



**Universidade Federal do Sul da Bahia - UFSB**  
**Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Bahia - IFBA**  
**Programa de Pós-Graduação em Ciências e Tecnologias Ambientais - PPGCTA**

Leonilton Cagy Silva

**MODELO DINÂMICO DA EMISSÃO DE METANO E ESTIMATIVA DE  
GERAÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS ORGÂNICOS URBANOS DE PORTO  
SEGURO – BA**

Orientador: Prof. Dr. Elfany Reis do Nascimento Lopes

Coorientador: Prof. Dr. Fabrício Berton Zanchi

PORTO SEGURO - BA

MAIO - 2020

Leonilton Cagy Silva

**MODELO DINÂMICO DA EMISSÃO DE METANO E ESTIMATIVA  
DE GERAÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS ORGÂNICOS URBANOS  
DE PORTO SEGURO – BA**

Dissertação apresentada à Universidade Federal do Sul da Bahia e Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Bahia, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciências e Tecnologias Ambientais para obtenção do Título de Mestre em Ciências e Tecnologias Ambientais.

Orientador: Prof. Dr. Elfany Reis do Nascimento Lopes

Coorientador: Prof. Dr. Fabrício Berton Zanchi

PORTO SEGURO - BA

MAIO - 2020

Dados internacionais de catalogação na publicação (CIP)  
Universidade Federal do Sul da Bahia - Sistema de Bibliotecas

S586m Silva, Leonilton Cagy, 1985 -

Modelo dinâmico da emissão de metano e estimativa de  
geração de resíduos sólidos orgânicos urbanos de Porto  
Seguro - BA. / Leonilton Cagy Silva. – Porto Seguro, 2020.  
70 p.

Orientador: Elfany Reis do Nascimento Lopes  
Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Sul da  
Bahia. Programa de Pós-Graduação em Ciências e  
Tecnologias Ambientais. Campus Sosígenes Costa.

1. Resíduos Sólidos. 2. Biogás. 3. Lixão. 4. Gravimetria. I.  
Lopes, Elfany Reis do Nascimento. II. Título.

CDD: 363.7285

**MODELO DINÂMICO DA EMISSÃO DE METANO E ESTIMATIVA  
DE GERAÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS ORGÂNICOS URBANOS  
DE PORTO SEGURO - BA**

**Comissão Julgadora**

---

**Prof. Dr. FELIPE MICALI NUVOLONI**  
**UNIVERSIDADE FEDERAL DO SUL DA BAHIA**

---

**Prof. Dr. ALLISON GONÇALVES SILVA**  
**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E**  
**TECNOLOGIA DA BAHIA**

---

**Profa. Dra. LENIR ABREU**  
**UNIVERSIDADE FEDERAL DO SUL DA BAHIA**

Aprovada em: dia mês ano (12/05/2020)

Local da Defesa: Universidade Federal do Sul da Bahia

Dedico este trabalho  
aos meus pais, Rosa e  
José Nilton, ao meu  
irmão, José Nilton,  
aos meus avós  
maternos e paternos, e  
a minha namorada,  
Gabriela.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente à Deus, por ter me permitido chegar até aqui.

Aos meus pais, Rosa e José Nilton, que sempre estiveram ao meu lado me apoiando ao longo de toda a minha trajetória. E ao meu irmão José Nilton por me incentivar e contribuir no desenvolvimento desse trabalho.

A minha namorada Gabriela pela compreensão e paciência demonstrada durante o período do projeto.

Sou grato ao meu coorientador Dr. Fabrício Berton Zanchi, pela disponibilidade, apoio e paciência. Obrigado por me manter motivado durante todo o processo.

Agradeço as contribuições do meu orientador Dr. Elfany do Nascimento Lopes que foram fundamentais para conclusão da dissertação.

Aos meus colegas de pesquisa Ana Luísa, Raiane, Rafael e Wander que compartilharam e enfrentaram os desafios no desenvolvimento da pesquisa, obrigado por todo o companheirismo ao longo deste percurso.

Agradeço aos meus amigos Antônio, Gabriel e Marcos agradeço a amizade e compreensão que sempre me disponibilizaram.

Um agradecimento especial aos meus amigos de trabalho e parceiros de pesquisa, seu Manoel, Luiza, Zenilton, Ilo, Marcel, Fábio, Júlia e Mateus pelo apoio e compreensão durante todo período de pesquisa vocês foram essenciais para que este trabalho fosse concluído satisfatoriamente.

Aos professores Dr. Allison Gonçalves, Dr. Marcos Bernardes, Dr. Felipe Micali, Dr. Leonardo Moraes, Dra. Lenir Abreu, Dr. Nadson Simões e Dra. Catarina Marcolin pelo apoio e contribuições durante a pesquisa.

Meus Agradecimentos ao IFBA e UFSB e todos os seus professores, técnicos e terceirizados que proporcionam um ensino público de qualidade.

Meu reconhecimento e gratidão aos catadores do lixão de Porto Seguro que além da contribuição na coleta dos dados proporcionaram lições de vida.

A Prefeitura Municipal de Porto Seguro por ter possibilitado acesso ao campo de pesquisa e pelos dados cedidos.

De coração... muito obrigado a todos vocês!

## SUMÁRIO

<b>RESUMO GERAL .....</b>	<b>9</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>10</b>
<b>LISTA DE FIGURAS .....</b>	<b>12</b>
<b>INTRODUÇÃO GERAL .....</b>	<b>16</b>
<b>Classificação dos resíduos sólidos .....</b>	<b>17</b>
<b>Disposição final dos resíduos .....</b>	<b>19</b>
<b>Lixão .....</b>	<b>20</b>
<b>Aterros Sanitários.....</b>	<b>20</b>
<b>Conversão Energética e Motores Ciclo Otto.....</b>	<b>23</b>
<b>Créditos de carbono .....</b>	<b>24</b>
<b>Objetivos gerais .....</b>	<b>25</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>26</b>
<b>ARTIGO I.....</b>	<b>28</b>
<b>MODELO DINÂMICO DE EMISSÃO DE METANO .....</b>	<b>29</b>
<b>RESUMO.....</b>	<b>29</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>29</b>
<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>30</b>
<b>MATERIAL E MÉTODOS.....</b>	<b>32</b>
<b>Proposição do Modelo Dinâmico de Emissão de Metano-MDEM .....</b>	<b>32</b>
<b>IPCC .....</b>	<b>34</b>
<b>Produção Energética .....</b>	<b>37</b>
<b>Créditos de Carbono .....</b>	<b>38</b>
<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>40</b>
<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>43</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>43</b>
<b>ARTIGO II.....</b>	<b>47</b>
<b>ESTIMATIVA DE GERAÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS E MODELAGEM DINÂMICA DE EMISSÃO DE METANO DE PORTO SEGURO-BA .....</b>	<b>47</b>
<b>RESUMO.....</b>	<b>47</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>47</b>
<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>48</b>
<b>MATERIAL E MÉTODOS.....</b>	<b>50</b>
<b>Área de estudo.....</b>	<b>50</b>
<b>Caracterização dos Resíduos Sólidos.....</b>	<b>51</b>

<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>54</b>
<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>63</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>64</b>
<b>CONCLUSÃO.....</b>	<b>69</b>



# MODELAGEM DINÂMICA DA EMISSÃO DE METANO E ESTIMATIVA DE GERAÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS ORGÂNICOS URBANOS DE PORTO SEGURO - BA

## RESUMO GERAL

Atualmente, uma das principais problemáticas que impacta de maneira negativa o mundo em que vivemos diz respeito aos resíduos sólidos, sobretudo quando a sua decomposição ocorre sem o tratamento adequado, produzindo, dentre outras coisas, o biogás que apresenta em sua composição o gás metano ( $\text{CH}_4$ ) que é um dos principais gases do efeito estufa. Esse problema se elevou em razão do crescimento populacional que provocou o aumento na geração dos resíduos sólidos (RS) e problemas no gerenciamento adequado destes, especialmente nos países em desenvolvimento. A partir desse problema, o trabalho teve como objetivo propor a elaboração e validação de um modelo dinâmico para estimar a emissão do gás metano e por meio da aplicação desse prever as emissões de metano para os próximos vinte anos no município de Porto Seguro – BA. Os dados utilizados para alimentar o modelo foram obtidos através da caracterização gravimétrica dos RS de três setores de coleta representativos produzidos no município. Esses dados contribuíram para a definição de parâmetros para a elaboração e análise do modelo dinâmico. Os resultados indicaram que o modelo proposto apresentou uma validação de ajuste excelente para estimar a população e produção de resíduos e a estimativa da produção de metano e produção energética obtiveram um ajuste ótimo, o estudo também indicou por meio da análise gravimétrica do resíduo depositado uma predominância de matéria orgânica de 44,51%, muito importante para produção do metano, aplicando o modelo proposto para no município de Porto Seguro em uma previsão de um período de 20 anos foram obtidos os seguintes resultados, a modelagem indicou um aumento na produção diária de resíduos de 43,69% em comparação com 150 t/dia atuais, previu também uma emissão de metano de 176.569.297,57  $\text{m}^3/\text{CH}_4$  para 2039, que gerariam retornos interessantes com a comercialização e/ou utilização do gás e da venda dos créditos de carbono gerados, o estudo fornece um modelo moldável as necessidades além de colaborar com o melhor entendimento sobre a poluição gerada pelos resíduos orgânicos e com a execução de políticas públicas socioambientais de maneira mais eficiente, bem como uma melhor gestão e execução mais rentável e viável para o município.

**Palavras-chave:** resíduos sólidos; biogás; lixo, gravimetria.

# DYNAMIC MODELING OF METHANE EMISSIONS AND ESTIMATION OF GENERATION OF SOLID URBAN ORGANIC WASTE FROM PORTO SEGURO – BA

## ABSTRACT

Nowadays one of the main problems that negatively impacts the world in which we live is solid waste, especially when its decomposition occurs without proper treatment, producing, among other things, the biogas that contains methane gas in its composition (CH<sub>4</sub>) which is one of the main greenhouse gases. This problem has arisen due to population growth that has caused an increase in the generation of solid waste (RS) and problems on its proper management, especially in developing countries. Based on this problem, this paper aimed to propose the elaboration and validation of a dynamic model to estimate the emission of methane gas and by applying this model to predict methane emissions for the next twenty years in the city of Porto Seguro - BA. The data used to feed the model was obtained through the gravimetric characterization of the SR from three representative collection sectors produced in the municipality. These data contributed to the definition of parameters for the elaboration and analysis of the dynamic model. The results indicated that the proposed model presented an excellent adjustment validation to estimate the population and waste production and the estimate of methane production and energy production obtained an optimal adjustment, the study also indicated through the gravimetric analysis of the deposited waste a predominance 44.51% organic matter, very important for methane production, applying the proposed model for the municipality of Porto Seguro in a 20-year forecast, the following results were obtained, the modeling indicated an increase in the daily production of 43.69% waste compared to the current 150 t / day, it also predicted a methane emission of 176,569,297.57 m<sup>3</sup> / CH<sub>4</sub> for 2039, which would generate interesting returns with the commercialization and / or use of gas and the sale of carbon credits generated, the study provides a moldable model to different needs in addition to collaborating with a better understanding of the pollution generated by organic waste and with the execution of social and environmental public policies in a more efficient way, as well as better management and more profitable and viable execution for the municipality.

**Keywords:** solid waste; biogas; dumping ground; gravimetry.

## **LISTA DE TABELAS**

### **ARTIGO II - MODELAGEM DINÂMICA DA EMISSÃO DE METANO E ESTIMATIVA DE GERAÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS ORGÂNICOS URBANOS DE PORTO SEGURO-BA**

Tabela 1: Rotas de coleta de resíduos sólidos do município de Porto Seguro – BA. ....	53
Tabela 2: Composição gravimétrica dos RSU de Porto Seguro – BA .....	55
Tabela 3: Valores de COD por tipo de resíduos sólidos encontrados na gravimetria. ....	56
Tabela 4: Custos de implementação de aterros sanitários por etapa (em R\$). ....	58

## LISTA DE FIGURAS

### INTRODUÇÃO GERAL

Figura 1: Esquema de decomposição anaeróbica. ....	22
Figura 2: Estrutura Motor Ciclo Otto.....	23

### ARTIGO I - MODELO DINÂMICO DA EMISSÃO DE METANO

Figura 1: Características funcionais do programa STELLA.....	33
Figura 2: Representação completa do modelo MDEM no Stella.....	39
Figura 3: Validação do modelo da população. ....	40
Figura 4: Validação do modelo de produção de resíduos sólidos. ....	41
Figura 5: Validação do modelo de produção do metano. ....	41
Figura 6: Validação do modelo produção de energética .....	42

### ARTIGO II - ESTIMATIVA DE GERAÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS E MODELAGEM DINÂMICA DE EMISSÃO DE METANO DE PORTO SEGURO-BA

Figura 1: Mapa da localização do lixão de Porto Seguro – BA.....	51
Figura 2: Método de quarteamento dos Resíduos Sólidos.....	52
Figura 3: Representação completa do modelo MDEM no Stella.....	54
Figura 4: Geração de metano. ....	59
Figura 5: Conversão de CH <sub>4</sub> gerando potência. ....	60
Figura 6: Conversão de CH <sub>4</sub> para energia elétrica. ....	61
Figura 7: Créditos de Carbono. ....	63

## **LISTA DE QUADROS**

### **INTRODUÇÃO GERAL**

Quadro 1: Classificação dos RS segundo a USEPA e IPCC.....	17
Quadro 2: Classificação dos RSU no Brasil. ....	18

### **ARTIGO I - MODELO DINÂMICO DA EMISSÃO DE METANO E ESTIMATIVA DE GERAÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS ORGÂNICOS URBANOS**

Quadro 1: Fator de Correção do Metano (FCM) para diferentes locais de deposição.....	35
Quadro 2: Valores de COD para vários tipos de materiais.....	36

## LISTA DE ABREVIATURAS

- ABETRE** – Associação Brasileira de Empresas de Tratamento de Resíduos
- ABNT** – Associação Brasileira de Normas Técnicas
- MDEM** - Modelo Dinâmico de Emissão de Metano
- ABRELPE** - Associação Brasileira das Empresas de Limpeza
- CETESB** - Companhia Ambiental do Estado de São Paulo
- COD** - Carbono orgânico degradável
- CONDESC** - Consórcio de Desenvolvimento Sustentável da Costa do Descobrimento
- FNR** - *Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe*
- GEE** – Gases de Efeito Estufa
- GWP** - *Global Warming Potential*
- IBGE** - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
- ICLEI** – *Local Governments for Sustainability*
- IGP-DI** - Índice de Preços ao Consumidor
- IPCC** - *Intergovernmental Panel on Climate Change*
- MDL** - Mecanismos de Desenvolvimento Limpo
- MMA** – Ministério do Meio Ambiente
- MP-BA** – Ministério Público da Bahia
- ONG** – Organização Não Governamental
- PMGIRS** - Plano Municipal de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos
- PNRS** - Política Nacional de Resíduos Sólidos
- PQ** – Protocolo De Quioto
- RCE** – Redução Certificada de Emissão
- RSU** – Resíduos Sólidos Urbanos
- RSU** – Resíduos Sólidos Urbanos
- SD** -Sistemas Dinâmicos
- SMMA** - Secretaria Municipal de Meio Ambiente
- SMPMPS** – Prefeitura Municipal de Porto Seguro
- SMTSP** - Secretaria Municipal de Trânsito e Serviços Públicos
- STELLA**<sup>®</sup> - *Structural Thinking Experimental Learning Laboratory with Animation*
- UNFCCC** – *United Nations Framework Convention on Climate Change*
- USEPA** - *United States Environmental Protection Agency*

## LISTA DE SIMBOLOS

<b>CH<sub>4</sub></b>	- Metano
<b>CO<sub>2</sub></b>	- Dióxido de carbono
<b>H<sub>2</sub></b>	- Hidrogênio
<b>H<sub>2</sub>S</b>	- Gás sulfídrico
<b>O<sub>2</sub></b>	- Oxigênio
<b>NH<sub>3</sub></b>	- Amoníaco
<b>N<sub>2</sub></b>	- Nitrogênio
<b>MW</b>	- Megawatts
<b>kg</b>	- Quilograma
<b>kWh</b>	- Quilowatts hora
<b>kW</b>	- Quilowatts
<b>MW</b>	- Megawatts
<b>kg/habitante/ano</b>	- Quilograma por habitante ano
<b>kg/habitante/dia</b>	- Quilograma por habitante ano
<b>kg/ano</b>	- Quilograma por ano
<b>R\$</b>	- Real Moeda
<b>€</b>	- Euro Moeda
<b>m<sup>3</sup>/CH<sub>4</sub></b>	- Metro cúbico de metano
<b>m<sup>3</sup>CH<sub>4</sub>/t RS</b>	- Metros cubicos de metano por tonelada métrica Resíduos Sólidos
<b>t</b>	- Tonelada métrica
<b>t/CH<sub>4</sub>/ano</b>	- Tonelada métrica metano por ano
<b>tCO<sub>2</sub>e</b>	- Tonelada de dióxido de carbono equivalente

## INTRODUÇÃO GERAL

Em todo o mundo há uma preocupação relacionada aos problemas voltados as catástrofes causadas de forma natural e àquelas causadas por ações antrópicas. Um desses problemas é o crescimento constante da quantidade de resíduos produzidos pelos centros urbanos, consequência do aumento da população e do modelo econômico que estimula um consumo desenfreado de produtos industrializados e descartáveis. O manejo adequado dos resíduos e a busca por alternativas de diminuição de impactos são desafios enfrentados atualmente pelos gestores de resíduos sólidos urbanos (SUKHOLTHAMAN; SHARP, 2016).

