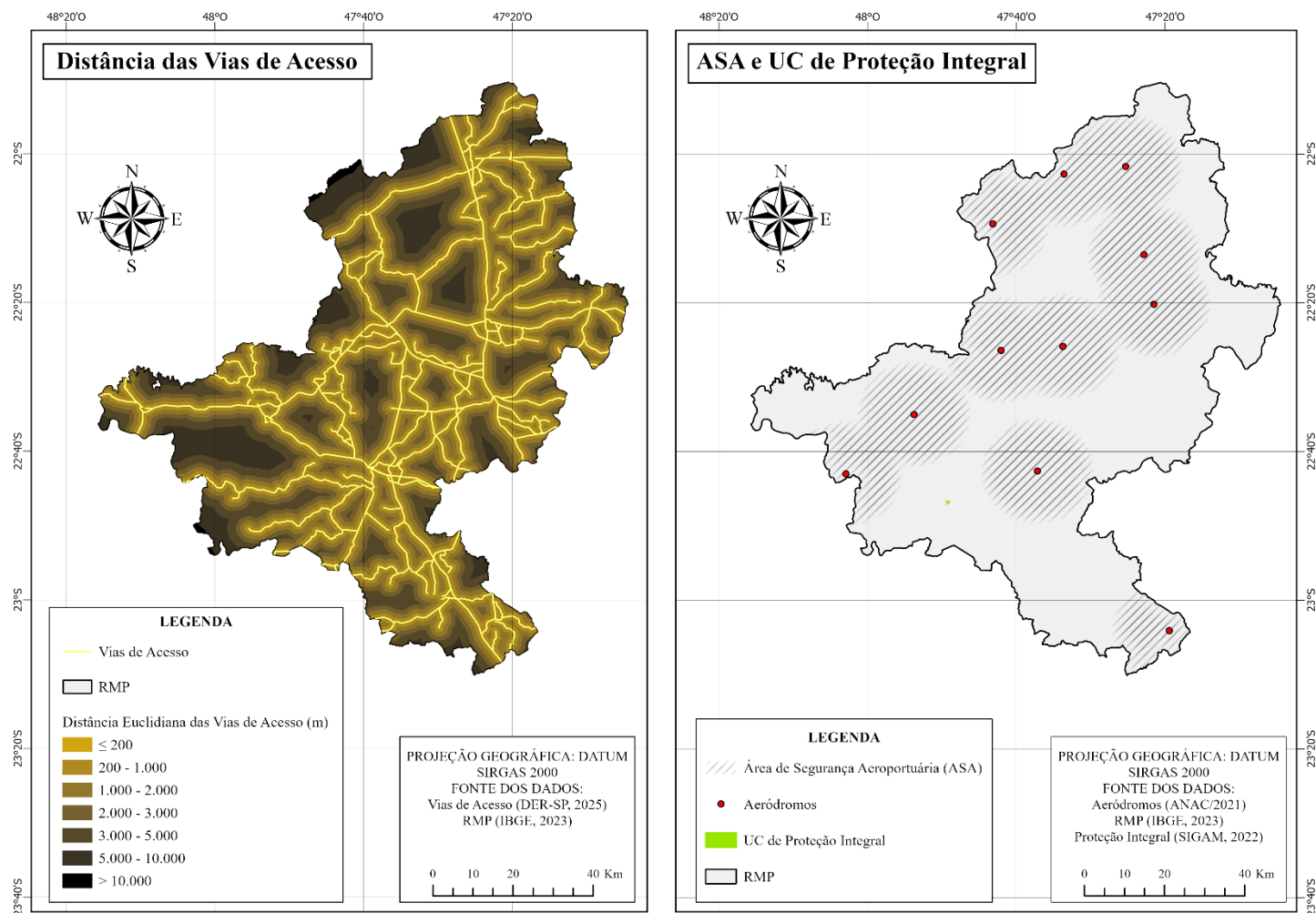
Fonte: Autor (2025).

Figura 5: Mapa de Distância das Áreas Urbanas, Hidrografia e Áreas de Preservação Permanente.



Fonte: Autor (2025).

Figura 6: Mapa da Distância das Vias de Acesso e delimitação das ASA e UC de Proteção Integral na RMP.



Fonte: Autor (2025).

5.2. Síntese por Análise de Multicritérios

A matriz de decisão foi então elaborada utilizando a escala fundamental de Saaty (1991), para se definir linearmente a hierarquia de importância entre os critérios e obteve-se 0,04104 como Razão de Consistência, indicando a consistência do julgamento como aceitável. Os pesos obtidos são apresentados na Tabela 8, junto com as notas atribuídas aos critérios escalonados. Enquanto para os critérios restritivos, as notas atribuídas são apresentadas na Tabela 9.

Tabela 8: Pesos e notas atribuídas aos critérios escalonados.

Peso	Critério	Descrição	Nota	Peso	Critério	Descrição	Nota
22,1%	Pedologia	Argissolos	1	2,6%	Uso e Ocupação do Solo	Agricultura	1
		Cambissolos	0,2			Água Superficial	0
		Chernossolos	0,4			Área Urbana	0
		Gleissolos	0			Campo Alagado	0
		Latossolos	1			Floresta Plantada	0,4
		Luvissolos	0,6			Mosaico de Usos	1
		Neossolos	0,2			Outras não vegetadas	0,4
		Nitossolos	0,6			Pastagem	1
		Planossolos	0			Vegetação Arbórea	0
32,3%	Hidrografia	≤ 200	0	22,1%	Geologia	Vegetação Herbácea	0,2
		$200 < d \leq 300$	0,2			Aquidauana	0,4
		$300 < d \leq 400$	0,4			Botucatu	0,2
		$400 < d \leq 500$	0,6			Coberturas Detriticas Indiferenciadas	0
		$500 < d \leq 600$	0,8			Corumbataí	0,8
		$d > 600$	1			Depósito Colúvio-Eluvionares	0
5,6%	Área Urbana	$d \leq 500 \text{ m e } d > 10.000 \text{ m}$	0			Depósitos Aluvionares	0
		$500 \text{ m} < d \leq 2.000 \text{ m e } 8.000 \text{ m} < d \leq 10.000 \text{ m}$	0,6			Irati	0,8
		$2.000 \text{ m} < d \leq 8.000 \text{ m}$	1			Itaqueri	0,2
3,9%	Vias de Acesso	$d \leq 200 \text{ ou } d > 10.000 \text{ m}$	0			Itararé	0,4
		5.000 - 10.000	0,2			Pirambóia	0,2
		3.000 - 5.000	0,4			Rio Claro	0,2
		2.000 - 3.000	0,6			Serra Geral	1
		1.000 - 2.000	0,8			Tatuí	0,6
		200 - 1.000	1			Teresina	0,8
11,4%	Declividade	$i \leq 1\% \text{ e } i \geq 30\%$	0				
		$20\% < i < 30\%$	0,6				
		$8\% < i \leq 20\%$	0,8				
		$1\% < i \leq 8\%$	1				

