OTIMIZAÇÃO DA LOCALIZAÇÃO DE ATERROS SANITÁRIOS NO MARANHÃO

Moises dos Santos Rocha[1]

Natiene Marinho Nunes[2]

Rossane Cardoso Carvalho[3]

INTRODUÇÃO

Atualmente, o crescimento populacional mundial, aliado às atividades industriais e comerciais que impulsionam o consumo de bens e serviços, apresenta uma correlação positiva forte com a geração de resíduos sólidos urbanos (RSU). O volume crescente de RSU constitui um desafio significativo para as administrações municipais, exigindo a formulação e implementação de estratégias eficazes para a gestão e a garantia da destinação adequada desses resíduos (Da Silva, Fugii e Hernández Santoyo, 2023).

Em 2022, no Brasil, 46,4 milhões de toneladas de RSU foram destinadas a aterros sanitários, representando 61% do volume total coletado. No entanto, 39% dos RSU foram dispostos inadequadamente em lixões e aterros controlados (ABRELPE, 2022). Essa destinação inadequada afeta o meio ambiente, resultando na contaminação do solo, da água e do ar, o que contribui para a proliferação de vetores de doenças e pode causar danos à infraestrutura urbana, como enchentes, deslizamentos e desmoronamentos (Reis, Mattos e Da Silva, 2016). Dentro desse contexto, o estado do Maranhão apresenta apenas 11,4% de seu território classificado como apropriado para a instalação de aterros sanitários, o que corresponde a uma área de 37.468 km². Outros 15,6% do estado, representando 51.524 km², são classificados como áreas recomendadas com restrições. Por outro lado, 73% do território maranhense (240.659 km²) é considerado inapto para a instalação de aterros sanitários (IMESC, 2021). Levando em consideração as unidades hidrogeológicas e fundamentado no novo marco legal de saneamento (Lei nº 14.026/2020), o IMESC estabeleceu quatro Microrregiões de Saneamento no estado: Norte (78 municípios), Noroeste (29 municípios), Centro-Leste (55 municípios) e Sul (55 municípios) (IMESC, 2021).

Neste trabalho, a análise concentra-se nas microrregiões Norte e Noroeste Maranhense. A análise conjunta dessas duas regiões se justifica pela presença da Baía de São Marcos, que dificulta a conexão rodoviária entre os municípios costeiros e impõe desafios logísticos à destinação adequada dos resíduos. A Microrregião Norte é composta por 78 municípios, com uma área de 77.749 km² e população estimada em 3.487.980 habitantes (IMESC, 2021). Já a Microrregião Noroeste reúne 29 municípios, totalizando uma área de 43.390 km² e população de 684.774 habitantes (IMESC, 2021).

Considerando as áreas classificadas como recomendadas para instalação de aterros sanitários pelo IMESC, a Microrregião Norte conta com cerca de 10.345 km² de áreas adequadas e apresenta os municípios com condições para instalação de aterros sanitários: Matões do Norte, Turilândia, Turiaçu, Pedro do Rosário, Viana, Coroatá, Presidente Sarney, Santa Helena, Brejo e São Vicente Ferrer. Já na Microrregião Noroeste, dispõe de 6.309 km² de áreas recomendadas, os municípios com maior potencial para instalação de aterros sanitários são: Junco do Maranhão, Centro Novo do Maranhão, Nova Olinda do Maranhão, Amapá do Maranhão, Santa Luzia do Paruá, Governador Nunes Freire, Zé Doca, Presidente Médici, Boa

1 Doutor em Engenharia Mecânica. E-mail: moisesrocha@professor.uema.br
2 Discente em Engenharia de Produção. E-mail: mar.nattyx@gmail.com
3 Doutora em desenvolvimento sustentável E-mail: rossanecarvalho@professor.uema.br

Vista do Gurupi e Maranhãozinho (IMESC, 2021).

Nesse contexto, este trabalho buscou responder aos seguintes questionamentos: Quais municípios devem ser selecionados para instalação de aterros sanitários na Microrregião de Saneamento Norte-Noroeste Maranhense? Para qual aterro sanitário cada município da região deve destinar seus resíduos sólidos urbanos? Quais volumes de resíduos serão enviados para cada instalação? Quantas viagens de caminhões com capacidade de 40 toneladas serão necessárias para transportar os resíduos até os respectivos aterros? Quais aterros irão formar consórcios municipais? Pode-se observar trabalhos que contemplam a utilização de modelos de Pesquisa Operacional (PO) para solucionar problemas de logística de destinação de resíduos sólidos: 1) Lyeme et al. (2017) aplicaram um modelo de programação por metas lexicográfica para selecionar locais ideais de tratamento e disposição final de resíduos sólidos urbanos em Dar es Salaam, Tanzânia, considerando custos, emissões de GEE e volume destinado a aterros; e 2) Franco et al. (2021) aplicaram o problema das p-medianas (p-Medians Problem - PMP) para otimizar a configuração de consórcios municipais destinados ao manejo dos resíduos sólidos no Paraná, Brasil, reduzindo custos de transporte e melhorando a alocação dos aterros sanitários existentes e novos.

