

1 **ALOCAÇÃO DE ATERRO SANITÁRIO EM CONSÓRCIO: ESTRATÉGIA PARA MUNICÍPIOS**
2 **NO ESTADO DO AMAZONAS (BRASIL)**

3 *Allocation of sanitary landfill in consortium: strategy for the brazilian municipalities in the State of*
4 *Amazonas*

6 ISMAEL DAMASCENO PAVANI

7 REJANE ENNES CICERELLI ¹

8 TATI DE ALMEIDA¹

9 ¹ Universidade de Brasília

10 (ismaelpav@gmail.com; rejaneig@unb.br; tati_almeida@unb.br)

12 **RESUMO**

13 Um dos atuais problemas enfrentado pelos municípios brasileiros está relacionado à disposição final
14 ambientalmente adequada dos rejeitos em aterros sanitários. Além de projetos técnicos apropriados, os
15 aterros devem ser instalados em locais que possuam condições técnicas e ambientais favoráveis. Com a
16 proposta de minimizar e racionalizar os esforços para seleção destes locais, este estudo busca apresentar
17 uma metodologia para avaliar a aptidão dos locais com base em determinados critérios (legais, técnicos,
18 ambientais) para seleção das áreas mais aptas à instalação de um aterro sanitário, considerando o modelo de
19 arranjo municipal consorciado proposto no Plano Estadual de Resíduos Sólidos do Amazonas aplicado aos
20 municípios de Atalaia do Norte, Benjamin Constant e Tabatinga. Assim, a partir da utilização de dados
21 gratuitos disponibilizados em ambiente web, ferramentas de geoprocessamento e de análise multicritério,
22 foram identificadas 47 áreas consideradas aptas para instalação de um aterro sanitário nos municípios
23 supracitados, sendo que, dentre elas, as mais aptas se localizam próximo à rodovia que interliga os
24 municípios de Benjamin Constant e Atalaia do Norte.

25 **Frases-chave:** Utilização de SIG e análise multicritério para a seleção de áreas para instalação de aterro
26 sanitário; Estudo de caso para seleção de áreas para instalação de aterro sanitário de forma consorciada por
27 três municípios brasileiros; Obtenção de mapa de aptidão para instalação de aterro sanitário.

28

29 **Palavras-chave:** SIG, análise multicritério, AHP, aterro sanitário, resíduos sólidos.

30

31 **ABSTRACT**

32

33 One of the current problems faced by the Brazilian municipalities is related to the environmentally adequate
34 disposition of the wastes in landfills. In addition to appropriate technical projects, landfills should be
35 installed in locations with favorable technical and environmental conditions. With the proposal to minimize
36 and rationalize efforts to select these sites, this study aims to present a methodology to evaluate the suitability
37 of the sites based on certain criteria (legal, technical, environmental) for selecting the most suitable areas
38 for the installation of a sanitary landfill, considering the model of municipal consortium arrangement
39 proposed in the State Plan of Solid Waste of Amazonas applied to the municipalities of Atalaia do Norte,
40 Benjamin Constant and Tabatinga. Thus, based on the use of free data available on the Web, geoprocessing
41 tools and multicriteria analysis, 47 areas were identified as suitable for the installation of a sanitary landfill
42 in the municipalities mentioned above, among which the most suitable are located near to the highway that
43 connects the municipalities of Benjamin Constant and Atalaia do Norte.

44

45 **Highlights:** Use of GIS and multicriteria analysis for the selection of landfill area; Case study to select
46 landfill area in a consortium of three Brazilian municipalities; Obtaining map of suitability for installation
47 of sanitary landfill.

48

49 **Keywords:** GIS, multicriteria analysis, AHP, landfill, solid waste.

50

51 1. INTRODUÇÃO

52

53 Para suprir as demandas mundiais de consumo, a humanidade explora recursos naturais renováveis e
54 não renováveis do planeta, provocando a perda da biodiversidade e a exaustão da geodiversidade. A geração
55 de resíduos, consequência desse processo, é responsabilidade de todos os segmentos da sociedade:
56 indivíduos, empresas, organizações e governos. Assim, é função desses segmentos propor medidas que
57 mitiguem esse impacto ambiental (Ersoy e Bulut, 2009; Chang et al., 2008).

58 Nas últimas décadas, foram realizados no Brasil debates entre governo, setor acadêmico, setor
59 empresarial e entidades civis que originou a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), Lei nº
60 12.305/2010, sancionada em 02/08/2010 (Brasil et al., 2010). A PNRS representa um marco para a sociedade
61 brasileira no que toca à sustentabilidade com destaque para uma visão avançada na forma de tratar os
62 resíduos sólidos. A lei prevê diretrizes para a gestão integrada dos resíduos sólidos, incluindo o tratamento
63 e recuperação dos resíduos por processos tecnológicos disponíveis e economicamente viáveis e,
64 posteriormente, depois de esgotadas todas as alternativas, o rejeito resultante deve ser encaminhado à
65 disposição final ambientalmente adequada, como em aterros sanitários (Furusetth e Johnson, 1988; Ngoc e
66 Schnitzera, 2009; Ersoy e Bulut, 2009).

67 Um aterro sanitário incorpora um processo de disposição de rejeitos no solo fundamentado em critérios
68 e normas operacionais específicas, permitindo um confinamento seguro do ponto de vista ambiental e de
69 saúde pública (Furusetth e Johnson, 1988; Rathi, 2006 e Li'aoa et al., 2009). Os aterros sanitários são
70 realidade para poucos municípios brasileiros, sendo que 50% ainda fazem disposição irregular em lixões,
71 contaminando aquíferos e lençóis freáticos (IPEA, 2012). No caso específico do estado do Amazonas (AM),
72 maior estado do Brasil, com 1.559.161 km² de extensão, 62 municípios e cerca de 3.483.985 habitantes
73 (IBGE, 2010), os dados obtidos pelo governo federal indicam que 93% dos municípios dispõe seus resíduos
74 em lixões. Esse cenário indica a fragilidade do ecossistema dessa unidade da federação e, portanto, torna-se
75 urgente medidas de implementação e operação de aterros sanitários na região, adaptadas à limitação de
76 investimentos no setor. Uma possibilidade para redução de custos é a organização dos municípios em

77 consórcios. A proposta é o uso conjunto do aterro sanitário e a divisão de investimentos referentes a sua
78 implantação, operação e manutenção (Lourenço et al., 2015). Neste processo, um dos aspectos mais
79 complexos na indicação do aterro sanitário é a localização, pois essa deve minimizar impactos ambientais,
80 garantir a saúde da população e uma gestão eficaz para os municípios envolvidos.

81 Para indicação de um local ideal muitos critérios devem ser analisados, o que requer bases de dados de
82 informações espaciais abrangentes e técnicas que permitam a combinação de fatores físicos, sociais,
83 ambientais e econômicos. Vários trabalhos foram desenvolvidos utilizando geoprocessamento como
84 principal ferramenta, tais como Whitlatch (1976) e McBean & Zukovs (1983) e mais recentemente Ersoy e
85 Bulut, 2009; Kara e Doratli (2012). Estes trabalhos podem ser base para o delineamento de diretrizes na
86 implantação de políticas públicas voltadas a gestão integrada e ao gerenciamento de resíduos sólidos, porém,
87 deve-se considerar as restrições e especificidades de cada região.

88 Nesse sentido, esse trabalho objetiva a proposição de cenários de áreas potenciais para instalação de
89 aterro sanitário consorciado, utilizando geoprocessamento e análise multicritério (AHP - *Analytic Hierarchy*
90 *Process*). Para isso, será utilizado como estudo de caso os municípios de Atalaia do Norte, Benjamin
91 Constant e Tabatinga, no estado do Amazonas, e dados espaciais gratuitos.