O Brasil é o quinto maior produtor de resíduos do mundo, sendo superado apenas dos Estados Unidos, União Europeia, China e Índia (Kaza *et al.* 2018). Segundo o Panorama de Resíduos Sólidos no Brasil (2019), da Associação Brasileira das Empresas de Limpeza (ABRELPE), foram produzidos 79 milhões de toneladas de resíduos sólidos no Brasil em 2018, desse total foram coletados 92%. Dos resíduos coletados 59,5% receberam destinação adequada em aterros sanitários.

A média nacional de destinação adequada dos resíduos é muito menor do que a de países com o mesmo nível de renda onde 70% dos resíduos chegam ao destino adequado. Em 2010, a política nacional de resíduos sólidos estabeleceu que o país deveria estar livre dos lixões até agosto de 2014. Entretanto, nos dias de hoje, cerca de 8% dos resíduos gerados no Brasil (6,3 milhões de toneladas) ainda não são coletados e 40% dos resíduos coletados são despejados em lixões ou aterros que não possuem as medidas necessárias para garantir a integridade do meio ambiente e da população local. Essa é a realidade em aproximadamente 3.000 dos mais de 5.500 municípios do país (ABRELPE, 2019).

Uma parte desses resíduos principalmente a de origem orgânica que vai para os lixões e aterros gera biogás, que é composto principalmente pelo gás metano (CH<sub>4</sub>), um dos principais causadores do efeito estufa, além de gás carbônico (CO<sub>2</sub>) e traços de outros gases como hidrogênio (H<sub>2</sub>), gás sulfídrico (H<sub>2</sub>S), oxigênio (O<sub>2</sub>), amoníaco (NH<sub>3</sub>) e nitrogênio (N<sub>2</sub>) (FNR, 2010). Em todo o mundo, o metano produzido em lixões e aterros representa de 5 a 15% do metano total emitido para a atmosfera. A quantidade de metano emitida nesses ambientes de resíduos sólidos pode ser estimada a partir de fatores como a quantidade e composição dos resíduos, a umidade do solo, o clima e o tempo no qual o resíduo está depositado (CANDIANI; MOREIRA, 2018; SANTOS *et al.* 2017).



Quantificar os resíduos sólidos é essencial para a seleção das operações relacionadas a gestão de resíduos. Por causa disso modelos preditivos tem sido utilizados no planejamento de métodos de gerenciamento de resíduos, visando explicar ou estimar a geração de resíduos presente ou futura usando dados econômicos, sóciodemográficos ou de gestão (BEIGL et al., 2008).

Nesse sentido, é importante a investigação do estudo da dinâmica de geração de resíduos e produção de metano em ambientes urbanos.

#### *Classificação dos resíduos sólidos*

Os Resíduos Sólidos (RS) podem ser definidos, segundo a NBR 10.004 (ABNT, 2004), como qualquer material encontrado no estado sólido e semissólido que é resultante das atividades industriais, domésticas, hospitalares, comerciais, agrícolas, de serviços e de varrição (ABETRE, 2006; SILVEIRA, 2008; COSTA *et al.*, 2012). São abrangidos, também, os lodos originados a partir de sistemas de tratamento de água, de equipamentos e instalações de controle de poluição, de determinados líquidos inviáveis para o lançamento na rede pública de esgotos, bem como em corpos de água (ABNT, 2004; BRASIL, 2010).

Os RS tratam-se ainda de subprodutos de toda atividade humana e, dessa forma, apresentam características diversas. Estas compreendem os mais variados processos que os gerou (ABETRE, 2006; SILVEIRA, 2008; COSTA *et al.*, 2012). Nessa perspectiva, os materiais aproveitados após o descarte não são considerados mais como simples resíduos e, assim, passam a ser considerados como matérias-primas secundárias. Em contrapartida, é preciso destacar que os materiais que não apresentam condições de serem aproveitados em termos econômicos são automaticamente entendidos pela sociedade, de forma geral, como rejeitos. Feitas as devidas considerações, deve-se discorrer sobre a sua classificação (Quadro 1). Os RS são determinados conforme os critérios utilizados pela USEPA (United States Environmental Protection Agency) e pelo IPCC, com algumas adaptações à realidade brasileira.

Quadro 1: Classificação dos RS segundo a USEPA e IPCC.

<b>CATEGORIAS</b>	<b>CARACTERÍSTICAS</b>
Facilmente degradáveis	Constituídos de resto de alimentos, podas, animais mortos e excrementos
Moderadamente degradáveis	São compostos pelos produtos celulósicos, como o papel, o papelão
Difícilmente degradáveis	Representados pelos tecidos, couro, madeira, borracha, ossos, plásticos etc
Não degradáveis	Categoria composta por metal não ferroso, vidro, pedras, areia etc

**Fonte:** Costa *et al.* (2012); USEPA (2018); IPCC (2006).

Com essa classificação, percebe-se que os RS acabam determinando quais as melhores formas de tratamento, em relação à disposição final, deverão ser adotadas para esses RS em um determinado município. Busca-se, então, minimizar os impactos de origem socioeconômica e, principalmente, ambiental. Dentre as características consideradas para essa classificação, estão fenômenos voltados à origem, às características físicas, à composição química e à potencialidade de risco ao meio ambiente. A análise da composição dos RS visibiliza o conhecimento sobre os resíduos produzidos em uma determinada localidade (ABETRE, 2006; SILVEIRA, 2008; COSTA *et al.*, 2012). Dessa forma, identificar o percentual dos materiais em sua constituição permite inferir sobre a viabilidade da implantação de uma coleta diferenciada, de instalações adequadas, de uma equipe de trabalho apropriada e de equipamentos necessários; além disso, pode-se projetar melhores estratégias na transformação de despesas em receitas.

Os resíduos sólidos urbanos (RSU) podem ser definidos como um conjunto de detritos gerados em decorrências das atividades humanas nos aglomerados urbanos (ABETRE, 2006; SILVEIRA, 2008; COSTA *et al.*, 2012). Dentre os RSU, destacam-se os de origem domiciliar; comercial; oriundos das atividades industriais e da prestação de serviços; de serviços de limpeza pública urbana; provenientes da saúde; restos da construção civil; e os gerados nos terminais de embarque e desembarque. Com isso, percebe-se que a composição do lixo urbano (Quadro 2) é motivada por diversos fatores como as condições socioeconômicas, os hábitos da população, o desenvolvimento industrial, a população flutuante impulsionadas em alguns lugares pelo turismo, a sazonalidade e o número de habitantes. Esses RSU são constituídos a partir de: matéria orgânica, papel, papelão, vidro, metais, plásticos, materiais têxteis, madeira, borracha, couro e outros tipos de materiais (ABETRE, 2006; SILVEIRA, 2008; COSTA *et al.*, 2012).

Quadro 2: Classificação dos RSU no Brasil.

<b>ITENS</b>	<b>PESO (%)</b>
Matéria Orgânica	52,5%
Papel e Papelão	24,5%
Plásticos	2,3%
Vidros	2,9%
Metais ferrosos e não ferrosos	1,6%
Outros (trapos, borracha, couro, madeira etc)	16,2%
<b>TOTAL</b>	<b>100%</b>

**Fonte:** Costa *et al.*, (2012).

Pode-se enfatizar que, no que se refere à composição dos RSU no Brasil, dentre os principais materiais encontrados destacam-se os orgânicos, o papel, os plásticos, os vidros, os metais e outros materiais (COSTA *et al*, 2012). Como a quantidade de matéria orgânica é bastante abrangente, a presença de vetores nos aterros é expressiva; e, assim, há o mau cheiro provocado pela decomposição da matéria, e em razão da produção de um líquido de tonalidade escura conhecido como chorume, que deteriora o meio ambiente (ABETRE, 2006; SILVEIRA, 2008; COSTA *et al*, 2012). A caracterização física dos RSU faz com que seja possível analisar os diferentes tipos de materiais que são encontrados nos resíduos das residências e, dessa forma, é importante, ainda, para definir as formas de disposição final mais adequadas para a implementação de sistemas de tratamento para esses resíduos, bem como para subsidiar os sistemas de coleta seletiva.

#### *Disposição final dos resíduos*

Sabe-se que a disposição final do resíduo urbano é um dos grandes problemas ambientais enfrentados pelos grandes centros urbanos em todo o mundo. Esse problema tende a se agravar sobretudo em momentos nos quais há o aumento de bens descartáveis, visto que estes passam a compor os grandes volumes de resíduos gerados pela população (COELHO; OLIVEIRA, 2012). No Brasil, grande parte dos RS é descartada sem nenhuma forma de tratamento, embora existam políticas diversas implementadas pelos governos para reverter essa situação. Contudo, despejos clandestinos estão presentes na maioria dos municípios, e os aterros sanitários ainda são poucos. Além dos diversos impactos sobre o meio ambiente, a saúde e a qualidade de vida, os RS, quando são mal dispostos, atuam como fontes significativas para a emissão de metano. Dessa forma, a Administração Pública se depara com grandes desafios quanto à gestão desses resíduos (SILVA; LIPERONE, 2011; SILVA *et al.*, 2013).

É importante discorrer sobre o descarte correto, pois a produção de RS vem aumentando devido à intensificação das atividades humanas nas últimas décadas. Isso dificulta o manejo e a disposição correta dos RS (COELHO; OLIVEIRA, 2012). Nota-se que, quando os RS são dispostos de forma inadequada, o gás metano produzido, ao invés de ser captado, aproveitado ou até mesmo queimado para minimizar o seu dano ao meio ambiente, acaba sendo emitido à atmosfera. Isso causa danos graves, pois trata-se de um gás de efeito estufa. Por ser um gás altamente combustível, o biogás precisa ser continuamente drenado para evitar explosões no interior do aterro sanitário. No Brasil, a maioria dos aterros utiliza o sistema de drenos abertos, onde é mantida acesa uma chama para promover a queima imediata do biogás, que é drenado continuamente. Esse sistema apresenta

uma baixa eficiência, e estima-se que apenas 20% do biogás drenado seja efetivamente destruído pela queima. O restante é simplesmente emitido para a atmosfera (COELHO; OLIVEIRA, 2012).

### *Lixão*

A problemática relacionada aos resíduos, de forma geral, é explicitada a partir dos “lixões”. Estes atuam como depósitos a céu aberto, em solo desnudo, sem isolamento ou controle da entrada de pessoas e animais. Também são desprovidos de quaisquer mecanismos para evitar a poluição ambiental provocada pela decomposição e lixiviação dos RS (MP-BA, 2007). Dentre as principais alterações ambientais negativas causadas pelos “lixões” estão a poluição visual; a modificação da qualidade do ar devido à liberação do material particulado; gases fétidos e gases contribuintes para o efeito estufa; poluição dos recursos hídricos superficiais e subterrâneos, do solo e do subsolo via chorume (líquido escuro gerado pela degradação bioquímica da matéria orgânica, associada ao percolado da água de chuva na massa de resíduos); degradação da demanda bioquímica de oxigênio; lançamento ao ambiente de sais, metais pesados e outros contaminantes; além da atração de animais que causam enfermidades à saúde humana, tais como ratos, moscas, mosquitos, urubus e baratas. (SILVA; LIPERONE, 2011)

Outro problema é a exposição a esses resíduos nos aterros/lixões, pois representa graves problemas ocupacionais aos catadores e aos funcionários da limpeza pública envolvidos na coleta, transporte e disposição, ocasionando diversos riscos à saúde. Dentre esses riscos destacam-se biológicos, químicos, radiológicos, e ainda os perfurocortantes ou escarificantes.

Nesse contexto, quando o lixo é disposto de forma inadequada, ou seja, a céu aberto e sem tratamento, ameaça-se a saúde humana, a segurança e o equilíbrio ambiental (MP-BA, 2007). Dessa forma, o mecanismo tecnológico mais utilizado para diminuir os riscos da disposição inadequada do lixo são os aterros sanitários. Ou seja, acionam-se os sistemas de confinamento de resíduos sólidos no menor volume por meio de camadas cobertas com solo alicerçados, aplicando normas específicas de operação que têm por objetivo a redução da degradação ambiental oriunda dos resíduos, para que seja possível evitar os riscos aqui mencionados.

### *Aterros Sanitários*

Os aterros sanitários podem ser simplificados ou convencionais, a depender das suas características estruturais e operacionais (MP-BA, 2007; SILVEIRA, 2008; SILVA *et al.*, 2013; FELICORI *et al.*, 2016). Os simplificados empregam um modelo tecnológico de implantação de valas com solos de baixa permeabilidade e, assim, não possuem tratamento de chorume e de gases.

São utilizados para atender a municípios de pequeno porte que contam com limitações orçamentárias para implementar e operar aterros convencionais. É recomendado para municípios que possuem população de até 30.000 habitantes, ou quando esses municípios conseguem garantir o descarte de quantidades de resíduos não superiores a trinta toneladas diárias.

Já os aterros convencionais possuem células impermeabilizadas que contam com uma manta plástica de alta densidade, responsável por isolar os resíduos do solo. Há, ainda, a presença de um sistema de captação e tratamento de gases e chorume (MP-BA, 2007; SILVEIRA, 2008; SILVA *et al.*, 2013; FELICORI *et al.*, 2016). Essas características tornam esse tipo de aterro mais oneroso em relação ao aterro simplificado. O aterro convencional atende às cidades que contam com mais de 30.000 habitantes, ou seja, para aquelas cidades que descartam mais de trinta toneladas diárias desses resíduos. Assim sendo, a sua habilitação é necessária apenas para as áreas densamente habitadas e que contam com uma elevada produção de resíduos sólidos, bem como com recursos financeiros disponíveis para custear esse aterro convencional.