Fonte: Autor (2025).

Tabela 9: Notas atribuídas aos critérios restritivos.

Critério	Descrição	Nota
Declividade	$1\% < i < 30\%$	1
	$i \leq 1\%$ e $i \geq 30\%$	0
Hidrografia	$d > 200$ m	1
	$d \leq 200$ m	0
Área Urbana	$d > 500$ m	1
	$d \leq 500$ m	0
Área de Proteção Permanente	Não incide sob APP	1
	Incide sob APP	0
Área de Segurança Aeroportuária	$d > 13$ Km de Aeródromos	1
	$d \leq 13$ Km de Aeródromos	0
Unidade de Conservação	Não Incide sob Proteção Integral	1
	Incide sob Proteção Integral	0

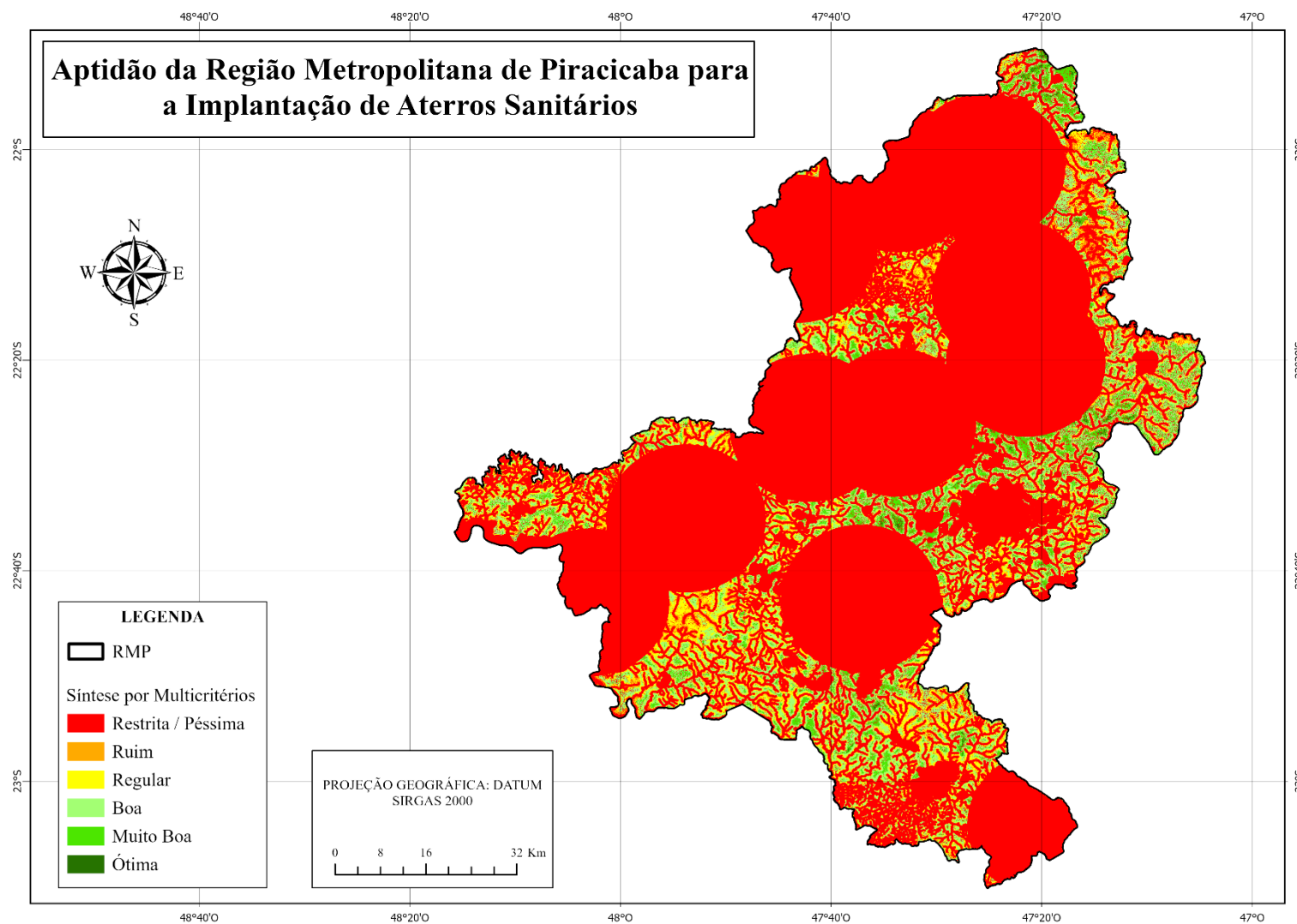
Fonte: Autor (2025).

Nota: d – distância; i – inclinação.

Utilizando os critérios e os valores acima informados, foi possível gerar o mapa de representação da Aptidão da Região Metropolitana de Piracicaba para Implantação de Aterros Sanitários, o qual é um produto derivado do cruzamento de todas as feições identificadas e apresentadas nas Figuras 3, 4, 5 e 6.