92

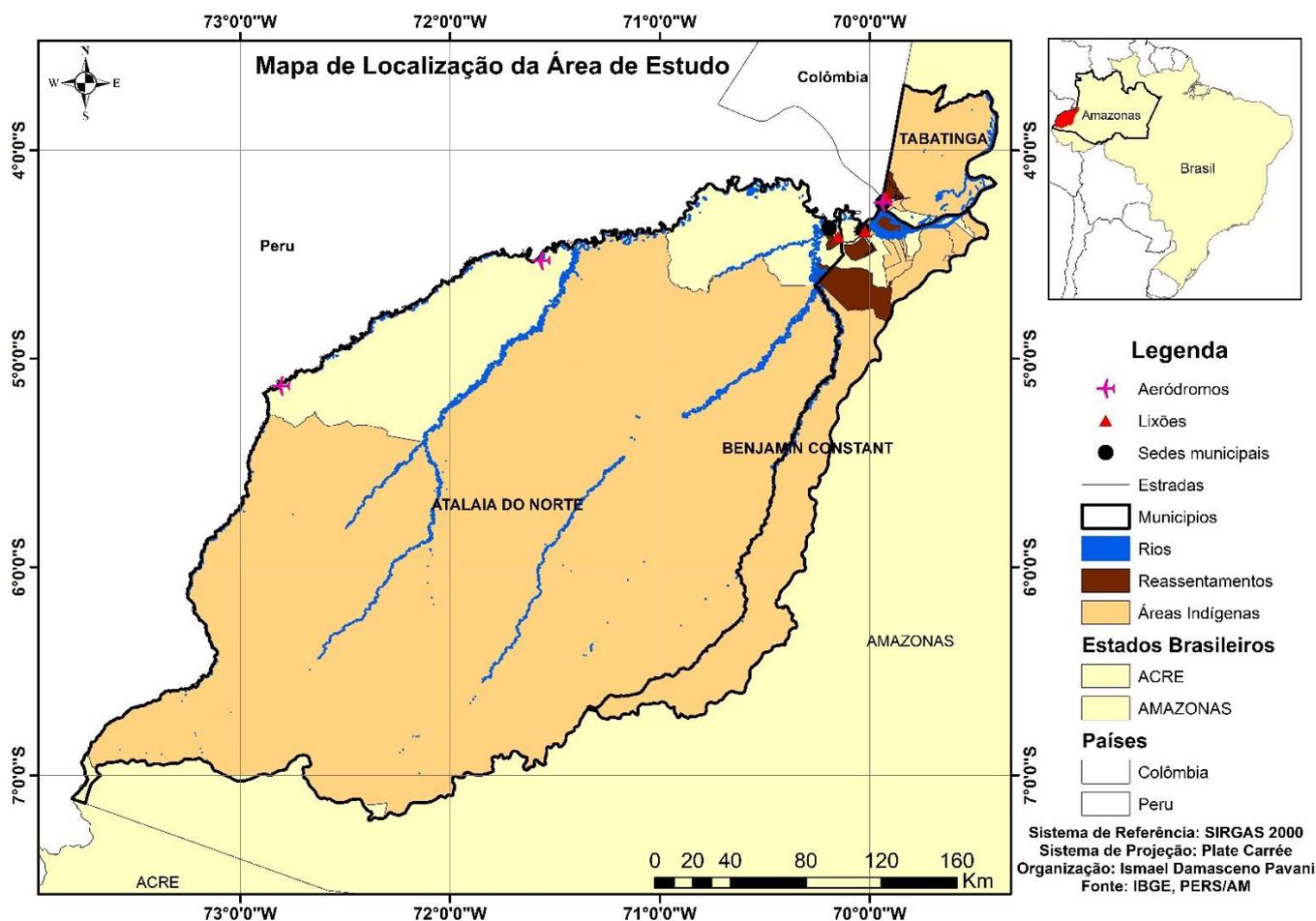
93 **2. ÁREA DE ESTUDO**

94 O estado do Amazonas faz fronteira ao norte com a Venezuela e o estado de Roraima (RR); a noroeste com
95 a Colômbia; a leste com o estado do Pará (PA); a sudeste com o estado do Mato Grosso; ao sul com o estado de
96 Rondônia (RO) e a sudoeste com o Peru e o estado do Acre (AC). O clima é equatorial úmido, com temperatura
97 média de 26,7°. A umidade relativa do ar fica em torno de 70% e o estado possui apenas duas estações bem
98 definidas: chuvosa (inverno) e seca ou menos chuvosa (verão). O Amazonas, reconhecido pela rica
99 biodiversidade, possui 51,8% do território destinado a regime especial de proteção: unidades de conservação
100 federais e estaduais (UCC) e terras indígenas (TI) (Amazonas, et al., 2015).

101 O território amazonense reserva 16% de toda a água doce do planeta, alimentada pelos dez rios existentes
102 no estado, que totalizam mais de 2.896.476 km² em 20 mil km de vias fluviais navegáveis, ligando comunidades
103 distantes na região (Amazonas, et. al., 2015).

104 A área de estudo selecionada é um típico cenário desse estado: municípios com extensa área geográfica,
105 baixa densidade populacional, grandes áreas de preservação (Unidades de Conservação e terras indígenas)
106 e rios de grandes extensões. A região fica no extremo oeste do estado e corresponde aos municípios de
107 Atalaia do Norte, Benjamin Constant e Tabatinga, conforme mostrado na Figura 1.

108 Figura 1 – Localização da Área de Estudo.



109 Esses municípios ocupam um território de 88.396,55 km² e população estimada em 121.362
110 habitantes (IBGE, 2016). De acordo com o mapa de solos 2011 da Empresa Brasileira de Pesquisa
111 Agropecuária (Embrapa), a pedologia do solo é predominantemente composta pelas classes argissolo e
112 gleissolo. De acordo com o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SiBCS), os argissolos se
113 caracterizam pela presença de horizonte diagnóstico B textural, apresentando acúmulo de argila em
114

115 profundidade devido à mobilização e perda de argila da parte mais superficial do solo. Por serem pouco
116 porosos, apresentam baixa permeabilidade. Já os gleissolos são solos hidromórficos, constituídos por
117 material mineral, que apresentam horizonte glei, que pode ser um horizonte subsuperficial (C, B ou E) ou
118 superficial A. Os solos desta classe encontram-se permanente ou periodicamente saturados por água. Cerca
119 de 85% da área de estudo possui declividade plana a suave ondulada.

120 Segundo Amazonas (2015), os municípios de Atalaia do Norte e Benjamin Constant são conectados,
121 pela via terrestre, por estradas. Por outro lado, Tabatinga, cuja fronteira do município com Benjamin
122 Constant é dividida pelos rios Jaguari e Solimões, somente tem acesso a esses municípios pela via fluvial.
123 Todos estes municípios dispõem atualmente seus resíduos sólidos e rejeitos de forma inadequada em lixões,
124 cujas áreas são de propriedade dos municípios, e não possuem programa de coleta seletiva. As informações
125 são mostradas na Tabela 1.