METODOLOGIA

A metodologia utilizada neste estudo contemplou 4 passos. O primeiro passo consistiu em desenvolver uma instância do modelo matemático das p-medianas considerando as cidades com áreas recomendadas para instalação de aterros sanitários, como facilidades (i) e o total de cidades da região como clientes (j) a serem atendidos pelos aterros a serem instalados.

Ainda com relação ao primeiro passo metodológico, para o desenvolvimento da instância do modelo das p-medianas do caso foi feito: i) levantamento das distâncias rodoviárias entre as cidades; ii) desenvolvimento da instância do modelo, com o auxílio do Microsoft Office Excel, de acordo com a sintaxe do LP-solve software utilizado, otimizador de código aberto; iii) geração da solução para a instalação de 17 aterros sanitários; e iv) extração do relatório da solução ótima do otimizador utilizado.

O segundo passo, por sua vez, compreendeu o desenvolvimento de arquivos com dados para gerar informações necessárias a realização da análise do caso em estudo. O primeiro arquivo contém um conjunto de informações compiladas do estudo do IMESC (2021) que contemplam a perspectiva de um cenário para o ano de 2049 com a instalação dos 17 aterros sanitários que inclui os seguintes dados: população em 2023 (IBGE, 2023) de cada cidade; estimativa da geração diária, em toneladas, de resíduos em cada cidade para o ano de 2049 (IMESC, 2021); estimativa do número de viagens de caminhões de 40 toneladas para o escoamento dos resíduos; tempo necessário para gerar 40 toneladas de resíduos em dias. O segundo arquivo contém dados geográficos de latitude e longitude para geração de mapas dos conjuntos das cidades, onde deverão ser instalados os aterros sanitários, e do conjunto das cidades da região.

O terceiro passo constituiu-se no desenvolvimento de rotinas computacionais utilizando a linguagem de programação Python para geração de mapas e relatórios que possibilitaram a análise do cenário de instalação dos 17 aterros sanitários e o conjunto de cidades que deveriam enviar seus resíduos para cada facilidade (aterro sanitário) instalada para o ano de 2049, ano que considera o horizonte de tempo do estudo do IMESC (2021).

O quarto passo contemplou a análise do cenário com a instalação dos 17 aterros sanitários em resposta às questões levantadas como problemas de pesquisa.

RESULTADOS

Foi formulada uma instância do modelo de p-medianas aplicada ao contexto estudado, o que demandou, em um primeiro momento, a definição das variáveis e dos conjuntos que

compõem o modelo. Para isso, foram definidos dois conjuntos principais: o conjunto I, formado pelos municípios que possuem áreas classificadas como recomendadas para a instalação de aterros sanitários, e o conjunto J, composto por todos os municípios da região em estudo. O Quadro 1 apresenta os elementos do conjunto I, que representa os possíveis locais candidatos à instalação dos aterros sanitários na Microrregião de Saneamento Norte-Noroeste Maranhense.

Quadro 1 – Conjunto I: municípios com áreas recomendadas para instalação de aterros sanitários na Microrregião de Saneamento do Norte-Noroeste Maranhense.

Conjunto I	
Municípios	**i**
Amapá do Maranhão	1
Boa Vista do Gurupi	2
Centro Novo do Maranhão	3
Governador Nunes Freire	4
Junco do Maranhão	5
Maranhãozinho	6
Nova Olinda do Maranhão	7
Presidente Médici	8
Santa Luzia do Paruá	9
Zé Doca	10
Turilândia	11
Turiaçu	12
Pedro Rosário	13
Viana	14
Presidente Sarney	15
Santa Helena	16
São Vicente Ferrer	17

Fonte: elaboração própria, 2025

O Quadro 2, por sua vez, apresenta o conjunto J dos municípios da Microrregião de Saneamento do Norte-Noroeste Maranhense.

Quadro 2 – Conjunto J dos municípios da Microrregião de Saneamento do Norte-Noroeste Maranhense.