A Figura 7 permite a visualização das restrições e a aptidão das áreas, bem como quais são as áreas mais ou menos aptas à implantação de um aterro sanitário. É importante acentuar que essa síntese corresponde a uma proposta inicial que pode orientar a escolha de locais que apresentaram uma aptidão prévia à instalação, de acordo com os critérios e métodos utilizados.

Figura 7: Mapa de Aptidão para Implantação de Aterros Sanitários na RMP.



Fonte: Autor (2025).

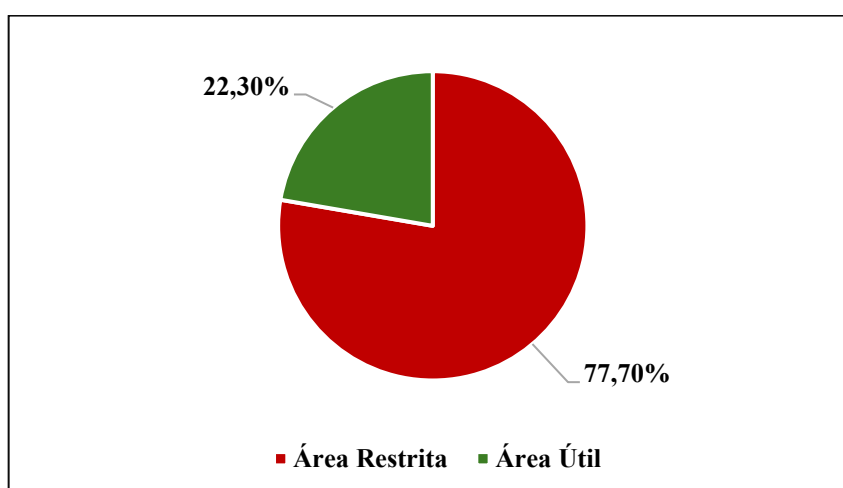
As tonalidades verdes representam as áreas com maior aptidão, por serem predominantemente ocupadas por atividades agrícolas e de pastagem, localizadas sobre solos e formações geológicas favoráveis, além de estarem afastadas de cursos d'água, áreas urbanas e serem admissíveis pelos demais critérios analisados.

Por outro lado, as regiões indicadas pelas cores laranja e vermelha correspondem a áreas com vegetação, solos e geologia menos adequados ao propósito, além de apresentarem relevo desfavorável e sobreposição com áreas restritas, que desaconselha seu uso para a instalação de empreendimentos dessa tipologia.

As áreas identificadas com aptidão regular na cor amarela, devem ser avaliadas com cautela antes de uma efetiva instalação, pois são regiões próximas à cursos d'água e de solo do tipo gleissolo e planossolos, bem como possuem geologia diversa, que para sua fiel caracterização, necessita-se de sondagens e análises laboratoriais.

Além disso, cabe destacar que, de toda a área pertencente à RMP, apenas cerca de 1.752,6 km² não se sobrepõe as áreas restritas. Isso porque os aeródromos e a grande densidade de afluentes limitam as áreas potenciais da RMP. Embora esse valor represente, em número absoluto, uma extensão suficiente para se implantar diversos aterros sanitários, proporcionalmente, corresponde a apenas 22,3 % do território total da RMP, conforme ilustra a Figura 8.

Figura 8: Quantificação da área restrita e da área útil para instalação de aterro sanitário.



Fonte: Autor (2025).

A partir da estimativa da projeção populacional e dos volume de resíduos sólidos urbanos gerados a serem dispostos em aterros sanitários, foi possível identificar a área mínima

necessária para a implantação de aterros sanitários municipais ou regional, de forma a suportar toda o volume gerado por um período de 25 anos.

Tabela 10: Massa de resíduos sólidos gerados e área mínima para aterro sanitário.

Municípios	Massa RSU (m³)	Área Mínima (ha)
Águas de São Pedro	23.151,07	0,19
Analândia	23.803,52	0,19
Araras	961.772,66	7,69
Capivari	354.898,37	2,84
Charqueada	91.013,33	0,73
Conchal	17.979,55	1,44
Cordeirópolis	149.382,36	1,20
Corumbataí	12.784,21	0,10
Elias Fausto	83.697,02	0,67
Ipeúna	43.603,01	0,35
Iracemópolis	149.490,67	1,20
Leme	139.402,35	1,12
Limeira	2.206.982,26	17,66
Mombuca	16.579,91	0,13
Piracicaba	3.135.572,68	25,08
Pirassununga	445.537,58	3,56
Rafard	442.946,37	3,54
Rio Claro	1.498.279,31	11,99
Rio das Pedras	240.885,17	1,93
Saltinho	43.115,38	0,34
Santa Cruz da Conceição	17.521,59	0,14
Santa Gertrudes	197.349,09	1,58
Santa Maria da Serra	32.000,75	0,26
São Pedro	219.589,00	1,76
Região Metropolitana de Piracicaba	10709337,21	85,67

Fonte: Autor (2025).

Conforme os dados apresentados, os municípios que demandam as maiores áreas são: Limeira, Piracicaba, Rio Claro e Araras, pois são municípios que possuem grande número de habitantes e, conseqüentemente, promovem maior geração de RSU. Para a implantação de um aterro sanitário que atenda a RMP por 25 anos, deve-se dispor de uma área mínima de 85,67 ha ou 0,8567 km². Nesse sentido, ao verificar a disponibilidade de área útil, conclui-se que a RMP apresenta potencial para implantar um empreendimento desse porte a fim de promover a gestão dos resíduos sólidos urbanos.

Ainda nesse viés, é importante ressaltar, contudo, que o total de área remanescente abrange as áreas mapeadas como “péssima”, “ruim” e “regular”. Considerando somente as áreas mapeadas como “boas”, “muito boas” e “ótimas” restam 12,84%. Após a exclusão de pixels isolados e a verificação de áreas contíguas e efetivamente aproveitáveis, esse valor reduz-se

para 9,76%, correspondente à 767,27 km² ou 76.727,16 ha, sendo possível implantar aproximadamente 895 aterros sanitários com a área mínima necessária para atender à RMP.