126 Tabela 1 - Dados dos municípios da área de estudo.

Municípios	Área do município (km ²)	População 2010	População estimada 2016	Área ocupada pelos lixões (ha)	Localização dos lixões
Atalaia do Norte	76.345	15.153	18.599	3,73	S 04°24'48.75" W 70°08'58.37"
Benjamin Constant	8.785	33.411	40.417	4,5	S 04°23'13.43" W 70°01'18.32"
Tabatinga	3.266	52.272	62.346	8,0	S 04°13'18.03" W 69°55'09.05"
Total	88.396,55	100.836	121.362	16,23	

127 Fonte: IBGE, 2016 e Amazonas, 2015

128

129 3. MÉTODOS

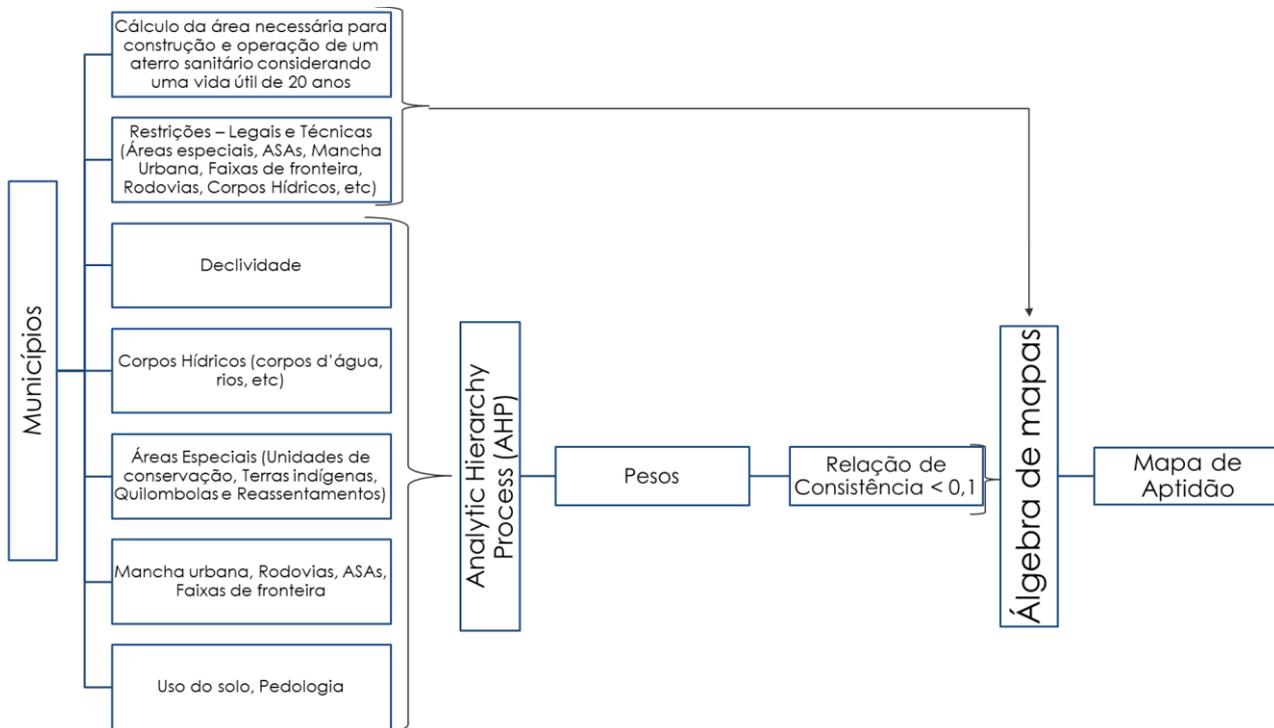
130 Os dados obtidos para a pesquisa foram adquiridos de forma gratuita e possuem recobrimento para o
131 estado do Amazonas. A integração desses dados para a proposição de áreas favoráveis à construção de
132 aterros sanitários foi realizada utilizando a análise multicritério, técnica AHP (*Analytic Hierarchy Process*).
133 Essa técnica permite a ponderação de variáveis de acordo com a importância relativa entre os fatores e é
134 utilizada com frequência na seleção de regiões propícias para a instalação de aterro sanitário (Basağoğlu et
135 al., 1997; Allen et al., 2003; Sener et al., 2006 e Sener et al., 2010).

136 O fluxograma da Figura 2 demonstra os dados utilizados e as correlações realizadas para a confecção
137 do mapa de aptidão a instalação de aterro sanitário para os municípios estudados.

138

139

Figura 2: Fluxograma da metodologia adotada no trabalho.



140

141

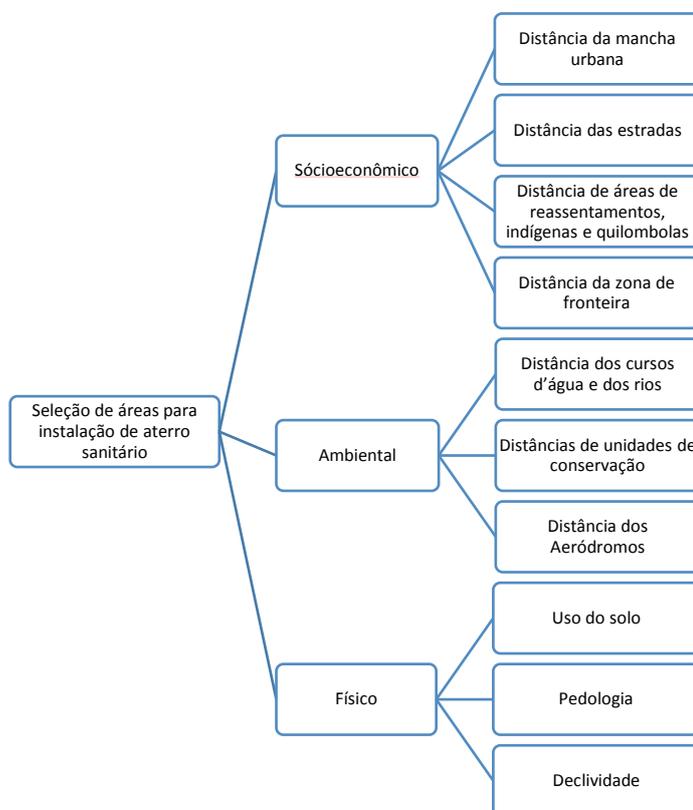
142 Primeiramente foi realizado um cálculo para estimativa do volume de resíduos sólidos urbanos (RSU)
143 gerados e coletados nos municípios estudados, de modo que se possa dimensionar a área necessária para
144 instalação e operação de um aterro sanitário considerando um tempo de vida útil de 20 anos. Para isso, foi
145 necessário estimar a geração per capita média diária de RSU para os municípios estudados. Com base na
146 publicação Diagnóstico do Manejo de Resíduos Sólidos Urbanos 2014 do Sistema Nacional de Informações
147 sobre Saneamento Básico (SNIS, 2014), obteve-se uma estimativa de geração per capita média diária de
148 0,87 kg/(hab dia) para municípios com população até 30.000 habitantes e de 0,94 kg/(hab dia) para
149 municípios com população de 30.000 até 100.000 habitantes. Tais valores foram adotados, para os
150 municípios de Atalaia do Norte (0,87 kg/(hab dia)) e Benjamin Constant e Tabatinga (0,94 kg/(hab dia)). O
151 volume de RSU gerado foi estimado com base na relação do crescimento populacional de cada um dos
152 municípios do consórcio, calculado a partir do levantamento populacional do censo de 2010 e dos cálculos

153 de estimativa populacional do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) para os anos de 2011 a
154 2016 (IBGE, 2016), utilizando-se do modelo estatístico de regressão linear ajustado pelos mínimos
155 quadrados. Oweiss e Khera (1990) estimaram o peso específico do resíduo municipal moderadamente
156 compactado na faixa de 0,46 a 0,63 t/m³. Para este trabalho, adotou-se o valor de 0,55 t/m³. Finalmente, a
157 área estimada foi calculada utilizando-se a metodologia de cálculo prevista no Procedimento para
158 Implantação de Aterro Sanitário em Valas, do Governo do Estado de São Paulo (São Paulo, 2005),
159 considerando-se uma vala padrão com dimensões de 3 m x 100 m x 3 m.

160 Em seguida, tendo calculada a área necessária para a instalação de um aterro sanitário, adotou-se uma
161 modelagem para seleção de áreas com base em critérios múltiplos restritivos. Foram considerados,
162 principalmente, critérios de natureza ambiental, físicos e socioeconômicos. A figura 3 apresenta um
163 diagrama com os critérios múltiplos restritivos mais relevantes adotados neste trabalho.

