



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CAMPUS CRATEÚS
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AMBIENTAL E SANITÁRIA

MARIA ELAINY BERNARDINO CARVALHO

**AVALIAÇÃO DO POTENCIAL ENERGÉTICO DA BIOMASSA DISPOSTA EM
LIXÕES DO SEMIÁRIDO CEARENSE**

CRATEÚS
2021

MARIA ELAINY BERNARDINO CARVALHO

AVALIAÇÃO DO POTENCIAL ENERGÉTICO DA BIOMASSA DISPOSTA EM LIXÕES
DO SEMIÁRIDO CEARENSE

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à banca examinadora do Curso de Graduação em Engenharia Ambiental e Sanitária da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título do grau de bacharel em Engenharia Ambiental e Sanitária.

Orientadora: Prof. Dr^a. Janine Brandão de Farias Mesquita.

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca Universitária
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

C325a Carvalho, Maria Elaine Bernardino.
Avaliação do potencial energético da biomassa disposta em lixões do semiárido cearense / Maria Elaine Bernardino Carvalho. – 2021.
61 f. : il.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Campus de Crateús, Curso de Engenharia Ambiental, Crateús, 2021.
Orientação: Profa. Dra. Janine Brandão de Farias Mesquita.

1. Resíduos Sólidos. 2. LandGEM. 3. Biogás. 4. Metano. 5. Energia. I. Título.

CDD 628

MARIA ELAINY BERNARDINO CARVALHO

AVALIAÇÃO DO POTENCIAL ENERGÉTICO DA BIOMASSA DISPOSTA EM LIXÕES
DO SEMIÁRIDO CEARENSE

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à banca examinadora do Curso de Graduação em Engenharia Ambiental e Sanitária da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título do grau de bacharel em Engenharia Ambiental e Sanitária.

Aprovado em: ____/____/_____.

BANCA EXAMINADORA

Prof^ª. Dra. Janine Brandão de Farias Mesquita (Orientadora)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof^ª. Dra. Carla Beatriz Costa de Araújo
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof^ª. Dra. Raimunda Moreira da Franca
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof^ª. Dra. Thayres de Sousa Andrade
Universidade Federal do Ceará (UFC)

A Deus.

Aos meus pais, Fátima Bernardino e Evandro
Carvalho.

Aos meus irmãos, Edvandro, Felipe, Maria e
Bryan.

A minha amada tia, Joelita Bernardino (*In
memoriam*).

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus, por ter me guiado até aqui. Ao longo dessa árdua caminhada pude sentir a sua presença em vários momentos. Se algum dia duvidei, hoje não duvido mais que, fora do teu cuidado Senhor, não existe paz.

Estudar em uma universidade federal nunca é uma tarefa fácil, e eu agradeço especialmente a minha tia Joelita que mudou a minha vida quando me presenteou com uns livros na infância. Tive muita sorte de poder ter dito, em sua breve vida, o quanto aquela atitude foi importante para mim e como contribuiu pelo meu prazer pela leitura e consequente desenvolvimento intelectual. Sempre a considereei extremamente inteligente e juntamente com a minha mãe, ela foi uma grande inspiração para chegar até aqui. Tia Joelita me disse uma vez que amava todas as suas sobrinhas, mas que em mim via um potencial fora do comum, dizia que eu ainda faria algo muito importante um dia. Ela era mestre em saber agradecer e eu sempre serei grata pelo seu amor.

E por falar em amor, não existe amor maior em meu âmago que o amor que sinto pela minha mãe, Fátima Bernardino. Não me envergonho de dizer que por vezes quis desistir do curso porque via dificuldade em tudo e detestava a monotonia, mas foi o amor pela minha mãe que me fez permanecer. Minha mãe é tão guerreira que foi simplesmente impossível conseguir contrariá-la, ela sempre disse que eu não era uma fracassada e que jamais me permitiria desistir de uma coisa só porque achava difícil. Eu me sinto muito abençoada por ter nascido sua filha e poder contar com seu amor incondicional.

Agradeço também ao meu pai, Evandro Carvalho, por acreditar nos meus sonhos e ser um dos maiores apoiadores, não só em palavras, mas em atitudes. Reconheço com carinho tudo o que ele fez por mim e só posso me sentir privilegiada por, mesmo neste mundo caótico, ainda haver homens de honra e que colocam a família acima de tudo. Herdei seu temperamento forte, mas também seus valores e princípios. Graças a ele, a ousadia de falar a verdade me acompanhará onde quer que eu vá. Meu pai sempre cuidou de mim e fez com que eu me tornasse uma mulher segura, cujas ideias são valorizadas e o próprio valor pessoal não está em xeque.

Também neste sentido, agradeço a toda a minha família, de modo geral, pelo zelo, carinho, cuidado e proteção que recebi ao longo da vida. Meus irmãos Edvandro, Felipe, Maria e Bryan, meu amado tio Airton, pelas inúmeras caronas que me deu para a faculdade, mesmo na chuva e no sol de meio dia, aos meus avós, Dona Fransquinha e Seu Cícero e a minha tia, Zenete. Obrigada por acreditarem em mim!

Eu sou especialmente grata a todas as adversidades as quais fui submetida na universidade, pois me tornaram mais forte. Dito isto, agradeço as professoras Luísa e Janaína por terem me proporcionado o ambiente de aprendizado mais hostil que eu já vivi em toda a minha vida acadêmica, com a maturidade que tenho agora, vejo que isso foi um verdadeiro presente pois me fortaleceu de inúmeras maneiras.

Agradeço aos meus amigos Waldymar e Jenilson, que sempre me acolheram e tornaram meus dias melhores. A amizade de vocês tornou essa jornada mais agradável, rica em aprendizados e felicidade. Foi uma honra poder ter passado por tudo isso ao lado de vocês.

E, claro, agradeço também aos colegas e amigos: Emanuel, Bernardo, Karol Carvalho, Alisson, Vitória, Luandersson, Tiago, Matheus, Carol Mesquita, Karina, Nazaré, Dayanna, Diego, Amanda, Marcos, Neto, Robson, Fabrinny, Ivo, Isabel, Kelly, Breno, Wandson, Jailson, Dayanne, Luanny, Hitallo, Flávio, João Pedro, Francisco e Samila. Todos vocês contribuíram de alguma forma no meu percurso e eu sou muito grata a todos vocês.

Ao pessoal da secretaria do meio ambiente (SEMAM) pela oportunidade de estágio, bem como da empresa DFL. Em ambas as instituições eu pude me desenvolver profissionalmente e obter clareza quanto ao ramo de atuação, além de ter conhecido algumas pessoas maravilhosas as quais sempre lembrarei com carinho.

A minha orientadora, Prof^a Dr^a. Janine Brandão, por me aceitar como orientanda e ter sido absolutamente paciente comigo, só nós duas conhecemos o quão árduo foi o caminho até aqui e eu realmente lhe agradeço por todo o incentivo e presteza de informações.

As professoras participantes da banca examinadora: Dr^a. Carla Beatriz, Dr^a. Raimunda Franca e Dr^a. Thayres Andrade pelas valiosas colaborações e sugestões.

Ao professor MSc. Cândido por todo o tempo e material concedido para sanar as dúvidas que tive.

E por fim, mas não menos importante, a coordenação do curso, tanto a gestão das professoras Luísa e Janaína que promoveram a nossa mudança de grade curricular, o que possibilitou melhorias significativas na nossa expectativa ao adentrar o mercado de trabalho, quanto a gestão das professoras Luana e Thayres que trabalharam em dobro para que os formandos deste ano não fossem prejudicados com o período pandêmico atrelado ao covid-19. Eu gostaria de enaltecer o meu reconhecimento pelo seu valioso trabalho e agradecer por todo o comprometimento com o curso de Engenharia Ambiental e Sanitária.

*“Tudo tem o seu tempo determinado, e há tempo
para todo propósito debaixo do céu.”*

Eclesiastes 3:1.

RESUMO

A gestão de resíduos sólidos urbanos é um dos maiores desafios da sociedade moderna. O constante aumento populacional com pouco ou nenhum controle sobre a geração e tratamento dos resíduos traz consigo inconvenientes como contaminação dos recursos naturais e problemas de saúde pública. A decomposição dos resíduos incide na emissão de CH₄ e CO₂, ambos gases de efeito estufa que contribuem para o aquecimento global, mas que também são aptos ao beneficiamento elétrico. O presente trabalho tem por objetivo avaliar o potencial de geração de gases passíveis de aproveitamento energético. Foi utilizado o *LandGEM* da US EPA – *United States Environmental Protection Agency*, um *software* especializado em estimativas de gases de aterro e cenários similares para estimar a quantidade de metano gerado nos lixões dos municípios de Varjota, Monsenhor Tabosa e Reriutaba, região semiárida do Estado do Ceará. Com o ano de abertura dos lixões variando entre 1986 e 1997 e considerando a simulação do ano de encerramento em 2021, estima-se que haveria em um cenário futuro, no ano de 2022, o pico de geração de metano, onde o lixão de Varjota apresentou um potencial de 6.380,860 KWh/ano e 531.738 KWh/mês, o lixão de Monsenhor Tabosa 3.471.816 KWh/ano e 289.318 KWh/mês e o lixão de Reriutaba 4.519,875 KWh/ano e 376.656 KWh/mês. Esses resultados demonstram que existe potencial energético nos lixões para abastecer entre 1753 e 3223 residências, contudo, ressalta-se a importância da aplicação de métodos tecnológicos de aproveitamento a partir do início das atividades de recepção da massa de resíduos sólidos urbanos, sendo mais indicado para isso a utilização de aterros sanitários. Por fim, conclui-se que há na biomassa de resíduos sólidos urbanos potencial energético passível de aproveitamento.

Palavras-chave: Resíduos sólidos. *LandGEM*. Biogás. Metano. Energia.

ABSTRACT

The management of urban solid waste is one of the greatest challenges of modern society. The constant population increase with little or no control over the generation and treatment of waste brings with it inconveniences such as contamination of natural resources and public health problems. The decomposition of waste affects the emission of CH₄ and CO₂, both greenhouse gases that contribute to global warming, but which are also suitable for electrical processing. This work aims to evaluate the potential for generating gases that can be used for energy use. LandGEM from the US EPA – United States Environmental Protection Agency, a software specialized in estimating landfill gases and similar scenarios, was used to estimate the amount of methane generated in landfills in the municipalities of Varjota, Monsenhor Tabosa and Reriutaba, semi-arid region of the State of Ceará. With the opening year of the dumps varying between 1986 and 1997 and considering the simulation of the closing year in 2021, it is estimated that there would be, in a future scenario, in the year 2022, the peak of methane generation, where the Varjota dump presented a potential of 6,380,860 kWh/year and 531,738 kWh/month, the Monsenhor Tabosa landfill 3471,816 kWh/year and 289,318 kWh/month and the Reriutaba landfill 4,519,875 kWh/year and 376,656 kWh/month. These results demonstrate that there is energy potential in landfills to supply between 1753 and 3223 homes, however, it emphasizes the importance of applying technological methods of recovery from the beginning of reception activities for the mass of urban solid waste, being more suitable for this the use of landfills. Finally, it is concluded that there is energy potential in urban solid waste biomass.

Keywords: Solid waste. LandGEM. Biogas. Methane. Energy.

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1** – Visão esquemática da ampla variedade de rotas tecnológicas para conversão e utilização da energia da biomassa.20
- Figura 2** – Limites territoriais da Bacia Hidrográfica do Acaraú.27

LISTA DE TABELAS

| | |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabela 01 – Levantamento de informações sobre os lixões inseridos na Bacia do Acaraú. | 31 |
| Tabela 02 – Volume de RSU por hectare para os lixões selecionados da Bacia do Acaraú. ... | 35 |
| Tabela 03 – Território e População dos municípios selecionados..... | 35 |
| Tabela 04 – Estimativa de funcionamento dos lixões selecionados da Bacia do Acaraú. | 36 |
| Tabela 05 – Taxa de recebimento de Resíduos Sólidos no lixão de Varjota, Ceará. | 39 |
| Tabela 06 – Taxa de recebimento de Resíduos Sólidos no lixão de Monsenhor Tabosa, Ceará. | 41 |
| Tabela 07 – Taxa de recebimento de Resíduos Sólidos no lixão de Reriutaba, Ceará..... | 43 |
| Tabela 08 – Parâmetros padrão do modelo LandGEM. | 45 |
| Tabela 09 – Estimativa da geração de metano com pico em 2022 para os municípios selecionados..... | 50 |
| Tabela 10 – Conversão do volume de metano (m ³) em potencial elétrico (KWh)..... | 51 |
| Tabela 11 – Potencial de atendimento energético com o metano de lixão em 2022..... | 51 |
| Tabela 12 – Custo da energia elétrica no Brasil. | 52 |
| Tabela 13 – Receita gerada com a captação e utilização do metano proveniente de RSU. | 52 |

LISTA DE GRÁFICOS

| | |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Gráfico 01 – Relação dos municípios da bacia do Acaraú com o maior volume de resíduos sólidos por área de lixão. | 34 |
| Gráfico 02 – Estimativa Populacional do Município de Varjota, Ceará.. | 37 |
| Gráfico 03 – Estimativa Populacional do Município de Monsenhor Tabosa, Ceará. | 37 |
| Gráfico 04 – Estimativa Populacional do Município de Reriutaba, Ceará..... | 38 |
| Gráfico 05 – Deposição anual de Resíduos Sólidos no lixão de Varjota, Ceará. | 45 |
| Gráfico 06 – Emissões de gases do lixão de Varjota, Ceará gerados a partir do modelo LandGEM. | 46 |
| Gráfico 07 – Deposição de Resíduos Sólidos no lixão de Monsenhor Tabosa, Ceará..... | 47 |
| Gráfico 08 – Emissões de gases do lixão de Monsenhor Tabosa, Ceará gerados a partir do modelo LandGEM. | 48 |
| Gráfico 09 – Deposição de Resíduos Sólidos no lixão de Reriutaba, Ceará. | 48 |
| Gráfico 10 – Emissões de Gases no lixão de Reriutaba, Ceará gerados a partir do modelo LandGEM. | 49 |
| Gráfico 11 – Pico da geração de metano nos lixões selecionados ocorre em 2022. | 50 |

LISTA DE ABREVIATURA E SIGLAS

| | |
|----------------|---------------------------------------------------------------------------|
| ABRELPE | Associação Brasileira De Empresas De Limpeza Pública E Resíduos Especiais |
| COGERH | Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos |
| EPA | United States Environmental Protection Agency |
| EPE | Empresa de Pesquisa Energética |
| GEE | Gases de efeito estufa |
| IBGE | Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística |
| IEA | Agência Internacional de energia |
| IPCC | Intergovernmental Panel On Climate Change |
| KWh | Kilowatt hora |
| <i>LandGEM</i> | Landfill Gas Emissions Model |
| MW | Megawatt |
| NMOC | Composto Orgânico Não Metano |
| PNUD | Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento |
| RSU | Resíduos Sólidos Urbanos |
| SRH | Secretaria dos Recursos Hídricos |
| TWh | Terawatt hora |

SUMÁRIO

| | | |
|--------------|------------------------------------------------------|----|
| 1 | INTRODUÇÃO | 16 |
| 1.1 | Contextualização | 16 |
| 1.2 | Justificativa | 17 |
| 1.3 | Hipóteses | 17 |
| 1.4 | Objetivos | 17 |
| 2 | FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA | 19 |
| 2.1 | RESÍDUOS SÓLIDOS E POTENCIAL ENERGÉTICO | 19 |
| 2.1.1 | Destinação dos RSU | 22 |
| 2.1.2 | Gases produzidos e aspectos energéticos | 23 |
| 2.1.3 | Estimativa da produção de gases | 24 |
| 2.1.4 | LandGEM | 25 |
| 3 | ÁREA DE ESTUDO | 27 |
| 4 | METODOLOGIA | 30 |
| 4.1 | Tipo de Estudo | 30 |
| 4.2 | Critérios para seleção da área | 30 |
| 4.3 | Aplicação do Modelo LandGEM | 32 |
| 5 | RESULTADOS E DISCUSSÃO | 34 |
| 6 | CONCLUSÕES | 54 |
| 7 | SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS | 54 |
| | REFERÊNCIAS | 55 |

1 INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização

Desde que haja viabilidade econômica e ambiental, recomenda-se que o resíduo sólido urbano (RSU) seja descartado em aterros sanitários consistindo este método na utilização dos princípios da engenharia para depositar resíduos sólidos em pequenas áreas de modo a reduzi-los ao menor volume permitido para, após, cobri-los com uma camada de terra (WASTLAKE, 2014; BRASIL, 1992). Porém, na região Nordeste do Brasil os lixões constituem-se de uma técnica de descarte ainda amplamente adotada (FREIRE *et al.*, 2020).

A utilização de lixões para destinação final dos resíduos sólidos ainda é uma atividade comum, principalmente, em países em desenvolvimento. No entanto, essa prática é desaconselhada por implicar em consequências como perturbação da saúde pública e contaminação dos recursos naturais (RAMOS *et al.*, 2017).