Apesar da expressiva aptidão observada, esses dados não devem servir como justificativa para uma gestão inadequada dos resíduos sólidos urbanos. Ao contrário, deve-se adotar práticas mais eficientes de gerenciamento, como a separação na fonte e a destinação ambientalmente adequada dos resíduos recicláveis e orgânicos, assim como preconiza a PNRS, pois tais medidas contribuem para a ampliação da vida útil dos aterros já existentes e reduz a necessidade de se implantar novas unidades.

Adicionalmente, destaca-se que as áreas de maior aptidão podem ser inferiores à 9,76 %, uma vez que esse estudo constitui uma análise inicial e na concepção de um projeto executivo, deve-se averiguar em campo a fidelidade com a realidade e, sobretudo, avaliar as especificidades do local que podem condicionar (ou não) a implantação de aterro, como por exemplo a capacidade de permeabilidade, haja vista a recomendação da ABNT NBR 13.896/1997 para coeficiente inferior a 10^{-6} cm/s e uma zona não saturada, com espessura superior a 3,0 m, para evitar contato com lençol freático e contaminações.

Nesse momento, torna-se relevante informar que foi realizado o levantamento dos poços cadastrados no Sistema de Informações de Águas Subterrâneas – SIAGAS do Serviço Geológico do Brasil – CPRM (CPRM, 2020), para se obter dados preliminares referentes a profundidade do lençol freático no município para a análise desse critério ambiental. Entretanto, do total de 1.509 poços cadastrados na RMP, 892 não possuem informações referente ao seu Nível Estático (profundidade do lençol freático) e os 617 restantes estão localizados nas áreas urbanas, ou seja, área inapta para o presente estudo. Portanto, não sendo possível analisar esse critério preliminarmente apenas com as informações dos poços cadastrados, a verificação in loco é necessária.

Por fim, além resultados obtidos com a aplicação prática das ferramentas de geoprocessamento e da análise multicritério, este trabalho também contribui para a produção de conhecimento técnico-científico na área de planejamento e gestão de resíduos sólidos. A aplicação dos critérios no contexto regional da RMP, oferece uma base técnico-científica que pode ser replicada para outros estudos de regiões com características semelhantes. O uso de geotecnologias integrado às metodologias de tomada de decisão reforça a importância do conhecimento técnico para a formulação de políticas públicas e planos de desenvolvimento.

Dessa forma, o presente estudo poderá ser utilizado por todos os municípios integrantes da RMP, para a orientação de locais aptos à instalação de aterros sanitários, consorciados ou não, assim como poderá ser aproveitado para aprimoramento do PDUI da RMP, haja vista a ausência da delimitação de áreas favoráveis. Logo, este mapeamento cobre uma lacuna do PDUI e pode ser considerado em futuras revisões do macrozoneamento.

6 CONCLUSÕES

O presente trabalho teve como objetivo principal identificar áreas com maior aptidão para a instalação de aterros sanitários na Região Metropolitana de Piracicaba (RMP), a partir da análise integrada de critérios ambientais, legais e normativos, utilizando tecnologias de geoinformação e métodos de apoio à tomada de decisão.

A crescente geração de resíduos sólidos urbanos associado à não destinação ambientalmente adequada, provoca a diminuição da vida útil dos aterros e, conseqüentemente, aumenta-se a necessidade de se ampliar ou de se implantar novos aterros sanitários. Esta última opção, exige o planejamento territorial eficiente e tecnicamente embasado.

A aplicação do método de Análise Hierárquica de Processos (AHP), permitiu hierarquizar os critérios através da determinação das importâncias relativas e ponderá-los com notas. A Lógica Booleana, por sua vez, trouxe maior praticidade e economia de tempo para a análise, pois permitiu excluir extensas áreas restritas. O cruzamento de dados resultou no mapa de aptidão para a instalação de aterros sanitários na RMP, demonstrando que a combinação dos dois métodos é eficiente.

Os resultados reforçam a eficácia do uso de SIG para fins de planejamento territorial e tomada de decisão. Ademais, o estudo demonstrou que 77,7 % das áreas são restritas e, a parcela restante, ou seja, 22,3 %, é classificada entre as diferentes classes de aptidão, o que reduz ainda mais as áreas favoráveis para a instalação de aterros sanitários.

A análise estatística evidenciou que, ao considerar apenas as áreas classificadas como boa, muito boa e ótima, identificou-se 12,84% da área total da RMP. E após a exclusão dos pixels isolados e verificação das áreas contíguas, restaram-se apenas 9,76% equivalente a cerca de 767,27 km². Considerando uma área mínima estimada de 85,67 hectares para implantação de um aterro com vida útil de 25 anos, seria possível, teoricamente, instalar até 895 unidades.

Destaca-se, ainda, que as áreas para a instalação de aterros sanitários são reduzidas devido à crescente urbanização dos municípios, a densidade de afluentes identificados e, sobretudo, aos aeródromos, que restringe mais que a metade de toda a extensão territorial analisada. E embora, tenha sido identificado um potencial significativo da RMP para a implantação de aterros sanitários, deve-se realizar a destinação ambientalmente adequada dos resíduos sólidos urbanos assim como preconiza da PNRS.

Por fim, através dos resultados gerados, é possível orientar a instalação de aterros sanitários em áreas favoráveis, entretanto, salienta-se que para a escolha definitiva de uma área, é preciso maior aprofundamento nos estudos técnicos, realização de análises específicas para a correta caracterização geológica e pedológica, bem como mensuração do coeficiente de permeabilidade local e a avaliação da profundidade do nível do lençol freático como abordada pela NBR ABNT 13.896/1997.