164

165 Figura 3: Diagrama com os critérios múltiplos restritivos mais relevantes adotados neste trabalho.



166

167 Buscou-se ainda utilizar como critério de restrição dados de nível de lençol freático, uma vez que esta
168 variável é importante no que se refere a preservação das águas subterrâneas. Foram obtidos dados do nível

169 estático de poços por meio do Sistema de Informações de Águas Subterrâneas (Siagas) do Serviço Geológico
170 do Brasil (CPRM). Porém, os dados se concentram nas sedes municipais, inviabilizando a interpolação.

171 Para cada critério avaliado (variável), foi gerada uma carta representativa do fenômeno no espaço. Os
172 mapas produzidos foram incluídos num banco de dados geográfico para posterior análise geográfica em um
173 ambiente de sistema de informação geográfica (SIG). Os dados foram padronizados para uma mesma escala
174 de mensuração, readequando as classes de acordo com a sua importância. A nota atribuída variou de 1 a 10
175 (um a dez), em que 1 representa a menor aptidão e 10 a melhor. Para obtenção das notas foram consultados
176 especialistas. Calculou-se a média aritmética das notas dadas pelos especialistas para cada uma das variáveis
177 propostas. As zonas de restrição à implantação do aterro foram excluídas da análise. A lista com os critérios
178 (variáveis) e faixas consideradas para a seleção de áreas para instalação de aterro sanitário são mostradas na
179 Tabela 2.

180

181

182

183

184

185

186

187

188

189

190

191

192

193

194

Tabela 2: Lista de critérios, restrições e faixas avaliadas.

Critérios principais	Critérios	Políticas	Áreas de restrição	Fatores (Classes)	Base de dados
Sócioeconômico	Distância da mancha urbana	Levou-se em conta a rejeição da população a este tipo de empreendimento e a sua incompatibilidade, segundo o planejamento territorial municipal. Assim, nesse estudo, foi considerada como área restrita a distância mínima de 500 m de quaisquer agrupamentos urbanos, conforme definido pela NBR 13896/1997 (ABNT, 1997). Porém, adotou-se uma distância máxima de 30 km, de modo a limitar o tempo de transporte do rejeito até o aterro, bem como, tornar mais viável economicamente o seu transporte.	distância abaixo de 500 m e acima de 30 km da mancha urbana.	500 - 5000 m	Vetorização de imagens de satélite de alta resolução espacial (Rapid Eye) de resolução espacial de 5 m.
				5000 - 10000 m	
				10000 - 20000 m	
				20000 - 30000 m	
Sócioeconômico	Distância das estradas	O uso das estradas existentes deve ser priorizado para evitar o custo de construção de estradas de conexão (Nas et al., 2008).	distância abaixo de 100 m e acima de 5 km das estradas existentes.	100 - 500 m	Vetorização de imagens de satélite de alta resolução espacial (Rapid Eye) de resolução espacial de 5 m.
				500 - 1000 m	
				1000 - 2000 m 2000 - 5000 m	
Sócioeconômico	Distância de áreas de reassentamento, indígenas e quilombolas	Aterros sanitários não devem ser instalados em áreas que apresentem restrições legais, tais como áreas de reassentamento para reforma agrária, indígenas e quilombolas.	distância abaixo de 500 m destas áreas.	500 - 1000 m	Fundação Nacional do Índio (Funai), 2010; e Instituto Nacional de Colonização e Reforma Agrária (Incra).
				1000 - 2000 m >2000 m	
Sócioeconômico	Distância da zona de fronteira	Deve ser evitada a construção de aterros sanitários em regiões muito próximas a fronteiras internacionais.	distância abaixo de 3 km.	-	IBGE para a América do Sul.
Ambiental	Distância dos cursos d'água	Aterros sanitários não devem ser instalados em áreas próximas a cursos d'água. A NBR 13896/1997 (ABNT, 1997) recomenda uma distância mínima de 200 m dos corpos d'água.	distância abaixo de 200 m.	200 - 300 m	Imagem SRTM (<i>Shuttle Radar Topography Mission</i>) de 30 metros, disponível no sítio do U.S. Geological Survey.
				300 - 400 m 400 - 500 m >500 m	
	Distância dos rios	Aterros sanitários não devem ser instalados em áreas próximas a rios. A região amazônica apresenta altos índices pluviométricos, o que contribui para a existência de muitos rios perenes e caudalosos. A legislação ambiental brasileira define como área de restrição de uso para rios com largura superior a 600 m, uma distância mínima de 500 m do rio.	distância abaixo de 500 m.	500 - 800 m	Agência Nacional de Águas (Base Hidrográfica Ottocodificada Multiescalas 2013) na escala 1:1.000.000 associada a Projeto TerraClass 2010 do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) e imagens de satélite de alta resolução espacial (Rapid Eye) de resolução espacial de 5 m.
				800 - 1000 m >1000 m	
	Distância de unidades de conservação	Aterros sanitários não devem ser instalados em áreas que apresentem restrições legais, tais como unidades de conservação. A legislação brasileira define que para unidades de conservação sem plano de manejo, deve haver uma zona de amortecimento mínima de 3 km.	distância abaixo de 3 km.	3000 - 3500 m 3500 - 4000 m 4500 - 5000 m >5000 m	Ministério do Meio Ambiente.
Distância de aeródromos	A resolução CONAMA nº 04/1995 (CONAMA, 1995) é o marco regulatório que define os critérios de restrições de usos do solo ao redor de aeródromos e estabelece o raio mínimo de exclusão de 13 km de distância de quaisquer atividades que ofereçam riscos, entendidas como "foco de atração de pássaros".	distância abaixo de 13 km.	-	Plano Nacional de Logística e Transportes 2010 (PNLT), do Ministério dos Transportes, Portos e Aviação Civil.	
Físico	Declividade	A topografia tem peso significativo na definição da melhor área para instalação de aterros sanitários. É fator determinante na escolha do método construtivo e nas obras de terraplanagem para sua construção. Segundo a NBR 13896/1997 (ABNT, 1997), as áreas com declividades entre 1 e 30% são consideradas as mais	áreas com declividade acima de 30% (Forte ondulado a Montanhoso e	0 - 3 % (Plano)	Imagem SRTM (<i>Shuttle Radar Topography Mission</i>) de 30 metros, disponível no sítio do U.S. Geological Survey.
				3 - 8 % (Suave ondulado)	
	Uso do solo	Aterros sanitários devem ser preferencialmente instalados em áreas com características antropizadas.	Áreas cobertas por hidrografia e mancha urbana.	Agricultura/Pastos diversos Florestas/Vegetação ou Regeneração secundária/Desflorestamentos /Área não observada	Não floresta/Outros usos/Mosaico de ocupações
Pedologia	Aterros sanitários devem ser preferencialmente instalados em terrenos que apresentem baixa permeabilidade	-	Gleissolo Argissolo	Mapa de solos 2011 da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa), em escala de 1:5.000.000.	

196

197

198

199

Posteriormente, por meio do método AHP (*Analytic Hierarchy Process*), proposto por Saaty (1980), foi realizada a ponderação das variáveis de acordo com a importância relativa entre os fatores.

200 3.1 Atribuições dos pesos das variáveis por *Analytic Hierarchy Process* (AHP)

201 Após a definição das classes e pesos dentro de cada carta temática e reclassificação dos valores,
202 ponderou-se as variáveis de acordo com o grau de importância relativa entre os fatores. Isso foi feito
203 utilizando o método AHP (*Analytic Hierarchy Process*) proposto por Saaty (1980).