Os lixões são caracterizados pela descarga de resíduos sólidos sobre o solo sem o controle ambiental adequado (GOMES, 2019). Com frequência, ocorrem nas margens de florestas, periferias de áreas habitadas, valas entre outros locais inadequados, contaminando os solos, a água, alterando a vegetação, a funcionalidade do ecossistema e causando degradação da terra (VAVERKOVÁ *et al.*, 2019).

Após a disposição dos resíduos no solo ocorre um processo de degradação do material e os resíduos orgânicos apresentam liberação dos gases metano (CH₄), dióxido de carbono (CO₂), entre outros gases que compõem o biogás (ENSINAS, 2003). De Campos Monteiro *et al.* (2018) afirmam que o biogás é altamente inflamável e sem o manejo adequado pode causar incêndios e explosões. Apesar disso, concerne que o metano pode ser utilizado como combustível para a geração de energia elétrica renovável. Existem modelos matemáticos que auxiliam na estimativa da produção de gases, como metano, com potencial de geração de energia. Dentre estes modelos destaca-se o *LandGEM*, desenvolvido pela *United States Environmental Protection Agency* para analisar gases gerados na decomposição de resíduos sólidos municipais (EPA, 2005a).

Nesse contexto, trabalhos como o de Maciel (2020), Souza (2019), Rezende (2017), Silva (2012) e Cardoso (2012) são relevantes no estudo de biomassa como fonte alternativa de energia, e com potencial de aproveitamento social e econômico. Visto que a fração de resíduos sólidos orgânicos depositada nos lixões sofre degradação biológica e produzem gases

possíveis de geração ou microgeração energética elétrica e resultando em um impacto positivo na mitigação do efeito estufa.

1.2 Justificativa

No Nordeste, estima-se que só no ano de 2019 foram produzidas 19.700.875 toneladas de RSU, esse valor é o segundo maior do país em geração de resíduos e fica atrás apenas do Sudeste com 39.442.995 toneladas de RSU produzidas naquele ano (ABRELPE, 2020).

Em relação a fração orgânica, a qual passa por processos de degradação e origina a formação de gases, no Brasil, estima-se que essa fração represente 45,3% de toda a composição gravimétrica (ABRELPE, 2020).

O desenvolvimento de projetos de energia baseados no uso de biogás é uma alternativa relevante pelo fato da utilização do biogás como fonte energética ser capaz de reduzir as emissões de Gases de Efeito Estufa – GEE (CHARTEGUI *et al.*, 2015). Com isso, é possível melhorar a qualidade do ar como um todo, os odores de controle nas áreas de disposição de resíduos e resultar em benefícios econômicos para a comunidade e o usuário final de energia.

Portanto, a quantificação do potencial gerador de energia a partir da biomassa de lixões reflete a possibilidade de avaliação de prejuízo na esfera ambiental, sanitária e econômica oriundo do descarte inadequado do que poderia ser uma fonte energética (SOUZA *et al.*, 2019).

1.3 Hipóteses

Ao final deste estudo, espera-se cumprir com os objetivos estabelecidos e verificar as seguintes hipóteses:

- 1) Os resíduos sólidos urbanos descartados inadequadamente em lixões possuem potencial energético.
- 2) Existe viabilidade técnica para produção e captação do biogás gerado em lixão.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo geral

Avaliar o potencial de produção de gases passíveis de aproveitamento energético em lixões localizados no semiárido cearense.

1.4.2 Objetivos específicos

Este trabalho visa atender os seguintes objetivos específicos:

- a) Realizar o levantamento dos lixões existentes na Bacia do Acaraú;
- b) Estimar a produção anual de resíduos sólidos dos lixões selecionados;
- c) Estimar o potencial energético de lixão através da aplicação do modelo *LandGEM*;
- d) Analisar a viabilidade e os benefícios da utilização de biogás como fonte de energia.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

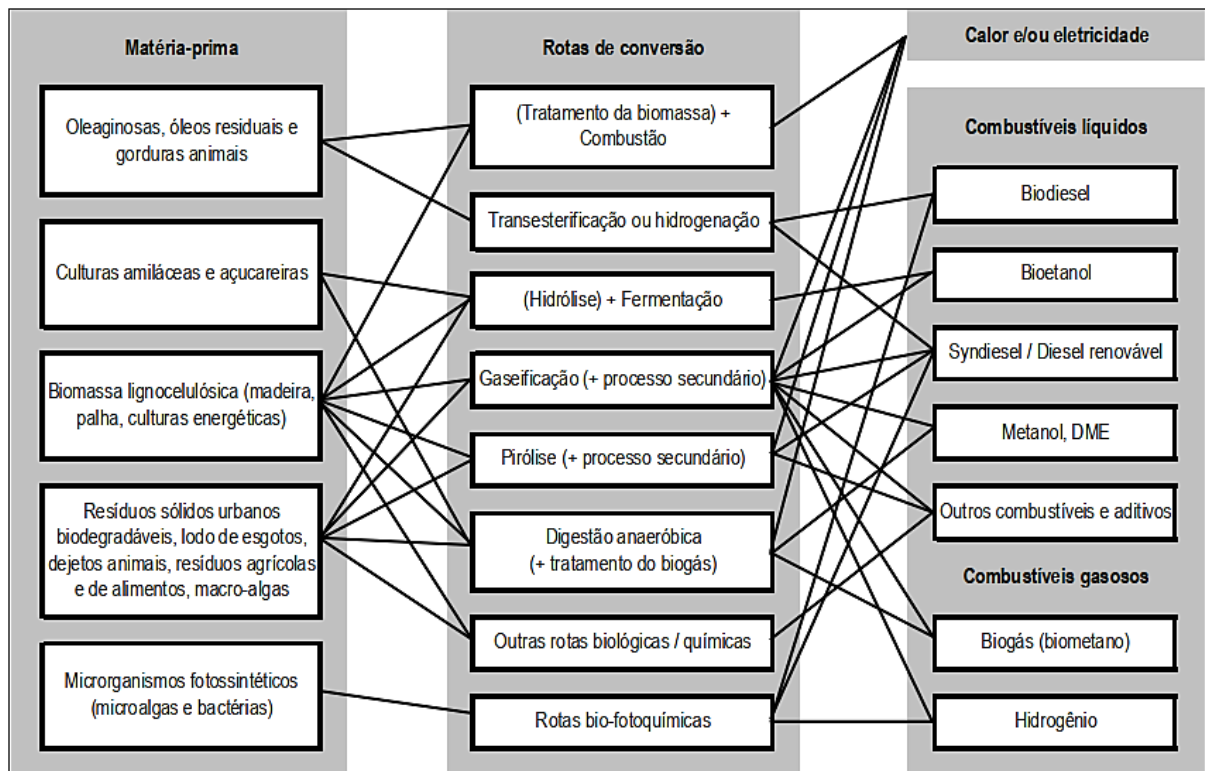
2.1 RESÍDUOS SÓLIDOS E POTENCIAL ENERGÉTICO

A composição gravimétrica dos resíduos sólidos urbanos é heterogênea, porém, cerca da metade desse material é de matéria orgânica e é possível haver capacidade de aproveitamento energético. A matriz energética brasileira é uma das mais representadas por fontes renováveis e no ano de 2017 cerca de 42,9% do total de produção energética foi advindo de fontes como energia hidráulica, biomassa da cana, carvão vegetal e outras renováveis (DRUDI, 2017; BEM, 2018).

A possibilidade de aproveitamento energético dos RSU, desde que devidamente analisada quanto à viabilidade de implementação, trata-se de uma necessidade sanitária, uma vez que, a disposição descontrolada da geração de lixo, que é constante, influi em sérios problemas ambientais e de saúde pública, mas ao converter os RSU em energia tem-se além de uma alternativa de destinação ambientalmente correta, uma oportunidade de negócio (FEAM, 2012; DRUDI, 2017).

Com a expansão das fontes de energia renováveis, o uso da biomassa como combustível energético destaca-se como pioneira em relação a substituição dos combustíveis fósseis (CAVALCANTE *et al.*, 2020). Considerando às diferentes características físicas e químicas das matérias primas capazes de converter a biomassa em um produto energético final, diversas são as rotas tecnológicas possíveis (IEA BIOENERGY, 2009 *apud* ZANETTE, 2009), conforme observa-se na Figura 1.

Figura 1 – Visão esquemática da ampla variedade de rotas tecnológicas para conversão e utilização da energia da biomassa.



Fonte: Zanette, (2009).

Durante a transformação de biomassa em energia pode ocorrer conversão bioquímica, termoquímica e físico-química. O resultado é um produto intermediário que serve de combustível para alimentar a força motriz de uma máquina que, por sua vez, gera energia mecânica e consegue movimentar o gerador de uma usina para então produzir energia elétrica capaz de ser utilizada ou distribuída (PRETO; MORTOZA, 2010).

De acordo com a IEA (2005) uma tecnologia que pode tratar com sucesso a fração orgânica de resíduos sólidos é digestão anaeróbica, pois quando usada em um sistema bem projetado, a digestão anaeróbica não apenas fornece uma prevenção contra a poluição, mas também permite o fornecimento de energia e, assim, pode converter o problema de gastos constantes com tratamento de RSU, em lucro, ao se utilizar dos resíduos como matéria-prima para obtenção de energia. À medida que a tecnologia continua a amadurecer, está se tornando um método chave para redução de resíduos e recuperação de um combustível renovável e outros produtos valiosos (IEA, 2005).

No Brasil, a alta produção agropecuária e agroindustrial atrelada à elevada concentração de pessoas nos grandes centros urbanos, favorecem uma significativa produção de resíduos sólidos e, conseqüentemente, um grande potencial de produção de biogás

(ZANETTE, 2009). Como a produção de biogás está condicionado a atividade metabólica das bactérias, a produção é favorecida em regiões de clima tropical devido à faixa de temperatura ser ideal (BERNI; MANDUCA, 2020).

O Ministério do Meio Ambiente em parceria com o Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento – PNUD, desenvolveu um estudo sobre o potencial de geração de energia elétrica a partir de resíduos de saneamento, visando incrementar o uso de biogás como fonte alternativa de energia renovável (BRASIL, 2010a). Os resultados obtidos para a análise do potencial de geração de energia, a partir da geração de metano proveniente da disposição de resíduos sólidos, apontaram que em relação aos GEE, o metano tem um potencial 21 vezes maior que o dióxido de carbono no aumento do efeito estufa, logo a utilização do biogás garante não só o aproveitamento sustentável do metano, maior componente do biogás, como a redução dos GEE na atmosfera. Estima-se que ao longo de um período de 11 anos, o aproveitamento energético do biogás evitaria a dissipação de 121 milhões de toneladas destes gases (BRASIL, 2010a).

Todavia, é necessário haver viabilidade econômica para o aproveitamento energético do biogás, sobretudo, dos projetos integrados de produção, coleta e utilização do biogás (ZANETTE, 2009).

Uma das maneiras de avaliar a capacidade de geração de energia a partir do biogás é através do seu poder calorífico inferior (PCI), que é tratado como a estimativa teórica do potencial de geração de energia em alguma fonte combustível. O PCI do biogás está diretamente relacionado ao tipo de resíduo que o gerou. Se o biogás possui predominância de gás metano, este apresentará um poder calorífico superior (PCS) ao biogás que apresentar predominância de gás carbônico (BERNI; MANDUCA, 2020).

A título de exemplo sobre o potencial energético do gás metano, Waldman (2014), revela que no decênio 2003-2013, foram construídos 41,7 milhões de biodigestores de pequena escala no meio rural chinês. Na República Popular da China (RPC), o incremento no uso de biodigestores para produzir gás metano garante 10% da energia consumida no país. (WALDMAM, 2014).

A forma de aproveitamento do biogás produzido diferencia o sistema de cada país. A Suécia utiliza a energia do biogás transformando-o em biometano para uso como combustível veicular, porém a Alemanha, principal produtora europeia, tem um sistema focado no aproveitamento elétrico (PERECIN, 2017). No Brasil, é concedido direito de exploração

elétrica do biogás para os produtores independentes e seus fins comerciais e para autoprodutores com interesse no consumo particular (BILOTTA; ROSS, 2016).

Segundo a Agencia Câmara de Notícias (2020), circula na câmara dos deputados o Projeto de Lei nº 2.193/2020. Esse projeto é uma tentativa de institucionalizar a “Política Federal do Biogás e do Biometano” trazendo incentivos à produção, pesquisas e o consumo de gás produzido a partir de resíduos orgânicos. O projeto se apoia no uso de incentivos fiscais, como abate de 50% no Imposto sobre Produtos Industrializados (IPI) de máquinas e equipamentos adquiridos para a produção de biogás e biometano, e, também, na subvenção econômica das taxas de juros e encargos cobrados pelo Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social – BNDES para empréstimo aos produtores (CAMARA DOS DEPUTADOS DO BRASIL, 2020).

2.1.1 Destinação dos RSU

Não é de hoje que a questão dos resíduos sólidos é discutida no cenário ambiental. Nesse sentido, em 2010 foi instituída a Política Nacional dos Resíduos Sólidos (PNRS), Lei nº 12.305/2010. Esta estabeleceu um marco regulatório para o direito ambiental e setor de resíduos sólidos ao elaborar um plano que responsabiliza os estados e municípios pela implementação de programas e ações para alcance de objetivos, metas e prazos presentes no referido documento, tendo como base o manejo adequado dos resíduos (SOUZA *et al.*, 2019; BRASIL, 2010b; FIGUEIREDO; COSTA; CORAZA, 2019).

No que tange a destinação dos RSU, o Capítulo II, que trata das definições da PNRS, traz no art. 3º e inciso VII da Lei 12.305/2010, traz a definição de destinação ambientalmente adequada como “reutilização, reciclagem, compostagem, recuperação e o aproveitamento energético ou outras destinações admitidas pelos órgãos competentes” (BRASIL, 2010b). Contudo, para fins de reaproveitamento dos resíduos é necessário aderir a um sistema eficaz que atente a todo o ciclo de vida do resíduo, desde a sua origem até a sua disposição final. (PIMENTEL *et al.*, 2020).

No inciso VIII do art. 3º, o texto destaca a natureza complementar do termo **disposição final** ambientalmente adequada em relação a **destinação final** ambientalmente adequada, basicamente classificando a primeira como um dos meios de realização da segunda, ao incumbir ao termo disposição a função distribuição ordenada sobre a superfície, e, ao termo destinação, a função de reaproveitamento (RAMOS; SANTOS; OLIVEIRA, 2020).

Porém, a implementação da PNRS ainda passa por muitos entraves. Sobre isso, Pimentel (2020) diz que a elaboração da lei nº 12.305/2010 trouxe consigo a expectativa de melhorias acerca da situação dos resíduos sólidos, porém, vários anos se passaram desde a sua efetivação, mas muitos gestores ainda não conseguem cumprir com as metas estabelecidas na lei.

Logo, a destinação final ambientalmente adequada de resíduo sólido significa sua reutilização pós-uso na forma de algum reaproveitamento condizente com a proteção ambiental. No entanto, isso implica no retorno do produto à cadeia de consumo e, sem o devido investimento em tecnologias que o possibilitem, o setor não avança (RAMOS; SANTOS; OLIVEIRA, 2020).

2.1.2 Gases produzidos e aspectos energéticos

Uma vez depositados os resíduos sólidos em aterros ou lixões, a decomposição da fração orgânica resulta na formação de efluente líquido (chorume) e de gases altamente poluentes (RAMOS; SANTOS; OLIVEIRA, 2020).

A decomposição da fração orgânica transcorre na fase aeróbia e anaeróbia. A primeira geralmente ocorre durante o período de deposição dos resíduos sobre a superfície de aterros ou lixões; já a segunda, ocorre após a redução do oxigênio devido à compactação das camadas de resíduo (MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE, 2009).

Os gases produzidos em aterros sanitários dão origem ao biogás, um gás com elevado poder calorífico. Sua captação é vantajosa para geração de energia e para proteção do meio ambiente, uma vez que, ao deixar de coexistir livremente na atmosfera, reduz as emissões de gases do efeito estufa, diminui a possibilidade de explosões e incêndios por acúmulo desordenado, minimiza a ação de odores que causam tantos transtornos às comunidades circunvizinhas e reduz vetores causadores de doenças (ELK, 2007).

De acordo com Maciel (2009), o processo de degradação da fração orgânica nos resíduos sólidos ocorre em cinco fases sequenciais:

- Fase I: Aeróbia.
- Fase II: Hidrólise.
- Fase III: Acidogênica.
- Fase IV: Metanogênica.

- Fase V: Decomposição Final.

O autor explica que na fase aeróbia, como o próprio nome sugere, existe ainda uma predominância do ar atmosférico em contato com a biomassa de resíduos e a composição média é de aproximadamente 80% de nitrogênio e 20% oxigênio. Na fase de hidrólise ocorre o consumo do oxigênio pelos microrganismos aeróbios incidindo em um meio anaeróbio e na decomposição de outros materiais formando o dióxido de carbono e reduzindo a composição de outros gases. Na fase acidogênica até existe a presença de outros gases, como o gás hidrogênio, mas predomina-se a geração de dióxido de carbono. Na fase metanogênica a quantidade de microrganismos elevada e ocorre a estabilização do teor de dióxido de carbono e do teor de metano sendo está a fase mais longa do processo. Na fase de decomposição final nota-se escassez da matéria carbonácea e as concentrações de metano e dióxido de carbono tendem a diminuir ao passo que as condições atmosféricas tendem a se estabelecer.