Conjunto J					
Município	j	Município	j	Município	j
Alto Alegre do Pindaré	1	Boa Vista do Gurupi	21	Matinha	41
Araguanã	2	Centro Novo do Maranhão	22	Mirinzal	42
Bela Vista do Maranhão	3	Governador Nunes Freire	23	Palmeirândia	43
Bom Jardim	4	Junco do Maranhão	24	Pedro do Rosário	44
Cândido Mendes	5	Maranhãozinho	25	Penalva	45
Carutapera	6	Nova Olinda do Maranhão	26	Peri Mirim	46
Centro do Guilherme	7	Presidente Médici	27	Pinheiro	47
Godofredo Viana	8	Santa Luzia do Paruá	28	Porto Rico do Maranhão	48

Governador Newton Bello	9	Zé Doca	29	Presidente Sarney	49
Igarapé do Meio	10	Alcantâra	30	Santa Helena	50
Luís Domingues	11	Apicum-Açu	31	São Bento	51
Maracaçumé	12	Bacuri	32	São João Batista	52
Monção	13	Bacurituba	33	São Vicente Ferrer	53
Pindaré-Mirim	14	Bequimão	34	Serrano do Maranhão	54
Pio XII	15	Cajapió	35	Turiaçu	55
Santa Inês	16	Cajari	36	Turilandia	56
Santa Luzia	17	Cedral	37	Viana	57
São João do Carú	18	Central do Maranhão	38		
Tufilândia	19	Cururupu	39		
Amapá do Maranhão	20	Guimarães	40		

Fonte: elaboração própria, 2025

Em seguida, foram definidas as variáveis do modelo para o caso, conforme a descrito em (1) e (2):

$$x_{ij} = \begin{cases} 1, \text{ se o aterro i vai atender o município j (nó);} \\ 0, \text{ caso contrário.} \end{cases} \quad (1)$$

$$y_i = \begin{cases} 1, \text{ se o aterro for aberto;} \\ 0, \text{ caso contrário.} \end{cases} \quad (2)$$

O passo seguinte foi desenvolver uma matriz de distâncias rodoviárias (Figura 1), em quilômetros (Km), entre os municípios com potencial de instalação de aterros sanitários (conjunto I) e todos os municípios da região (conjunto J).

Figura 1 – Parte da matriz de distâncias em Km.

Matriz de Distâncias - Microrregião de Saneamento Norte-Noroeste do Maranhão

Microrregião (Destino) (I)	Municípios Microrregião (J)								
	Alto Alegre do Pindaré	Araguanã	Bela Vista do Maranhão	Bom Jardim	Cândido Mendes	Carutapera	Centro do Guilherme	Godofredo Viana	Governador N
Amapá do Maranhão	325	158	306	227	54,4	57,7	123	51,3	211
Boa Vista do Gurupi	329	162	310	231	99,2	102	127	96,1	215
Centro Novo do Maranhão	300	132	281	202	127	131	97	124	186
Governador Nunes Freire	263	95,3	244	165	117	120	60,3	114	149
Junco do Maranhão	297	130	279	199	82,3	85,5	94,8	79,2	183
Maranhãozinho	249	81,8	231	151	130	134	46,8	127	135
Nova Olinda do Maranhão	184	16,5	140	86,1	196	199	82,5	192	70
Presidente Médici	234	66,5	190	136	146	149	32,5	143	120
Santa Luzia do Paruá	215	46,9	170	117	165	168	52,1	162	100
Zé Doca	132	36,4	87,2	33,8	248	252	135	245	17,6
Turilândia	338	160	277	191	184	187	125	181	214
Turiaçu	375	208	331	277	231	235	173	228	261
Pedro Rosário	218	84,6	159	83,6	297	300	184	289	67,4
Viana	166	137	106	136	349	352	236	346	120
Presidente Sarney	298	164	237	163	264	267	205	261	147
Santa Helena	337	162	276	190	186	189	127	183	174
São Vicente Ferrer	224	167	163	166	299	302	240	296	149

Fonte: elaboração própria, 2025

Após a definição das variáveis, foram montadas as funções da instância do modelo das p-medianas a ser aplicado ao caso. A função objetivo contempla 17 municípios com potencial de instalação de aterros

sanitários e os 57 municípios da região (3). A primeira restrição do modelo indica que um município só poderá enviar os resíduos sólidos para um único aterro sanitário, o que é apresentado em (4); a restrição que indica que uma cidade só pode enviar os resíduos para um aterro instalado é apresentado em (6); a restrição que indica a quantidade de aterros sanitários a serem instalados (dezessete); (7) e (8) indicam os tipos das variáveis.