Embora utilizem a tecnologia de forma mais abrangente para a disposição final dos resíduos, os aterros sanitários apresentam riscos de contaminação do solo e das águas superficiais e subterrâneas, quando mal operados ou localizados em áreas inadequadas (MP-BA, 2007). É preciso, então, que a sua localização, implantação e operacionalização sejam feitas em aterros convencionais ou simplificados, tornando mínimas as possibilidades de contaminação dos recursos hídricos e do solo pelos produtos de decomposição dos resíduos sólidos.

### *Biogás*

Na decomposição da matéria orgânica em um ambiente anaeróbico (ausência de oxigênio), cria-se uma mistura gasosa chamada de biogás (Figura 1). Esse processo é muito comum na natureza e ocorre, por exemplo, em pântanos, no fundo de lagos, em composteiras e no rúmen de animais ruminantes. Vários microrganismos convertem quase todo o material orgânico em biogás. Além disso, certas quantidades de energia (calor) e nova biomassa são geradas (FNR, 2010).

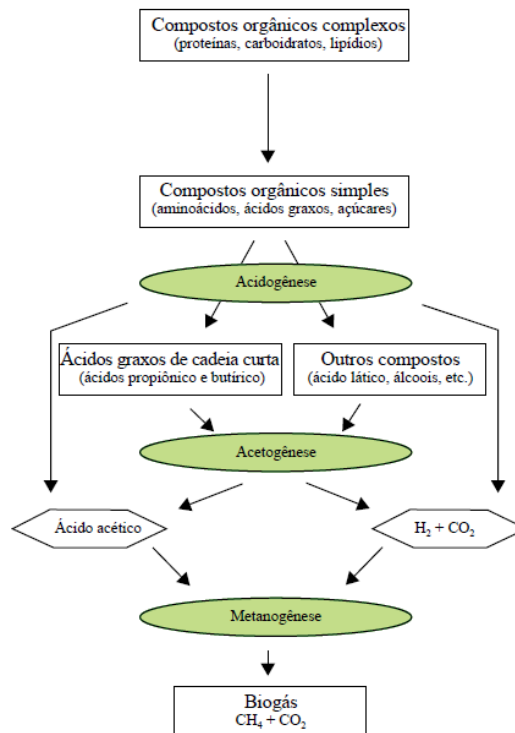


Figura 1: Esquema de decomposição anaeróbica.  
Fonte: (FNR, 2010).

A mistura gasosa formada consiste-se principalmente de metano (50-75%) e dióxido de carbono (25-50%). Na maioria dos aterros sanitários brasileiros, devido às características do lixo, em sua maioria composto por matéria orgânica, a concentração de CH<sub>4</sub> no biogás fica em 50-55%. O biogás também contém pequenas quantidades de hidrogênio, sulfeto de hidrogênio, amônia e outros gases em traços. Sua composição é influenciada principalmente pelos substratos utilizados, pela técnica de fermentação e pelas diferentes tecnologias de construção das plantas (FNR, 2010; COELHO *et al.*, 2006; DAVIES; STULP, 2016).

O processo de digestão anaeróbica é dividido em quatro estágios complexos: a) hidrólise - quando os compostos orgânicos complexos são decompostos em compostos mais simples; b) acidogênese - os compostos formados na etapa anterior são decompostos em ácidos graxos de cadeia curta, ácido acético, dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), hidrogênio (H<sub>2</sub>) e outros compostos; c) acetogênese - os ácidos graxos são convertidos por bactérias em mais ácido acético e sequencialmente em H<sub>2</sub> e CO<sub>2</sub>; e d) metanogênese - bactérias anaeróbicas convertem ácido acético, hidrogênio e dióxido de carbono em metano. Cada etapa ocorre sob a prevalência de certos grupos de microrganismos (FNR, 2010; DAVIES; STULP, 2016). Para o sucesso da produção de biogás é necessário que durante o processo os microrganismos fermentativos e metanogênicos sejam

coordenados e interajam, sendo necessário estabelecer condições adequadas por meio do controle de temperatura e diminuição do oxigênio.

### *Conversão Energética e Motores Ciclo Otto*

Existem diversas tecnologias de conversão energética do biogás, sendo as principais os métodos de conversão da energia química do biogás em energia mecânica, térmica e elétrica, por meio de microturbinas a compressão e motores de combustão interna por centelha. O motor ciclo Otto é o equipamento mais utilizado para queima do biogás, devido à maior eficiência elétrica e ao menor custo quando comparado às outras tecnologias. Para promover a queima de biogás em motores ciclo Otto, são necessárias pequenas modificações nos sistemas de alimentação, ignição e taxa de compressão (ICLEI – BRASIL, 2009; COELHO *et al.*, 2006; PECORA *et al.*, 2010).

Os motores ciclo Otto aspiram a mistura ar-combustível antes de esta ser comprimida no interior dos cilindros; e a combustão da mistura é dada por centelha produzida na vela de ignição. Esses motores são chamados de “4 tempos” (Figura 2), pois o pistão executa quatro cursos distintos, dentro do cilindro, para cada duas rotações do eixo de manivelas (FNR, 2010; ICLEI – BRASIL, 2009).

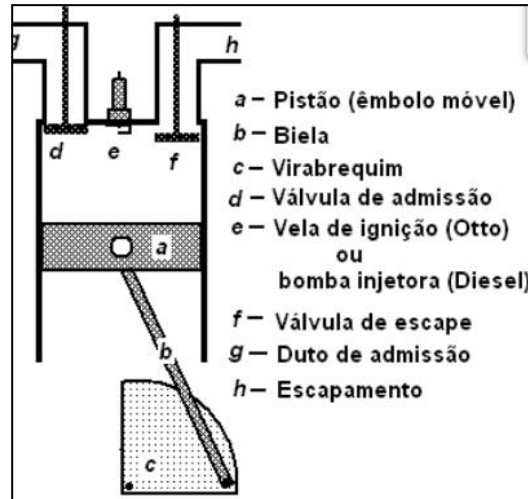


Figura 2: Estrutura Motor Ciclo Otto.  
Fonte: SILVEIRA (2001).

De acordo com o FNR (2010) e ICLEI – Brasil (2009) o princípio de funcionamento é descrito a seguir:

- **Admissão** (primeiro tempo) - a válvula de admissão encontra-se aberta, através da qual é injetada ao cilindro a mistura ar-combustível, e o pistão é empurrado para baixo com o movimento do virabrequim;

- **Compressão** (segundo tempo) - fechamento da válvula de admissão e compressão da mistura (ordem de 10:1); conforme o pistão sobe (antes de chegar à parte superior), a vela gera uma faísca;
- **Combustão** (terceiro tempo) - ocorre a explosão da mistura e expansão dos gases quentes formados na explosão; essa expansão dos gases promove uma determinada força, permitindo que o pistão desça;
- **Exaustão** (quarto tempo) - abertura da válvula de escape.

Os motores a gás de ciclo Otto foram especialmente projetados para operação com motores a gás. Para permitir reduções de óxido de nitrogênio, eles são operados com uma mistura pobre – quando uma quantidade pequena de combustível, em proporção à quantidade de ar, é convertida em energia cinética no motor e, ocasionalmente, ocorre uma queda no desempenho, que é compensada pela ação do turbo compressor.

Os motores a gás ciclo Otto necessitam de um teor de CH<sub>4</sub> de pelo menos 45% no biogás. Um teor menor de metano faz com que o mecanismo estagne, evitando seu funcionamento. Os motores a gás ciclo Otto possuem uma potência elétrica de 100 kW a 1 MW, com uma eficiência elétrica de 34% a 42%, usando como parâmetro potências nominais de até 300 kW (ICLEI – BRASIL, 2009; FNR, 2010; PEREIRA, 2017).

### *Créditos de carbono*

O mercado de carbono surgiu a partir da criação da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre a Mudança Climática (UNFCCC, em inglês), durante a ECO-92, no Rio de Janeiro. Como desdobramento desta, surgiu a Convenção de Quioto, no Japão, em 1997, decidindo que os países signatários deveriam assumir compromissos mais rígidos para a redução das emissões de gases agravantes do efeito estufa. Esse acordo ficou conhecido como Protocolo de Quioto. O acordo reuniu os países que representavam 55% das emissões globais de gases de efeito estufa (GEE), tendo como objetivo central limitar e reduzir as emissões de GEE a um nível que evitasse uma interferência antropogênica perigosa no clima; e, através do acordo, as reduções das emissões passaram a ter valor econômico (RÜGNITZ *et al.*, 2009; RETTMANN, 2019).

Por convenção, uma tonelada de carbono equivalente (tCO<sub>2</sub>e) corresponde a um crédito de carbono, que pode ser negociado no mercado internacional. A redução da emissão de outros gases, igualmente geradores do efeito estufa, como o metano (CH<sub>4</sub>), também pode ser convertida em créditos de carbono utilizando o conceito de carbono equivalente (RETTMANN, 2019). O metano



(CH<sub>4</sub>) possui potencial de aquecimento global (*Global Warming Potential* – GWP) de 23 vezes maior do que o dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>). Tendo em vista que 1 kg de carbono equivale a 3,67 kg de CO<sub>2</sub> (IPCC, 2006), por definição, 1 kg de CO<sub>2</sub> vale 0,2727 kg de carbono; e 1 kg de metano CH<sub>4</sub> é 23 vezes isso, ou seja, 6,2772 kg de carbono (IPCC, 2006, RÜGNITZ *et al.*, 2009; GRZEBIELUCKAS *et al.*, 2010).

Com o objetivo de os países atingirem suas metas de emissões, foram incluídos três mecanismos de mercado:

- **Comércio de emissões:** Países que tiverem limites de emissões sobrando podem vender esse excesso para outras nações que estão emitindo acima dos limites, através de corretoras.
- **Implementação conjunta:** Mecanismo em que os países do acordo podem agir em conjunto para atingir suas metas. Assim, se um país não vai conseguir reduzir suficientemente suas emissões, mas o outro vai, eles podem firmar um acordo para se ajudarem.
- **Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL):** Este mecanismo permite projetos de redução de emissões em países em desenvolvimento, que não possuem metas de redução de emissões. Esses projetos geram Redução Certificadas de Emissões (RCE), que podem ser negociados com países que tenham metas de redução de emissões dentro do Protocolo de Quioto (RÜGNITZ *et al.*, 2009; RETTMANN, 2019).

Existe, além disso, um mercado voluntário, em que empresas, ONGs, instituições, governos ou mesmo cidadãos tomam a iniciativa de reduzir as emissões voluntariamente. Os créditos desse mercado podem ser gerados em qualquer lugar do mundo e são auditados por uma entidade independente do sistema das Nações Unidas (ICLEI – BRASIL, 2009). O principal mercado voluntário é o *Chicago Climate Exchange*, nos EUA. Os principais fundos são o “Forest Carbon Partnership Facility” do Banco Mundial e o Fundo Amazônia do governo brasileiro.

### *Objetivos gerais*

Este trabalho tem como objetivo propor um modelo dinâmico preditivo para estimar a emissão do gás metano nos aterros sanitários e posteriormente aplica-lo no município de Porto Seguro – BA, além de prever a energia elétrica gerada pela conversão energética do metano e a quantidade de créditos de carbono gerados pela extração do gás metano durante um período de 20 anos, entre 2019 a 2039.

Este trabalho se encontra estruturado em dois capítulos, sendo dois artigos complementares. Primeiro artigo apresenta a metodologia adotada para a elaboração do modelo dinâmico de emissão de metano e no segundo os resultados e discussões da aplicação do modelo no município de Porto Seguro – BA.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABETRE. **Classificação de resíduos sólidos: Norma ABNT NBR 10. 004: 2004.** 2006.

ABRELPE - Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais. **Panorama de Resíduos Sólidos no Brasil 2018/2019.** ABRELPE. Nov. 2019. Acessado < <http://abrelpe.org.br/panorama/> > em 20-01-2020

BEIGL, P.; LEBERSORGER, S.; SALHOFER, S. ‘: a review. **Waste Management**, v. 28, p. 200-214, 2008 <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2006.12.011>

BRASIL. Lei Federal nº 12.305 de 02 de agosto de 2010. **Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos.** Brasília, DF. Disponível em: < [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2007-2010/2010/lei/112305.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/112305.htm)>. Acesso em: 16 de abril de 2018.

CANDIANI, G.; MOREIRA, J. M.L. Avaliação dos parâmetros cinéticos da geração de metano em uma célula experimental de resíduos sólidos. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, [S.L.], v. 23, n. 3, p. 459-470, jun. 2018. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s1413-41522018162393>.

COELHO, T. C.; OLIVEIRA, R. M. S. de. Estimativa da produção teórica do metano gerado no aterro Sanitário de Palmas - TO. **Engenharia Ambiental** –Espírito Santo do Pinhal, v. 9, n. 1, p. 177-189, jan. /mar, 2012.

DAVIES, F. D.; STULP, S. Determinações de gás metano (CH<sub>4</sub>) gerado em estação de tratamento de efluentes, com avaliação do poder calorífico para queima em caldeira. **Revista Destaques Acadêmicos**, [S.L.], v. 8, n. 4, dez. 2016. ISSN 2176-3070. Disponível em: <<http://univates.br/revistas/index.php/destaques/article/view/1213>>. Acesso em: 23 out. 2019. doi:<http://dx.doi.org/10.22410/issn.2176-3070.v8i4a2016.1213>.

FNR - FACHAGENTUR NACHWACHSENDE ROHSTOFFE e. V. (FNR). Guia Prático do Biogás – Geração e utilização. 5ª edição, totalmente revista e atualizada, Publicado com o apoio do **Ministério da Nutrição, Agricultura e Defesa do Consumidor da Alemanha**, Gülzow, 2010.

GRZEBIELUCKAS, C.; CAMPOS, L. M. S.; BORNIA, A. C. SELIG, Paulo Mauricio. Integrando o custo ambiental do metano (CH<sub>4</sub>) e os Créditos de Carbono (CERS) em análise de investimento agrícola, um estudo no Cerrado brasileiro. **XVII Congresso Brasileiro de Custos** – Belo Horizonte - MG, Brasil, 3 a 5 de novembro de 2010. Disponível em <<https://anaiscbc.emnuvens.com.br/anais/article/view/679>> Acessado em 20 out. 2019.

ICLEI – BRASIL. Manual para aproveitamento do biogás: volume um, aterros sanitários. **ICLEI - Governos Locais pela Sustentabilidade**, Secretariado para América Latina e Caribe, Escritório de projetos no Brasil, São Paulo, 2009.

KAZA, S.; YAO, L.; BHADA-TATA, P.; VAN WOERDEN, F. What a Waste 2.0: a global snapshot of solid waste management to 2050. **The World Bank**, out. 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1596/978-1-4648-1329-0> >Acessado em: 26 jun. 2020.

MP-BA. Desafio do lixo: problemas, responsabilidades e perspectivas: Relatório 2006/2007 / **Ministério Público do Estado da Bahia**. Centro de Apoio Operacional às Promotorias de Justiça de Meio Ambiente.- Salvador: Ministério Público, 2007. Disponível em: <[http://www.mpgo.mp.br/portalweb/hp/9/docs/rsudoutrina\\_18.pdf](http://www.mpgo.mp.br/portalweb/hp/9/docs/rsudoutrina_18.pdf)> acesso em 17 de mar. 2018.

RETTMANN, Ricardo. **O que é e como funciona o mercado de carbono**. Disponível em: <<http://www.ipam.org.br/saiba-mais/O-que-e-e-como-funciona-o-Mercado-de-Carbono-/4>>. Acesso em: agosto. 2019

RÜGNITZ, M. T.; CHACÓN, M. L.; PORRO R. **Guia para Determinação de Carbono em Pequenas Propriedades Rurais**. 1ª ed. Belém, Brasil. Centro Mundial Agroflo-restal (ICRAF)/ Consórcio Iniciativa Amazônica (IA). 2009.