O biogás enquanto potencial energético pode ser convertido em energia elétrica, vapor, combustível para caldeiras ou fogões, combustível veicular ou abastecer gasodutos com gás de qualidade (MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE, 2009).

2.1.3 Estimativa da produção de gases

Piñas *et al.* (2016) afirmam que existem vários modelos capazes de estimar a energia gerada pela combustão do metano presente no biogás de RSU. Contudo, a seleção adequada de critérios é necessária para a correta aplicação dos programas e confiabilidade dos resultados. O prognóstico norteia a avaliação de emissões de GEE e a viabilidade do aproveitamento energético do biogás (SILVA, 2012).

Os modelos que estimam a energia e a quantidade de biogás, gerados a partir de aterros ou lixões, fazem uso de dados como massa dos RSU, taxa de geração de metano, precipitação, entre outros (COSTA *et al.*, 2016). A Agência de Proteção Ambiental dos EUA – EPA e a Agência Intergovernamental Painel sobre Mudanças Climáticas – IPCC, recomendam que para estimativa de emissões de metano em aterros sejam utilizados os modelos que tem como base equações de decaimento em primeira ordem (MACHADO *et al.*, 2009).

O *Landfill Air Emissions Model – LandGEM* é um exemplo de modelo de primeira ordem, cujos principais parâmetros de trabalho são o potencial de geração de metano (L_0) e a constante de geração de metano (k). L_0 varia em função do tipo de resíduo e k além do tipo de

resíduo, em função de fatores como pH, temperatura, umidade e qualidade de nutrientes durante a fase anaeróbia (EPA, 2005a).

2.1.4 LandGEM

Considerado padrão no setor de gases de aterro sanitário, o *LandGEM* é um *software* desenvolvido pela U.S. *Environmental Protection Agency* – EPA para estimar as emissões de metano, dióxido de carbono, composto orgânico não metano (NMOC) e poluentes perigosos em aterros de RSU (ABRELPE, 2013).

O modelo foi desenvolvido para considerar que os gases de aterros possuem uma fração de cerca de 50% de metano e a emissão de outros componentes. É utilizado para abranger não somente aterros sanitários, mas também regiões com cenários similares (FREITAS *et al.*, 2019).

LandGEM é um modelo que tem como essência uma equação de primeira ordem (Equação 1), segundo a qual a produção de metano é proporcional ao consumo de matéria orgânica por decomposição (LATTANZI; FILHO; QUELHAS, 2019).

$$Q_{CH_4} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=0,1}^1 KL_0 \left(\frac{M_t}{10} \right) e^{-kt_{i,j}} \quad (1)$$

Piñas (2016) descreve as variáveis como:

Q_{CH_4} = geração anual de metano no ano do cálculo ($m^3 \cdot ano^{-1}$);

i = incremento de tempo de 1 ano;

n = (ano do cálculo) – (ano inicial do cálculo);

j = incremento de tempo de 0,1 ano;

K = taxa de geração de metano;

L_o = capacidade potencial de geração de metano (m^3/Mg);

M_t = massa de resíduos aceita do t -ésimo ano Mg ;

$t_{i,j}$ = idade da j-ésima seção de massa de resíduo M_i , aceita no enésimo ano (anos em número decimal, p. ex. 3,2 anos).

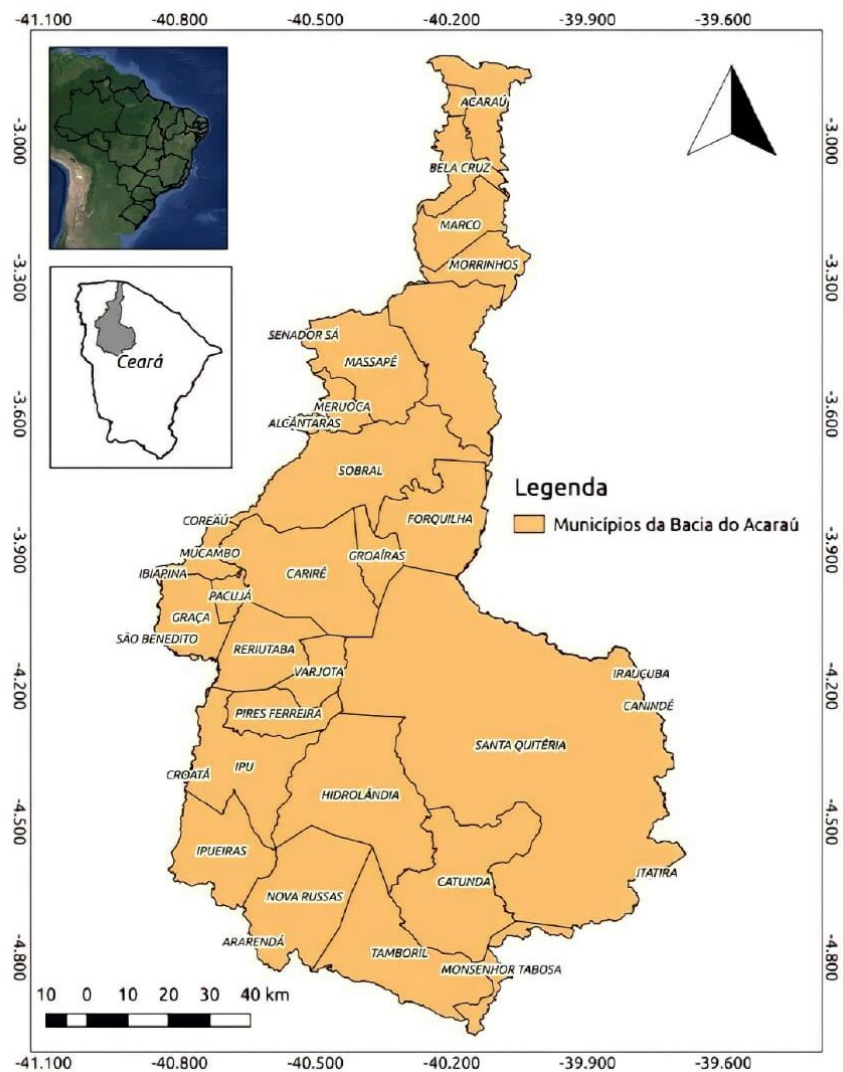
Freitas (2019) explica que como a composição específica dos resíduos não é conhecida, o *software* permite a estimativa por parâmetros padronizados para o cálculo dos valores de L_0 e K . De acordo com a EPA (2005b), para aterros convencionais os valores de capacidade de geração do metano (L_0) variam entre 96 e 170 m^3/Mg e os valores de taxa de geração do metano (K) variam entre 0.02 e 0.7 m^3/Mg . Assim, a geração de CH_4 é obtida por meio da equação cinética de primeira ordem, Equação 1, aplicada pelo *software LandGEM* (SILVA *et al.*, 2017).

A nível de verificação da qualidade e confiabilidade do modelo, ressalta-se que Thompson *et al.*, (2009) realizaram um estudo comparativo de vários modelos estimativos da produção de metano em 35 aterros canadenses. O modelo *LandGEM* não apenas se classificou entre os três mais eficazes como demonstrou maior estabilidade nas taxas de estimativas.

3 ÁREA DE ESTUDO

Para esse estudo, analisou-se o potencial energético da biomassa gerada a partir de lixões na região da bacia do Acaraú, situada na porção Noroeste do estado do Ceará. Na direção sul, a bacia faz limite com as bacias Banabuiú e Sertões de Crateús, no sentido norte com o Oceano Atlântico e no lado leste com as bacias do Litoral e do Curu (NIPPON KOEI LAC, 2016). Na Figura 02 é possível observar a localização da bacia do Acaraú e os municípios que a compõem.

Figura 2 – Limites territoriais da bacia Hidrográfica do Acaraú.



Fonte: Autora.

Mota e Valladares (2011) afirmam que os municípios nos limites territoriais da bacia são drenados de modo exclusivo pelo rio Acaraú e seus afluentes. A bacia ocupa uma área da ordem de 14.416 km² o que representa aproximadamente 9,7% da área territorial do estado do Ceará.

De acordo com a Secretaria de Recursos Hídricos (2020) a bacia do Acaraú é composta por 28 municípios e apresenta uma capacidade de acumulação de águas superficiais de 1.443.763.000 bilhão de m³, num total de 15 açudes públicos gerenciados pela Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos (COGERH). Os municípios que a compõem são: Acaraú, Alcântaras, Bela Cruz, Cariré, Catunda, Cruz, Forquilha, Graça, Groaíras, Hidrolândia, Ibiapina, Ipu, Ipueiras, Marco, Massapê, Meruoca, Monsenhor Tabosa, Morrinhos, Mucambo, Nova Russas, Pacujá, Pires Ferreira, Reriutaba, Santa Quitéria, Santana do Acaraú, Sobral, Tamboril e Varjota (SECRETARIA DE RECURSOS HÍDRICOS, 2020).

Acerca das características climáticas e geomorfológicas, Santana (2009) descreve o clima da região da bacia como sendo do tipo Semiárido Quente, onde as precipitações médias anuais variam entre 600 e 800 mm. Os meses de janeiro e maio, são os de temperaturas mais elevadas, com média em torno de 27°C. A geologia da bacia é composta principalmente por terrenos cristalinos pré-Cambrianos (até 94,70%), representado por gnaisses e migmatitos diversos, quartzitos e metacalcários, associados a rochas plutônicas e metaplutônicas de composição predominantemente granítica (SANTANA, 2009). Porém, no baixo curso a bacia ocupa uma superfície coberta por sedimentos areno-argilosos em interflúvios tabulares de baixas altitudes, com precipitações superiores a 900 mm entre janeiro e junho e temperaturas em torno de 23°C (SANTANA, 2009).

Em 2017 o Governo do Estado do Ceará, em conjunto com o Instituto Benese e a Secretaria do Meio Ambiente (SEMA), publicou uma Avaliação do Impacto Econômico da Degradação Ambiental – AIEDA para as bacias do Salgado e Acaraú. Trata-se de um compêndio, onde para a bacia do Acaraú foi exposto que o município de Sobral é o único núcleo urbano que efetua a disposição final do lixo em aterro sanitário e atende as exigências preconizadas pela legislação ambiental. Além disso, o referido documento expõe que, nessa bacia, apenas 11 municípios possuem índices de cobertura de coleta de lixo acima de 75% de abrangência populacional.

Consequentemente, os resíduos são depositados em terrenos baldios formando pequenos lixões, e os municípios ou regiões da bacia que não contam com serviços de coleta pública têm o destino final do lixo a cargo da população (CEARÁ, 2017). Esse documento traz

à tona que não há coleta diferenciada para o lixo dos estabelecimentos de saúde, que os terrenos da maioria dos aterros não são impermeabilizados e que não há drenagem de gases e das águas pluviais, nem tratamento do chorume como forma de evitar a contaminação dos solos, a poluição dos recursos hídricos e do ar (CEARÁ, 2017).

Para os municípios de Forquilha, Massapê e Cariré a destinação final é efetuada em lixões localizados em terrenos baldios às margens de rodovias e, muitas vezes, próximos a cursos d'água. Apenas Forquilha, Graça, Hidrolândia, Ipu, Pacujá e Varjota possuem águas subterrâneas com qualidade para consumo humano sem tratamento preliminar, sendo que, a atividade antrópica é a principal responsável pelo declínio da qualidade da água, uma vez que causa excesso de contribuição de nutrientes e desencadeia a eutrofização dos cursos hídricos (CEARÁ, 2017). Quanto ao esgotamento sanitário, entre os 28 municípios que compõem a bacia, 14 não dispõem de nenhum tipo de rede de esgoto e o restante dos municípios possui valores de taxa de cobertura de saneamento para a população total variando entre 1,48%, Município de Marco, e 54,97%, município de Sobral (CEARÁ, 2017).

4 METODOLOGIA

4.1 Tipo de Estudo

Este trabalho seguiu pela abordagem quali-quantitativa, com levantamento de dados demográficos, produção e destinação dos RSU de municípios selecionados na bacia do Acaraú e, posteriormente, aplicação do modelo *LandGEM* para determinação do potencial energético oriundo dos resíduos sólidos urbanos da região.

4.2 Critérios para seleção da área

A bacia do Acaraú encontra-se inserida no espaço territorial de vinte e oito municípios do estado do Ceará (SECRETARIA DE RECURSOS HÍDRICOS, 2020). Dados do IBGE cidades (2020) demonstram que esses municípios possuem características divergentes entre si e alguns municípios possuem menos dados do que outro, portanto, foi necessário estabelecer critérios de seleção, sendo adotados os municípios com:

- Disponibilidade de dados atualizados na literatura acerca da abertura e/ou encerramento dos lixões,
- Maior geração de resíduos sólidos urbano e
- Maior área do lixão.

Logo, analisou-se informações pertinentes para 27 municípios através dos Planos de Recuperação de Áreas Degradadas disponibilizados pela SEMA (2017), ficando ausente apenas o município de Ibiapina, como pode se observar na Tabela 01; estimativas populacionais para o ano de 2021 no IBGE Cidades e; censos dos anos anteriores, ou seja, 1991, 2000 e 2010 verificado nos perfis municipais publicados pelo IPECE (2017).

De posse dos dados de interesse, pode-se escolher os três municípios melhores classificados para, finalmente, verificar o comportamento da geração de resíduos, atrelada a possibilidade de aproveitamento energético proveniente dos gases gerados nos lixões. Os municípios escolhidos foram:

- Varjota;
- Monsenhor Tabosa;
- Reriutaba.

Tabela 01– Levantamento de informações sobre os lixões inseridos na Bacia do Acaraú.

| LOCAL DO LIXÃO | ANO DE ABERTURA | ANO DE ENCERRAMENTO* | TEMPO DE FUNCIONAMENTO (anos) | VOLUME DE RSU EM 2017 (m³) | ÁREA DO LIXÃO (hec) | CAPACIDADE DO LIXÃO (m³/hectare) |
|-------------------|-----------------|----------------------|-------------------------------|----------------------------|---------------------|----------------------------------|
| VARJOTA | 1997 | 2021 | 24 | 144000 | 5 | 28800,0 |
| MONSENHOR TABOSA | 1986 | 2021 | 35 | 106300 | 5 | 21260,0 |
| RERIUTABA | 1986 | 2021 | 35 | 78750 | 3,9 | 20192,3 |
| SANTA QUITÉRIA | 1996 | 2021 | 25 | 25760 | 1,5 | 17173,3 |
| GROAÍRAS | 1986 | 2021 | 35 | 9000 | 1,3 | 6923,1 |
| CATUNDA | 1990 | 2021 | 31 | 12900 | 2 | 6450,0 |
| IPUEIRAS | 2010 | 2021 | 11 | 13100 | 2,3 | 5695,7 |
| CARIRÉ | 2000 | 2021 | 21 | 18400 | 3,8 | 4842,1 |
| NOVA RUSSAS | 2002 | 2021 | 19 | 21160 | 5,3 | 3992,5 |
| TAMBORIL | 1986 | 2021 | 35 | 25600 | 6,8 | 3764,7 |
| HIDROLÂNDIA | 2004 | 2021 | 17 | 14700 | 4 | 3675,0 |
| FORQUILHA | 1986 | 2021 | 35 | 31000 | 8,5 | 3647,1 |
| PIRES FERREIRA | 2001 | 2021 | 20 | 2660 | 0,8 | 3325,0 |
| MASSAPÊ | 1997 | 2021 | 24 | 17600 | 5,45 | 3229,4 |
| BELA CRUZ | 2006 | 2021 | 15 | 29500 | 10 | 2950,0 |
| IPU | 2002 | 2021 | 19 | 20100 | 7 | 2871,4 |
| SANTANA DO ACARAÚ | 1998 | 2014 | 23 | 6120 | 3,5 | 1748,6 |
| SOBRAL | Desconhecido | 1999 | - | 5560 | 5,8 | 958,6 |
| MORRINHOS | 2009 | 2021 | 12 | 4000 | 4,3 | 930,2 |
| CRUZ | 2001 | 2021 | 20 | 2540 | 2,75 | 923,6 |
| MARCO | 2009 | 2021 | 12 | 740 | 1 | 740,0 |
| ALCANTÂRAS | 1996 | 2021 | 25 | 600 | 1 | 600,0 |
| ACARAÚ | Desconhecido | 2021 | - | 220 | 0,55 | 400,0 |
| MUCAMBO | 2002 | 2021 | 19 | 1100 | 3 | 366,7 |
| PACUJÁ | 2005 | 2021 | 16 | 1100 | 3,6 | 305,6 |
| MERUOCA | Desconhecido | 2003 | - | 60 | 0,64 | 93,8 |
| GRAÇA | 2000 | 2021 | 21 | 120 | 1,75 | 68,6 |

*2021 adotado para ano de encerramento desconhecido.

Fonte: Elaborado pela autora com dados da SEMA, (2018a).