$$\text{Minimizar } z = \sum_{i=1}^{17}\sum_{j=1}^{57} d_{ij}x_{ij} \qquad (3)$$

Sujeito a:

$$\sum_{i\in I} x_{ij} = 1, \quad \forall j \in J \qquad (4)$$

$$x_{ij} \leq y_i, \quad \forall i \in I, \forall j \in J \qquad (5)$$

$$\sum_{i\in I} y_i = 17, \quad \forall j \in J \qquad (6)$$

$$x_{ij} = \{0,1\} \qquad (7)$$

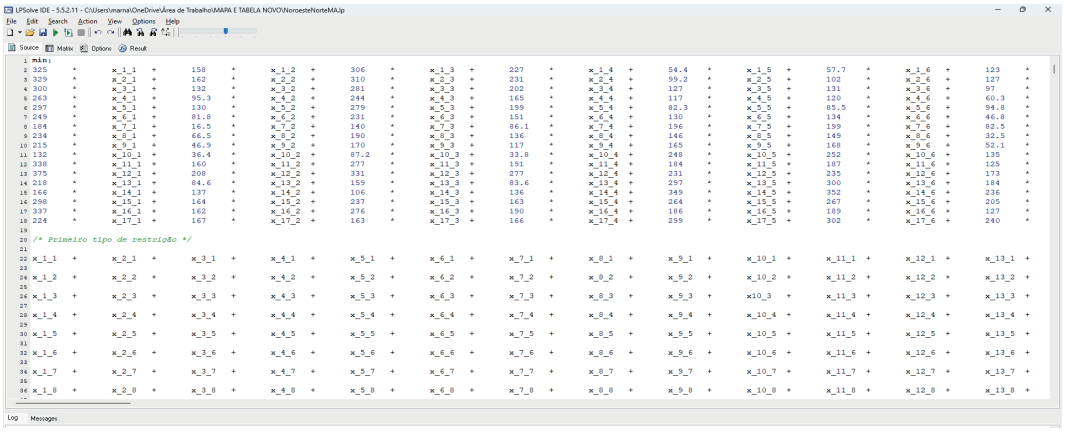
$$y_i = \{0,1\} \qquad (8)$$

Onde:

- d_{ij} = distância , em quilômetros (km) entre o municipio-aterro i e o município a ser atendido j;
- i = 1,..., 17;
- j = 1,..., 57;
- p = número de medianas (aterros) a serem instalados.

Em seguida, foi desenvolvida a instância do modelo das p-medianas para o caso com o auxílio do Microsoft Office Excel de acordo com a sintaxe do otimizador LP-solve. A Figura 2 apresenta parte da instância das p-medianas para o planejamento ótimo da localização de aterros sanitários na Microrregião de Saneamento do Norte-Maranhense no LP-solve.

Figura 2 – Parte da instância do modelo p-medianas para o planejamento ótimo da localização de aterros sanitários na Microrregião de Saneamento do Norte-Noroeste Maranhense.



Fonte: elaboração própria, 2025

Os próximos passos residiram na geração da solução do problema para p = 17 com o LP Solve e a criação dos arquivos para realizar as análises da solução da solução gerada o Quadro 3 apresenta os dados utilizados na realização das análises.

Quadro 3 – Informações para análise da geração de resíduos na Microrregião de Saneamento Norte-Noroeste Maranhense.