REFERÊNCIAS

- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Aterros de resíduos não perigosos - Critérios para projeto, implantação e operação**. Rio de Janeiro, 1997.
- ABOARRAGE, A. M.; LOPES, Ricardo da Cunha. **Projeto A borda leste da Bacia do Paraná: integração geológica e avaliação econômica, relatório final**. Porto Alegre: CPRM, 1986. 18 v.
- ABREMA – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE RESÍDUOS E MEIO AMBIENTE. **Panorama dos resíduos sólidos do Brasil**. São Paulo: Grappa Marketing Editorial, 2023. Disponível em: <https://www.abrema.org.br/panorama/>. Acesso em: 08 fev. 2025.
- ANDRADE, I. M. S; JESUS, M. H. Albuquerque de; LINS, V. F. **Impacto ambientais causados pelo descarte irregular de resíduos sólidos: soluções para mitigar a problemática**. 2023. Trabalho de Conclusão de Curso (Ciências Biológicas) – Centro Universitário Brasileiro, Recife, 2021. Disponível em: <https://www.grupounibra.com/repositorio/CBIOLO/2023/impactos-ambientais-causados-pelo-descarte-irregular-de-residuos-solidos-solucoes-para-mitigar-a-problematika.pdf>. Acesso em: 09 fev. 2025.
- AZEVEDO, A. M.; BARBOSA, I. M. B. R. **Identificação de áreas restritas à implantação de aterros de resíduos sólidos na região metropolitana do Recife**. Instituto Federal de Pernambuco, Recife, 2021. Disponível em: <https://repositorio.ifpe.edu.br/xmlui/handle/123456789/278>. Acesso em: 14 fev. 2025.
- BARROS; A. V. B.; LEAL, L. R. B.; MELO, D. H. C. T. B.; GONÇALVES, S. C. Geoprocessamento e análise multicritérios na seleção de alternativas locais na disposição final de resíduos sólidos urbanos: estudo de caso em Camaçari, Bahia. **Revista Geociências**, UNESP, São Paulo, v. 43, n. 4, p. 559 - 571, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.5016/geociencias.v43i4.18634>. Acesso em: 09 fev. 2025.
- BLASIUS, J. P. **Proposta de metodologia de baixo custo para seleção de áreas para localização de aterros sanitário com uso de SIG e análise multicritério: estudo de caso na Região de Araras – SP**. Dissertação (Doutorado em Geociências e Meio Ambiente) – UNESP (Instituto de Geociências e Ciências Exatas), Rio Claro, 2023.
- BOLZANI, I.; MARTINS, R. **Censo do IBGE: população do Brasil cresce 6,45% e chega a 203 milhões; veja números**. Portal G1 – Economia, 28 jun. 2023. Disponível em: <https://g1.globo.com/economia/censo/noticia/2023/06/28/censo-do-ibge-populacao-do-brasil-cresce-645percent-e-chega-a-203-milhoes-veja-numeros.ghtml>. Acesso em: 08 fev. 2025.
- BRASIL. **Lei nº 9.985, de 18 de julho de 2000**. Regulamenta o art. 225, § 1º, incisos I, II, III e VII da Constituição Federal, institui o Sistema Nacional de Unidades de Conservação da Natureza e dá outras providências. Brasília, DF, 2000. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/19985.htm. Acesso em: 14 fev. 2025.
- BRASIL. **Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010**. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/12305.htm. Acesso em 14 fev. 2025.

BRASIL. **Lei nº 12.651, de 25 de maio de 2012.** Dispõe sobre a proteção da vegetação nativa, estabelece normas para a exploração sustentável e dá outras providências. Brasília, DF, 2012. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2011-2014/2012/lei/112651.htm. Acesso em: 14 fev. 2025.

BRADY, N. C.; WEIL, R. R. **A Natureza e Propriedades do Solo.** 15ª Edição. Upper Saddle River: Pearson, 2017.

CÂMARA, G; DAVIS, C; MONTEIRO, A. M. V. **Introdução a ciência da geoinformação.** INPE, São José dos Campos, 2001. Disponível em: <http://mtc-m12.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/sergio/2004/04.22.07.43/doc/publicacao.pdf>. Acesso em: 18 fev. 2025.

CARVALHO, M. B. et al. Uso de geotecnologias na seleção de áreas para implantação de aterros sanitários: Abordagem composta aplicada ao município de Mirandópolis, SP. **Revista de Geociências**, São Paulo, v. 38, n. 3, p. 717-729, 2019. Disponível em: <https://www.periodicos.rc.biblioteca.unesp.br/index.php/geociencias/article/view/13315/11321>. Acesso em: 14 fev. 2025.

CETESB - Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. **Inventário Estadual de Resíduos Sólidos Urbanos - 2021.** Série Relatórios. ISSN (0103-4103), São Paulo, 2022. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/residuossolidos/wpcontent/uploads/sites/26/2022/07/Inventario-Estadual-de-Residuos-Solidos-Urbanos2021.pdf>. Acesso em: 10 mar. 2025.

CONCEIÇÃO, M. M. M; TEIXEIRA, L. C. G. M. Relação entre produção de resíduos sólidos urbanos e crescimento populacional na Região Norte. **Revista AIDIS**, Belém, Vol. 14, N. 3, 1383-1396, 2021. Disponível em: <https://www.revistas.unam.mx/index.php/aidis/article/view/75886>. Acesso em: 09 fev. 2025.

CONAMA – CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. **Resolução nº 4, de outubro de 1995.** Dispõe sobre a criação de Unidades de Conservação e dá outras providências. Brasília, DF, 1995. Disponível em: https://www.pilotopolicial.com.br/wp-content/uploads/2017/04/CONAMA_RES_CONS_1995_004.pdf. Acesso em: 14 fev. 2025.

CORSEUIL, C. W. **Técnicas de geoprocessamento e de análise de multicritérios na adequação de uso das terras.** 2006. Dissertação (Doutorado em Agronomia - Área de Concentração em Energia na Agricultura) - Faculdade de Ciências Agrônômicas da UNESP - Campus de Botucatu, Botucatu, 2006.