Os dados de abertura e/ou fechamento são necessários na aplicação do modelo *LandGEM*, que estima a quantidade de gases de aproveitamento energético com base em fatores como anos de operação de aterros ou lixões. Logo, o ideal seria haver disponibilidade da data de abertura, ou se for o caso, de encerramento para os três municípios com melhor similaridade nos critérios estabelecidos. Foi possível determinar a data de abertura, mas para o encerramento

foi adotada como 2021 porque não foram encontrados registros que comprovem o encerramento dos lixões nestes municípios até a data deste trabalho.

Já o critério de maior geração de RSU se deve a implicação de maior possibilidade de geração de gases com potencial de aproveitamento energético. Em consequência, quanto maior a quantidade de gases estimados, mais expressivos são os resultados, onde lixões com área maior estão diretamente relacionados com a maior disposição de RSU.

4.3 Aplicação do Modelo *LandGEM*

LandGEM é a abreviação de *Landfill Air Emissions Model*, que em tradução livre significa “Modelo de emissões de gás de aterro”. Segundo a EPA (2005b), autora do modelo, trata-se de uma ferramenta de estimativa automatizada na Interface do *Microsoft Excel* que pode ser utilizada para estimar as taxas de emissão total dos gases de aterro ou cenários similares. Essa ferramenta é capaz de estimar metano, dióxido de carbono, compostos orgânicos não metânicos (NMOCs) e poluentes individuais do ar de aterros municipais de resíduos sólidos.

Na sessão de dados de entrada do usuário constata-se que o modelo exige a introdução das seguintes características: ano de abertura, ano de encerramento ou estimativa final do funcionamento, taxa de recebimento dos resíduos desde o ano de abertura até a data atual, ou desde o ano de abertura até o ano de encerramento. Portanto, os levantamentos desses dados serão imprescindíveis para a execução desse trabalho (EPA, 2005b).

A partir da inserção, foi possível determinar os parâmetros do modelo como taxa de geração de metano, capacidade potencial de geração de metano, concentração de NMOC e teor de porcentagem de metano.

O modelo permite ainda inserir taxas de aceitação de resíduos e selecionar até quatro gases/poluentes entre os quais: gás total do aterro, metano, dióxido de carbono, NMOC e 46 poluentes atmosféricos.

Para a estimativa de resíduos gerados no decorrer do funcionamento dos lixões, aplicou-se cálculos de estimativa populacional. Essa projeção e o cálculo da quantidade de RSU gerada pela área de estudo foram indispensáveis nas análises de produção de biogás nos lixões e nas simulações de geração de gases de efeito estufa (SOUZA *et al.*, 2019).

Assim, a geração de resíduos foi estimada, de forma simplificada, com base em dados históricos dos censos demográficos do IBGE de 1991, 2000 e 2010 com o auxílio da Equação 2, cujas variáveis são determinadas pelas Equações 3 e 4 (BARROS, 2013).

$$Q = P \cdot q \cdot 365 \text{ dias} \quad (2)$$

$$P = P_0 + k(t - t_0) \quad (3)$$

$$k = \frac{P - P_0}{t - t_0} \quad (4)$$

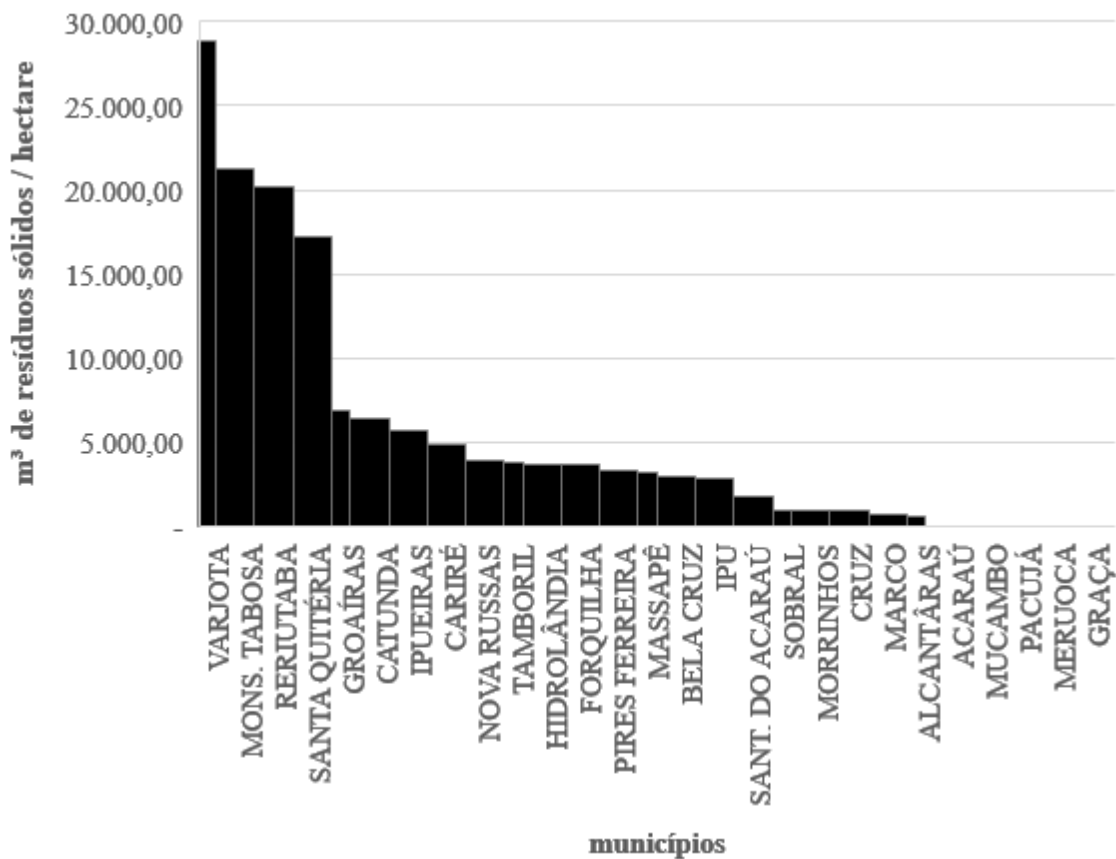
Onde: Q = Quantidade de resíduos; P = População; q = Geração *per capita* de RSU; P₀ = População inicial; t = ano final, t₀ = ano inicial; k = Coeficiente.

Já para a análise do potencial energético do metano, o método utilizado foi o de estimativa de conversão de metano dos lixões em biogás, através do *software LandGEM*, como visto na Equação 1, que rege o modelo de geração.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Através do levantamento de dados sobre os lixões contidos na região da bacia do Acaraú, como descrito na metodologia, pode-se conhecer o volume total de RSU, em m³, despejados em 27 dos 28 municípios, ficando ausente apenas o município de Ibiapina, por não ter sido considerado na série de estudos da SEMA (2018a). Também foi possível obter o valor da área de disposição de cada lixão, em hectare, e descobrir a geração de resíduos *per capita*. Os resultados encontrados estão apresentados no Gráfico 01.

Gráfico 01 – Relação dos municípios da bacia do Acaraú com o maior volume de resíduos sólidos por área de lixão.



Fonte: Elaborado pela autora com dados de SEMA, (2018a).

Observa-se que os três maiores lixões da bacia do Acaraú, em relação as dimensões de área espacial e volume de resíduos sólidos são aqueles inseridos nos municípios de Varjota, Monsenhor Tabosa e Reriutaba, inclusive, possuindo dados confirmados para os anos de abertura dos lixões. Portanto, os lixões destes municípios foram os escolhidos. Na Tabela 02 é possível observar o volume exato de RSU, em m³, por área de cada lixão, em hectare.

Tabela 02 – Volume de RSU por hectare para os lixões selecionados da Bacia do Acaraú.

| Lixão | Quantidade de RSU (m³/hectare) |
|------------------|------------------------------------------------------|
| Varjota | 28.800,0 |
| Monsenhor Tabosa | 21.260,0 |
| Reriutaba | 20.192,3 |

Fonte: Elaborado pela autora com dados de SEMA, (2018b, 2018c, 2018d).

Dentre os três municípios, o lixão de Varjota foi o que apresentou maior volume de resíduos sólidos, com quase 28.800,0 m³, enquanto Monsenhor Tabosa apresentou o segundo maior valor, 21.260,0 m³ e Reriutaba o terceiro maior, com 20.193,3 m³. Ao consultar os dados do IPECE (2017a, 2017b, 2017c) para cada município, observa-se que esse fato pode ocorrer em função de fatores como perfil de consumo, desenvolvimento socioeconômico e quantidade de habitantes. Na Tabela 03 constam informações sobre quantidade de empregos formais, área territorial e número de habitantes de cada município. Nota-se que Varjota não possui o maior território, logo, a sua alta taxa de recebimento deve justificar-se pelo fato de haver um perfil econômico relativamente mais desenvolvido e uma maior população.

Tabela 03 – Território e População dos municípios selecionados.

| Município | Empregos Formais (2016) | Território (km²) | População Urbana (Estimativa 2016) |
|------------------|------------------------------------|------------------------------------|-----------------------------------------------|
| Varjota | 1.988 | 179,239 | 14.978 |
| Monsenhor Tabosa | 1.166 | 892,538 | 10.439 |
| Reriutaba | 1.175 | 372,949 | 11.104 |

Fonte: Elaborado pela autora com dados de IPECE, (2017a, 2017b, 2017c).

Conforme descrito na metodologia, para aplicação no *LandGEM* levantou-se os seguintes dados: ano de abertura, estimativa do ano de encerramento e taxa de recebimento (EPA, 2005a). Na Tabela 03 estão listados os anos de abertura de cada lixão selecionado. Como não se encontrou na literatura os anos de encerramento, adotou-se o ano de 2021 para os três casos. Considerando o ano de encerramento como 2021, mesmo apresentando a maior taxa de

recebimento de resíduos (Tabela 02), o lixão de Varjota estaria recebendo resíduos sólidos a menos tempo que os lixões de Monsenhor Tabosa que constam em operação há cerca de 35 anos (Tabela 04), enquanto o lixão de Varjota está em funcionamento há cerca de 24 anos.

Tabela 04 – Estimativa de funcionamento dos lixões selecionados da Bacia do Acaraú.

| Lixão | Ano de abertura (PRAD) | Ano de encerramento (Adotado) | Estimativa de funcionamento |
|------------------|-----------------------------------|------------------------------------------|----------------------------------------|
| Varjota | 1997 | 2021 | 24 anos |
| Monsenhor Tabosa | 1986 | 2021 | 35 anos |
| Reriutaba | 1986 | 2021 | 35 anos |

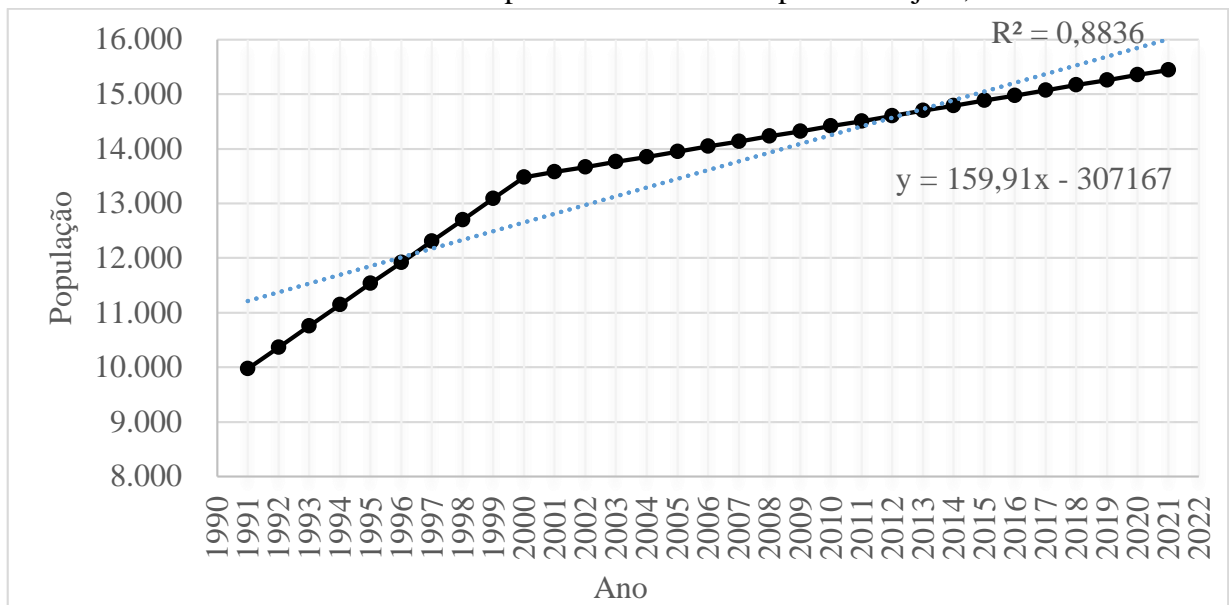
Fonte: Elaborado pela autora com dados de SEMA, (2018b, 2018c, 2018d).

Para o cálculo da taxa de recebimento é necessário conhecer a entrada de resíduos sólidos ano a ano, desde a abertura até o encerramento. O IBGE fornece os dados de censos demográficos nos anos de 1991, 2000 e 2010. A partir destes dados foi possível estimar para anos anteriores e posteriores através do método aritmético de estimativa populacional, conforme o descrito no tópico 3.3 da metodologia deste trabalho.

Sabe-se que a quantidade de pessoas que residem em um local e os seus hábitos de consumo influenciam na quantidade gerada de resíduos (KEYNES, 2017). Consequentemente, o potencial de geração de metano em cada lixão será proporcional, dentre outros fatores, a quantidade de resíduos envolvido no processo de decomposição (EPA, 2005b). Nos Gráficos 02, 03 e 04 constam o crescimento populacional estimado para os três municípios.

No município de Varjota, a estimativa para os anos desconhecidos se deu pela aplicação do método aritmético entre os anos de 1991 e 2000, 2000 e 2010, 2010 e 2021. Nota-se que houve uma maior taxa de crescimento entre os anos de 1991 e 2000, assumindo logo em seguida uma tendência de crescimento quase homogênea. Encontrou-se valor de 0,8836 para o R^2 da curva linear, Gráfico 02. De acordo com Chiode (2020), quanto mais próximo do valor absoluto 1, mais confiável é a estimativa, todavia, se houvessem mais censos demográficos, principalmente no período posterior a 2010, maior seria o valor do R^2 .

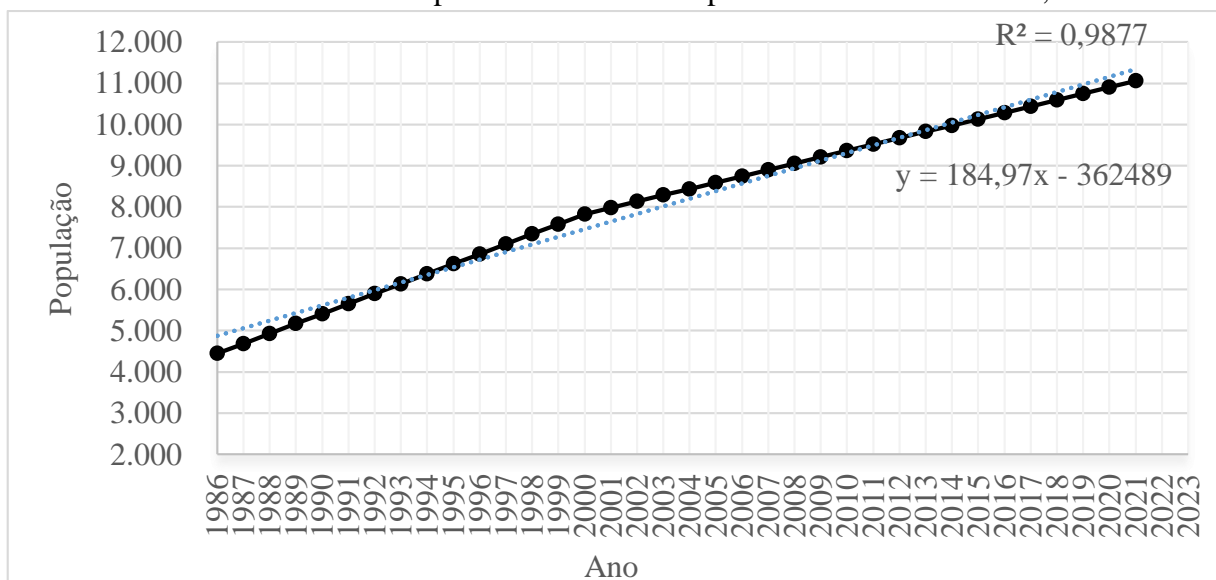
Gráfico 02 – Estimativa Populacional do Município de Varjota, Ceará..



Fonte: Elaborado pela autora com dados de IBGE, (1991, 2000, 2010).

No município de Monsenhor Tabosa, a estimativa para os anos desconhecidos se deu pela aplicação do método aritmético entre os anos de 1991 e 2000, 2000 e 2010, 2010 e 2021; porém, para obter os valores dos anos anteriores a 1991, aplicou-se o mesmo coeficiente K dos anos de 1991 a 2000, subtraindo do valor da população de 1991 em ordem decrescente até o ano de 1986. A Tabela 05 demonstra esse cálculo. Monsenhor Tabosa demonstrou maior precisão da estimativa, com R^2 no valor de 0,9877, como observa-se no Gráfico 03.