SANTOS, M. M. ; ROMANEL, C.; VAN ELK, A. G. H. P. Análise da eficiência de modelos de decaimento de primeira ordem na previsão da emissão de gás de efeito estufa em aterros sanitários brasileiros. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, [s.l.], v. 22, n. 6, p.1151-1162, dez. 2017. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s1413-41522017156311>.

SILVA, T. N; FREITAS, F. S. N. de; CANDIANI, G. Avaliação das emissões superficiais do gás de aterros sanitários de grande porte. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v.18, n. 2, p. 95-104, 2013.

SILVA, C. B. da; LIPERONE, F. Disposição irregular de resíduos sólidos domésticos em Uberlândia: algumas considerações. **Revista Eletrônica de Geografia**. v.2, n.6, p.22-35. Abr, 2011.

SILVEIRA, Fernando Lang. da Máquinas térmicas à combustão interna de Otto e de Diesel. **Instituto de Física da UFRGS**. 2001. Disponível em <<http://www.if.ufrgs.br/fis183/textos/maquinas/maquinas.html>> acesso em out. 2019.

SUKHOLTHAMAN, P.; SHARP, A. A system dynamics model to evaluate effects of source separation of municipal solid waste management: A case of Bangkok, Thailand. **Waste Management**, 52: 50-61, 2016.

USEPA. United States Environmental Protection Agency. **Advancing Sustainable Materials Management: 2015 Fact Sheet**. Assessing Trends in Material Generation, Recycling, Composting, Combustion with Energy Recovery and Landfilling in the United States. Jul 2018. Disponível em: <[https://www.epa.gov/sites/production/files/2018-07/documents/2015\\_smm\\_msw\\_factsheet\\_07242018\\_fnl\\_508\\_002.pdf](https://www.epa.gov/sites/production/files/2018-07/documents/2015_smm_msw_factsheet_07242018_fnl_508_002.pdf)>. Acesso em: jul. 2019

Este artigo está formatado segundo as normas da Revista GAIA SCIENTIA

Disponível no site:

<https://periodicos.ufpb.br/ojs2/index.php/gaia/about/submissions#authorGuidelines>

## **ARTIGO I**

## MODELO DINÂMICO DE EMISSÃO DE METANO

### RESUMO

A complexidade da gestão de resíduos sólidos em especial o controle das emissão de gases de efeito estufa relacionado a fatores como o aumento da população e produção de resíduos, exigem ferramentas que colaborem para solucionar esses problemas como a modelagem dinâmica que é uma forma de transcender à representação matemática de um processo do mundo real, cujo resultado muda em resposta a variações das forças que o governam. Nesse intuito, o presente artigo tem como objetivo propor um modelo dinâmico de sistemas para estimar a emissão do gás metano nos aterros sanitários. E prever a quantidade de energia elétrica gerada pela conversão energética do metano e a quantidade de créditos de carbono gerados pela extração do gás metano. Para tal, teve-se como base para a elaboração o modelo de resíduos do Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). O presente estudo também comparou a metodologia utilizada por modelos existentes como o da Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB) para a validação, utilizando o método dos mínimos quadrados. Os resultados indicaram que o modelo proposto apresentou uma ajuste excelente para estimar a população  $R^2=0,99$  e produção de resíduos  $R^2=1$ , estimativa da produção de metano e a produção energética obtiveram um ajuste ótimo com  $R^2=0,83$  cada, o modelo se mostrou satisfatório apresentando-se como uma ferramenta para o gerenciamento dos resíduos sólidos, com possibilidade de adaptação em razão da necessidade, contribuindo para o desenvolvimento do potencial econômico de maneira sustentável, diminuindo os impactos ambientais causados ao meio ambiente.

**Palavras-chave:** modelagem dinâmica; aterro sanitário; biogás; energia renovável.

## DYNAMIC MODEL OF METHANE EMISSION

### ABSTRACT

The complexity of solid waste management, especially the control of greenhouse gas emissions related to factors such as population growth and waste production, requires tools that collaborate to solve these problems, such as dynamic modeling that is a way of transcending mathematical representation of a real-world process, which the results changes in response to variations in the forces that govern it. To this end, this article aims to propose a dynamic model of systems to estimate the emission of methane gas in landfills and to predict the amount of electricity generated by the energy conversion of methane and the amount of carbon credits generated by the extraction of methane gas. For this, the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) waste model was used as base on the elaboration. The present study also compared the methodology used by existing models such as the Environmental Company of the State of São Paulo (CETESB) for validation, using the minimum squares method. The results indicated that the proposed model presented an excellent fit to estimate the population  $R^2 = 0.99$  and production of residues  $R^2 = 1$ , estimate of methane production and energy production obtained an optimal adjustment with  $R^2 = 0.83$  each, the The model proved to be satisfactory, presenting itself as a tool for the management of solid waste, with the possibility of adapting according to the need, contributing to the development of economic potential in a sustainable manner, reducing the environmental impacts caused to the environment.

**Keywords:** dynamic modeling; landfill; biogas; renewable energy.

## INTRODUÇÃO

Após o período da revolução industrial, diversas mudanças ocorreram no mundo, principalmente pelo aumento populacional que acarretou sérios desafios ligados às gestão ambiental. Um desses problemas é o crescimento constante da quantidade de resíduos produzidos pelos centros urbanos, consequência do modelo econômico que estimula um consumo desenfreado de produtos industrializados e descartáveis como também o crescimento das grandes cidades.

Segundo o Panorama de Resíduos Sólidos no Brasil da ABRELPE (2019), foram produzidas 79 milhões de toneladas de resíduos no Brasil em 2018 com uma taxa de coleta de 92%, dos resíduos coletados 59,5% receberam destinação adequada em aterros sanitários em comparação à média de adequação no destino dos resíduos em países com mesmo nível de renda é de 70%. Cerca de 8% dos resíduos gerados no Brasil (6,3 milhões de toneladas) ainda não são coletados e 40% dos resíduos coletados são despejados em lixões ou aterros que não possuem as medidas necessárias para garantir a integridade do meio ambiente e da população local. (ABRELPE, 2019).

Efetivamente, parte do resíduo orgânico que vai para os lixões e aterros gera biogás, que é composto principalmente pelo gás metano ( $\text{CH}_4$ ), um dos principais causadores do efeito estufa, além de gás carbônico e traços de outros gases como o hidrogênio, amônia e gás sulfídrico (FNR, 2010). A má destinação e os efeitos que os gases gerados pelo lixo afetam diretamente o clima causando as mudanças climáticas e alterações na atmosfera da terra como o aquecimento global, portanto, o manejo adequado do lixo e a busca de alternativas de diminuição de impactos são desafios enfrentados pelos gestores de resíduos sólidos urbanos no poder público, empresas e entre a população. (SUKHOLTHAMAN; SHARP, 2016).

O metano compõe cerca de 50 a 55% do biogás e possui um potencial de aquecimento global até 23 vezes maior do que o do dióxido de carbono, considerando um período de cem anos (ETMINAN *et al.*, 2016; LATTANZI *et al.*, 2019). Assim sendo, tornam-se necessárias soluções eficazes para reduzir a sua liberação no meio ambiente. Em uma escala mundial, os aterros sanitários são responsáveis por 18% das emissões antropogênicas de  $\text{CH}_4$ , e, dessa forma, há a necessidade urgente da adesão a soluções capazes de limitar a liberação do metano na atmosfera.

Nesse contexto, estudos diversos têm proposto estratégias amparadas pelos conceitos e teorias advindos da esfera da biotecnologia como a elaboração de biofiltros capazes de oxidar até 80% do metano proveniente de aterros (LATTANZI *et al.*, 2019). Estudos apontam também que o metano pode ser melhor utilizado e aproveitado para a geração de energia elétrica e aquecimento (GAO *et al.*, 2015). De acordo com Nascimento *et al* (2019) no Brasil entre os anos de 2004 e 2015

foram implantadas nove usinas termelétricas que aproveitam o biogás dos aterros de resíduos e que geram um total de 86,3 MW de energia elétrica.

Segundo Lattanzi *et al.* (2019) um dos principais benefícios desse reaproveitamento do biogás, sobretudo em países em desenvolvimento, trata-se da possibilidade de elaborar projetos que cumpram com rigor as indicações do Protocolo de Quioto (PQ). Um dos mecanismos propostos pelo PQ é o Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL), que tem por objetivo auxiliar os países em desenvolvimento a alcançarem o desenvolvimento sustentável e ao mesmo tempo com menores custos.

Em 2015, foi estabelecimento do Acordo de Paris (*Paris Agreement*), que teve como objetivo o acordo climático, o fortalecimento da responsabilidade global em relação a proposição de soluções para que as mudanças climáticas se tornem possíveis, bem como o desenvolvimento sustentável. Dentre esses objetivos está a limitação do aumento da temperatura global em 1,5° acima dos níveis pré-industriais (UNFCCC, 2020).

Nesse contexto, a The United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC) desenvolveu diversas metodologias para regulamentar os projetos de mitigação dos impactos no clima baseados no MDL, onde a proposta é a diminuição da emissão de gases de efeito estufa, todavia, parcerias entre países diante do MDL se mostraram como bastante vantajosas (LATTANZI *et al.*, 2019). Os ganhos estão voltados ao caráter econômico, social e ambiental sabe-se que o Brasil é um dos países que mais possuem projetos MDL ativos e que a maior parte deles se concentram nas áreas da energia e dos resíduos (BENITES-LAZARO; MELLO-THÉRY 2019; LATTANZI *et al.*, 2019).

Para colaborar na gestão desse projetos modelos de previsão podem ser utilizados para o planejamento de métodos de gerenciamento de resíduos. Um desse modelos é o criado pelo engenheiro Jay Forrester a metodologia de Sistemas Dinâmicos (SD) na qual consistem em uma estrutura que faz uso da combinação de fluxos que são variáveis de ação e de estoque que são repositórios de acúmulo ou armazenamento, estes parâmetros são interligados por meio de loops de feedback, variáveis auxiliares e conectores que inter-relacionam a estrutura computacional para serem simulados (GIANNIS *et al.*, 2016; LANE *et al.*, 2011)

De acordo com LANE *et al.* (2011) os modelos de SD são instrumentos adequados para resolução de problemas complexos que se concentram em políticas, demonstrando serem eficazes em questões como os dos sistemas de gestão de resíduos. A metodologia de sistema dinâmicos provou ser eficaz no manuseio questões específicas de gestão de resíduos, apresentando alguns trabalhos específicos na literatura como por exemplo: Kollikkathara *et al.* ( 2010), executou uma simulação

de previsão para resolução de custos de operação relacionados a gestão de resíduos sólidos em Newark; Karavezyris *et al.* (2002) propôs uma estrutura integrada para a gestão de resíduos na cidade Berlim; Nola *et al.* (2018) sugere a modelagem para a propor soluções do gerenciamento de RS em Campânia; Dyson e Chang (2005) usaram a modelagem de SD para prever geração de resíduos sólido em uma região de rápido crescimento; Inghels e Dullaert (2011) avaliaram os efeitos das iniciativas de prevenção “Poluidor-Pagador” na gestão de resíduos em Flandres enquanto Galarza (2015) utilizou para gerenciamento de resíduos da construção civil em Porto Alegre.

Nesse contexto uma proposta de um modelo dinâmicos para a emissão de metano, torna-se relevante para entender a contribuição das emissões de metano, bem como a redução da emissão desses gases.

Nesse sentido, este trabalho teve por objetivo a proposição de um modelo dinâmico para estimar a emissão do gás metano nos aterros sanitários. Além disso, prever a quantidade de energia elétrica gerada pela conversão energética do metano e a quantidade de créditos de carbono gerados pela extração do gás metano.

## **MATERIAL E MÉTODOS**

### **Proposição do Modelo Dinâmico de Emissão de Metano-MDEM**

Para o desenvolvimento do Modelo Dinâmico de Emissão de Metano-MDEM, foi elaborada a modelagem dinâmica por meio do *software* STELLA<sup>®</sup> (*Structural Thinking Experimental Learning Laboratory with Animation*). Este *software* faz uso de uma linguagem de programação orientada a objetos que utiliza uma interface de icnográficos, para facilitar a construção de estruturas de sistemas dinâmicos, entre eles os sistemas ambientais (COSTANZA; GOTTLIEB, 1998). O *software* fornece uma solução flexível para a criação de vários modelos de simulação, criando relações dinâmicas entre elementos, incluindo variáveis, parâmetros e conexões (Figura 1).



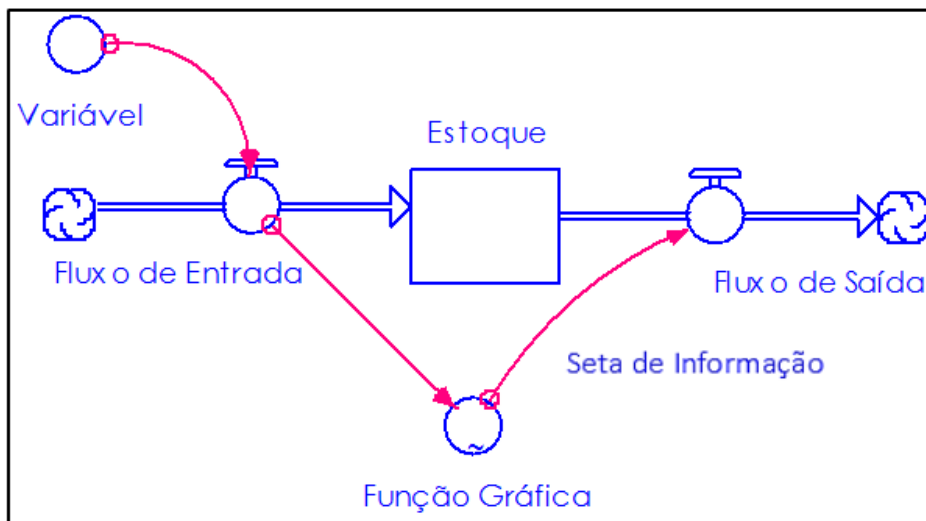


Figura 1: Características funcionais do programa STELLA.

**Fonte:** elaborado pelos autores.

O *software* STELLA processa conexões entre ações, fluxos e parâmetros. Os estoques são reservas de materiais como população, biomassa, nutrientes, dinheiro ou a quantidade inicial do que será modelado. Essas relações podem ser matemáticas, lógicas ou gráficas, permitindo flexibilidade na montagem do modelo (COSTANZA; GOTTLIEB, 1998). Variáveis auxiliares podem ter valores de constantes, funções matemáticas ou gráficas e banco de dados, permitindo a construção de um modelo por meio de conexões entre objetos básicos; e o usuário não necessita definir as equações diretamente. O próprio sistema converte relações algébricas fornecidas pelo usuário em linhas de programação (KURTZ DOS SANTOS *et al.*, 2002).

Conforme lembram Amorim Neto e Costa (2015), entende-se que o STELLA é um sistema de modelagem adequado para cálculos exponenciais, com variáveis diversas como, por exemplo, para simulações de crescimento e decrescimento, estimativas e regressões. Dessa forma, o *software* se aplica perfeitamente para análises da geração de resíduos e emissão de gás metano no lixão.

Para estimar a composição e o quantitativo do biogás a ser produzido no MDEM, em especial o metano, foi utilizado o método proposto pelo Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas – IPCC – *Waste Model* (IPCC, 2006). Esse método de decomposição de primeira ordem pressupõe que o componente orgânico degradável (carbono orgânico degradável – COD) nos resíduos decaem lentamente ao longo do tempo, durante as quais o CH<sub>4</sub> e o CO<sub>2</sub> são formados. Se as condições forem constantes, a taxa de produção de CH<sub>4</sub> depende unicamente da quantidade de carbono restante nos resíduos.