204 A teoria AHP de Saaty (1980) é uma técnica baseada na lógica da comparação pareada, no qual os
205 fatores que influenciam a tomada de decisão são comparados dois-a-dois. Os diferentes fatores são
206 organizados hierarquicamente de acordo com um valor de importância relativa de um fator sobre os outros
207 e comparados entre si. A análise empírica sobre os fatores, comparando-os de forma pareada, permite a
208 estipulação de um valor que represente a relação entre eles.

209 Utilizou-se a escala de Saaty (1980) de números absolutos para atribuir valores numéricos quantitativos
210 e qualitativos aos julgamentos (Tabela 3).

211

212 Tabela 3: Escala de Saaty (1980) com os 9 pesos fundamentais de julgamento comparativo.

Importância	Definição	Explicação
1	Importância Equiparada	Contribuição equiparada para o objetivo.
3	Importância Moderada	Um objetivo ligeiramente favorável em detrimento a outro.
5	Importância Forte	Um objetivo fortemente favorável em detrimento a outro.
7	Importância Muito Forte	Um objetivo muito fortemente favorável em detrimento a outro; domínio demonstrado na prática.
9	Importância Absoluta	É a maior ordem de afirmação possível de um objetivo em detrimento a outro.
2,4,6,8	Valores intermediário entre dois julgamentos sucessivos	Possível necessidade de interpolar julgamentos numéricos

213 FONTE: Adaptado de Saaty (2008)

214

215 Esse método fundamenta-se numa matriz quadrada ($n \times n$) de comparação entre os “n” critérios
216 (fatores), na qual as linhas e as colunas correspondem aos critérios avaliados (na mesma ordem ao longo das

217 linhas e das colunas). Cada célula da matriz (a_{ij}) representa a importância relativa do critério da linha i com
218 relação ao critério da coluna j . Essa matriz é recíproca, sendo necessário preencher somente a metade
219 triangular superior direita, já que a outra metade deriva desta, e a diagonal principal assume valores unitários.
220 Em outras palavras, cada célula da matriz é preenchida com um valor de julgamento que expressa a
221 importância relativa entre pares de critérios. Por exemplo: na comparação do critério distância de
222 reassentamentos (D_r) com o critério distância de terras indígenas (D_{tr}) atribuiu-se o peso 1, ou seja, ambos
223 os critérios possuem importância equiparada para o objetivo de selecionar a melhor área para construção de
224 um aterro sanitário.

225 Após a construção da matriz, é necessário calcular o índice de consistência (IC). Se não for satisfatório,
226 deve-se refazer os julgamentos.

227
$$I.C. = \text{Índice de Consistência} = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1}$$

228 Onde λ_{max} é o maior autovalor da matriz de preferências; e n é a ordem da matriz.

229 O IC pode ser comparado com o de uma matriz aleatória, Índice Randômico (IR), que varia com o
230 tamanho n da amostra. A razão IC/IR é a razão de consistência (RC). A razão de consistência (RC) foi
231 calculada para verificar a coerência dos julgamentos, sendo que seus valores devem ser inferiores a 0,10
232 para serem aceitáveis.

233 Com base nas feições de restrições geradas (APP's, Estradas, Mancha urbana, terras indígenas, ASA's,
234 reassentamentos, rios, cursos d'água, etc.) foi feito um recorte da área de estudo, obtendo-se o polígono com
235 as áreas aptas à construção de um aterro sanitário. De posse dos pesos dos fatores obtidos da matriz AHP,
236 procedeu-se à soma ponderada dos mapas intermediários por meio de uma soma algébrica dos pesos com as
237 cartas geradas, por meio da técnica de álgebra de mapas.

238 O mapa final de aptidão para instalação de um aterro sanitário foi obtido para uma escala entre baixa a
239 alta aptidão, que varia de áreas menos aptas (nota menor que 5) às mais aptas (nota maior que 7).

240 De posse do mapa de aptidão, foram identificadas as áreas viáveis à locação do aterro sanitário. Para
241 tanto, utilizou-se um grid com as áreas estimadas necessárias para a construção e operação de um aterro

242 sanitário por 20 anos. Estas classes foram extraídas e cruzadas com o grid e ranqueadas da maior aptidão
243 para menor aptidão.

244

245 **4. RESULTADOS E DISCUSSÕES**

246

247 Primeiramente, calculou-se a área necessária para a construção e operação de um aterro sanitário, no
248 modelo consorciado, considerando um tempo de vida útil de 20 anos, segundo a metodologia apresentada
249 no item 2 deste artigo. O resultado obtido é apresentado na Tabela 4.

250

251 Tabela 4: Área estimada para a construção de um aterro sanitário na área de estudo.

Municípios	Calculada (ha)	PERS* - ITAU (ha)	PERS* - SEPLAN (ha)
Atalaia do Norte	9	10	10
Benjamin Constant	27	27	28
Tabatinga	47	47	49
Total	83	84	88

252

*Obtido de Amazonas, 2015.

253

254 Verifica-se que o valor da área calculado neste estudo é próximo dos estimados pelo Plano Estadual de
255 Resíduos Sólidos (PERS) do Amazonas (Amazonas, 2015).

256 Em seguida, para cada uma das variáveis da tabela 2 foram atribuídas, para cada uma das classes
257 (faixas), notas de 1 a 10 (um a dez), em que 1 representa a menor aptidão e 10 a melhor. Para obtenção das
258 notas foram consultados especialistas. O valor médio das notas obtidas dos especialistas é apresentado na
259 Tabela 5.

260

Tabela 5: Grau de aptidão para cada uma das classes das variáveis estudadas.

Critérios principais	Critérios	Fatores (Classes)	Grau de aptidão
Sócioeconômico	Distância da mancha urbana	500 - 5000 m	3
		5000 - 10000 m	6
		10000 - 20000 m	8
		20000 - 30000 m	7
	Distância das estradas	100 - 500 m	6
		500 - 1000 m	7
		1000 - 2000 m	8
		2000 - 5000 m	4
	Distância de áreas de reassentamento, indígenas e quilombolas	500 - 1000 m	3
		1000 - 2000 m	6
>2000 m		9	
Ambiental	Distância dos cursos d'água	200 - 300 m	4
		300 - 400 m	5
		400 - 500 m	7
		>500 m	8
	Distância dos rios	500 - 800 m	5
		800 - 1000 m	8
		>1000 m	9
	Distância de unidades de conservação	3000 - 3500 m	4
		3500 - 4500 m	6
		4500 - 5000 m	8
>5000 m		10	
Físico	Declividade	0 - 3 % (Plano)	9
		3 - 8 % (Suave ondulado)	8
		8 - 20 % (Ondulado)	5
		20 - 30 % (Forte ondulado)	2
	Uso do solo	Não floresta/Outros usos/Mosaico de ocupações	9
		Agricultura/Pastos diversos	6
		Florestas/Vegetação ou Regeneração secundária/Desflorestamentos/Área não observada	3
	Pedologia	Gleissolo	10
		Argissolo	4

263 Logo após, adotando-se o método AHP, foi gerada a matriz de interação entre as variáveis consideradas
 264 neste trabalho. A Tabela 6 representa a matriz de interação entre as variáveis geradas. Os pesos finais
 265 calculados estão apresentados na Tabela 7.