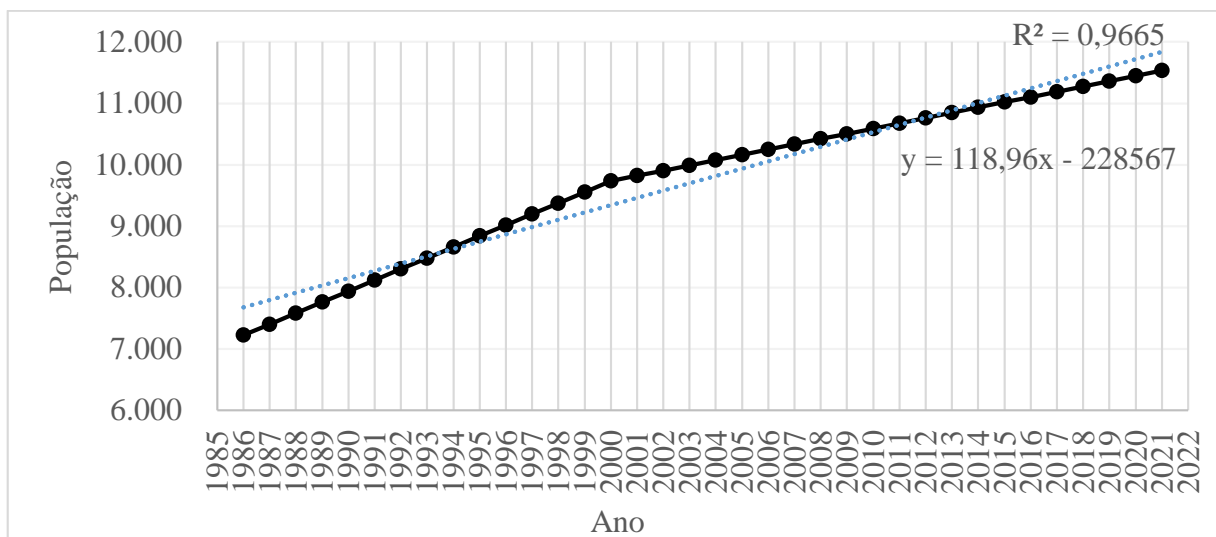
Gráfico 03 – Estimativa Populacional do Município de Monsenhor Tabosa, Ceará.



Fonte: Elaborado pela autora com dados de IBGE, (1991, 2000, 2010).

Assim como no município de Monsenhor Tabosa, para Reriutaba a estimativa para os anos desconhecidos se deu pela aplicação do método aritmético entre os anos de 1991 e 2000, 2000 e 2010, 2010 e 2021. No entanto, para obter os valores dos anos anteriores a 1991, aplicou-se o mesmo coeficiente K dos anos de 1991 a 2000, porém, subtraindo do valor da população de 1991 em ordem decrescente até o ano de 1986. A Tabela 05 demonstra esse cálculo. Reriutaba apresentou o segundo melhor valor de R^2 , com $R^2 = 0,9665$. Observa-se no Gráfico 04, que a reta é praticamente constante.

Gráfico 04 – Estimativa Populacional do Município de Reriutaba, Ceará.



Fonte: Elaborado pela autora com dados de IBGE, (1991, 2000, 2010).

Os PRADs de cada lixão apresentam também os valores de geração de lixo *per capita* e, uma vez conhecida a população para cada ano, o valor de geração *per capita* pode ser atribuído a todo o intervalo de funcionamento, por fim, resultando na taxa de recebimento para cada lixão. Nas Tabelas 05, 06 e 07 são apresentados os valores encontrados para Varjota, Monsenhor Tabosa e Reriutaba, respectivamente. Onde:

- k é o coeficiente de ajuste da estimativa populacional em habitantes por ano e é definido pela Equação 04 da metodologia;
- P é a população estimada, onde os anos de 1991, 2000, 2010 foram obtidos pelos censos do IBGE e para mensurar a população total nos intervalos entre estes períodos utilizou-se a Equação 3;
- g é a geração *per capita* e foi encontrada no PRAD de cada lixão;

- Q é a taxa de recebimento do lixo em quilogramas por ano, calculado através da Equação 2. Porém, na última coluna destaca-se a taxa Q em megagramas (Mg) por ano, unidade americana que equivalente a toneladas, ou seja, uma megagrama é o equivalente a uma tonelada, então bastou-se dividir a coluna anterior por mil. Essa unidade é usada para alimentar o *LandGEM* no segmento de “entradas do usuário” para taxa de aceitação de resíduos.

A Tabela 05 apresenta os valores encontrados ano a ano para a taxa de aceitação de resíduos no lixão do município de Varjota. O menor valor encontrado foi o de 3.282,6 Mg/ano, referente a 1991, ano de abertura. O valor médio foi de 4.621,6 Mg/ano, em 2006. Já o maior valor foi de 5.084,3 que se refere ao ano adotado como encerramento, 2021.

Tabela 05 – Taxa de recebimento de Resíduos Sólidos no lixão de Varjota, Ceará.

(*Continua*)

| ANO | K (hab/ano) *ajustado | P (hab) | GERAÇÃO PER CAPITA (kg/hab.dia) | Q (Kg/ano) | Mg/ano (1 Mg = 1 Ton)* |
|------------|------------------------------------|-------------------|-----------------------------------------------------|----------------------|----------------------------------|
| 2021 | 93,7 | 15.447 | 0,90 | 5.084.253,0 | 5.084,3 |
| 2020 | | 15.353 | 0,90 | 5.053.411,8 | 5.053,4 |
| 2019 | | 15.259 | 0,90 | 5.022.570,7 | 5.022,6 |
| 2018 | | 15.166 | 0,90 | 4.991.729,5 | 4.991,7 |
| 2017 | | 15.072 | 0,90 | 4.960.888,3 | 4.960,9 |
| 2016 | | 14.978 | 0,90 | 4.930.047,1 | 4.930,0 |
| 2015 | | 14.885 | 0,90 | 4.899.205,9 | 4.899,2 |
| 2014 | | 14.791 | 0,90 | 4.868.364,7 | 4.868,4 |
| 2013 | | 14.697 | 0,90 | 4.837.523,6 | 4.837,5 |
| 2012 | | 14.603 | 0,90 | 4.806.682,4 | 4.806,7 |
| 2011 | | 14.510 | 0,90 | 4.775.841,2 | 4.775,8 |
| 2010 | | 14.416 | 0,90 | 4.745.000,0 | 4.745,0 |

Fonte: Elaborado pela autora com dados de IPECE, (2017c); SEMA, (2018d).

Tabela 05 – Taxa de recebimento de Resíduos Sólidos no lixão de Varjota, Ceará.

| | | | | | <i>(Conclusão)</i> |
|------|-------|--------|------|-------------|--------------------|
| 2009 | 93,7 | 14.322 | 0,90 | 4.714.158,8 | 4.714,2 |
| 2008 | | 14.229 | 0,90 | 4.683.317,6 | 4.683,3 |
| 2007 | | 14.135 | 0,90 | 4.652.476,4 | 4.652,5 |
| 2006 | | 14.041 | 0,90 | 4.621.635,3 | 4.621,6 |
| 2005 | | 13.948 | 0,90 | 4.590.794,1 | 4.590,8 |
| 2004 | | 13.854 | 0,90 | 4.559.952,9 | 4.560,0 |
| 2003 | | 13.760 | 0,90 | 4.529.111,7 | 4.529,1 |
| 2002 | | 13.666 | 0,90 | 4.498.270,5 | 4.498,3 |
| 2001 | | 13.573 | 0,90 | 4.467.429,3 | 4.467,4 |
| 2000 | | 13.479 | 0,90 | 4.436.588,2 | 4.436,6 |
| 1999 | 389,6 | 13.089 | 0,90 | 4.308.366,7 | 4.308,4 |
| 1998 | | 12.700 | 0,90 | 4.180.145,2 | 4.180,1 |
| 1997 | | 12.310 | 0,90 | 4.051.923,7 | 4.051,9 |
| 1996 | | 11.921 | 0,90 | 3.923.702,2 | 3.923,7 |
| 1995 | | 11.531 | 0,90 | 3.795.480,7 | 3.795,5 |
| 1994 | | 11.142 | 0,90 | 3.667.259,2 | 3.667,3 |
| 1993 | | 10.752 | 0,90 | 3.539.037,7 | 3.539,0 |
| 1992 | | 10.363 | 0,90 | 3.410.816,2 | 3.410,8 |
| 1991 | | 9.973 | 0,90 | 3.282.594,7 | 3.282,6 |

Fonte: Elaborado pela autora com dados de IPECE, (2017c); SEMA, (2018d).

A Tabela 06 apresenta os valores encontrados ano a ano para a taxa de aceitação de resíduos no lixão do município de Monsenhor Tabosa. O menor valor encontrado foi o de 1.213,3 Mg/ano, referente a 1986, ano de abertura. O valor médio foi de 2.282,0 Mg/ano, que

está próximo dos valores encontrados para os anos de 2003 e 2004. Já o maior valor foi o de 5.084,3 que se refere ao ano adotado como encerramento, 2021.

Tabela 06 – Taxa de recebimento de Resíduos Sólidos no lixão de Monsenhor Tabosa, Ceará.

(Continua)

| ANO | K (hab/ano) *ajustado | P (hab) | GERAÇÃO PER CAPITA (kg/hab.dia) | Q (Kg/ano) | Mg/ano (1 Mg = 1 Ton)* |
|------------|------------------------------------|-------------------|-----------------------------------------------|----------------------|----------------------------------|
| 2021 | 153,9 | 11.055 | 0,75 | 3.017.012,3 | 3.017,0 |
| 2020 | | 10.901 | 0,75 | 2.975.011,2 | 2.975,0 |
| 2019 | | 10.747 | 0,75 | 2.933.010,1 | 2.933,0 |
| 2018 | | 10.593 | 0,75 | 2.891.009,0 | 2.891,0 |
| 2017 | | 10.439 | 0,75 | 2.849.007,9 | 2.849,0 |
| 2016 | | 10.285 | 0,75 | 2.807.006,7 | 2.807,0 |
| 2015 | | 10.132 | 0,75 | 2.765.005,6 | 2.765,0 |
| 2014 | | 9.978 | 0,75 | 2.723.004,5 | 2.723,0 |
| 2013 | | 9.824 | 0,75 | 2.681.003,4 | 2.681,0 |
| 2012 | | 9.670 | 0,75 | 2.639.002,2 | 2.639,0 |
| 2011 | 153,9 | 9.516 | 0,75 | 2.597.001,1 | 2.597,0 |
| 2010 | | 9.362 | 0,75 | 2.555.000,0 | 2.555,0 |
| 2009 | | 9.208 | 0,75 | 2.512.998,9 | 2.513,0 |
| 2008 | | 9.054 | 0,75 | 2.470.997,8 | 2.471,0 |
| 2007 | | 8.900 | 0,75 | 2.428.996,6 | 2.429,0 |
| 2006 | | 8.746 | 0,75 | 2.386.995,5 | 2.387,0 |
| 2005 | | 8.593 | 0,75 | 2.344.994,4 | 2.345,0 |

Fonte: Elaborado pela autora com dados de IPECE, (2017a); SEMA, (2018b).

Tabela 06 – Taxa de recebimento de Resíduos Sólidos no lixão de Monsenhor Tabosa, Ceará.

(Conclusão)

| | | | | | |
|------|--------|-------|------|-------------|---------|
| 2004 | | 8.439 | 0,75 | 2.302.993,3 | 2.303,0 |
| 2003 | | 8.285 | 0,75 | 2.260.992,1 | 2.261,0 |
| 2002 | | 8.131 | 0,75 | 2.218.991,0 | 2.219,0 |
| 2001 | | 7.977 | 0,75 | 2.176.989,9 | 2.177,0 |
| 2000 | | 7.823 | 0,75 | 2.134.988,8 | 2.135,0 |
| 1999 | | 7.582 | 0,75 | 2.069.156,4 | 2.069,2 |
| 1998 | | 7.341 | 0,75 | 2.003.324,0 | 2.003,3 |
| 1997 | | 7.099 | 0,75 | 1.937.491,6 | 1.937,5 |
| 1996 | | 6.858 | 0,75 | 1.871.659,2 | 1.871,7 |
| 1995 | 241,2 | 6.617 | 0,75 | 1.805.826,9 | 1.805,8 |
| 1994 | | 6.376 | 0,75 | 1.739.994,5 | 1.740,0 |
| 1993 | | 6.134 | 0,75 | 1.674.162,1 | 1.674,2 |
| 1992 | | 5.893 | 0,75 | 1.608.329,7 | 1.608,3 |
| 1991 | | 5.652 | 0,75 | 1.542.497,3 | 1.542,5 |
| 1990 | | 5.411 | 0,75 | 1.476.664,9 | 1.476,7 |
| 1989 | | 5.170 | 0,75 | 1.410.832,6 | 1.410,8 |
| 1988 | -241,2 | 4.928 | 0,75 | 1.345.000,2 | 1.345,0 |
| 1987 | | 4.687 | 0,75 | 1.279.167,8 | 1.279,2 |
| 1986 | | 4.446 | 0,75 | 1.213.335,4 | 1.213,3 |

Fonte: Elaborado pela autora com dados de IPECE, (2017a); SEMA, (2018b).

A Tabela 07 apresenta os valores encontrados ano a ano para a taxa de aceitação de resíduos no lixão do município de Reriutaba. O menor valor encontrado foi o de 2.240,7 Mg/ano, referente a 1986, ano de abertura. O valor médio foi de 3.112,4 Mg/ano, que está

próximo dos valores encontrados para os anos de 2003 e 2004. Já o maior valor foi o de 3.577,1 que se refere ao ano adotado como encerramento, 2021.

Tabela 07 – Taxa de recebimento de Resíduos Sólidos no lixão de Reriutaba, Ceará.

(Continua)

| ANO | K (hab/ano) *ajustado | P (hab) | g (kg/hab.dia) | Q (Kg/ano) | Mg/ano (1 Mg = 1 Ton) |
|------------|------------------------------------|-------------------|--------------------------|----------------------|---------------------------------|
| 2021 | 85,6 | 11.532 | 0,85 | 3.577.082,7 | 3.577,1 |
| 2020 | | 11.446 | 0,85 | 3.550.529,7 | 3.550,5 |
| 2019 | | 11.360 | 0,85 | 3.523.976,8 | 3.524,0 |
| 2018 | | 11.275 | 0,85 | 3.497.423,8 | 3.497,4 |
| 2017 | | 11.189 | 0,85 | 3.470.870,8 | 3.470,9 |
| 2016 | | 11.104 | 0,85 | 3.444.317,8 | 3.444,3 |
| 2015 | | 11.018 | 0,85 | 3.417.764,9 | 3.417,8 |
| 2014 | | 10.932 | 0,85 | 3.391.211,9 | 3.391,2 |
| 2013 | | 10.847 | 0,85 | 3.364.658,9 | 3.364,7 |
| 2012 | | 10.761 | 0,85 | 3.338.105,9 | 3.338,1 |
| 2011 | 85,6 | 10.676 | 0,85 | 3.311.553,0 | 3.311,6 |
| 2010 | | 10.590 | 0,85 | 3.285.000,0 | 3.285,0 |
| 2009 | | 10.504 | 0,85 | 3.258.447,0 | 3.258,4 |
| 2008 | | 10.419 | 0,85 | 3.231.894,1 | 3.231,9 |
| 2007 | | 10.333 | 0,85 | 3.205.341,1 | 3.205,3 |
| 2006 | | 10.248 | 0,85 | 3.178.788,1 | 3.178,8 |
| 2005 | | 10.162 | 0,85 | 3.152.235,1 | 3.152,2 |
| 2004 | | 10.076 | 0,85 | 3.125.682,2 | 3.125,7 |

Fonte: Elaborado pela autora com dados de IPECE, (2017b); SEMA, (2018c).