Nesse sentido, as emissões de CH<sub>4</sub> de resíduos depositados em um local de descarte são mais altos nos primeiros anos de deposição; depois ocorre gradual declínio, à medida que o carbono

degradável no lixo é consumido pelas bactérias responsáveis pela decomposição. A transformação de material degradável do aterro em CH<sub>4</sub> e CO<sub>2</sub> ocorre por meio de uma cadeia de reações paralelas, cuja complexidade do modelo varia de acordo com as condições do Lixão (IPCC, 2006).

A validação do modelo matemático MDEM, foi feita através da comparação e análise estatística com o modelo “Biógás, geração e uso energético”, (versão 1.0, Companhia Ambiental do Estado de São Paulo - CETESB), pois este programa emprega um modelo matemático usado pela *United States Environmental Protection Agency* – USEPA para estimar a geração de metano. Foram utilizados os mesmos dados iniciais (inputs) para ambos os modelos. Ambos os modelos permitem calcular a taxa populacional no decorrer dos anos, bem como o acumulado dos resíduos a ser alcançando no município hipotético para um dado período, bem como e a previsão da produção de gás gerado a partir da decomposição dos RS, assim possibilitando a validação do modelo. Vale ressaltar que este modelo MDEM além de considerar a taxa populacional e os resíduos acumulados, também tem projeção dos Créditos de Carbono e Potencial Energético, podendo ampliar a complexidade nos resultados, à medida que o gestor ou modelador deseja implementar.

## IPCC

O Modelo MDEM, utiliza para estimativa da produção de metano em m<sup>3</sup>CH<sub>4</sub>/ano (E<sub>CH<sub>4</sub></sub>), o cálculo através da equação 1 (IPCC, 2006):

$$E_{CH_4} = k * R_x * L_0 * e^{-k(x-T)} \quad (1)$$

Onde,

**k** = Constante de decaimento do aterro;

**R<sub>x</sub>** = Quantidade (em toneladas) de resíduos depositados no aterro em um ano;

**x** = Ano atual;

**T** = Ano de deposição dos resíduos no aterro (início de operação);

e

**L<sub>0</sub>** = O potencial de geração de metano do resíduo.

O L<sub>0</sub> é um fator que indica o potencial característico do tipo de Resíduo depositado, a taxa de degradação deste material orgânico e as Características técnicas da área de depósito estudada. Sendo este fator obtido pela equação 2 (IPCC, 2006):

$$L_0 = FCM * COD * COD_f * F * \frac{16}{12} \quad (2)$$

Onde,

**FCM** = Fator de Correção de geração de Metano no ano; varia de 1 a 0,4, a depender das condições do aterro ou Lixão;

**COD** = Carbono Orgânico Degradável, que está presente nos resíduos depositados no aterro;

**COD<sub>f</sub>** = Fração de Carbono Orgânico Degradável por fatores bioquímicos; seu valor varia entre 0,5 e 0,77;

**F** = Fração de metano presente no aterro;

$\frac{16}{12}$  = Taxa de conversão de carbono pra metano.

Por definição, adota-se **F** com valor de 0,5, pois, usualmente, metade de todo o biogás produzido no aterro é metano (FNR, 2010; COELHO *et al.*, 2006; DAVIES; STULP, 2016).

Utilizando o IPCC (2006), o Fator de Correção da geração de metano-FCM é identificado a partir da classificação do aterro e de características técnicas, representadas no Quadro 1, a classificação varia de 0,4 para as piores condições de deposição dos resíduos sólidos e 1 para as melhores condições, o valor atribuído ao **FCM** altera o potencial de geração de metano do resíduo depositado no aterro, ou seja altera o valor de **L<sub>0</sub>**.

Quadro 1: Fator de Correção do Metano (FCM) para diferentes locais de deposição.

CLASSIFICAÇÃO DO ATERRO E CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS	FCM	L0 (m <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> /t RS)
<b>1</b> - Aterro bem gerenciado, com sistema anaeróbico eficiente; resíduos dispostos em área específica, com certo controle de recuperação dos resíduos recicláveis antes da disposição e queima do biogás gerado; e chorume coletado por sistema de drenagem. Deve-se incluir, na análise, pelo menos um dos seguintes aspectos: compactação mecânica dos resíduos; recobrimento dos resíduos com material inerte; e nivelamento dos resíduos no solo.	1	94,19395
<b>2</b> – Aterros inadequados, semi-aeróbicos, rasos, muito próximos do lençol freático, devendo a disposição de resíduos ser controlada e incluir na análise todas as estruturas injetoras de ar nas camadas.	0,5	47,096973
<b>3</b> – Aterros controlados, com profundidades iguais ou superiores a 5m, e com lençol freático distante do nível do solo. Devem-se incluir sistemas de compactação, recobrimento com solo e captação de gases.	0,8	75,355156

4 – Aterros sem gerenciamento. Vazadouros a céu aberto, que não satisfazem os critérios de gerenciamento, e profundidades inferiores a 5 metros.	0,4	37,677578
5 – Sem categoria de aterro. Os países que não puderem classificar seus aterros numa dessas quatro categorias de gerenciamento citados acima podem utilizar o coeficiente indicado aqui.	0,6	56,516367

**Fonte:** IPCC (2006)

**COD** é o carbono orgânico degradável que está presente nos resíduos depositados no aterro. É necessário calcular o **COD** para cada tipo de material presente no aterro, porque cada um contém quantidades diferentes de carbono orgânico degradável. Logo, o **COD** total do aterro será a somatória de cada tipo de material “*i*”, conforme a equação 3 (IPCC, 2006):

$$\mathbf{COD} = \sum \mathbf{COD}_i * \mathbf{W}_i \quad (3)$$

Onde,

$W_i$  = porcentagem do tipo de resíduo;

$COD_i$  = materiais, seguindo o padrão do IPCC-2006.

O **COD** corresponde ao "**COD TOTAL**" do modelo, e representa o somatório da porcentagem de cada tipo de material  $W_i$  multiplicado pelo seu valor  $COD_i$  correspondente. Os valores do COD estão descritos no Quadro 2.

Quadro 2: Valores de COD para vários tipos de materiais.

<b>Tipo de resíduo</b>	<b>COD contido nos materiais úmidos (%)</b>
Madeira	43
Papel/Papelão	40
Fraldas	24
Tecido	24
Resíduos de parques e jardins	20
Restos de comida	15

**Fonte:** IPCC (2006).

O  $COD_f$  é a fração de carbono orgânico degradável que será degradado pela ação bioquímica. É a última fração a ser decomposta, e seu valor varia entre 0,5 e 0,77. O carbono orgânico degradável não se decompõe totalmente; e parte permanece no aterro, inclusive durante longos períodos de tempo (BORBA, 2006).

O  $W_i$  é a porcentagem do tipo de material que se encontra no total dos resíduos sólidos do aterro.

### Produção Energética

Para o cálculo da potência disponível em kW, foi utilizada a Equação 4, que possui fatores de eficiência na conversão do biogás (adaptado de CETESB, 2006):2006):

$$P_x = \frac{E_{CH_4} * P_c}{31536000} E_c \frac{k}{1000} \quad (4)$$

Onde,

$P_x$  = Potência disponível [kW]

$E_{CH_4}$  = Vazão de metano a cada ano [ $m^3CH_4$ /ano]

$P_c$ (**metano**) = Poder calorífico do metano [ $J/m^3CH_4$ ], igual a  $35,53 \times 10^6$

$E_c$  = Eficiência de coleta de gases [%]

31.536.000 = 31.536.000 segundos = 1 ano [s/ano]

$k = 1$

A estimativa da Energia disponível ( $E_{disponível}$ ) é adaptada a partir da Equação 5 (CETESB, 2006):

$$E_{Disponível} = P_x * \frac{1}{365 * 24} \quad (5)$$

Onde,

$E_{disponível}$  = Energia disponível [kWh]

$P_x$  = Potência disponível [kW]

365 = dias por ano [dia/ano]

24 = horas por dia [h/dia]

Lembrando que esta Energia disponível, refere-se ao total de metano produzido na deposição dos resíduos. Neste caso é necessário que o Gestor ou modelador, inclua a eficiência de

conversão do motor–gerador que será usado, este rendimento varia de acordo com as características do motor a ser implementado no sistema.

### Créditos de Carbono

Para o cálculo do custo do CH<sub>4</sub>, foi adaptada a seguinte equação (GRZEBIELUCKAS *et al.*, 2010):

$$CM = C_{eq} * PC * T_M \quad (6)$$

Onde,

**CM** = Custo do metano (CH<sub>4</sub>)

**C<sub>eq</sub>** = Carbono equivalente

**PC** = Preço da tonelada de carbono (valor do crédito de carbono)

**T<sub>M</sub>** = Vazão de metano em toneladas/ano

Considerando a variação que ocorre na dinâmica populacional do município, foram estabelecidas relações no modelo MDEM, com as taxas de natalidade e mortalidade como parâmetros e a população urbana como estoque. Para encontrar o aumento populacional foi considerado o somatório da população urbana com a taxa de natalidade anual atual. Enquanto que, a diminuição da população urbana foi obtida através do somatório da população urbana com a taxa de mortalidade anual.

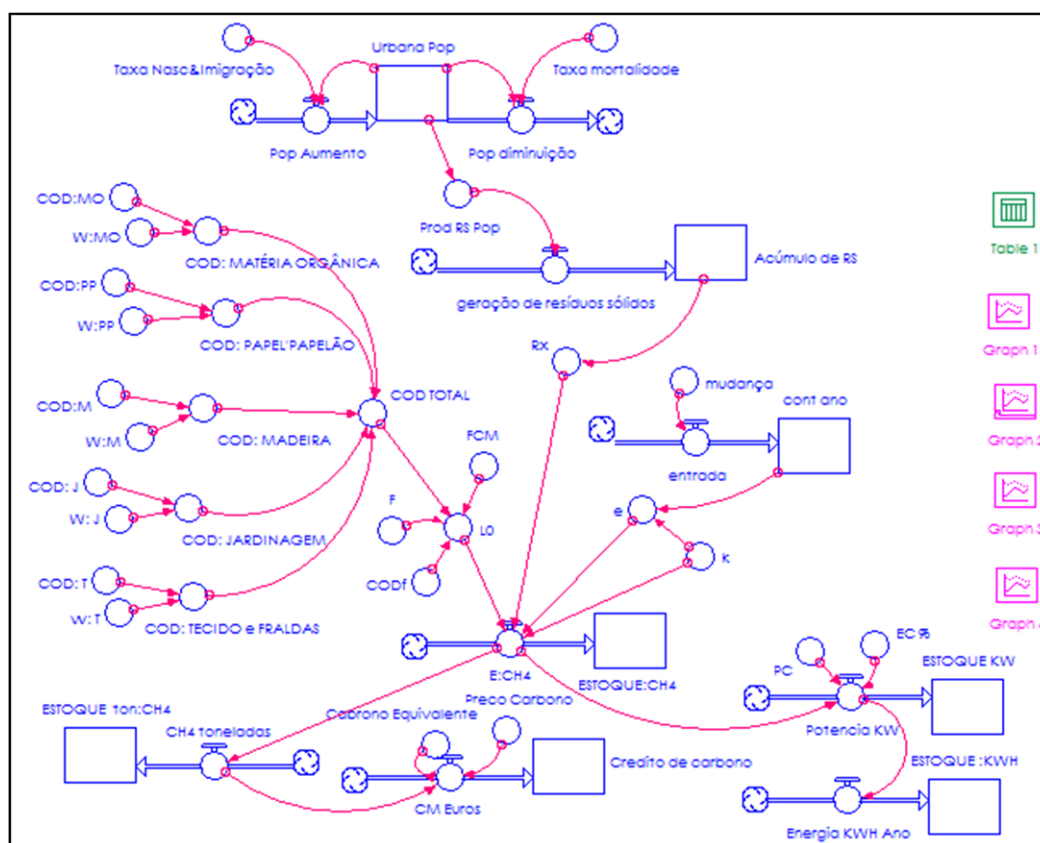
$$Pop_{Aumento} = Urbana\ Pop + Taxa\ de\ Natalidade$$

$$Pop_{Diminuição} = Urbana\ Pop + Taxa\ de\ Mortalidade$$

$$Prod\ RS\ Pop = RS\_PerCapta\_Ano * População\_Urbana$$

$$Rx = Acúmulo\_de\_RS/1000$$

Para que a unidade de “E: CH<sub>4</sub>” seja transformada de m<sup>3</sup>/CH<sub>4</sub>/ano para tonelada/ano, foi multiplicado o valor de “E: CH<sub>4</sub>” obtido por 0,0007168 t/m<sup>3</sup>, que é a densidade do metano (COELHO; OLIVEIRA, 2012). Ao utilizar a metodologia do Stella, construímos o seguinte modelo dinâmico (Figura 7) do material orgânico para produção de metano, com os parâmetros do IPCC (assim como também desenvolvemos a previsão de créditos de carbono e produção energética):



**Figura 2:** Representação completa do modelo MDEM no Stella.

**Fonte:** elaborado pelos autores.

Para a validação do modelo foram utilizadas as seguintes informações para previsão:

- I. Taxa Populacional: considerou-se a taxa de crescimento populacional anual no município de Porto Seguro - BA durante o período inicial de análise.
- II. População atual: foi utilizado a população urbana do município do primeiro ano analisado no estudo.
- III. Período: considerou-se em ambos os modelos um período de análise de 20 anos com intervalos anual para a corrida do modelo.
- IV. Taxa da geração per capita de RS: o modelo proposto pela CETESB (2006) considera a taxa como sendo anual da mesma forma do MDEM.
- V. Estimativa da taxa de decaimento ( $k$ ) valores entre 0,03; 0,07 e 0,15 a depender do clima.
- VI. Estimativa do potencial de geração de biogás ( $L_0$ ).

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados da validação do modelo são apresentados nas Figuras de 3 a 6. Os coeficientes de determinação obtidos ao compararem os dados em ambos os resultados dos *modelos*, demonstraram valores confiáveis, indicando que o modelo MDEM proposto por este estudo apresentou um grau satisfatório para prever a dinâmica populacional em relação a produção de resíduos e o potencial de geração do gás metano em aterros, assim como a produção energética por meio do uso do gás metano.

Para estimar os coeficientes das curvas analíticas, utilizou-se a equação da regressão linear determinada pelo método dos mínimos quadrados  $R^2$ . O resultado da validação do modelo MDEM mostrou um nível de correlação ( $R^2$ ) igual a 0,99 entre os valores de população, em comparação com o modelo da CETESB conforme descreve a Figura 3. Demonstrando resultados de ajuste excelente na previsão populacional.

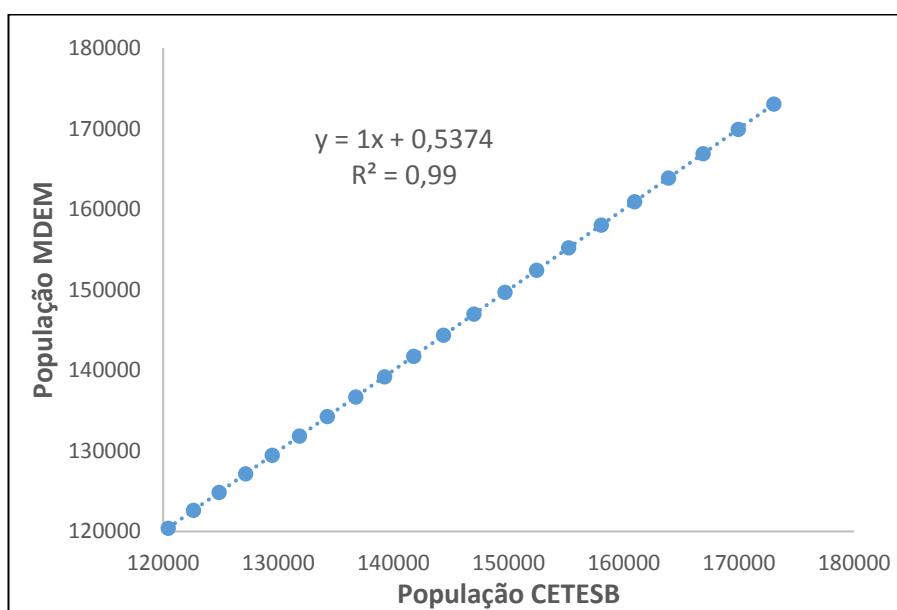


Figura 3: Validação do modelo da população.