Município	População (2023)	Toneladas / município/dia (estimado para 2049)	Número de viagens de caminhões de 40 toneladas por dia	Tempo (dias) geração de 40 toneladas
Alto Alegre do Pindaré	25710	29,278	0,7	1,37
Araguanã	11181	36,348	0,9	1,10
Bela Vista do Maranhão	11750	13,381	0,3	2,99
Bom Jardim	33100	37,694	0,9	1,06
Cândido Mendes	19932	22,698	0,6	1,76
Carutapera	24238	27,602	0,7	1,45
Centro do Guilherme	12342	14,055	0,4	2,85
Godofredo Viana	10186	11,6	0,3	3,45
Governador Newton Bello	10713	12,2	0,3	3,28
Igarapé do Meio	13974	15,913	0,4	2,51
Luís Domingues	7161	8,155	0,2	4,90
Maracaçumé	21149	24,084	0,6	1,66
Monção	27751	31,602	0,8	1,27
Pindaré-Mirim	31429	35,791	0,9	1,12
Pio XII	21886	24,923	0,6	1,60
Santa Inês	85014	96,813	2,4	0,41
Santa Luzia	57635	65,634	1,6	0,61
São João do Carú	12251	13,951	0,3	2,87
Tufilândia	5507	6,271	0,2	6,38
Amapá do Maranhão	7170	8,165	0,2	4,90
Boa Vista do Gurupi	7574	8,625	0,2	4,64
Centro Novo do Maranhão	16267	18,525	0,5	2,16
Governador Nunes Freire	23128	26,338	0,7	1,52
Junco do Maranhão	5146	5,86	0,1	6,83
Maranhãozinho	13761	15,671	0,4	2,55
Nova Olinda do Maranhão	14314	16,301	0,4	2,45
Presidente Médici	4696	5,348	0,1	7,48
Santa Luzia do Paruá	24307	27,68	0,7	1,45
Zé Doca	40801	46,464	1,2	0,86
Alcantâra	18467	18,078	0,5	2,21
Apicum-Açu	17519	17,15	0,4	2,33
Bacuri	16290	15,947	0,4	2,51
Bacurituba	5252	5,141	0,1	7,78
Bequimão	19584	19,172	0,5	2,09
Cajapió	10121	9,908	0,2	4,04
Cajari	16412	16,067	0,4	2,49
Cedral	10208	9,993	0,2	4,00
Central do Maranhão	7094	6,945	0,2	5,76

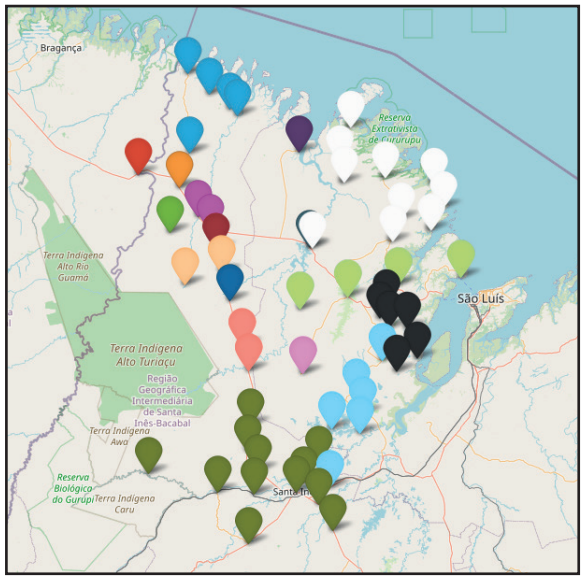
Cururupu	31558	30,894	0,8	1,29
Guimarães	10290	10,073	0,3	3,97
Matinha	22034	21,57	0,5	1,85
Mirinzal	13978	13,684	0,3	2,92
Palmeirândia	21059	20,616	0,5	1,94
Pedro do Rosário	24320	23,808	0,6	1,68
Penalva	32511	31,827	0,8	1,26
Peri Mirim	11108	10,874	0,3	3,68
Pinheiro	84621	82,84	2,1	0,48
Porto Rico do Maranhão	5954	5,829	0,1	6,86
Presidente Sarney	17511	17,143	0,4	2,33
Santa Helena	41561	40,686	1,0	0,98
São Bento	46395	45,419	1,1	0,88
São João Batista	18544	18,154	0,5	2,20
São Vicente Ferrer	19498	19,088	0,5	2,10
Serrano do Maranhão	10202	9,987	0,2	4,01
Turiaçu	37491	36,702	0,9	1,09
Turilandia	31638	30,972	0,8	1,29
Viana	51442	50,359	1,3	0,79

Fonte: elaboração própria, 2025

Posteriormente, foram desenvolvidas rotinas computacionais por meio da linguagem de programação Python para unificar os dados do Quadro 2, a solução gerada pelo software de otimização e as informações de latitude e longitude dos conjuntos de cidades, para gerar informações que proporcionaram a análise do cenário para 2049 com a implantação de 17 aterros sanitários e a designação dos conjuntos de cidades a serem atendidas por cada aterro específico.

A Figura 3 apresenta mapas que representam a solução ótima para o caso, mostra os agrupamentos de municípios que devem enviar os resíduos para cada um dos municípios onde seriam instalados os aterros sanitários.