Tabela 07 – Taxa de recebimento de Resíduos Sólidos no lixão de Reriutaba, Ceará.

| | | | | | (Conclusão) |
|------|--------|-------|------|-------------|-------------|
| 2003 | | 9.991 | 0,85 | 3.099.129,2 | 3.099,1 |
| 2002 | | 9.905 | 0,85 | 3.072.576,2 | 3.072,6 |
| 2001 | | 9.820 | 0,85 | 3.046.023,2 | 3.046,0 |
| 2000 | | 9.734 | 0,85 | 3.019.470,3 | 3.019,5 |
| 1999 | | 9.555 | 0,85 | 2.963.841,4 | 2.963,8 |
| 1998 | | 9.375 | 0,85 | 2.908.212,5 | 2.908,2 |
| 1997 | | 9.196 | 0,85 | 2.852.583,6 | 2.852,6 |
| 1996 | | 9.017 | 0,85 | 2.796.954,7 | 2.797,0 |
| 1995 | 179,3 | 8.837 | 0,85 | 2.741.325,8 | 2.741,3 |
| 1994 | | 8.658 | 0,85 | 2.685.696,9 | 2.685,7 |
| 1993 | | 8.479 | 0,85 | 2.630.068,0 | 2.630,1 |
| 1992 | | 8.299 | 0,85 | 2.574.439,1 | 2.574,4 |
| 1991 | | 8.120 | 0,85 | 2.518.810,2 | 2.518,8 |
| 1990 | | 7.941 | 0,85 | 2.463.181,3 | 2.463,2 |
| 1989 | | 7.761 | 0,85 | 2.407.552,4 | 2.407,6 |
| 1988 | -179,3 | 7.582 | 0,85 | 2.351.923,5 | 2.351,9 |
| 1987 | | 7.403 | 0,85 | 2.296.294,6 | 2.296,3 |
| 1986 | | 7.223 | 0,85 | 2.240.665,7 | 2.240,7 |

Fonte: Elaborado pela autora com dados de IPECE, (2017b); SEMA, (2018c).

Como não se encontrou na literatura maiores informações acerca da composição e do teor de umidade dos resíduos, dados estes que possibilitam um melhor ajuste na escolha dos parâmetros do modelo *LandGEM*, optou-se por ajustar as variáveis para os valores padrões do modelo, Tabela 08, (EPA, 2005b).

Tabela 08 – Parâmetros padrão do modelo LandGEM.

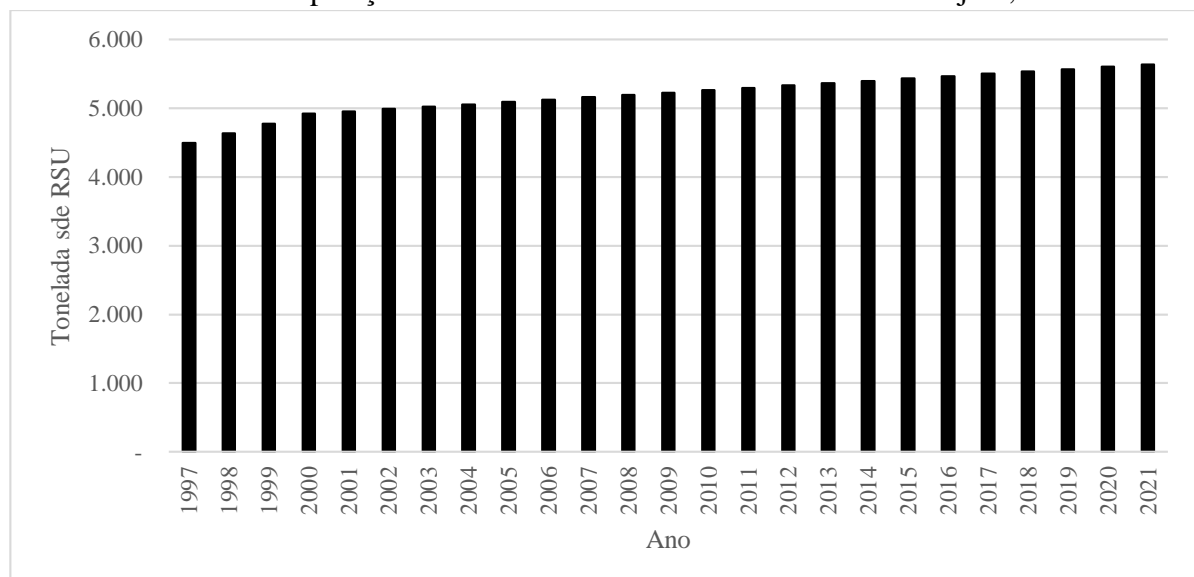
| Variáveis | Valores |
|-------------------------------------------------------------|------------------------|
| Taxa de geração de metano (k) | 0,05 ano ⁻¹ |
| Capacidade potencial de geração de metano (L ₀) | 170 m ³ /Mg |
| Concentração de NMOC | 600 ppmv as hexane |
| Teor de metano | 50% |

Fonte: Elaborado pela autora com dados de EPA, 2005b.

Uma vez estimada a capacidade de recebimento anual dos resíduos sólidos desde a abertura até o encerramento (adotado como 2021) e do ajuste das variáveis para o “padrão”, pode-se estimar a quantidade de metano que os resíduos nos lixões seriam capazes de gerar se houvesse uma forma adequada de aproveitamento.

Nos Gráficos 05, 07 e 09 são apresentadas as taxas de aceitação de resíduos nos lixões de Varjota, Monsenhor Tabosa e Reriutaba. Nos gráficos 06, 08 e 10 constam os valores metano e outros compostos obtidos no programa *LandGEM* com a aplicação das respectivas taxas e variáveis selecionadas. Abaixo, no Gráfico 05, é apresentado a taxa de deposição de resíduos sólidos no lixão de Varjota.

Gráfico 05 – Deposição anual de Resíduos Sólidos no lixão de Varjota, Ceará.

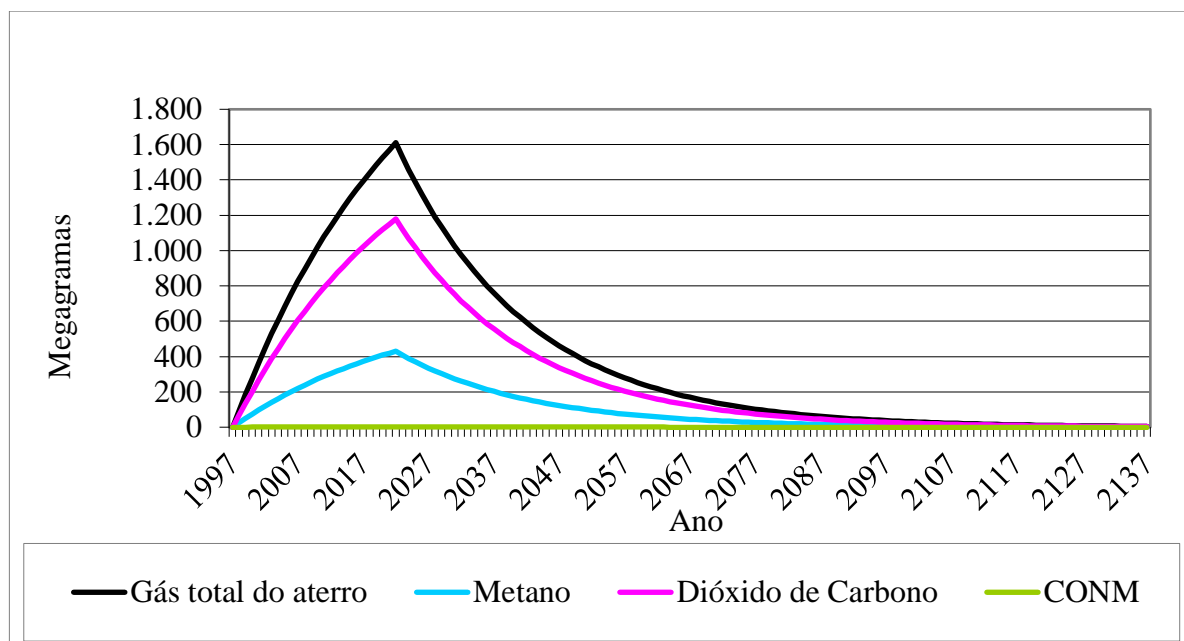


Fonte: Elaborado pela autora com dados de SEMA (2018d).

No Gráfico 06 vê-se o resultado da aplicação da taxa e dos parâmetros do modelo *LandGEM*, obtendo-se assim estimativa da produção de gases para o lixão de Varjota. A geração de gases vai além do ano de início e ano final de deposição de resíduos, uma vez que o

modelo apontou zero m³ de volume no ano inicial, mas continuou a estimativa até o ano de 2137. Supõe-se que esse resultado ocorra devido o primeiro ano de acúmulo de resíduos a fração de gases gerada ainda não ser significativa e que mesmo após o encerramento processos físico, químicos e biológicos continuem ocorrendo, o que acarretaria, portanto, na geração desses gases mesmo após o interrompimento da deposição de resíduos. Percebeu-se também que o ano de pico de geração de gases do lixão foi o ano de 2022, ano posterior ao encerramento, com os valores de 430 megagramas de metano e 1.180 megagramas de dióxido de carbono, totalizando 1.610 megagramas (ou toneladas) de gás total do lixão em 2022. Esse resultado é semelhante ao encontrado por Nascimento, Medeiros e Carvalho (2016) cujo o ano de maior geração de gases em seu estudo também foi o ano seguinte ao interrompimento do recebimento de resíduos. Quanto aos compostos orgânicos não metânicos, os resultados demonstraram baixa significância destes valores em relação aos gases de lixão, os valores variaram de 0,01 a 2,77 megagramas, sendo encontrado o valor médio de 0,26 megagramas.

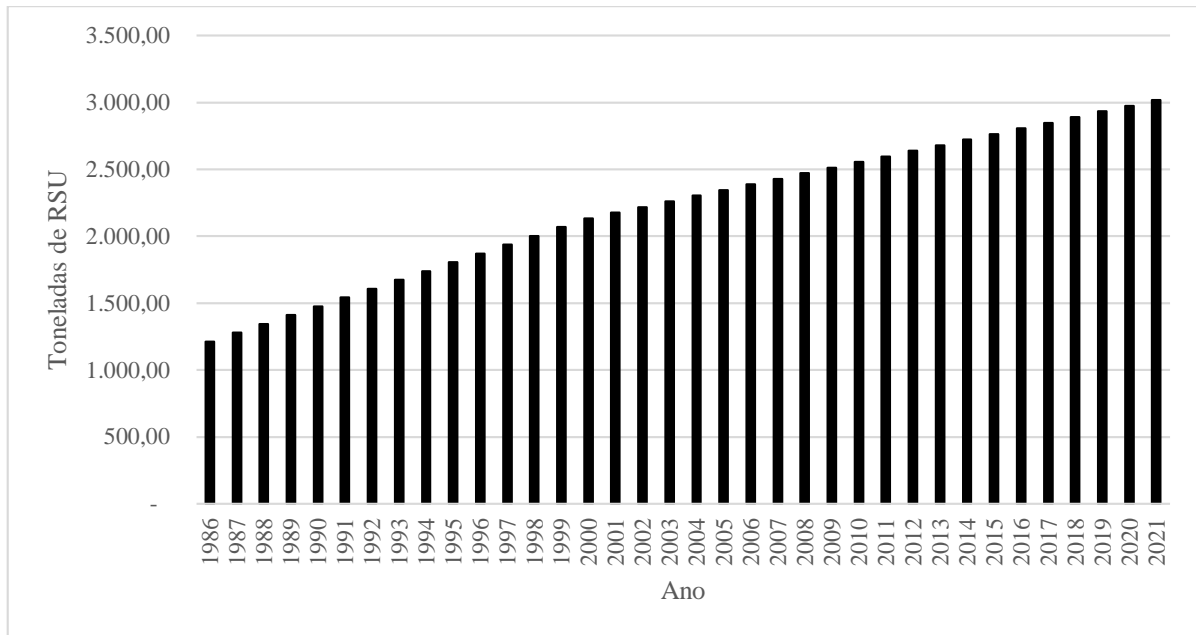
Gráfico 06 – Emissões de gases do lixão de Varjota, Ceará gerados a partir do modelo LandGEM.



Fonte: Elaborado pela autora.

Para Monsenhor Tabosa é apresentado no Gráfico 07 a taxa de deposição de resíduos sólidos no lixão, onde nota-se um crescente recebimento do material ao longo dos anos.

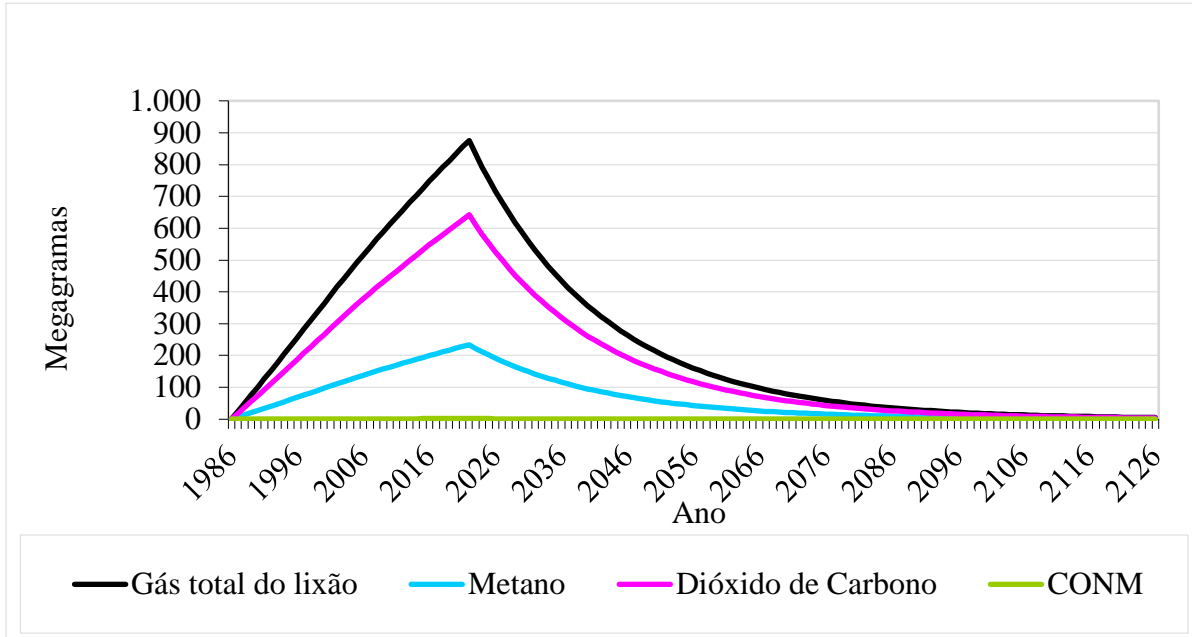
Gráfico 07 – Deposição de Resíduos Sólidos no lixão de Monsenhor Tabosa, Ceará.



Fonte: Elaborado pela autora com dados de SEMA (2018b).

No Gráfico 08 consta o resultado da aplicação da taxa de recebimento de resíduos e dos parâmetros do modelo *LandGEM*. Assim como em Varjota, a geração de gases vai além do ano de início e fim da deposição de resíduos. O modelo apontou zero m³ de volume no ano inicial, mas continuou a estimativa até o ano de 2126. O ano de pico de geração de gases do lixão foi o ano de 2022, ano posterior ao encerramento, com os valores de 234 megagramas de metano e 642 megagramas de dióxido de carbono, totalizando 876 megagramas (ou toneladas) de gás total do lixão em 2022. Quanto aos compostos orgânicos não metânicos, os resultados demonstraram baixa significância destes valores em relação aos gases de lixão, os valores variaram de 0,01 a 1,51 megagramas, sendo encontrado o valor médio de 0,21 megagramas.

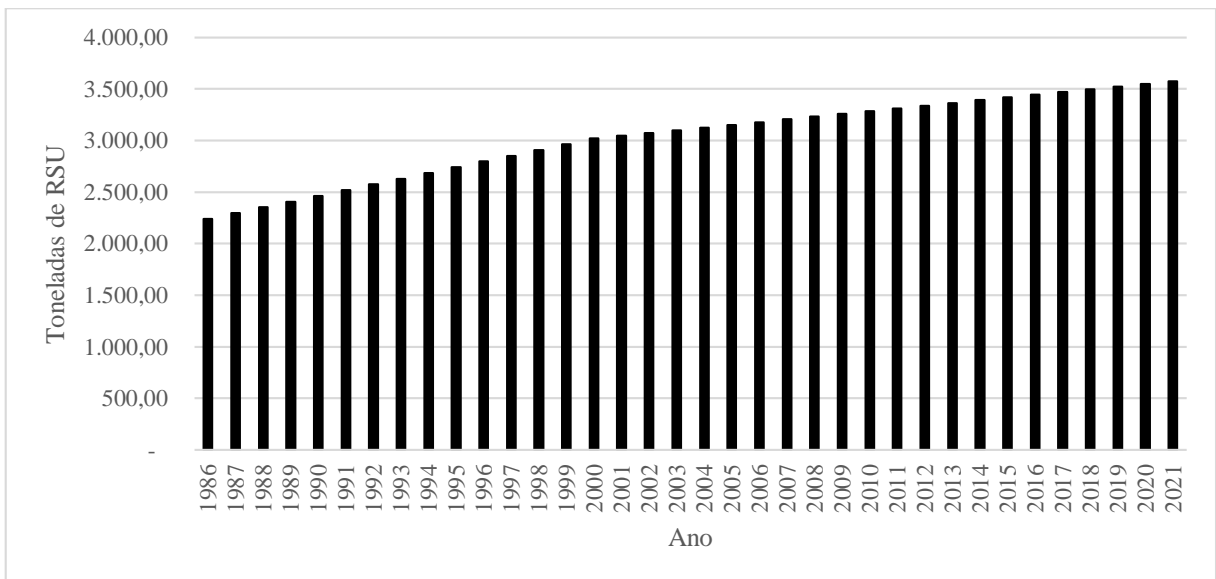
Gráfico 08 – Emissões de gases do lixão de Monsenhor Tabosa, Ceará gerados a partir do modelo LandGEM.