**Fonte:** elaborado pelos autores.

O resultado da validação do modelo de produção de resíduos sólidos do MDEM mostrou um nível de correlação com o modelo da Cetesb ( $R^2$ ) igual a 1, conforme a Figura 4 que apresenta também as equações do gráficos. Demonstrando resultados de ajuste excelente na previsão da produção de resíduos sólidos.



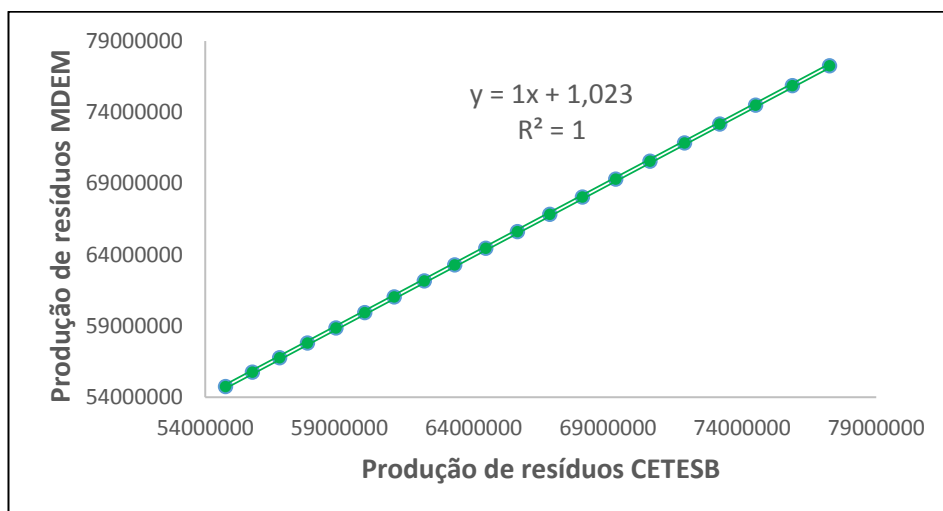


Figura 4: Validação do modelo de produção de resíduos sólidos.  
**Fonte:** elaborado pelos autores.

Para os resultados da validação da produção de metano o MDEM mostrou um nível de correlação ( $R^2$ ) igual a 0,83 entre os valores da emissão de metano, apresentando uma tendência exponencial para o MDEM enquanto o modelo da Cetesb segue uma tendência logaritmica conforme a Figura 5, mas diferenciando pouco nos valores finais apresentando resultados de ajuste ótimo. Essa diferença entre os modelos são evidenciadas por Santos *et al.* (2017) e se deve a baixa atuação do decaimento da produção de metano no MDEM que é anual seguindo o padrão do IPCC(2006), desta forma precisando ajustar a incidência do decaimento para diária ou para a mesma que o Cetesb utiliza que é o padrão USEPA afim de obter um resultado de ajuste excelente.

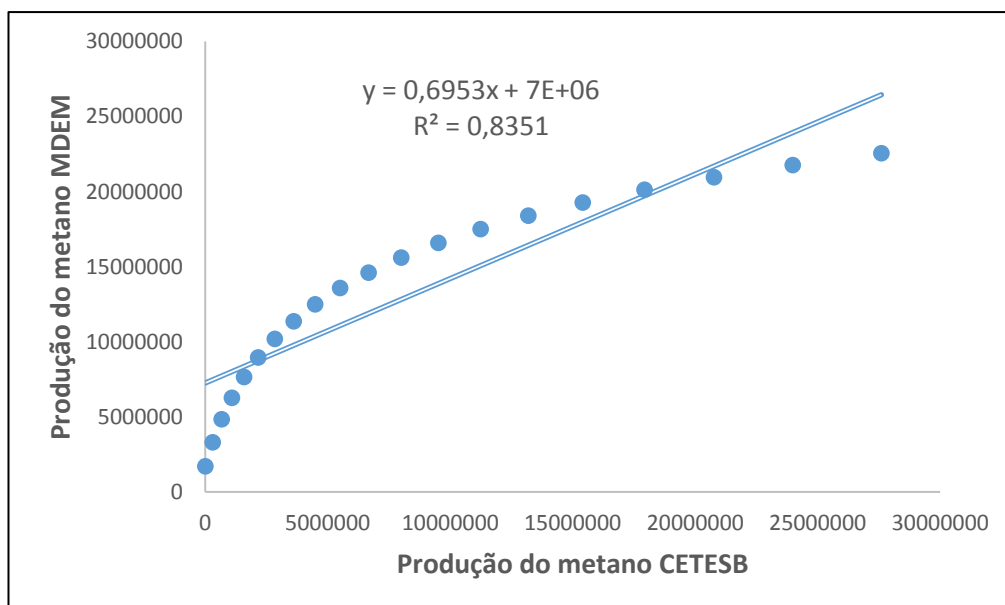


Figura 5: Validação do modelo de produção do metano.  
**Fonte:** elaborado pelos autores.

A validação do modelo para a produção energética no MDEM conforme Figura 6 é dependente dos resultados do modelo de produção de metano conforme a Figura 5 por este motivo também apresentando um gráfico exponencial para MDEM e outro logaritmo para o Cetesb, mostrando um nível de correlação ( $R^2$ ) igual a 0,83 e uma tendência similar de produção, com um ajuste ótimo diferenciando pouco nos valores finais mesmo em propostas com períodos diferentes.

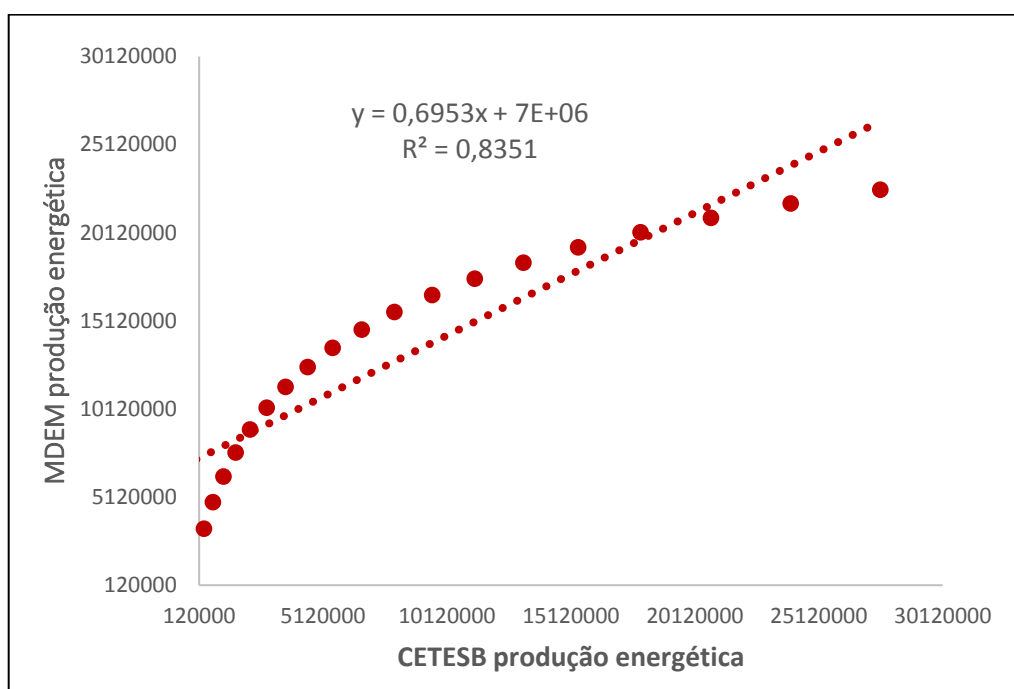


Figura 6: Validação do modelo produção energética

Fonte: elaborado pelos autores.

A partir do exposto, com base nos resultados da validação do MDEM por meio do software Biogás da Ceteb, verificou-se que o modelo de população e produção de resíduos demonstraram resultados excelentes, enquanto a produção de metano e produção energética demonstraram resultados com alguns diferenças em baixas concentrações e com resultados ótimos em previsão de altas concentrações de metano em comparação ao modelo da Cetesb necessitando ainda de alguns ajustes na constante de decaimento do modelo MDEM diferenças comuns nesse tipo de modelo (Santos *et al.* 2017; IPCC, 2006). Ressaltando que o MDEM se demonstrou como uma ferramenta confiável para gerenciamento de resíduos sólidos e para a emissão metano em altas concentrações como ocorre nos aterro sanitários.

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

O modelo dinâmico MDEM demonstrou ser uma ferramenta que fornece uma simulação de grande utilidade e eficiência para a mensuração da emissão de metano, além de ser uma ferramenta com alguns outros módulos como a de produção de energia através do biogás e os valores referentes aos créditos de carbono.

Quanto aos resultados da validação, há de se observar que o Modelo MDEM foi desenvolvido de forma efetiva; mas será necessário que o usuário verifique todos os parâmetros de entrada minuciosamente para a modelagem, antes de serem estipulados, pois depende da característica de cada localidade a ser implementado o MDEM.

Em razão de a modelagem dinâmica ter sido desenvolvida em *software* com possibilidades de inclusão ou alteração entre variáveis, poderá o mesmo ser modelado de acordo com as necessidades de gerenciamento ou pesquisa, proporcionando autonomia e adaptação às diversas necessidades e ambientes e facilitando o entendimento de onde o MDEM será proposto.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABRELPE - Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais.

**Panorama de Resíduos Sólidos no Brasil 2018/2019** ABRELPE. Nov. 2019 Disponível em: <<http://abrelpe.org.br/panorama/>> Acessado em: 20-01-2020

AMORIM NETO, Alcides de C.; COSTA, Jean Antunes C. da. Modelagem de Sistemas Ambientais Usando o Software Stella. **Proceeding Series of the Brazilian Society of Applied and Computational Mathematics**, Vol. 3, N. 1, 25 ago. 2015. SBMAC. <http://dx.doi.org/10.5540/03.2015.003.01.0374>.

BENITES-LAZARO, L.I.; MELLO-THÉRY, N.a.. Empowering communities? Local stakeholders' participation in the Clean Development Mechanism in Latin America. *World Development*, [s.l.], v. 114, p. 254-266, fev. 2019. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.worlddev.2018.10.005>.

BORBA, Silvia Mary Pereira. Análise de Modelos de Geração de Gases em Aterros Sanitários: Estudo de Caso. 2006. 134 f. Dissertação (Mestrado) - **Curso de Programas de Pós-graduação de Engenharia**, Coppe, UFRJ, Rio de Janeiro-RJ, 2006. Disponível em: <[http://www.getres.ufrj.br/pdf/BORBA\\_SMP\\_06\\_t\\_M\\_int.pdf](http://www.getres.ufrj.br/pdf/BORBA_SMP_06_t_M_int.pdf)>. Acesso em: 26 maio 2018.

DAVIES, F. D.; STULP, S. DETERMINAÇÕES DE GÁS METANO (CH<sub>4</sub>) GERADO EM ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE EFLUENTES, COM AVALIAÇÃO DO PODER CALORÍFICO PARA QUEIMA EM CALDEIRA. **Revista Destaques Acadêmicos**, [S.l.], v. 8, n. 4, dez. 2016. ISSN 2176-3070. Disponível em:

<<http://univates.br/revistas/index.php/destaques/article/view/1213>>. Acesso em: 23 out. 2019.  
doi:<http://dx.doi.org/10.22410/issn.2176-3070.v8i4a2016.1213>.

DYSON, B; CHANG, N. Forecasting municipal solid waste generation in a fast-growing urban region with system dynamics modeling. **Waste Management**, [s.l.], v. 25, n. 7, p.669-679, jan. 2005. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2004.10.005>.

ETMINAN, M.; MYHRE, G.; HIGHWOOD, E. J.; SHINE, K. P. Radiative forcing of carbon dioxide, methane, and nitrous oxide: a significant revision of the methane radiative forcing. : A significant revision of the methane radiative forcing. **Geophysical Research Letters**, [s.l.], v. 43, n. 24, p. 12614-12623, 27 dez. 2016. <http://dx.doi.org/10.1002/2016gl071930>.

FACHAGENTUR NACHWACHSENDE ROHSTOFFE e. V. (FNR). **Guia Prático do Biogás – Geração e utilização**. 5ª edição, totalmente revista e atualizada. Publicado com o apoio do Ministério da Nutrição, Agricultura e Defesa do Consumidor da Alemanha, Gülzow, 2010.

GALARZA, L. H. W. *et al.* **Modelo dinâmico de sistemas para o gerenciamento de resíduos da construção civil na cidade de Porto Alegre: estudo de caso**. *Eng. Sanit. Ambient.* [online]. 2015, vol.20, n.3, pp.463-474. ISSN 1413-4152. <https://doi.org/10.1590/S1413-4152201502000099167>.

GAO P. *et al.* Energy matching and optimization analysis of waste to energy CCHP (combined cooling, heating and power) system with energy and energy level. **Energy**, 79:522-535. 2015

GIANNIS, A.; CHEN, M.; YIN, K.; TONG, H.; VEKSHA, A. Application of system dynamics modeling for evaluation of different recycling scenarios in Singapore. **J Master Cycles Waste Manag**, v. 19, p. 1177-1185, 2017.

INGHELDS, D.; DULLAERT, W. An analysis of household waste management policy using system dynamics modelling. *Waste Management & Research*, [S.L.], v. 29, n. 4, p. 351-370, 28 jun. 2010. SAGE Publications. <http://dx.doi.org/10.1177/0734242x10373800>.

IPCC, Intergovernmental Panel on Climate Change. **Guia para inventários nacionais de gases de efeito estufa**. Módulo 6: Lixo. Volume 2: Livro de trabalho, 2006. Disponível em: <<http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/gl/invs6.html>>. Acesso em: 22 abr 2018

KARAVEZYRIS, V; TIMPE, K; MARZI, R. Application of system dynamics and fuzzy logic to forecasting of municipal solid waste. *Mathematics And Computers In Simulation*, [S.L.], v. 60, n. 3-5, p. 149-158, set. 2002. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/s0378-4754\(02\)00010-1](http://dx.doi.org/10.1016/s0378-4754(02)00010-1).

KOLLIKATHARA, N; FENG, H; YU, D. A system dynamic modeling approach for evaluating municipal solid waste generation, landfill capacity and related cost management issues. *Waste Management*, [S.L.], v. 30, n. 11, p. 2194-2203, nov. 2010. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2010.05.012>.

KURTZ DOS SANTOS, A. C; CHO, Y; ARAUJO, I. S; GONÇALVES, G. P. **MODELAGEM COMPUTACIONAL UTILIZANDO STELLA**: considerações teóricas e aplicações em Gerenciamento, Física e Ecologia de Sistemas. Rio Grande – RS, Editora da FURG. 2002. Disponível em: <http://www.modelciencias.furg.br/princisist/livrostel/index.html> > Acessado em: 26 de maio de 2018

LANE, D. C.; STERMAN, John D.. FORRESTER, J. W. **Profiles In Operations Research**, p. 363-386, 2011. Springer US. [http://dx.doi.org/10.1007/978-1-4419-6281-2\\_20](http://dx.doi.org/10.1007/978-1-4419-6281-2_20).