266

267

Tabela 6: Matriz de comparação pareada das variáveis

	Dec	Dca	Dr	Dti	Dest	Dmu	Drio	Usol	Pd
Declividade (Dec)	1	3	4	4	3	3	1	4	5
Distância dos cursos d' água – margem simples (Dca)	1/3	1	2	2	1	1	1	2	3
Distância dos reassentamentos (Dr)	1/4	1/2	1	1	1	1	1	1	2
Distância das terras indígenas (Dti)	1/4	1/2	1	1	1	1	1	1	2
Distância das estradas (Dest)	1/3	1	1	1	1	1	1	2	3
Distância da mancha urbana (Dmu)	1/3	1	1	1	1	1	1	2	3
Distância dos Rios – margem dupla (Drio)	1	1	1	1	1	1	1	3	4

Uso do solo (Usol)	1/4	1/2	1	1	1/2	1/2	1/3	1	3
Pedologia (Pd)	1/5	1/3	1/2	1/2	1/3	1/3	1/4	1/3	1

268

269

Tabela 7: Pesos finais das variáveis obtidos através da matriz de comparação

Variável	Peso
Declividade	0,26800
Distância dos cursos d'água (margem simples)	0,12119
Distância dos reassentamentos	0,08370
Distância das terras indígenas	0,08370
Distância das estradas	0,10341
Distância da mancha urbana	0,10341
Distância dos Rios (margem dupla)	0,13324
Uso do solo	0,06691
Pedologia	0,03644

270

271

272

273

274

275

Como não foram encontradas áreas quilombolas e de unidades de conservação na área de estudo, estas variáveis não foram consideradas na composição da matriz de comparação. O Índice de Consistência (IC) obtido foi de 0,04. Também foi calculada a razão de consistência (RC) da matriz de comparação, que deve ser menor que 0,1, indicando, desta forma, que as avaliações da matriz foram geradas aleatoriamente. O valor obtido foi 0,03.

276

277

Em seguida, foram construídos os mapas de restrições referentes a cada uma das variáveis estudadas no item 3.

278

279

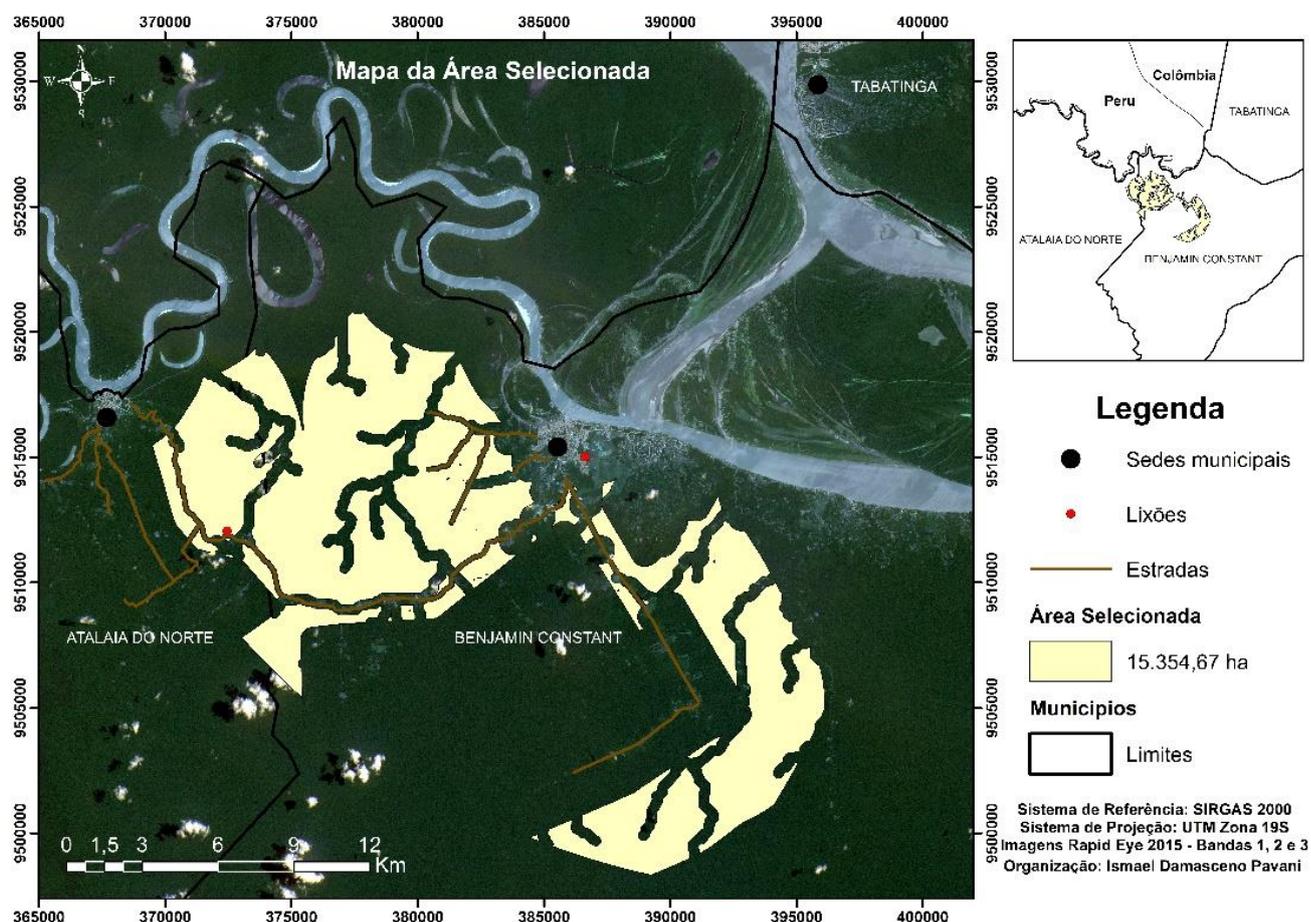
280

281

Após a aplicação do procedimento metodológico, foram selecionados, aproximadamente, 15.354,67 hectares de um total de, aproximadamente, 8.839.655 hectares estudados. Ou seja, aproximadamente 0,17%. Houve a eliminação de 99,83% da área de estudo. As restrições referentes à distância máxima de 30 km das manchas urbanas dos municípios estudados e de 5 km das estradas contribuíram significativamente para a

282 redução da área estudada. A Figura 3 apresenta a área selecionada, após a exclusão de todas as restrições
283 técnicas e legais.