CPRM - Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais. Serviço Geológico do Brasil. MARCONATO, A. et al. **Geologia e recursos minerais do Estado de São Paulo.** Programa Geologia do Brasil, 2006. Disponível em: <https://rigeo.sgb.gov.br/handle/doc/2966>. Acesso em: 12 mar. 2025.

CYPRESTE, J. **População do Brasil começará a encolher em 2042, antes do previsto, diz IBGE; AL e RS diminuem a partir de 2027.** Portal G1 – Economia, 22 ago. 2024. Disponível em: <https://g1.globo.com/economia/censo/noticia/2024/08/22/projecao-populacao-ibge-1.ghtml>. Acesso em: 09 fev. 2025.

DALFI, R. L.; SANTOS, A. Rosa dos; CAMPOS, R. Ferraço de.; MOREIRA, T. R.; EUGENIO, D. C.; SANTOS, G. M. A. D. Alves dos. Cenários distintos no mapeamento de áreas de inundação nos bairros do município de Alegre, ES. 2013. **Caderno de Geociências**, Alegre, ES, v. 10, n. 2, p. 76-86, 2013. Disponível em: <https://www.mundogeomatica.com.br/Publicacoes/Artigo47.pdf>. Acesso em: 18 fev. 2025

FELICORI, T. C.; Marques, E. A. G.; Silva, T. Q.; Porto, B. B.; Bravin, T. C.; Santos, K. M. C. Identificação de áreas adequadas para construção de aterros sanitários e usinas de triagem e compostagem na mesorregião da Zona da Mata, Minas Gerais. **Revista Sanitária e Ambiental**, Rio de Janeiro, RJ, v. 21, n. 3, p. 547-560, jul.-set. 2016. ISSN 1809-4457. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1413-41522016146258>. Acesso em: 14 fev. 2025.

FELIZARDO, L; SANTINI JÚNIOR, M; FARIA, G. A; OLIVEIRA, J. N de; ORTEGA, D. J. P; COELHO, G; MALTONI, K. **Determinação da área mínima de aterros sanitários para uso nos próximos 25 anos da microrregião Chapecó-SC. 2021.** Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/354378134_Determinacao_da_area_minima_de_aterrros_sanitarios_para_uso_nos_proximos_25_anos_da_microrregiao_Chapeco-SC. Acesso em: 10 mar. 2025.

FERNANDES, A. C. de Q; SILVA, F. de S. B; MOURA, R. S. C. Sociedade de consumo e o descarte de resíduos sólidos urbanos: reflexões a partir de um estudo de caso em Pau dos Ferros/RN. **Revista Geotemas**, Pau dos Ferros. v. 6, n. 2, p. 30–46, 2016. Disponível em: <https://periodicos.apps.uern.br/index.php/GEOTemas/article/view/737>. Acesso em: 8 fev. 2025.

FREITAS, C. J. S de. **Sequência didática resíduos sólidos: atividades lúdicas como proposta pedagógica.** 2021. Dissertação (Mestrado em Ensino das Ciências Ambientais) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2021. Disponível em: <https://repositorio.ufpe.br/handle/123456789/40710>. Acesso em 09 fev. 2025.

FREITAS, C. R. **Tecnologias de geoinformação no planejamento territorial: novas formas de produção, compartilhamento e uso de dados espaciais.** Tese de Doutorado (Arquitetura e Urbanismo) - Escola de Arquitetura da Universidade Federal de Minas Gerais, 2020. Disponível em: <http://hdl.handle.net/1843/40989>. Acesso em: 14 fev. 2025.

FURLANETTO, T. **Estudo de alternativas locacionais para viabilidade ambiental de empreendimentos: o caso de aeroporto de Ribeirão Preto – SP.** 2012. Dissertação (Mestrado em Ciências da Engenharia Ambiental) – Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos, 2012. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18139/tde-14122012-082939/pt-br.php>. Acesso em: 09 fev. 2025.

GOVERNO DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Lei Complementar 1.360, de 24 de agosto de 2021.** Cria a Região Metropolitana de Piracicaba e dá providências correlatas. São Paulo, 24 ago. 2021. Disponível em: <https://www.al.sp.gov.br/repositorio/legislacao/lei.complementar/2021/lei.complementar-1360-24.08.2021.html>. Acesso em: 14 fev. 2025.

GRANDZOL, J. R. **Melhorando o processo de seleção de docentes no Ensino Superior: Um caso para o processo de hierarquia analítica.** Universidade de Bloomsburg da Pensilvânia. 2005. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/234735207_Improving_the_Faculty_Selection_Process_in_Higher_Education_A_Case_for_the_Analytic_Hierarchy_Process_IR_Applications_Volume_6. Acesso em: 18 fev. 2025.

HELLER, L; REZENDE. S. **Planejamento em saneamento básico: aspectos teórico metodológicos.** Fundação Vale, 2013. Disponível em: <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000223068>. Acesso em: 8 mar. 2025.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Panorama do Censo Demográfico 2022**. Rio de Janeiro: IBGE, 2023. Disponível em: <https://censo2022.ibge.gov.br/panorama/>. Acesso em: 8 fev. 2025.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Biomass**. 2019. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/apps/biomass/#/home>. Acesso em: 14 fev. 2025.

IPEA – INSTITUTO DE PESQUISA ECONÔMICA APLICADA. **Gestão do uso do solo e disfunções do crescimento urbano: instrumentos de planejamento e gestão urbana: Brasília e Rio de Janeiro**. IPEA, USP, UnB, UFRJ. Brasília: IPEA, v. 3, 2001.

IPT - INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Lixo Municipal: Manual de Gerenciamento Integrado**. São Paulo, IPT, 2010.

IPT – INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO; COMPROMISSO EMPRESARIAL PARA RECICLAGEM – CEMPRE. **Lixo municipal: manual de gerenciamento integrado**. 4. ed. São Paulo, 2018.

JENSEN, J. R. **Sensoriamento Remoto do Meio Ambiente: Uma Perspectiva dos Recursos Terrestres**. 2 Ed. Pearson Prentice Hall: Upper Saddle River. 2007.