Figura 3 – Mapa desenvolvido para analisar a localização ***ótimas dos aterros***



Fonte: elaboração própria, 2025

O Quadro 4 apresenta os conjuntos de municípios que devem enviar os resíduos para cada uma dessas aterro a ser instalado. Além de mostrar quais municípios serão atendidos por cada aterro sanitário, o Quadro 4 também indica a cor que representa esses agrupamentos no mapa conforme a Figura 3. Alguns aterros nesse cenário atenderão apenas o município onde seriam instalados, sem formar consórcio com outros municípios, sendo estes: Boa Vista do Gurupi, Centro Novo do Maranhão, Junco do Maranhão, Maranhãozinho, Santa Luzia do Paruá, Turilândia, Turiaçu e Pedro Rosário. Os demais municípios atuarão como polos de destinação, recebendo os resíduos de alguns municípios próximos. É o caso de Amapá do Maranhão, que atenderá 5 municípios; Governador Nunes Freire e Nova Olinda do Maranhão, atenderão 2 municípios cada um; Santa Helena atenderá 10 municípios; São Vicente Ferrer atenderá 8; Rosário atenderá 14; e Brejo atenderá 18. Essa distribuição reflete a estratégia de organização regional para a destinação dos resíduos sólidos urbanos.

Quadro 4 – Solução para p=17 e suas cores correspondentes no mapa

Municípios com aterros	Municípios atendidos	Cor correspondente
Amapá do Maranhão	Cândido Mendes, Carutapera, Godofredo Viana, Luís Domingues, Amapá do Maranhão	azul
Boa Vista do Gurupi	Boa Vista do Gurupi	vermelho
Centro Novo do Maranhão	Centro Novo do Maranhão	verde
Governador Nunes Freire	Maracaçumé, Governador Nunes Freire	roxo
Junco do Maranhão	Junco do Maranhão	laranja
Maranhãozinho	Maranhãozinho	vermelho escuro
Nova Olinda do Maranhão	Araguanã, Nova Olinda do Maranhão	vermelho claro
Presidente Médici	Centro do Guilherme, Presidente Médici	bege
Santa Luzia do Paruá	Santa Luzia do Paruá	azul escuro
Zé Doca	Alto Alegre do Pindaré, Bela Vista do Maranhão, Bom Jardim, Governador Newton Bello, Monção, Pindaré-Mirim, Pio XII, Santa Inês, Santa Luzia, São João do Carú, Tufilândia, Zé Doca	verde escuro
Turilândia	Turilândia	azul cadete
Turiaçu	Turiaçu	roxo escuro
Pedro Rosário	Pedro Rosário	rosa
Viana	Igarapé do Meio, Cajari, Matinha, Penalva, São Vicente Ferrer, Viana	azul claro
Presidente Sarney	Alcantâra, Bequimão, Pinheiro, Presidente Sarney	verde claro
Santa Helena	Apicum-Açu, Bacuri, Cedral, Central do Maranhão, Cururupu, Guimarães, Mirinzal, Porto Rico do Maranhão, Santa Helena, Serrano do Maranhão	branco
São Vicente Ferrer	Bacurituba, Cajapió, Palmeirândia, Peri-Mirim, São Bento, São João Batista	preto

Fonte: elaboração própria, 2025

Considerando a estimativa de geração de resíduos realizadas pelo IMESC (2021) para o ano de 2049, organizadas no Quadro 4 e a solução gerada contemplando a instalação de 17 aterros sanitário. Tem-se que:

– O município de Amapá do Maranhão deve receber 78,303 toneladas de resíduos diariamente. Para escoar a quantidade de resíduos destinados para o aterro deste município seriam necessárias 2,0 viagens de veículos de 40 toneladas;

– O município de Boa Vista do Gurupi deve receber 8,634 toneladas de resíduos diariamente. Para escoar a quantidade de resíduos destinados para o aterro deste município seriam necessárias 0,2 viagens de veículos de 40 toneladas;

– O município de Centro Novo do Maranhão deve receber 18,544 toneladas de resíduos diariamente. Para escoar a quantidade de resíduos destinados para o aterro deste município seriam necessárias 0,5 viagens de veículos de 40 toneladas;

– O município de Governador Nunes Freire deve receber 50,476 toneladas de resíduos diariamente. Para escoar a quantidade de resíduos destinados para o aterro deste município seriam necessárias 1,3 viagens de veículos de 40 toneladas;

– O município de Junco do Maranhão deve receber 5,866 toneladas de resíduos diariamente. Para escoar a quantidade de resíduos destinados para o aterro deste município seriam necessárias 0,1 viagens de veículos de 40 toneladas;

– O município de Maranhãozinho deve receber 15,688 toneladas de resíduos diariamente. Para escoar a quantidade de resíduos destinados para o aterro deste município seriam necessárias 0,4 viagens de veículos de 40 toneladas;