284 Figura 3: Área selecionada após exclusões das restrições técnicas e legais.



285

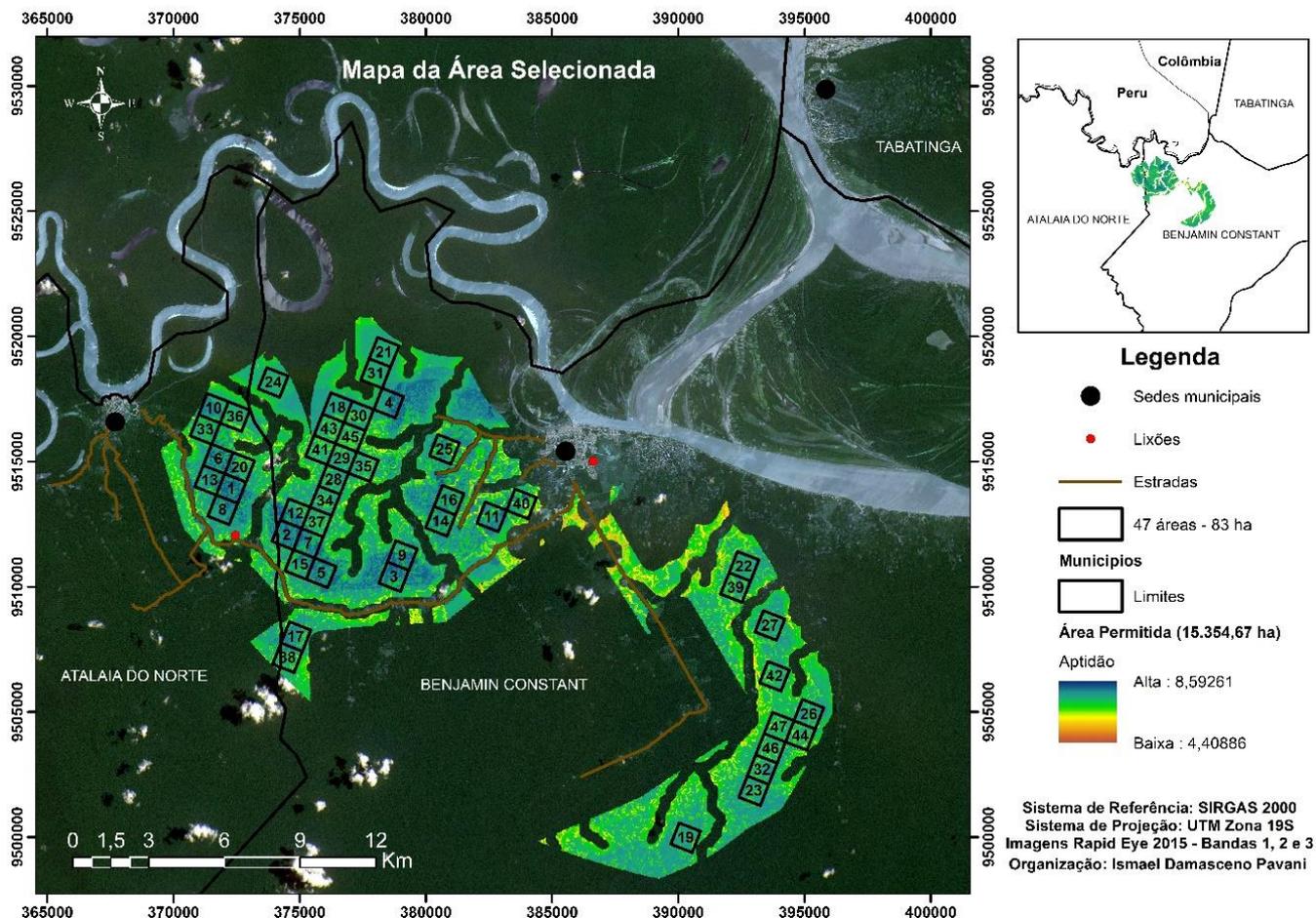
286

287 Em seguida, utilizando-se os pesos calculados por meio da análise multicritério (Tabela 6) e os graus
288 de aptidão da tabela 7, foi realizada a álgebra de mapas, obtendo-se o mapa de aptidão. Tendo-se a área
289 necessária para a construção de um aterro sanitário para 20 anos calculada em, aproximadamente, 83 ha
290 (vide Tabela 4), confeccionou-se um grid com áreas quadradas de 83 ha sobre o mapa de aptidão. Foram
291 obtidas cerca de 47 áreas com 83 ha cada. A partir daí, para cada célula do grid foram calculados os valores
292 médios de aptidão e as áreas foram ranqueadas de forma decrescente de 1 (mais apto) a 47 (menos apto). A
293 Figura 4 e a Tabela 8 a seguir ilustram a situação.

294

295

Figura 4: Mapa de aptidão final – Ranking de aptidão



297

298

Tabela 8: Ranking de áreas.

Ordem	Grau de aptidão	Ordem	Grau de aptidão	Ordem	Grau de aptidão
1	7,93283	17	7,60338	33	7,43352
2	7,90933	18	7,58307	34	7,43089
3	7,84394	19	7,54382	35	7,40588
4	7,83243	20	7,52346	36	7,37118
5	7,83148	21	7,51998	37	7,36333
6	7,82686	22	7,51534	38	7,34217
7	7,80174	23	7,50166	39	7,33885
8	7,79326	24	7,48956	40	7,32935
9	7,76582	25	7,48731	41	7,31922

10	7,70805	26	7,47631	42	7,31631
11	7,70746	27	7,46829	43	7,30792
12	7,68308	28	7,46758	44	7,30078
13	7,67350	29	7,45491	45	7,26617
14	7,65150	30	7,45241	46	7,26415
15	7,63278	31	7,44728	47	7,24635
16	7,61110	32	7,43378		

299

300 De acordo com a Figura 4, verifica-se que as áreas selecionadas foram escalonadas de acordo com o seu
301 grau de aptidão para instalação de um aterro sanitário, ou seja, de baixo (4,40886) a alto (8,59261). As áreas
302 mais escuras (verde escura a azul) são as que apresentam maior aptidão. Já as áreas mais claras (verde claro,
303 amarelo a vermelho) são as que apresentam menor aptidão. Verifica-se que as áreas mais aptas predominam
304 nas regiões próximas as estradas e se localizam entre os municípios de Benjamin Constant e Atalaia do
305 Norte.

306 De acordo com a Tabela 8, todas as 47 áreas apresentaram grau de aptidão médio maior que 7 (aptidão
307 média a alta). Percebe-se que as diferenças de aptidão entre as áreas são pequenas, recomendando-se que a
308 escolha seja feita com base nas áreas mais próximas da estrada que liga Benjamin Constant a Atalaia do
309 Norte. As áreas mais indicadas para a alocação de um aterro sanitário, considerando o modelo de arranjo
310 consorciado proposto entre os municípios de Atalaia do Norte, Benjamin Constant e Tabatinga, localizam-
311 se na região entre os municípios de Atalaia do Norte e Benjamin Constant (Figura 4). Dentre estas áreas, as
312 áreas nº 8, 15, 5, 3, 11 e 40, por localizaram-se próximas, principalmente, à estrada que liga Benjamin
313 Constant a Atalaia do Norte, apresentam-se como as mais indicadas. Dentre estas, a área 3 fica à cerca de
314 28 km de Tabatinga, 9 km de Benjamin Constant e 15 km de Atalaia do Norte, sendo a área mais indicada
315 dentre as demais para a alocação de um aterro sanitário.

316 A logística de transporte dos resíduos entre as cidades de Atalaia do Norte e Benjamin Constant será a
317 rodoviária, sendo que para o município mais distante, Tabatinga, deverá ser fluvial até Benjamin Constant,

318 devido a ambos os municípios serem divididos pelos rios Solimões e Jaguari, e, posteriormente, rodoviário.
319 Além disso, a instalação de um aterro sanitário no município de Tabatinga possui complicadores, visto a
320 existência do aeroporto internacional de Tabatinga e a proximidade do aeroporto de Letícia na Colômbia,
321 além de a sede urbana estar localizada muito próxima a áreas indígenas. Esses complicadores foram
322 apontados, ainda, no Plano Estadual de Resíduos Sólidos do Amazonas colocado em consulta pública no
323 final do ano de 2015 (Amazonas, 2015).

324 Por fim, devido a escala baixa de alguns dados de entrada utilizados neste estudo, principalmente os
325 referentes aos dados de pedologia (1:5.000.000), recomenda-se a realização de trabalho de campo para
326 verificação *in loco* destas áreas com o objetivo de validar os resultados obtidos.

327

328 **4. CONCLUSÃO**

329

330 O uso do SIG juntamente com a análise multicritério se mostrou eficiente na escolha de locais com
331 potencial para a instalação de um aterro sanitário, principalmente por fornecer aos gestores públicos
332 municipais uma ferramenta de suporte à tomada de decisão, direcionando rapidamente os trabalhos às
333 melhores áreas evitando, assim, gastos desnecessários de tempo e recursos públicos.

334 Os locais indicados podem servir para ordenar o espaço em relação à escolha das áreas sob uma
335 perspectiva técnica, legal e ambiental, mas tais aspectos não são os únicos que devem ser considerados nas
336 ações públicas. Diante dos dados apresentados por esse estudo, cabe aos gestores públicos obter
337 conhecimentos adicionais nas diversas áreas do conhecimento (sociais, econômicas, etc.) bem como se
338 utilizar de sua capacidade de análise empírica para decidir sobre a futura locação de um aterro sanitário,
339 ressaltando que são imprescindíveis a realização de levantamentos de campo antes da decisão final sobre
340 sua locação.