LONGLEY, P. A.; GOODCHILD, M. F.; MAGUIRE, D. J.; RHIND, D. W. **Sistema e ciência da informação geográfica**. 3 Ed. Porto Alegre: Bookman, 2013.

MAGUIRE, D. J.; GOODCHILD, M. F.; RHIND, D. W. **Sistemas de Informação Geográfica: Princípios e Aplicações**. Vol. 2, Longman Scientific & Technical, 1991.

MELO, A. L. Oliveira de. **Avaliação e seleção de área para implantação de aterro sanitária utilizando lógica fuzzy e análise multi-critério; um proposta metodológica**: Aplicação ao município de Cachoeiro de Itapemirim-ES. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2001. Disponível em: <https://locus.ufv.br/items/0c857c16-13e9-4eb5-bbcf-a7064f442148>. Acesso em: 14 fev. 2025.

MOURA, A. C. M. **Geoprocessamento na gestão e planejamento urbano**. 3 Ed. Rio de Janeiro: Editora Interciência, 2014.

NI-BIN, C.; PARVATHINATHAN, G.; BREEDEN, B. J. Combining GIS with fuzzy multicriteria decision-making for landfill siting in a fast-growing urban region. **Journal of Environmental Management**, Kingsville, v. 87, n. 1, p.139-153, abr. 2008.

PCS - PROGRAMA CIDADES SUSTENTÁVEIS. **Guia de introdução ao planejamento urbano integrado**. Programa Cidades Sustentáveis, 2020. Disponível em: https://www.cidadessustentaveis.org.br/arquivos/Publicacoes/Guia_de_Introducao_ao_Planejamento_Urbano_Integrado.pdf. Acesso em: 9 mar. 2025.

PEREIRA, D. H. **Métodos matemáticos aplicados à projeção da população de Curitiba-PR**. 2018. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/362516061_Metodos_matematicos_aplicados_a_projecao_da_populacao_de_Curitiba-PR. Acesso em: 10 mar. 2025.

PHILIPPI JR; BRUNA, G. C; SILVEIRA, V. F. **Planejamento Territorial e Ambiental: instrumentos de Intervenção**. In: PHILIPPI Jr. A. Saneamento, saúde e Ambiente. Manole, Barueri, São Paulo, 2005.

PERRONI, H. P. **Contribuição metodológica para análise preliminar de potenciais áreas para aterro sanitário com o auxílio do Software QGIS**: Estudo de caso: Município de

Vargem Grande do Sul – SP. Trabalho de Conclusão de Curso (Especialização em Conformidade Ambiental) - Pós-Graduação Lato Sensu Conformidade Ambiental com Requisitos Técnicos e Legais, Escola Superior da CETESB, São Paulo, 2021. Disponível em: <http://cetesb.sp.gov.br/escolasuperior/producaotecnico-cientifica/>. Acesso em: 09 fev. 2025.

PERINOTTO, J. A. de J.; ZAINÉ, J. E. **Coluna estratigráfica da Bacia do Paraná na região mapeada**. Modificado de Soares; Landim (1975), Rio Claro, 2008.

PINHEIRO, M. M. F.; OSCO, L. P.; MENDES, T. S. G.; RAMOS, A. P. M. Caracterização das áreas restritas para implantação de aterro sanitário na região do Pontal do Paranapanema SP. **Anais do XIX Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, Santos. São José dos Campos, INPE, 2019.

PLANO DE DESENVOLVIMENTO URBANO INTEGRADO (PDUI). **Região Metropolitana de Piracicaba (RMP)**. Governo do Estado de São Paulo: 2022. Disponível em: https://rmp.pdui.sp.gov.br/?page_id=127. Acesso em: 14 fev. 2025.

PONTES, J. M. Elaboração e Gestão de Políticas Públicas: O Diferencial do Planejamento Estratégico Situacional – PES. **Revista Diálogos Interdisciplinares**, São Paulo, v. 2, n. 2, p. 165-181. 2013. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/263400511_Elaboracao_e_Gestao_de_Politicas_Publicas_O_Diferencial_do_Planejamento_Estrategico_Situacional_-_PES. Acesso em: 9 mar. 2025

PURIFICAÇÃO, C. G. Campos da. **Análise de decisão multicritérios e SIG aplicados ao gerenciamento dos resíduos sólidos urbanos na escolha de área para implantação de aterros sanitários – RMS/BAHIA**. Dissertação (Mestrado em Geologia Ambiental, Hidrogeologia e Recursos Hídricos) – Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2020. Disponível em: <https://repositorio.ufba.br/handle/ri/33268>. Acesso em: 09 fev. 2025.

REICHERT, G. A.; SILAV A. A.; FLECK, E. **Proteção das Águas Subterrâneas na Implantação de um Aterro Sanitário**. 1998. Disponível em: <https://aguassubterraneas.abas.org/asubterraneas/article/download/22297/14640/80470>. Acesso em: 09 fev. 2025.

REZENDE, D. A. Planejamento estratégico municipal como proposta de desenvolvimento local e regional de um município paranaense. **Revista FAE**, Curitiba, v.9, n.2, p.87-104, 2006. Disponível em: <https://revistafae.fae.edu/revistafae/article/view/368>. Acesso em: 8 mar. 2025.

REZENDE, F.; LEITE, A. M. B.; CARRIELO, F. Áreas potenciais para implantação de aterro sanitário em Ilha Grande – RJ. **Anais XVII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**. João Pessoa, 2015. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/305789817_Areas_potenciais_para_implantacao_de_aterro_sanitario_em_Ilha_Grande_-_RJ. Acesso em: 14 fev. 2025.

RODRIGUES, R.; ARAÚJO, S. M. S. Sensoriamento remoto e geoprocessamento no contexto brasileiro e internacional: ferramentas para a análise da vegetação. **Revista Científica Semana Acadêmica**. Fortaleza, v. 1, n. 154, 2018. Disponível em: <https://semanaacademica.org.br/artigo/sensoriamento-remoto-e-geoprocessamento-no-contexto-brasileiro-e-internacional-ferramentas>. Acesso em: 09 fev. 2025.