– O município de Nova Olinda do Maranhão deve receber 29,064 toneladas de resíduos diariamente. Para escoar a quantidade de resíduos destinados para o aterro deste município seriam necessárias 1,3 viagens de veículos de 40 toneladas;

– O município de Presidente Médici deve receber 19,423 toneladas de resíduos diariamente. Para escoar a quantidade de resíduos destinados para o aterro deste município seriam necessárias 0,5 viagens de veículos de 40 toneladas;

– O município de Santa Luzia do Paruá deve receber 27,710 toneladas de resíduos diariamente. Para escoar a quantidade de resíduos destinados para o aterro deste município seriam necessárias 0,7 viagens de veículos de 40 toneladas;

– O município de Zé Doca deve receber 414,443 toneladas de resíduos diariamente. Para escoar a quantidade de resíduos destinados para o aterro deste município seriam necessárias 10,2 viagens de veículos de 40 toneladas;

– O município de Turilândia deve receber 31,005 toneladas de resíduos diariamente. Para escoar a quantidade de resíduos destinados para o aterro deste município seriam necessárias 0,8 viagens de veículos de 40 toneladas;

– O município de Turiaçu deve receber 36,741 toneladas de resíduos diariamente. Para escoar a quantidade de resíduos destinados para o aterro deste município seriam necessárias 0,9 viagens de veículos de 40 toneladas;

– O município de Pedro Rosário deve receber 23,834 toneladas de resíduos diariamente. Para escoar a quantidade de resíduos destinados para o aterro deste município seriam necessárias 0,6 viagens de veículos de 40 toneladas;

– O município de Viana deve receber 154,989 toneladas de resíduos. Para escoar a quantidade de resíduos destinados para o aterro deste município seriam necessárias 3,9 viagens de veículos de 40 toneladas;

– O município de Presidente Sarney deve receber 137,38 toneladas de resíduos diariamente. Para escoar a quantidade de resíduos destinados para o aterro deste município seriam necessárias 3,5 viagens de veículos de 40 toneladas;

– O município de Santa Helena deve receber 161,361 toneladas de resíduos diariamente. Para escoar a quantidade de resíduos destinados para o aterro deste município seriam necessárias 3,9 viagens de veículos de 40 toneladas;

– O município de São Vicente Ferrer deve receber 110,23 toneladas de resíduos diariamente. Para escoar a quantidade de resíduos destinados para o aterro deste município seriam necessárias 2,7 viagens de veículos de 40 tonelada.

Quadro 5 – Resumo do cenário para a destinação de resíduos sólidos dos municípios da Microrregião de Saneamento do Norte-Noroeste Maranhense para o ano de 2049 com 17 aterros sanitários instalados

Cenário	Municípios de instalação dos aterros sanitários	N° de	Toneladas de resíduos recebidos por dia	Nº. aproximado de viagens de veículos de 40 toneladas
p=17	Amapá do Maranhão	5	78,303	2
	Boa Vista do Gurupi	1	8,634	0,2
	Centro Novo do Maranhão	1	18,544	0,5
	Governador Nunes Freire	2	50,476	1,3
	Junco do Maranhão	1	5,866	0,1
	Maranhãozinho	1	15,688	0,4
	Nova Olinda do Maranhão	2	29,064	1,3
	Presidente Médici	2	19,423	0,5
	Santa Luzia do Paruá	1	27,71	0,7
	Zé Doca	12	414,443	10,2
	Turilândia	1	31,005	0,8
	Turiaçu	1	36,741	0,9
	Pedro Rosário	1	23,834	0,6
	Viana	6	154,989	3,9
	Presidente Sarney	4	137,38	3,5
	Santa Helena	10	161,361	3,9
	São Vicente Ferrer	6	110,23	2,7

Fonte: elaboração própria, 2025

O Quadro 5 apresenta o resumo do cenário para a destinação de resíduos sólidos das cidades da Microrregião de Saneamento do Norte-Noroeste Maranhense para o ano de 2049, com 17 aterros sanitários instalados. Pode-se observar os municípios indicados para a instalação de aterros, o número de municípios atendidos por cada aterro instalado, toneladas de resíduos a serem recebidas diariamente por cada aterro instalado e o número aproximado de viagens de

veículos de 40 toneladas necessários para envio dos resíduos entre os municípios geradores e cada aterro a ser instalado.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O desenvolvimento deste estudo apresenta êxito, visto que foi possível desenvolver um cenário relacionando dezessete aterros sanitários a serem instalados e os grupos de municípios que devem destinar seus resíduos sólidos para cada aterro na Microrregião de Saneamento Norte-Noroeste Maranhense em análise. Na região analisada, em um conjunto de 57 municípios, apenas 17 apresentam um volume de áreas recomendadas para instalação dos aterros sanitário, conforme estudo realizado em 2021 por pesquisadores do IMESC.