LATTANZI, I. E; PRATA FILHO, D. A.; QUELHAS, O. G. 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. : estudo de caso do Aterro MTR Santa Maria Madalena, RJ, Brasil. **Sistemas & Gestão**, [s.l.], v. 14, n. 4, p. 483-491, 2019.

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. **Eng. Sanit. Ambient.**, Rio de Janeiro , v. 24, n. 1, p. 143-155, Feb. 2019 . Available from <[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1413-41522019000100143&lng=en&nrm=iso](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1413-41522019000100143&lng=en&nrm=iso)>. access on 01 Jul. 2020. Epub Apr 01, 2019. <https://doi.org/10.1590/s1413-41522019171125>

NOLA, M. F.; ESCAPA, M.; ANSAH, J. P.. Modelling solid waste management solutions: the case of campania, italy. **Waste Management**, v. 78, p. 717-729, ago. 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2018.06.006>.

SANTOS, M. M.; ROMANEL, C.; VAN ELK, A. G. H. P. Análise da eficiência de modelos de decaimento de primeira ordem na previsão da emissão de gás de efeito estufa em aterros sanitários brasileiros. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, [s.l.], v. 22, n. 6, p.1151-1162, dez. 2017. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s1413-41522017156311>.

SUKHOLTHAMAN, P.; SHARP, A. A system dynamics model to evaluate effects of source separation of municipal solid waste management: A case of Bangkok, Thailand. **Waste Management**, [s.l.], v. 52, p.50-61, jun. 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2016.03.026>.

UNFCCC. United Nations Framework Convention On Climate Change. **The Paris Agreement**. 2020. Disponível em: <https://unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement/the-paris-agreement>. Acesso em: 06 jun. 2020.

Este artigo está formatado segundo as normas da Revista GAIA SCIENTIA  
Disponível no site:  
<https://periodicos.ufpb.br/ojs2/index.php/gaia/about/submissions#authorGuidelines>

## ARTIGO II

### ESTIMATIVA DE GERAÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS E MODELAGEM DINÂMICA DE EMISSÃO DE METANO DE PORTO SEGURO-BA

#### RESUMO

Os resíduos sólidos são, atualmente, um dos maiores problemas ambientais relacionados a emissões de gás metano (CH<sub>4</sub>), um dos principais gases do efeito estufa. Tal problema envolve aspectos como o aumento da população, a geração de resíduos sólidos e o aumento constante do nível de consumo. Este trabalho teve como objetivo determinar a produção de gás metano (CH<sub>4</sub>) no lixão do município de Porto Seguro - BA, através de modelagem dinâmica de emissão de metano (MDEM) pelo método do IPCC, para os próximos 20 anos, assim como uma análise da viabilidade energética e o retorno em crédito de carbono. Para conhecer o percentual de resíduos orgânicos a ser utilizado no modelo, foi feita uma análise da composição gravimétrica, pelo método da amostragem por quarteramento. Foram encontrados na análise gravimétrica 44,51% de resíduos orgânicos, 15,56% de papel e papelão, 3,11% de madeira, e 6,07% de tecidos e fraldas. Os dados foram usados como parâmetros para o modelo dinâmico implementado no Software Stella. Encontrou-se na projeção para os próximos 20 anos: aumento da deposição de resíduos de 150t/dia para 215,5t/dia; emissões totais de CH<sub>4</sub> de 27.598.752,04 m<sup>3</sup>/CH<sub>4</sub>; potencial de geração de energia de 22.709,09 kWh; oportunidades de projetos de Mecanismo de Desenvolvimento Limpo e acesso a títulos de créditos de carbono com um retorno de R\$124.245.053,05, através de sua comercialização. Esses resultados mostram como podem ser utilizados na execução de políticas públicas socioambientais e em projetos para o uso do Biogás, bem como tornar a execução rentável e viável para sua implementação.

**Palavras-chave:** biogás; gravimetria; energia; carbono, Modelo de Desenvolvimento Limpo.

### ESTIMATION OF SOLID WASTE GENERATION AND DYNAMIC MODELING OF METHANE EMISSION FROM PORTO SEGURO-BA

#### ABSTRACT

Solid waste is currently one of the biggest environmental problems related to emissions of methane gas (CH<sub>4</sub>), one of the main greenhouse gases. This problem involves aspects such as the increase in population, the generation of solid waste and the constant increase in the level of consumption. This paper aimed to determine the production of methane gas (CH<sub>4</sub>) in the dump in the municipality of Porto Seguro - BA, through dynamic modeling of methane emission (MDEM) by the IPCC method, for the next 20 years, as well as an energy viability analysis and return on carbon credit. In order to know the percentage of organic residues to be used in the model, an analysis of the gravimetric composition was made, using the method of sampling by quartering. In the gravimetric analysis 44.51% of organic residues, 15.56% of paper and cardboard, 3.11% of wood, and 6.07% of fabrics and diapers were found. The data were used as parameters for the dynamic model implemented in the Stella Software. It was found in the projection for the next 20 years: an increase in the deposition of waste from 150 tons / day to 215.5 tons / day; total CH<sub>4</sub> emissions of 27,598,752.04 m<sup>3</sup> / CH<sub>4</sub>; energy generation potential of 22,709.09 kWh; opportunities for Clean Development Mechanism projects and access to carbon credit bonds with a return of R\$124.245.053,05, through their commercialization. These results show how they can be used in the execution of socio-

environmental public policies and in projects for the Biogas use, as well as making the execution profitable and viable for its implementation.

**Keywords:** biogas; gravimetry; energy; carbon, Clean Development Model.

## **INTRODUÇÃO**

As atividades antrópicas e o crescimento populacional nas cidades, trouxeram grandes problemas ambientais para o mundo, sendo um desses problemas o aumento da geração de resíduos sólidos que hoje é um grande desafio a ser enfrentado pela administração pública das cidades. Isso devido ao avanço tecnológico, que também traz produtos de vida útil reduzida, o grande uso de descartáveis e os resíduos sólidos com características mais complexas, tornando difícil seu manejo, tratamento e disposição final (MORAES, 2011).

A Política Nacional de Resíduos Sólidos, instituída pela Lei 12.305/2010, determina que todos os municípios brasileiros realizem o Plano Municipal de Gerenciamento Integrado de Resíduos Sólidos, buscando a prevenção e a redução na geração de resíduos. E traz como propostas a prática de hábitos de consumo sustentável e um conjunto de instrumentos para propiciar o aumento da reciclagem e da reutilização dos resíduos sólidos, além da destinação ambientalmente adequada dos rejeitos (BRASIL, 2010).

No que tange ao gerenciamento de resíduos sólidos em cidades turísticas, os desafios são ainda maiores, devido a uma grande variação dos resíduos gerados em períodos de alta temporada. Muitas dessas cidades não possuem um plano para o gerenciamento adequado de seus resíduos, o que torna impossível realizar os serviços de coleta e a disposição final dos resíduos sólidos de maneira econômica e socioambiental satisfatória, reduzindo a vida útil da área de destinação final e tornando deficientes os serviços de limpeza pública (LIMA, 2005).

O turismo é capaz de produzir inúmeros impactos sobre o espaço, além de exercer influência na própria gestão da cidade. Entre esses impactos, um dos mais perceptíveis é o aumento na geração de resíduos sólidos. De certa maneira, a gestão de resíduos sólidos requer um tratamento diferenciado em face do aumento do fluxo turístico, sendo imprescindíveis novas proposições de como a ação do poder público e da sociedade civil podem contribuir para minimizar os impactos e melhorar a gestão em áreas litorâneas (SILVA, 2014).

Os resíduos do município de Porto Seguro são dispostos em um lixão a céu aberto, no local onde inicialmente foi projetado e implementado um aterro sanitário. Esse aterro foi implantado no ano de 2000, com recursos do Banco Mundial, por meio da Companhia de Desenvolvimento e Ação Regional (CAR), do Programa de Administração Municipal e Desenvolvimento de Infraestrutura



Urbana (PRODUR), e teve a obra executada pela Companhia de Desenvolvimento Urbano do Estado da Bahia (CONDER). A área fica próxima ao leito do rio Buranhém e a 17 km da costa do município de Porto Seguro (RAMOS *et al.*, 2000), um rio de grande importância que proporciona pesca, abastecimento, irrigação e transporte hidroviário e a má condição do lixão representa um risco de impacto ambiental para esse rio no território da Costa do Descobrimento.

Com o tempo, houve problemas na gestão dos resíduos sólidos e, atualmente, não são seguidas recomendações básicas, descritas na Lei Federal nº 12.305 de 2 de agosto de 2010, que instituiu a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) e que estabeleceu prazo para que os municípios adequassem a disposição final de seus resíduos e os parâmetros do Plano Diretor Municipal, instituído pela Lei Municipal nº 651 de 17 de novembro de 2006.

O Plano Diretor Municipal de Porto Seguro foi revisado no ano de 2019 e a temática da gestão dos resíduos sólidos não foi discutida pelo documento. Todavia, essa temática está estabelecida no Plano Integrado de Gestão de Resíduos Sólidos (PIGRS), que faz parte do Plano Municipal de Saneamento Básico de Porto Seguro, instituído em 2017. Conforme Bandeira *et al.*, (2010), o lixão apresenta diversos planos e projetos para melhorar a qualidade ambiental. No entanto, tais planos e projetos, por enquanto, ainda não se efetivaram e nem estão em vias de serem implementados.

Uma das consequências da geração de resíduos sólidos produzidos em lixões e aterros é a formação de gases que contribuem para o aumento do efeito estufa. Esses gases são gerados a partir de compostos diversos, através de interações físico-químicas e de reações biológicas que ocorrem ao longo do tempo. Alguns dos gases estão presentes em grandes quantidades, como o metano (CH<sub>4</sub>) e o dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) e outros em quantidades em traços (COELHO *et al.*, 2006; DAVIES; STULP, 2016).

Nessa perspectiva, o metano é um gás componente do efeito estufa e Brito Filho (2005) afirma que seu potencial de aquecimento atmosférico é de cerca de 20 a 25 vezes maior que o do dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>). Segundo Catapreta e Simões (2009), em todo o mundo 5 a 15% do metano total emitido para a atmosfera é proveniente de lixões e aterros. A quantidade de metano emitido nesses ambientes de resíduos sólidos pode ser estimada através de fatores como a quantidade e composição dos resíduos, umidade, clima e o tempo em que o resíduo está depositado (CANDIANI; MOREIRA, 2018; SANTOS *et al.*, 2017).

O Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC) apresenta modelos numéricos e metodologias para estimar esses valores, possibilitando assim o gerenciamento e o

planejamento de projetos para áreas de deposições, bem como o retorno financeiro e o uso desse biogás de forma mais planejada para as áreas de deposição dos Resíduos.

Este trabalho tem por objetivo verificar a produção de metano por meio da quantificação da deposição diária de resíduos sólidos no aterro e da caracterização gravimétrica de uma amostra desses resíduos, com a utilização do modelo dinâmico MDEM (Zanchi *et al*, 2020), quantificar o potencial de geração de CH<sub>4</sub> no lixão para os próximos 20 anos, além de apresentar possibilidades de desdobramentos da utilização do metano como potencial energético e/ou retorno com o crédito de carbono do total de CH<sub>4</sub> emitido.

## **MATERIAL E MÉTODOS**

### **Área de estudo**

O município fica localizado no extremo sul da Bahia em uma região litorânea. Possui uma população estimada em 148.686 habitantes e a área da unidade territorial é de 2.287,085 km<sup>2</sup> (IBGE, 2019). O dados utilizados para a pesquisa (Figura 1) se situa no antigo aterro sanitário de Porto Seguro que hoje se caracteriza como um vazadouro a céu aberto ou lixão, localizado nas coordenadas geográficas 16°23'44"S, 39°12'16"W (Figura 3).

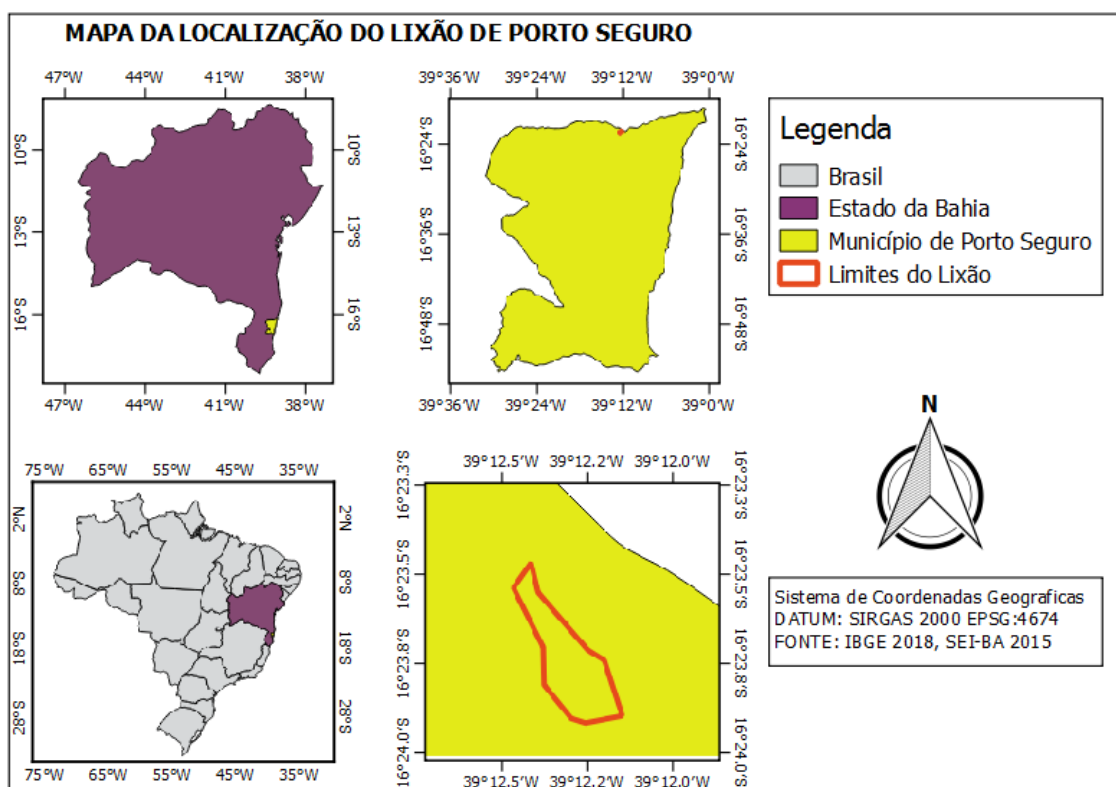


Figura 1: Mapa da localização do lixão de Porto Seguro – BA.

**Fonte:** elaborado pelos autores

O município de Porto Seguro possui tipologia climática Köppen Af' do tipo Tropical chuvoso de floresta sem estação seca e tipologia climática segundo Thornthwaite B1r'A' de clima Úmido, cuja pluviosidade média mensal é superior a 60mm e anual inferior a 1500mm. A temperatura do mês mais frio é acima de 18°C e verões longos e quentes com temperatura média do mês mais quente superior a 22°C (SEI, 1998). O lixão está localizado em uma área de declividade e que pode ser acessado pela BR 367, próximo ao leito do rio Buranhém e a 17 km da costa do município de Porto Seguro (RAMOS *et al.*, 2000).