ROSA, R. **Introdução ao geoprocessamento**. São Paulo: CETESB, 2013. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/wp-content/uploads/sites/33/2016/12/Introdu%C3%A7%C3%A3o-ao-Geoprocessamento-Roberto-Rosa.pdf>. Acesso em: 14 fev. 2025

ROSSI, M. **Mapa pedológico do estado de São Paulo: revisão e ampliado**. São Paulo: Instituto Florestal, 2017. Disponível em: <https://www.infraestruturameioambiente.sp.gov.br/institutoflorestal/2017/09/mapa-pedologico-do-estado-de-sao-paulo-revisado-e-ampliado/>. Acesso em: 21 fev. 2025

SAATY, T. H. A scaling method form priority in hierarquical structures. **Journal of Mathematical Psychology**, v.15, n. 3, p. 234-281, 1977. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/0022-2496\(77\)90033-5](https://doi.org/10.1016/0022-2496(77)90033-5). Acesso em: 18 fev. 2025

SAATY, T. L. Método de Análise Hierárquica. 3 ed. São Paulo-SP: **Makron Books do Brasil Editora Ltda, Editora McGraw-Hill do Brasil**, 1991.

SAATY, T. L. Como tomar uma decisão: O processo de hierarquia analítica. **Jornal Europeu de Investigação Operacional**: Amsterdã, v. 48. P. 9 - 26, 1994. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/307800676_How_to_Make_a_Decision_The_Analytic_Hierarchy_Process. Acesso em: 18 fev. 2025.

SEMIL – Secretaria de Meio Ambiente, Infraestrutura e Logística. **Planejamento Territorial**. São Paulo, 8 out. 2021. Disponível em: <https://semil.sp.gov.br/educacaoambiental/prateleira-ambiental/planejamento-territorial/>. Acesso em: 31 mar. 2025

SCHMIDT, T. **Seleção de área e dimensionamento de aterro sanitário para o consórcio público intermunicipal para assuntos estratégicos do G8-CIPAE G8**. Monografia (Bacharelado em Engenharia Ambiental) - Programa de Graduação em Engenharia Ambiental, Universidade do Vale do Taquari (UNIVATES), Lajeado, RS, 2016. p. 55. Disponível em: <http://hdl.handle.net/10737/1405>. Acesso em: 18 fev. 2025.

SCHNEIDER, R. L.; Schneider, R.; Mühlmann, H.; Tommasi, E.; Medeiros, R. D.; Daemon, R. F.; Nogueira, A. A. **Revisão estratigráfica da Bacia do Paraná**. In: Sociedade Brasileira de Geologia, Congresso Brasileiro de Geologia, 28, Porto Alegre, 1974. v. 1 p. 41-65.

SEDEMA – SECRETÁRIA DE DEFESA DO MEIO AMBIENTE. **Plano de Municipal de Arborização Urbana**. Prefeitura Municipal de Piracicaba, 2024. Disponível em: <https://piracicaba.sp.gov.br/wp-content/uploads/2024/08/Plano-Municipal-de-Arborizacao-Urbana.pdf>. Acesso em: 14 fev. 2025.

SILVA, E. Pereira da. **O aterro sanitário e o transbordo de Goiânia como atrativos de risco de fauna para o tráfego aéreo do Aeroporto Santa Genoveva**. Trabalho de Conclusão de Curso (Ciências Aeronáuticas) - Pontifícia Universidade Católica de Goiás, Goiânia, 2021. Disponível em: <https://repositorio.pucgoias.edu.br/jspui/handle/123456789/2229>. Acesso em: 14 fev. 2025.

SILVA, Jessica Carla da. **Monitoramento e avaliação para o planejamento urbano ecológico com o uso do sensoriamento remoto e dos sistemas de informação geográfica**. Dissertação (Mestrado em Urbanismo Sustentável e Ordenamento do Território) – Universidade Nova de Lisboa, Lisboa. 2023. Disponível em: <http://hdl.handle.net/10362/167770>. Acesso em: 09 fev. 2025.

SILVA, O. Cardoso da. **PLANEJAMENTO TERRITORIAL E A GESTÃO DOS RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS: O Consórcio Intermunicipal para o Desenvolvimento Ambiental Sustentável do Norte de Minas – CODANORTE**. Dissertação (Mestrado em Geografia) - Universidade Estadual de Montes – Unimontes, Montes Claro, 2016. Disponível em: <https://www.repositorio.unimontes.br/handle/1/587?mode=full>. Acesso em: 9 mar. 2025.

SILVA, N. L. S. **Aterro sanitário para Resíduos Sólidos Urbanos - RSU – Matriz para seleção da área de implantação.** Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) - Programa de Graduação em Engenharia Civil, Universidade Estadual de Feira de Santana (UEFS), Feira de Santana, BA, 2011. Disponível em: <http://civil.uefs.br/>. Acesso em: 14 fev. 2025.

SNIS – SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÃO SOBRE SANEAMENTO. **Diagnóstico Temático Manejo de Resíduos Sólidos Urbanos – Infraestrutura.** Brasília: FUNAPE/UnB, 2023. Disponível em: <https://www.gov.br/cidades/pt-br/aceso-a-informacao/acoes-e-programas/saneamento/snis>. Acesso em: 09 fev. 2025.

SOUZA, M. L.; RODRIGUES, G. B. Planejamento urbano e ativismos sociais. **Revista Eletrônica de Geografia**, Uberlândia, v. 1, n. 3, p. 126-131, 2009. Disponível em: <https://seer.ufu.br/index.php/Observatorium/article/view/44182/23336>. Acesso em: 8 mar. 2025.

VASCONCELOS, E. A. **Transporte urbano nos países em desenvolvimento: reflexões e propostas.** 3ª ed. São Paulo: Annablume, 2000.