Fonte: Elaborado pela autora.

Para Reriutaba é demonstra-se no Gráfico 09 a taxa de deposição de resíduos sólidos no lixão e o seu crescimento ao longo dos anos.

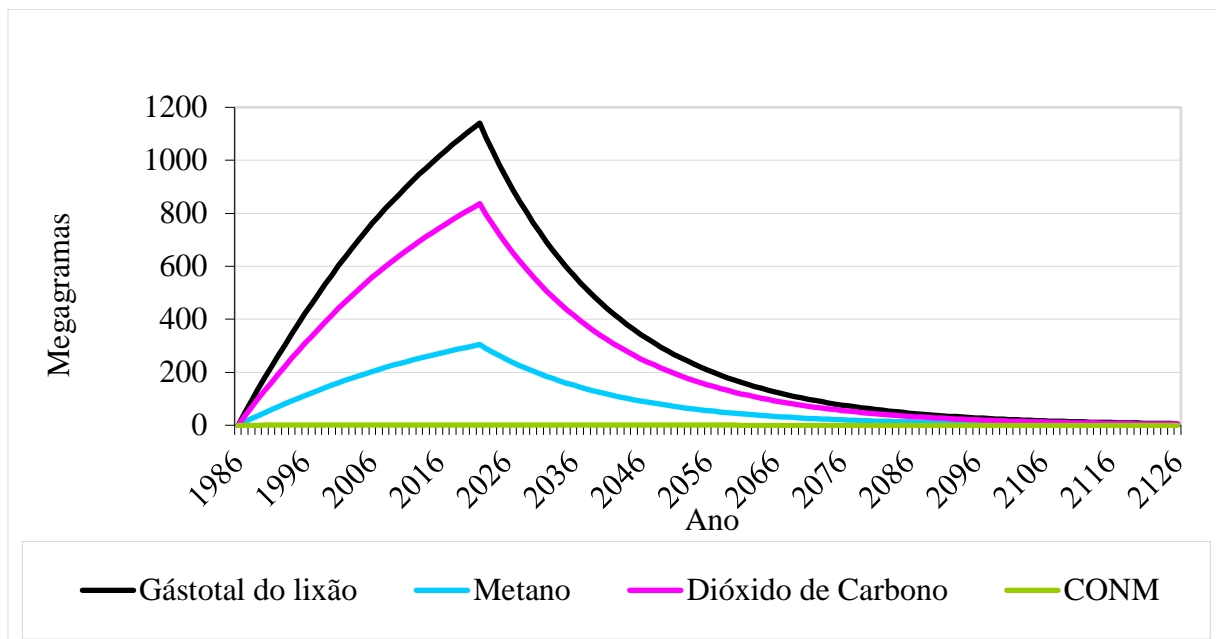
Gráfico 09 – Deposição de Resíduos Sólidos no lixão de Reriutaba, Ceará.



Fonte: Elaborado pela autora com dados de SEMA (2018c).

O Gráfico 10 apresenta o resultado da aplicação desta taxa e dos parâmetros do modelo *LandGEM* para o município de Reriutaba. Assim como nos outros dois lixões, a geração de gases vai além do ano de início e fim da deposição de resíduos. O modelo apontou zero m³ de volume no ano inicial, mas continuou a estimativa até o ano de 2126. O ano de pico de geração de gases do lixão foi o ano de 2022, ano posterior ao encerramento, com os valores de 305 megagramas de metano e 836 megagramas de dióxido de carbono, totalizando 1.140 megagramas (ou toneladas) de gás total do lixão em 2022. Quanto aos compostos orgânicos não metânicos, os resultados demonstraram baixa significância destes valores em relação aos gases de lixão, os valores variaram de 0,01 a 1,96 megagramas, sendo encontrado o valor médio de 0,29 megagramas.

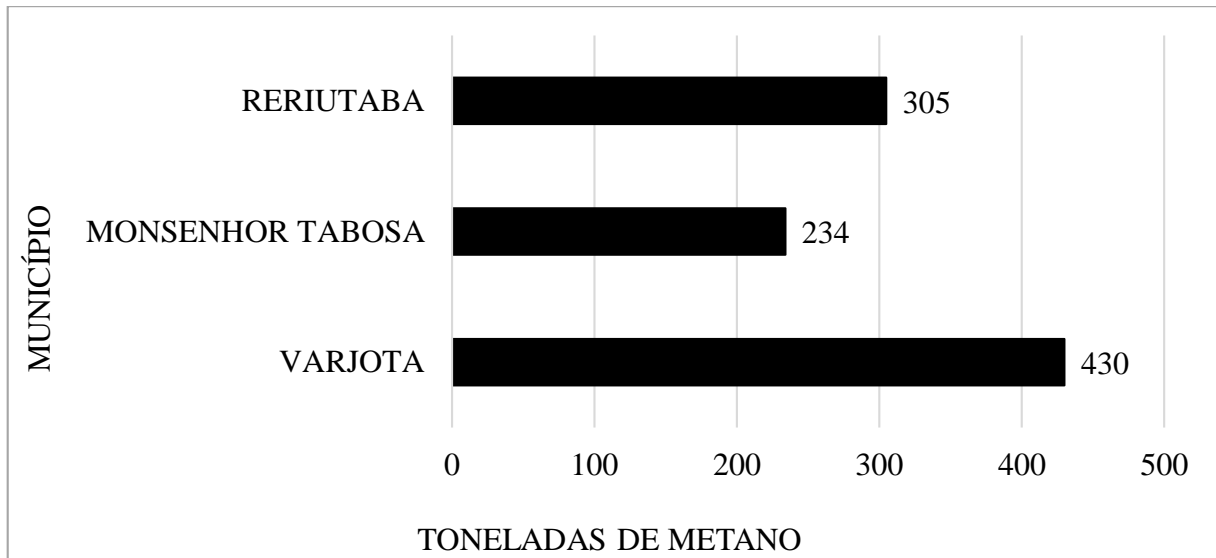
Gráfico 10 – Emissões de Gases no lixão de Reriutaba, Ceará gerados a partir do modelo LandGEM.



Fonte: Elaborado pela autora.

O ano de 2021 foi considerado como o de encerramento das atividades de recebimento de resíduos. Assim, observa-se que em 2022, Gráfico 11, ocorre o pico de geração de metano. Esse resultado pode se justificar pelo fato de o encerramento do lixão trazer consigo a tendência de finalizar a decomposição do material acumulado e incidir em uma redução cada vez maior de suas atividades de emissões de gases.

Gráfico 11 – Pico da geração de metano nos lixões selecionados ocorre em 2022.



Fonte: Elaborado pela autora com dados de *LandGEM*.

O modelo provê os resultados de saída em megagramas/ano, toneladas curtas/ano e em m³/ano. Firno (2013) e BMELV (2010) apresentam dados de conversão do potencial do volume de metano em m³, assim, é preferível a utilização dos dados em m³/ano. Na Tabela 09 apresenta-se os correspondentes valores anuais do volume de metano em megagramas em m³ para cada lixão no ano de pico de geração, 2022.

Tabela 09 – Estimativa da geração de metano com pico em 2022 para os municípios selecionados através do modelo LandGEM.

| Município | Megagramas / Ano | m ³ de metano / Ano |
|------------------|------------------|--------------------------------|
| Varjota | 430 | 644.531 |
| Monsenhor Tabosa | 234 | 350.689 |
| Reriutaba | 305 | 456.553 |

Fonte: Elaborado pela autora.

Consta no biogás a possibilidade de aproveitamento energético devido a sua composição rica em metano que, em condições normais de temperatura, 0°C e pressão, 1 atm, possui um poder calorífico inferior de 9.9 KWh/m³ (BMELV, 2010). Estima-se que um biogás composto por 50-80% pode ter um PCI entre 4,95-7,92 Kwh/m³ (CETESB, 2006 *Apud* MACHADO, 2011). Transformando o volume de metano da Tabela 08 pelo fator de conversão

citado na literatura, ou seja, $1 \text{ m}^3 = 9 \text{ KWh}$, encontrou-se os seguintes valores de potencial energético, Tabela 10:

Tabela 10 – Conversão do volume de metano (m^3) em potencial elétrico (KWh).

| Lixão | m^3/ano | Fator de conversão | Potencial (kWh) / ano | Potencial (KWh) / mês |
|------------------|-------------------------------------------|------------------------------------------------|------------------------------|------------------------------|
| Varjota | 644.531 | | 6.380.860 | 531.738 |
| Monsenhor Tabosa | 350.689 | $1 \text{ m}^3 \therefore 9,9 \text{ KWh/m}^3$ | 3.471.816 | 289.318 |
| Reriutaba | 456.553 | | 4.519.875 | 376.656 |

Fonte: Elaborado pela autora com dados de *LandGEM*; BMELV, (2010).

Para o ano de 2022, o lixão de Varjota apresentou um potencial de 6.380,860 KWh/ano e 531.738 KWh/mês, o lixão de Monsenhor Tabosa 3.471.816 KWh/ano e 289.318 KWh/mês e o lixão de Reriutaba 4.519.875 KWh/ano e 376.656 KWh/mês. A EPE – Empresa de Pesquisa Energética (2017), estima que em 2022 a média do consumo de energia elétrica residencial será de aproximadamente 165 KWh/mês. A Tabela 11 apresenta uma relação entre o potencial de energia elétrica contida nos resíduos sólidos de lixão, através da emissão de metano e a quantidade de residências que poderiam ser atendidas com essa energia.

Tabela 11 – Potencial de atendimento energético com o metano de lixão em 2022.

| Município | Potencial (KWh/mês) | População Estimada (2022) | Atendimento (Residências/mês) |
|------------------|----------------------------|----------------------------------|--------------------------------------|
| Varjota | 531.738 | 15.540 | 3.223 |
| Monsenhor Tabosa | 289.318 | 11.209 | 1.753 |
| Reriutaba | 376.656 | 11.617 | 2.283 |

Fonte: Elaborado pela autora com dados de EPE, 2017; *LandGEM*.

Com a quantidade de energia que cada lixão poderia gerar em 2022, e considerando as respectivas estimativas populacionais naquele ano para cada município, seria possível atender 3.222 residências do município de Varjota, 1.753 em Monsenhor Tabosa e 2.283 em Reriutaba.

A nível de custos, A EPE (2017), em sua nota técnica DEA 001/017, elaborou uma projeção de demanda energética para os anos de 2017 a 2026. Na tabela 12, são apresentados os preços comerciais do KWh da energia elétrica em reais.

Tabela 12 – Custo da energia elétrica no Brasil.

| Ano | Intensidade (kWh/R\$) |
|------|--------------------------|
| 2016 | 0,139 |
| 2021 | 0,149 |
| 2022 | 0,150 |
| 2026 | 0,157 |

Fonte: Elaborado pela autora com dados de Adaptado de EPE, 2017.

Na Tabela está expresso o valor do KWh em 2016, os demais valores são estimativas. Inclusive, o valor de 2022, quinze centavos, foi obtido através da interpolação entre os valores de 2021 e 2026. Ao se tomar como base o valor de R\$ 0,15 para o KWh de energia (EPE, 2017), é possível estimar o valor comercial da energia produzida a partir do metano proveniente da decomposição em lixão. Na Tabela 13 estão expressos os valores encontrados.

Tabela 13 – Receita gerada com a captação e utilização do metano proveniente de RSU.

| Município | Potencial (kWh) / ano | Receita anual | Potencial (KWh) / mês | Receita Mensal |
|------------------|--------------------------|------------------|--------------------------|-------------------|
| Varjota | 6.380.860 | R\$ 957.128,97 | 531.738 | R\$ 79.760,75 |
| Monsenhor Tabosa | 3.471.816 | R\$ 520.772,45 | 289.318 | R\$ 43.397,70 |
| Reriutaba | 4.519.875 | R\$ 677.981,24 | 376.656 | R\$ 56.498,44 |

Fonte: Elaborado pela autora com dados de EPE, 2017.

Considerando o valor comercial do KWh como R\$ 0,15 para o ano de 2022, a Tabela 13 apresenta a receita que poderia ser gerada por ano ou ao longo dos meses se houvesse uma forma de aproveitamento tecnológico do metano proveniente dos lixões de Varjota, Monsenhor Tabosa e Reriutaba. Porém, estudos sobre a viabilidade do aproveitamento energético de resíduos sólidos são feitos, majoritariamente, em aterros. Gomes *et al.* (2013), concordam que não existem muitas informações sobre a concentração do biogás em lixões, principalmente, lixões do semiárido brasileiro. Inclusive, só entre os anos de 2004 e 2015, Nascimento *et al* (2019) apontam que no Brasil foram implantadas nove usinas termelétricas

que aproveitam o biogás dos aterros de resíduos e que estes aterros geram 86,3 MW de energia elétrica em relação a potência total instalada.

Pelo fato do biogás proveniente de aterros sanitários ser rico em CH₄ e CO₂, cujo potencial energético é elevado, diversos benefícios sociais e econômicos têm sido desenvolvidos para viabilizar o aproveitamento energético do biogás (FIRMO *et al.*, 2010). Mas embora esses resultados se mostrem promissores, o processo de biodegradação da massa de resíduos evolui de forma diferente nos lixões e a composição do biogás pode ser alterada em relação a um ambiente de manejo controlado (GOMES *et al.*, 2013).

Zulauf (2004) afirma que, por maior que seja o depósito, se o lixão tiver mais de 5 anos, como é o caso dos lixões aqui estudados, é mais provável que não ofereça viabilidade econômica, pois seria necessário haver a ampliação da área para futuros depósitos de RSU de forma adequada à captação das emissões de metano. O autor ainda explica que o potencial energético do metano em lixões encerrados é limitado, uma vez que o acúmulo de resíduos se deu de maneira desorganizada, sem aproveitamento do biogás ou preocupação com a drenagem. Assim, seriam necessários grandes investimentos em ajuste técnico para viabilizar a captação do biogás e gerar relevância energética.

6 CONCLUSÕES

Foi possível cumprir os objetivos dessa pesquisa avaliando o potencial de produção de gases passíveis de aproveitamento energético em lixões localizados na bacia do Acaraú, semiárido cearense. Através do levantamento de dados para os lixões contidos na bacia foi possível estimar a produção anual de resíduos sólidos da região. O programa *LandGEM* apresentou valores relevantes para o potencial de geração de metano dos lixões selecionados, sendo estes suficientes para abastecer de 1753 até 3223 residências.

Em relação aos benefícios da utilização do biogás como fonte energética, destacaram-se recorrentemente o controle da emissão dos GEE na atmosfera, redução dos riscos de incêndios e explosões nos lixões, melhora dos odores de controle no manejo do material e geração de renda extra com um material outrora sem aplicabilidade. Com a utilização do *software* percebeu-se que existe na biomassa descartada inadequadamente nos lixões de Varjota, Monsenhor Tabosa e Reriutaba potencial para geração de energia elétrica suficiente para abastecer pequenas comunidades descentralizadas. Porém, o aproveitamento só poderia ocorrer com outra forma de disposição, pois os resíduos sólidos urbanos, enquanto descartados inadequadamente, não possuem potencial energético viável de captação.

A simples deposição sobre o solo, sem qualquer controle operacional, pode demandar elevado aporte de recursos financeiros para adequação técnica, uma vez que aproveitamento posterior ao início das atividades de recepção e acúmulo de resíduos onera ainda mais a implantação de tecnologias de aproveitamento sendo os custos de implantação superiores ao lucro com o aproveitamento e, dessa forma, recomenda-se que o método empregado para gerenciamento dos resíduos sólidos e aproveitamento energético seja o uso de aterro sanitário.

7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Custos de implantação, aproveitamento e encerramento de uma central de faturamento energético em lixões.
- Tecnologias de aproveitamento de metano e biogás gerados a partir de resíduos sólidos.
- Utilização de energia elétrica de biocombustíveis na produção e distribuição de água em uma região semiárida.

REFERÊNCIAS

ABRELPE. **Atlas brasileiro de emissões de gases de efeito estufa e potencial energético na destinação de resíduos sólidos**. São Paulo, 2013. 171p.

ABRELPE. **Panorama de Resíduos Sólidos no Brasil – 2020**. São Paulo, 2020. 52p.

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

BARROS, Regina Mambeli; TIAGO FILHO, Geraldo Lúcio; SILVA, Tiago Rodrigo da. The electric energy potential of landfill biogas in Brazil. **Energy Policy**, Estados Unidos, p.150-164, 5 nov. 2013.

BEN, Balanço Energético Nacional. Rio de Janeiro, 2018. **Relatório Síntese**. Rio de Janeiro, 2018, 62p.

BERNI, Mauro Donizeti; MANDUCA, Paulo Cesar. Transição e diversificação da matriz elétrica do estado de Roraima através de resíduos sólidos urbanos/Transition and diversification of the electric matrix of the state of Roraima through municipal solid waste. **Brazilian Journal of Development**, v. 6, n. 1, p. 4807-4817, 2020.