341 Verifica-se ainda, que os resultados obtidos neste estudo vão ao encontro das informações contidas no
342 Plano Estadual de Resíduos Sólidos do Amazonas, colocado em consulta pública no final do ano de 2015,
343 onde é recomendado, para o modelo consorciado de municípios estudado, a instalação de um aterro sanitário

344 consorciado no município de Benjamin Constant.

345 A metodologia adotada neste trabalho poderá ser adotada por outros municípios, porém exige a
346 manipulação de uma grande quantidade de dados, podendo ser de difícil replicação em algumas regiões onde
347 há falta de dados. É possível utilizar restrições e fatores alternativos, promovendo análises diferenciadas de
348 acordo com a necessidade, pois a utilidade deste estudo está na sistematização de uma maneira de tratar e
349 analisar as diversas informações que são consideradas nas decisões dos gestores públicos.

350 Pode-se concluir que o estudo permitiu a identificação das melhores áreas para a instalação de um aterro
351 sanitário, ressaltando que são imprescindíveis a realização de levantamentos de campo antes da decisão final
352 sobre sua locação definitiva, sendo uma ferramenta importante para auxiliar o gestor público municipal na
353 tomada de decisões com a agilidade que a função exige.

354

355 **5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

356

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

359

360 Allen, B.G., Caetano, P., Costa, C., Cummins, V., Donnelly, J., Koukoulas, S., O'Donnell, V., Robalo, C.,
361 Vendas, D., 2003. A landfill site selection process incorporating GIS modeling. In: Proceedings of Sardinia
362 2003, Ninth International Waste Management and Landfill Symposium, Italy.

363

364 Amazonas. Governo do Estado. Versão 1.0 do Plano Estadual de Resíduos Sólidos do Amazonas: SDS /
365 Laghi Engenharia Ltda./ Governo do Estado do Amazonas. - 2015

366

367 Batistella, M.; Moran, E, F. Geoinformação e monitoramento ambiental na América Latina. São Paulo:
368 SENAC São Paulo. 2008.

369

370 Basag˘aog˘lu, H., Celenk, E., Mariulo, M.A., Usul, N., 1997. Selection of waste disposal sites using GIS.
371 Journal of American Water Resources Association 33 (2), 455–464.
372
373 Brasil. Lei n˚ 12.305, de 2 de agosto de 2010. Institui a Polı́tica Nacional de Resı́duos Sólidos; altera a Lei
374 no 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. Diário Oficial [da] República Federativa do
375 Brasil, Poder Executivo, Brasília – DF, 2010.
376
377 Chang, N.B., Parvathinathan, G., Breeden, J.B., 2008. Combining GIS with fuzzy multicriteria decision-
378 making for landfill siting in a fast-growing urban region. Journal of Environmental Management 87 (1),
379 139–153.
380
381 CONAMA - Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução n˚ 04/95. Estabelece as Áreas de Segurança
382 Aeroportuárias – ASAs, 1995. Disponível em: <
383 <http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=182>> acesso em 14/11/2016.
384
385 Kara C.; Doratli, C. K. Application of GIS/AHP in siting sanitary landfill: a case study in Northern Cyprus.
386 Waste Management & Research 30(9) 966–980.
387
388 Ersoy, H.; Bulut, F. Spatial and multi-criteria decision analysis-based methodology for landfill site selection
389 in growing urban regions. Waste Management & Research. 2009: 27: 489–500 DOI:
390 10.1177/0734242X08098430
391
392 Furusheth, O. F. ;Johnson, M. S. Neighbourhood attitudes towards a sanitary landfill: a North Carolina study.
393 Applied Geogruphy (1988). 8, 135-145.
394

395 Gomes, L. P.; Martins, F. B. Projeto, Implantação e Operação de Aterros Sustentáveis de Resíduos Sólidos
396 Urbanos para Municípios de Pequeno Porte. Rio de Janeiro: ABES, RiMa, 2003.
397
398 IBGE, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Censo Demográfico 2010 - Amazonas. Disponível em:
399 <<http://www.ibge.gov.br/estadosat/perfil.php?sigla=am>> acesso em 20/09/2016.
400
401 IPEA, Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada, Diagnóstico dos Resíduos Sólidos Urbanos. 2012. 82 p.
402 Disponível em:
403 <[http://www.ipea.gov.br/agencia/images/stories/PDFs/relatoriopesquisa/121009_relatorio_residuos_solido](http://www.ipea.gov.br/agencia/images/stories/PDFs/relatoriopesquisa/121009_relatorio_residuos_solidos_urbanos.pdf)
404 <[s_urbanos.pdf](http://www.ipea.gov.br/agencia/images/stories/PDFs/relatoriopesquisa/121009_relatorio_residuos_solidos_urbanos.pdf)> acesso em 15/11/2016.
405
406 Li'aoa, W., Ting'quana, P., Chuana, H., Huib, Y., 2009. Management of municipal solid waste in the Three
407 Gorges region. *Waste Management* 29 (7), 2203–2208.
408
409 Lourenço, R. W.; Silva, D. C. C.; Sales, J. C. A.; Medeiros, G. A.; Otero, R. A. P. Metodologia para seleção
410 de áreas aptas à instalação de aterros sanitários consorciados utilizando SIG. *Ciência e Natura*, Santa Maria,
411 v. 37 n. 4 set-dez. 2015, p. 122-140.
412
413 Mc Bean, E. & Zukovs, G. (1983) A decision making analysis methodology for pollution control strategy
414 formulation. *Canadian Water Resources Journal*, 8, 64–67.
415
416 Nas, B., Cay, T., Iscan, F., Berkay, A., 2008. Selection of MSW landfill site for Konya, Turkey using GIS
417 and multi-criteria evaluation. *Environmental Monitoring Assessment* 160 (1–4), 491–500.
418
419 Ngoc, U.N., Schnitzera, H., 2009. Sustainable solutions for solid waste management in Southeast Asian
420 countries. *Waste Management* 29 (6), 1982–1995.

421

422 Oweis, I.S., Khera, R., 1998, "Geotechnology of Waste Management", PWS Publishing Co., ... Journal of
423 Geotechnical Engineering Division, ASCE, April 1990.

424

425 Rathi, S., 2006. Alternative approaches for better municipal solid waste management in Mumbai, India.
426 Journal of Waste Management 26 (10), 1192–1200.

427

428 Saaty, T. L. The Analytic Hierarchy Process: planning, priority setting, resource allocation. New York:
429 Mcgraw-hill, 1980. 287 p.

430

431 Saaty, T.L. Decision making with the analytic hierarchy process, Int. J. Services Sciences, Vol. 1, No. 1,
432 pp.83–98, 2008.

433

434 Sener, B., Suzen, M.L., Doyuran, V., 2006. Landfill site selection by using geographic information systems.
435 Environmental Geology 49, 376–388.

436

437 Sener, S., Sener, E., Karaguzel, R., 2010. Solid waste disposal site selection with GIS and AHP
438 methodology: a case study in Senirkent-Uluborlu (Isparta) Basin, Turkey. Environmental Monitoring and
439 Assessment, doi: 10.1007/s10661-010-1403-x.

440

441 São Paulo, Governo do Estado de São Paulo. Procedimentos para implantação de aterro sanitário em valas.
442 São Paulo: SEMA, 2005.

443

444 SNIS – Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento. Diagnóstico do Manejo de Resíduos Sólidos
445 Urbanos 2014. 2016. Disponível em: <[http://www.snis.gov.br/diagnostico-residuos-solidos/diagnostico-rs-](http://www.snis.gov.br/diagnostico-residuos-solidos/diagnostico-rs-2014)
446 2014 > acesso em 08/11/2016.

447

448 Whitlatch, E.E. (1976) Systematic approaches to environmental impact assessment: an evaluation. *Water*

449 *Resources Bulletin*, 12, 123–137.