A metodologia utilizada mostrou-se útil na produção de informações para a tomada de decisões que podem ser úteis ao planejamento das instalações de aterros sanitários na região analisada, uma vez que aliou solução ótima, gerada pelo software de otimização utilizado, a um conjunto de informações operacionais referentes à geração de resíduos na região estudada e à geração de mapas, úteis para análise desse tipo de problema.

Assim, conclui-se que as informações geradas neste estudo podem auxiliar gestores públicos do Estado do Maranhão nas decisões referentes à instalação de aterros sanitários, por apresentarem um conjunto de informações pertinentes ao caso que contemplam vários aspectos simultaneamente e em longo prazo.

O conjunto de informações reunidas nesse estudo pode auxiliar a tomada de decisões referentes à formação de consórcios entre os municípios, de acordo com a escolha dos municípios onde devem ser instalados os aterros sanitários; identificar a viabilidade das indicações de determinados municípios para a instalação de aterros, de acordo com o volume de resíduos destinados para cada aterro escolhido; dimensionar as operações de aterros sanitários e calcular alguns custos inerentes, de acordo com os volumes de resíduos sólidos a serem recebidos pelos aterros, bem como as necessidades de viagens para envio dos resíduos para os aterros; e identificar potenciais impactos na infraestrutura por meio do número de viagens de veículos de 40 toneladas destinadas a aterros sanitários específicos.

A utilização de mapas para representar a solução do problema apresentou-se muito útil na identificação dos grupos de cidades que devem destinar seus resíduos para os aterros a serem instalados, bem como para aprimorar o modelo matemático, auxiliando na correção de erros e distorções.

Como sugestões para trabalhos futuros dessa natureza, recomenda-se incluir o cálculo dos custos de destinação de resíduos sólidos urbanos para cenários com números de aterros instalados diferente de 17, a indicação da capacidade necessária para os aterros em cada cenário, e o dimensionamento das frotas de veículos necessários para o transporte dos resíduos sólidos gerados na região em análise.

AGRADECIMENTOS

À Universidade Estadual do Maranhão (UEMA), pela concessão da bolsa de Iniciação Científica (PIBIC/UEMA), cujo apoio foi essencial para a realização desta pesquisa, contribuindo significativamente para o crescimento acadêmico da segunda autora.

REFERÊNCIAS

ABRELPE. *Panorama dos resíduos sólidos no Brasil em 2022*. Disponível em: https://abrelpe.org.br/panorama/. Acesso em: 02 jun. 2025.

DA SILVA, C. L.; FUGII, G. M.; HERNANDÉZ SANTOYO, A. Proposta de um modelo de dinâmica de sistemas de gestão de resíduos sólidos urbanos. *Revista Brasileira de Gestão e Desenvolvimento Regional*, v. 19, n. 1, 2023. Disponível em: https://www.rbgdr.com.br/revista/index.php/rbgdr/article/view/6602. Acesso em: 02 jun. 2025.

FRANCO, D. G. B.; STEINER, M. T. A.; ASSEF, F. M. Optimization in waste landfilling partitioning in Paraná State, Brazil. *Journal of Cleaner Production*, v. 283, p. 125353, 2021.

IBGE. Pesquisa Nacional de Saneamento Básico: dados e análises. Rio de Janeiro: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2023.

IMESC – INSTITUTO MARANHENSE DE ESTUDOS SOCIOECONÔMICOS E CARTOGRÁFICOS. *Microrregiões do saneamento do Estado do Maranhão*. São Luís: IMESC, 2021.

REIS, P. T. B.; MATTOS, U. A. O.; DA SILVA, E. R. Gestão de resíduos sólidos urbanos em municípios do Brasil: desafios e perspectivas. *Revista Internacional de Ciências*, v. 6, n. 2, p. 137–146, 2016. Disponível em: https://www.e-publicacoes.uerj.br/ric/article/view/20753. Acesso em: 24 jan. 2024.

LYEME, K.; MATEE, G.; MONGI, H. Application of lexicographic goal programming to select ideal solid waste treatment and disposal sites in Dar es Salaam, Tanzania. *Environmental Modeling & Assessment*, 2017.