BILOTTA, Patrícia; ROSS, Bárbara Zanicotti Leite. Estimativa de geração de energia e emissão evitada de gás de efeito estufa na recuperação de biogás produzido em estação de tratamento de esgotos. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 21, n. 2, p. 275-282, 2016.

BMELV – Ministério da Nutrição, Agricultura e Defesa do Consumidor da Alemanha. Projeto PROBIOGÁS. **Guia prático do biogás**. Geração e Utilização. 5ª ed. Gülzow, 2010.

BRASIL. (2010a). **Ministério do Meio Ambiente**. Estudo sobre o Potencial de Geração de Energia a partir de Resíduos de Saneamento (lixo, esgoto), visando incrementar o uso de biogás como fonte alternativa de energia renovável. São Paulo. Disponível em: https://www.mma.gov.br/estruturas/164/_publicacao/164_publicacao10012011033201.pdf. Acesso em: 17 maio 2020.

BRASIL. (2010b) **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. Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil, Brasília. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/112305.htm. Acesso em: 17 maio 2020.

CÂMARA DOS DEPUTADOS DO BRASIL. **Projeto cria política para incentivar produção e uso de biogás**. Repórter: Janary Júnior. Agência Câmara de Notícias. Disponível em: <https://www.camara.leg.br/noticias/657496-projeto-cria-politica-para-incentivar-producao-e-uso-de-biogas/>. Acesso em: 02 Ago. 2020.

CARDOSO, B. M. **Uso da Biomassa como Alternativa Energetica**. Orientador: Jorge Luiz do Nascimento. Monografia (Projeto de Graduação em Engenharia Elétrica) — Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2012.

CAVALCANTI, Ingrid Lelis Ricarte *et al.* Caracterização química do resíduo da biomassa da algaroba para fins de estudos energéticos/Chemical characterization of algaroba biomass waste for energy studies. **Brazilian Journal of Development**, v. 6, n. 1, p. 872-881, 2020.

CEARÁ, Governo do Estado do. **Avaliação do Impacto Econômico da Degradação Ambiental – AIEDA**. Compêndio com resultados do projeto: apoio ao crescimento econômico com redução das desigualdades e sustentabilidade ambiental no Ceará – Programa para resultados (PfoR) / Coordenador Wirlan Fábio Bernardo. Instituto Benese. 2017.

CHACARTEGUI, Ricardo *et al.* Analysis of a CHP plant in a municipal solid waste landfill in the South of Spain. **Applied Thermal Engineering**, v. 91, p. 706-717, 2015.

CHIODE, A. de S. **Avaliação de propostas de coeficientes de determinação do tipo R² em modelos de regressão logística com resposta nominal**. Orientadora: Silvia Nagib Elian. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2020.

COSTA, Amanda Maria Coura Dias *et al.* Dimensionamento de Diferentes Cenários na Destinação de Resíduos Sólidos no Aterro Sanitário–CPGRS. **Revista Brasileira de Energias Renováveis**, v. 5, n. 3, p. 343-355, 2016.

DE CAMPOS MONTEIRO, N. N. *et al.* **I-005–Estudo Do Aproveitamento Energético Do Biogás Gerado No Lixão De Cuiabá-MT**. Trabalho apresentado no 13º Seminário Nacional de Resíduos Sólidos, ABES – Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2018, Cuiabá.

DRUDI, Kelly Cristina Rosa. **Modelo de Predição de Poder Calorífico dos Resíduos Sólidos Urbanos a partir de sua composição gravimétrica**. 2017. Tese (Doutorado em Energia) — Universidade Federal do ABC, 2017.

ELK, A. G. H. P. **Redução de emissões na disposição final**. Mecanismo de Desenvolvimento Limpo aplicado a resíduos sólidos. Rio de Janeiro, IBAM, 2007. Disponível em: http://www.ibam.org.br/media/arquivos/estudos/03-aterro_md1_1.pdf. Acesso em 18 maio 2020.

ENSINAS, A. V. **Estudo da geração de biogás no aterro sanitário delta em Campinas-SP**. 2003. 145 f. 2003. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) — Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas. Campinas. 2003.

EPA – United States Environmental Protection Agency. (2005a). **First-order kinetic gas generation model parameters for wet landfills** (EPA-600/R-05/072). Washington, 2005. 66 p.

EPA – United States Environmental Protection Agency. (2005b). **Landfill Gas Emissions Model (LandGEM) Version 3.02 User's Guide**, EPA-600/R-05/047. Disponível em: <https://www3.epa.gov/ttnca1/dir1/landgem-v302-guide.pdf>. Acesso em: 21 maio 2020.

EPE – Empresa De Pesquisa Energética. **SÉRIE ESTUDOS DA DEMANDA. NOTA TÉCNICA DEA 001/17**. Projeção da demanda de energia elétrica para os próximos 10 anos (2017-2026). Rio de Janeiro, 2017.

FEAM [FUNDAÇÃO ESTADUAL DO MEIO AMBIENTE]. **Aproveitamento Energético de Resíduos Sólidos Urbanos: Guia de Orientações para Governos Municipais de Minas Gerais**. Minas Gerais, 2012.

FIGUEIREDO, Aline Campos; COSTA, Ana Cristina Magalhães; CORAZA, Rosana Icassatti. **Diagnóstico da destinação dos resíduos sólidos em minas gerais (2011–2017): um estudo sobre sua evolução à luz de diretrizes da política nacional de resíduos sólidos**. In: Forum Internacional de Resíduos Sólidos-Anais. 2019. p. 9-9.

FIRMO, Alessandra Lee Barbosa *et al.* Avaliação do Potencial de Geração de Biogás dos Componentes dos Resíduos Sólidos Urbanos do Aterro da Muribeca. In: **3º Simposio Iberoamericano de Ingeniería de Residuos e 2º Seminário da Região Nordeste sobre Resíduos Sólidos**. 2010. p. 8-10.

FIRMO, Alessandra Lee Barbosa. **Estudo numérico e experimental da geração de biogás a partir da biodegradação de resíduos sólidos urbanos**. 2013. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Centro Tecnológico e Geociências, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Recife, PE, 2013.

FREIRE, Vitória de Andrade *et al.* Diagnosis of environmental damage, risks and dangers present in the Massaranduba dump–PB. **Research, Society and Development**, v. 9, n. 3, p. 77932442, 2020.

FREITAS, Lílian Carla Ferreira *et al.* Avaliação econômica e do potencial energético do biogás de aterro em Campinas-SP. **Research, Society and Development**, v. 8, n. 6, p. e4286788-e4286788, 2019.

GOMES, Érika Romana *et al.* III-261–**Investigação Da Composição Do Biogás Gerado Em Lixões Da Região Metropolitana Do Cariri**. ABES. 2013.

GOMES, Juliano da Cunha. **Desenvolvimento e aplicação de ferramenta de apoio à decisão para auxiliar a remediação de lixões de resíduos sólidos urbanos**. 2019. Tese (Doutorado em Engenharia Ambiental) — Centro Tecnológico, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, 2019.

IBGE. **Panorama Cidades do Ceará**. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/ce/panorama>. Acesso em: 28 jun. 2020.

IEA, 2005, **Biogas production and utilisation**, Disponível em: https://www.ieabioenergy.com/wp-content/uploads/2013/10/56_Task37booklet.pdf. Acesso em: 17 maio 2020.

IPCC – INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. (2013) **Fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. Disponível em: http://www.climatechange2013.org/images/report/WG1AR5_ALL_FINAL.pdf. Acesso em: 18 maio 2020.

IPECE. Instituto de Pesquisa e Estratégia Econômica do Ceará. (2018a). **Perfil Municipal 2017 Monsenhor Tabosa**. Fortaleza, Ceará, 2017.

IPECE. Instituto de Pesquisa e Estratégia Econômica do Ceará. (2018b). **Perfil Municipal 2017 Reriutaba**. Fortaleza, Ceará, 2017.

IPECE. Instituto de Pesquisa e Estratégia Econômica do Ceará. (2018c). **Perfil Municipal 2017 Varjota**. Fortaleza, Ceará, 2017.

KEYNES, John Maynard. **Teoria geral do emprego, do juro e da moeda**. Saraiva Educação SA, 2017.

LATTANZI, Iasmim Esteves; FILHO, Dario de Andrade Prata; QUELHAS, Osvaldo Luiz Gonçalves. Modelagem da geração de biogás aplicando metodologia CDM para redução de emissões de gases de efeito estufa: estudo de caso do Aterro MTR Santa Maria Madalena, RJ, Brasil. **Sistemas & Gestão**, v. 14, n. 4, 2019.

MACHADO, Camila Romantini. **Biodigestão anaeróbia de dejetos de bovinos leiteiros submetidos a diferentes tempos de exposição ao ar**. 2011. Dissertação (Mestrado em Energia na Agricultura) — Universidade Estadual Paulista “Julio de Mesquita Filho”, Botacatu, São Paulo, 2011.

MACHADO, S. L.; CARVALHO, M. F.; GOURC, J-P.; VILAR O. M.; NASCIMENTO, J. C. F. Methane generation in tropical landfills: Simplified methods and field results. **Waste Management**, v. 29, p. 153-161, 2009.

MACIEL, F. J. **Geração de biogás e energia em aterro experimental de resíduos sólidos urbanos**. 2009. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) — Universidade Federal de Pernambuco, Recife, PE, 2009.

MACIEL, Luciana Lima Lemos. Biomassa: uma fonte renovável para geração de energia elétrica no Brasil. **Revista de trabalhos Acadêmicos – Universo Campos dos Goytacazes**, v. 1, n. 13, 2020.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE, 2009. **Aproveitamento Energético de Biogás de Aterro Sanitário**. Disponível em: <https://www.mma.gov.br/cidades-sustentaveis/residuos-solidos/politica-nacional-de-residuos-solidos/aproveitamento-energetico-do-biogas-de-aterro-sanitario?tmpl=component&print=1>. Acesso em: 18 maio 2020.

MOTA, Lydia Helena da Silva; VALLADARES, Gustavo Souza. Vulnerabilidade à degradação dos solos da Bacia do Acaraú, Ceará. **Revista Ciência Agronômica**, v. 42, n. 1, p. 39-50, 2011.

NASCIMENTO, Dayse Pereira do; CARVALHO, Monica; MEDEIROS, Susane Eterna Leite. Aplicação Do Modelo Landgem Para Estimação Da Geração De Biogás No Aterro Sanitário Metropolitano De João Pessoa/PB. **Aplicação Do Modelo Landgem Para Estimação Da Geração De Biogás No Aterro Sanitário Metropolitano De João Pessoa/PB**, p. 1-388–416.

NASCIMENTO, Maria Cândida Barbosa *et al.* Estado da arte dos aterros de resíduos sólidos urbanos que aproveitam o biogás para geração de energia elétrica e biometano no Brasil. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 24, n. 1, p. 143-155, 2019.

NIPPON KOEI LAC. **Produto 02 – Relatório De Diagnóstico Ambiental Da Bacia Do Acaraú**. Plano de Segurança Hídrica das Bacias Hidrográficas do Acaraú, Metropolitanas e Salgado. Produto 01 – II – Bacia do Acaraú. 2016, 118p.

PERECIN, Danilo. **Comparação entre as estratégias de aproveitamento energético do biogás: geração de energia elétrica versus produção de biometano**. 2017. Dissertação (Mestrado em Ciências) — Universidade de São Paulo, São Paulo, 2017.

PIMENTEL, Cristine Helena Limeira *et al.* A gestão das rotas tecnológicas de tratamento e destinação final dos resíduos sólidos urbanos no município de João Pessoa/PB/Management of technological routes for treatment and final destination of urban solid waste in the municipality of João Pessoa/PB. **Brazilian Journal of Development**, v. 6, n. 2, p. 7063-7088, 2020.

PIÑAS, Jean Agustin Velásquez *et al.* Aterros sanitários para geração de energia elétrica a partir da produção de biogás no Brasil: comparação dos modelos *LandGEM* (EPA) e Biogás (Cetesb). **Revista Brasileira de Estudos de População**, v. 33, n. 1, p. 175-188, 2016.

PRETO, E. V.; MORTOZA, G. L. **Geração de energia elétrica utilizando biomassa**. 2010.

RAMOS, Naiara Francisca *et al.* Desenvolvimento de ferramenta para diagnóstico ambiental de lixões de resíduos sólidos urbanos no Brasil. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 22, n. 6, p. 1233-1241, 2017.

RAMOS, Silma Pacheco. SANTOS, Sérgio Luiz Silva. OLIVEIRA, Fabiane Araújo de. Lei da política nacional de resíduos sólidos: análise conceitual de destinação e disposição adequadas de resíduos sólidos. **Revista Interdisciplinar Científica Aplicada**, Blumenau, V.14, nº 1, p. 1-14 TRI I, 2020. ISSN 1980-7031.

REZENDE, B. X. **Estudo da viabilidade da utilização de biomassa para geração de energia elétrica**. Orientador: Welbert Alves Rodrigues. Monografia (Projeto de Graduação em Engenharia Elétrica) — Universidade Federal de Ouro Preto, João Monlevade, Minas Gerais, 2017.

SANTANA, E. W. **Caderno Regional da Bacia do Acaraú**. Fortaleza, 2009. 128p.

SEMA. Secretaria do Meio Ambiente. (2018a). **Plano de recuperação de áreas degradadas – Bacia do Acaraú**. 27 (vinte e sete) PRAD's. Disponível em: <https://www.sema.ce.gov.br/plano-de-recuperacao-de-areas-degradadas-por-lixao-prad/plano-de-recuperacao-de-areas-degradadas-bacia-acarau/>. Acesso em: 09 de Nov. de 2020.

SEMA. Secretaria do Meio Ambiente. (2018b). **ATIVIDADE 3 - PRODUTO 5C. PLANO DE TRANSIÇÃO DE RECUPERAÇÃO DA ÁREA DEGRADADA DO LIXÃO DE MONSENHOR TABOSA (BACIA DO ACARAÚ)**. RC-SP-056/18-R1. Brasil, Monsenhor Tabosa – CE, 2018.

SEMA. Secretaria do Meio Ambiente. (2018c). **ATIVIDADE 3 - PRODUTO 5C. PLANO DE RECUPERAÇÃO DA ÁREA DEGRADADA DO LIXÃO DE RERIUTABA (BACIA DO ACARAÚ)**. RC-SP-062/18-R1. Brasil, Reriutaba – CE, 2018.

SEMA. Secretaria do Meio Ambiente. (2018d). **ATIVIDADE 3 - PRODUTO 5C. PLANO DE RECUPERAÇÃO DA ÁREA DEGRADADA DO LIXÃO DE VARJOTA (BACIA DO ACARAÚ)**. RC-SP-067/18-R1. Brasil, Varjota – CE, 2018.

SILVA, Tiago Rodrigo *et al.* Methodology for the determination of optimum power of a Thermal Power Plant (TPP) by biogas from sanitary landfill. **Waste Management**, v. 65, p. 75-91, 2017.

SILVA, Tiago Rodrigo. **Metodologia para a determinação teórica da potência ótima conseguida a partir da combustão do biogás gerado em aterro sanitário: Estudo de caso do aterro sanitário de Itajubá-MG**. 2012.

SOUZA, Alessandra Ribeiro de *et al.* Análise do potencial de aproveitamento energético de biogás de aterro e simulação de emissões de gases do efeito estufa em diferentes cenários de gestão de resíduos sólidos urbanos em Varginha (MG). **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 24, n. 5, p. 887-896, 2019.

SOUZA, G. A. **Estimativa da produção de biogás no antigo lixão do Itacorubi, Flóridaópolis-SC**. Flóridaópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, 2009.

SRH – Secretaria de Recursos Hídricos do Ceará. **Comitê da Bacia Hidrográfica do Acaraú**. 2020. Disponível em: <https://www.srh.ce.gov.br/comite-da-bacia-hidrografica-do-acarau/>. Acesso em: 09 ago. 2020.

THOMPSON, S.; Sawyer, J.; Bonam, R. *et al.* (2009), “Building a better methane generation model: Validating models with methane recovery rates from 35 Canadian landfills”, **Waste Management**, Vol. 29, pp. 2085–2091.

VAVERKOVÁ, Magdalena Daria *et al.* Environmental consequences and the role of illegal waste dumps and their impact on land degradation. **Land Use Policy**, v. 89, p. 104234, 2019.

WALDMAN, Maurício. **Decifrar o lixo, decifrar perspectivas.** [Entrevista concedida a] IHU ON-Line. In: MARIA, Ana. Site Agência Envolverde Jornalismo, 28 out. 2014. Disponível em: <https://envolverde.cartacapital.com.br/decifrar-o-lixo-decifrar-perspectivas/>. Acesso em: 19 maio 2020.

WESTLAKE, Kenneth. **Landfill waste pollution and control.** Woodhead Publishing, 2014.

ZANETTE, André Luiz. **Potencial de aproveitamento energético do biogás no Brasil.** 2009. Dissertação (Mestrado em Planejamento Energético) — Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009.

ZULAUF, Mark. Geração com biogás de aterros de lixo. DOSSIÊ ENERGIA POSITIVA PARA O BRASIL. **O BRASIL QUER ENERGIAS RENOVÁVEIS,** 2004.