### **Caracterização dos Resíduos Sólidos**

Na etapa inicial, foi feito um levantamento de informações junto à Secretaria Municipal de Meio Ambiente (SMMA) e Secretaria Municipal de Trânsito e Serviços Públicos (SMTSP) de Porto Seguro - BA, órgãos responsáveis pela produção do Plano Municipal de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos (PMGIRS), acerca das rotas setoriais (Tabela 1) onde ocorre a coleta dos resíduos sólidos pelo Município. Após esse levantamento, foram escolhidos três setores representativos da cidade, sendo eles: litoral norte, os bairros do distrito de Arraial D'ajuda e centro de Porto Seguro. A

seleção destes bairros se deu por possuírem a maior concentração populacional e a característica da população de Porto Seguro que produz a maioria dos resíduos gerados na cidade.

A metodologia de caracterização foi por meio do método de quarteamento, sendo esta metodologia adaptada da NBR – 10.007 (ABNT, 2004). As principais etapas são as seguintes (Figura 2):

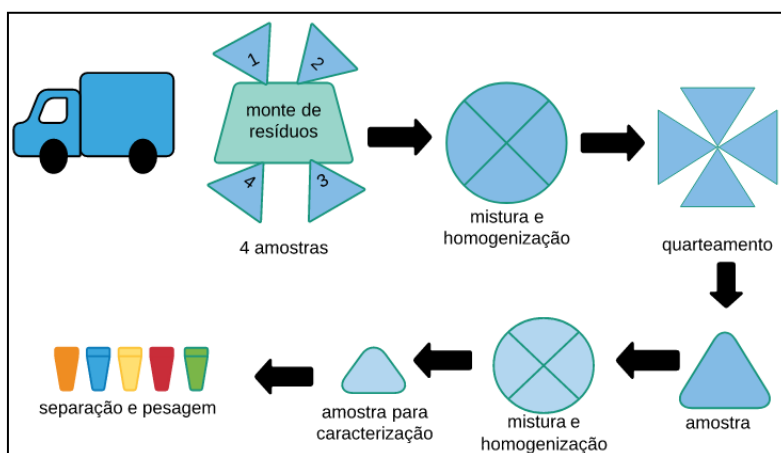


Figura 2: Método de quarteamento dos Resíduos Sólidos.

**Fonte:** elaborado pelos autores.

- a) Descarga dos resíduos sobre a lona plástica e rompimento de sacos;
- b) Homogeneização dos resíduos sólidos;
- c) Quarteamento dos resíduos sólidos;
- d) Seleção e separação de uma sub-amostra;
- e) Homogeneização e um novo quarteamento da amostra;
- f) Retroalimentação do processo até a amostra obter entre 100 e 300kg;
- g) Seleção e pesagem de cada resíduo de material separado, por meio de balança de capacidade de 40kg.

Na composição gravimétrica, foram identificados e separados manualmente os componentes em: matéria orgânica, papel, plástico filme, plástico rígido, PET, metal, vidro, papelão, tecido/couro, alumínio, madeira, fraldas/absorventes e outros. Os caminhões coletores dos setores selecionados foram pesados após a coleta de resíduos sólidos urbanos e também pesados após seu esvaziamento. A diferença da pesagem foi utilizada para se obter o peso dos resíduos coletados. Os setores rurais foram desconsiderados, pois não apresentam rotas de acordo com os dados fornecidos pela Prefeitura. (Tabela 1).

Tabela 1: Rotas de coleta de resíduos sólidos do município de Porto Seguro – BA.

Setores de coleta	Caminhão coletor de 15m <sup>3</sup> com capacidade de 7 a 10 toneladas	Periodicidade da coleta
Caraíva (Itaporanga, Nova Caraíva, Praia do Espelho)	1	2 x semana
Trancoso	3	1 x dia
Arraial D'Ajuda	3	2 x dia
Vera Cruz / Pindorama	1	1 x dia
Agrovilla / Orla	1	1 x dia
Paraguai (Vila Valdete, Vila Parracho)	1	1 x dia
Parque Ecológico João Carlos	1	1 x dia
Casas Novas	1	1 x dia
Mercado do Povo	1	1 x dia
Cambolo	1	1 x dia
Mirante	1	1 x dia
Campinho	1	1 x dia
Centro	1	2 x dia

**Fonte:** elaborado pelos autores.

Para definição da composição gravimétrica dos resíduos, foram relacionados (Equação 3) a fração total de cada categoria após a separação em relação à massa total das amostras coletadas em cada setor, de acordo com a seguinte relação:

$$\text{Categoria (\%)} = \frac{\text{massa da fração da categoria (kg)}}{\text{massa total da amostra coletada (kg)}} \times 100 \quad (3)$$

Para se obter a tonelada média diária de resíduos depositados no lixão durante o período de 2 meses (janeiro e fevereiro de 2019), todos os caminhões que entravam no lixão foram pesados em uma balança disponibilizada na portaria, em dois momentos, carregados de resíduos e esvaziados após a deposição. Com a diferença entre os pesos inicial e final para cada caminhão, obteve-se o peso dos resíduos por caminhão. Esses valores foram somados, obtendo-se a quantidade total de resíduos depositados no lixão em toneladas para cada dia e para encontrar os valores médios para do período, foram divididos pelos dias anotados. Assim, encontramos uma média de 150 t/dia de resíduos depositados no lixão.

Neste estudo, para prever a geração de metano em Porto Seguro, foi utilizado o Modelo Dinâmico de Emissão de Metano MDEM (Figura 3) proposto por Zanchi *et al* (2020).

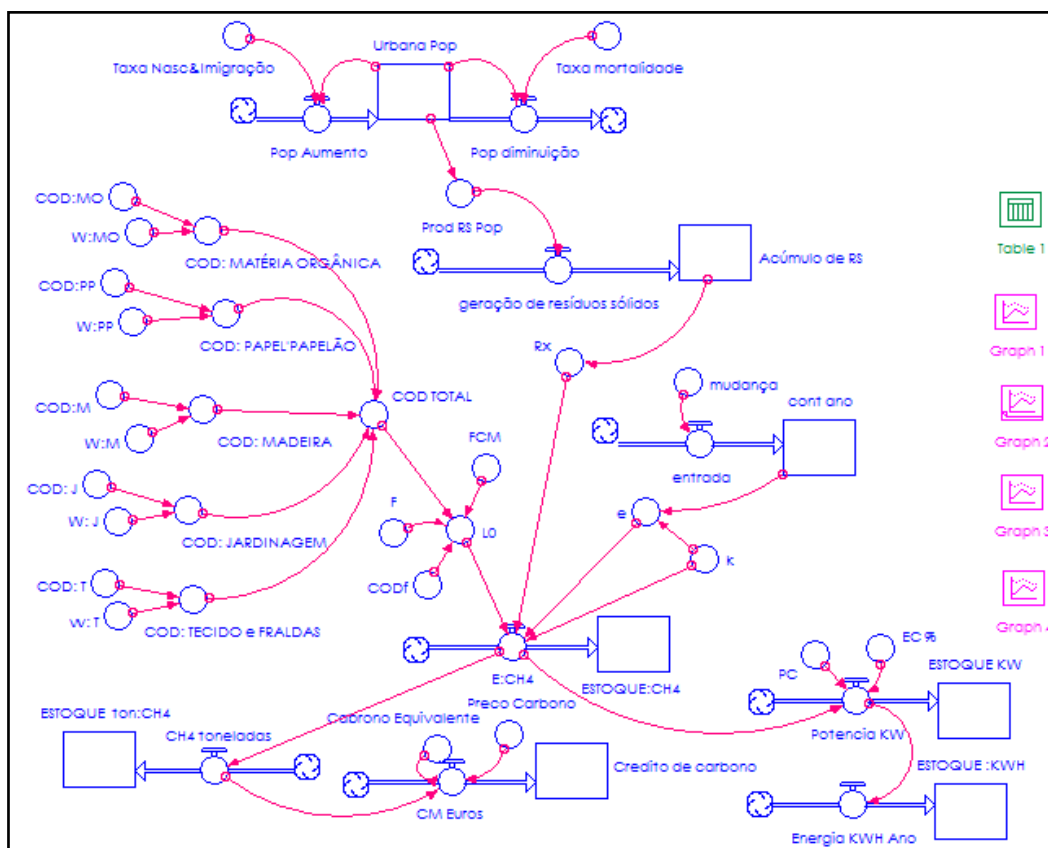


Figura 3: Representação completa do modelo MDEM no Stella.  
**Fonte:** Zanchi *et al* (2020)

Utilizou-se o *software* STELLA (versão 8.0 - Isee Systems) e para a modelagem dinâmica da produção de gás metano a partir da produção de resíduos de Porto Seguro, foi utilizado um intervalo de tempo de 20 anos com intervalos anual para a corrida do modelo. Foi considerado o período de  $t=0$ , iniciando em 2019 a  $t=20$  em 2039, representando todos os anos contidos no espaço de tempo estudado. As projeções das taxas do município e da população urbana utilizadas no modelo foram retiradas do Censo Demográfico (IBGE, 2019), do Atlas de Desenvolvimento Humano no Brasil (2019) e SNIS (2019), sendo a taxa de natalidade mais migração anual considerada de 2,37, a taxa de mortalidade anual de 0.54 e a população urbana de 120.423 habitantes.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Durante o processo de caracterização dos resíduos sólidos urbanos feito no lixão, os resultados provenientes dos hotéis do litoral norte, dos bairros do distrito de Arraial D’ajuda e do Centro de Porto Seguro tiveram diferentes proporções de resíduos nas rotas, porém, a presença de matéria orgânica prevalece em todos os casos. Para essa análise representada na tabela abaixo

(Tabela 2), foi feita uma média das 3 amostras, com foco para os resíduos orgânicos e outros geradores de carbono orgânico degradável - *COD*, como papel, papelão, madeira, fraldas e tecidos.

Tabela 2: Composição gravimétrica dos RSU de Porto Seguro – BA

Tipo	Hotéis da Orla Norte		Bairros de Arraial D'ajuda		Centro		Média	
	kg	%	kg	%	kg	%	kg	%
<b>Papelão</b>	344,19	10,27	700,66	9,61	1268,88	12,88	771,2	10,92
<b>PET</b>	383,68	11,45	487,73	6,69	780,37	7,92	550,5	8,6
<b>Alumínio</b>	37,29	1,11	44,05	0,60	54,66	0,55	45,3	0,7
<b>Plástico</b>	487,82	14,56	1065,00	14,61	1679,85	17,05	1077,5	15,4
<b>Papel</b>	586,66	17,51	115,87	1,59	346,24	3,52	349,5	7,5
<b>Fralda</b>	148,63	4,44	294,80	4,04	337,32	3,42	260,2	3,9
<b>Porcelana</b>	166,29	4,96	0	0,00	0	0,00	55,4	1,6
<b>Vidro</b>	103,46	3,09	365,51	5,01	325,67	3,31	264,9	3,8
<b>Tecido</b>	16,22	0,48	224,26	3,08	125,14	1,27	121,9	1,6
<b>Tetra Pak</b>	15,46	0,46	49,09	0,67	69,04	0,70	44,5	0,6
<b>Isopor</b>	6,89	0,21	21,76	0,30	75,52	0,77	34,7	0,4
<b>Metais</b>	0	0,00	38,80	0,53	51,78	0,53	30,2	0,3
<b>Madeira</b>	0	0,00	413,33	5,67	0	0,00	137,8	1,9
<b>Resíduos Tecnológicos</b>	0	0,00	0	0,00	128,02	1,30	42,7	0,4
<b>Material Orgânico</b>	1.053,35	31,44	3.469,07	47,59	4.607,45	46,78	3043,3	41,9
<b>TOTAL</b>	<b>3.350</b>	<b>100</b>	<b>7.290</b>	<b>100</b>	<b>9.850</b>	<b>100</b>	<b>6829,9</b>	<b>100</b>

Fonte: elaborado pelos autores.

A análise média da gravimetria apresentou em sua caracterização uma quantidade de matéria orgânica de 44,51% da amostra do resíduo. Em sua maioria, a matéria orgânica era derivada de restos sólidos vegetais ou animais provenientes das residências, da hotelaria e do comércio local. Também foi notado na composição desse resíduo um grande volume de casca de coco, que tem um

elevado consumo localmente. Segundo Rosa *et al.*, (2001), a casca e as fibras correspondem a cerca de 90% do peso bruto do fruto.

Houve também uma grande incidência de outros resíduos degradáveis como o papelão (10,62%) e papel (4,93%), materiais comumente utilizados para armazenar/transportar produtos no comércio, assim como embalagens descartáveis utilizados em hotéis e restaurantes. Notou-se uma quantidade de madeiras provenientes da construção civil, com um valor de 3,11%, além de tecidos (2,12%) e fraldas (3,94%), como dispostos na Tabela 3.

Tabela 3: Valores de COD por tipo de resíduos sólidos encontrados na gravimetria.

<b>Tipo de resíduo</b>	<b>Material %</b>	<b>COD %</b>	<b>COD<sub>i</sub> * W<sub>i</sub></b>
Matéria Orgânica	44,51	15	0,0667
Papel/Papelão	15,56	40	0,0622
Madeira	3,11	43	0,013
Jardinagem	0	20	0
Tecido e Fraldas	6,07	24	0,0145

**Fonte:** elaborado pelos autores.

Foram identificados também outros resíduos como plástico (15,27%), PET (7,87%), metais (0,44%), alumínio (0,68%), isopor (0,41%), porcelana (0,88%), vidro (4,21), caixas Tetra Pak (0,64%) e resíduos tecnológicos (0,36%), os quais não serão usados no modelo.

A caracterização gravimétrica dos resíduos sólidos do lixão de Porto Seguro indica a capacidade de geração de biogás, em virtude do elevado teor de material biodegradável presente nesses resíduos (FNR, 2010; COELHO *et al.*, 2006; DAVIES; STULP, 2016). Porém, esse é apenas um dos fatores que afetam a produção de metano em um aterro sanitário. Aspectos relacionados à densidade, umidade e idade dos resíduos, pH e temperatura também estão entre os fatores que mais afetam essa geração (SANTOS *et al.*, 2017; BORBA, 2006; CANDIANI; MOREIRA, 2018).

Para calcular a produção de matéria orgânica disponível para a produção de metano, foi elaborada uma relação dos resíduos orgânicos mais comuns encontrados na análise gravimétrica. Assim, cada tipo de resíduo foi representado no modelo MDEM (Figura 3) para obtenção do cálculo do Carbono Orgânico Degradável – COD. Cada elemento caracterizado recebeu a taxa de



frequência  $W_i$  no modelo, referente às porcentagens encontradas de cada material orgânico na análise gravimétrica e seu valor  $COD_i$ , ao qual convergem para o cálculo do “COD TOTAL”. Para obtermos o percentual do COD Total, utilizamos a equação  $COD = \sum COD_i * W_i$  (IPCC,2016) e obtivemos como resultado no  $COD = 0,16$  (16%).

O produto do “COD TOTAL” no modelo MDEM contribui para o cálculo do potencial de geração de metano  $L_0$ , o qual recebe também os valores do Fator de Correção de Metano -  $FCM$ , que recebeu o valor 0,6 da fração de carbono orgânico degradável.

$COD_f$  apresenta o valor 0,77, referente ao clima local do tipo tropical úmido e de acordo com os parâmetros do IPCC, corresponde à fração de metano presente no aterro (IPCC, 2006; SEI,1998).

$F$  recebeu o valor de 0,5, pois em aterros sanitários e lixões, em média, metade do biogás é metano (FNR, 2010; COELHO *et al.*, 2006; DAVIES; STULP, 2016).

Com o resultado de  $L_0$  e o  $R_x$ , foi feito o cálculo da estimativa da produção de metano em  $m^3$ /ano “E: CH4” e em um laço no algoritmo é rodada a constante de decaimento do aterro  $K$ , que recebe o valor de 0,078, referente ao clima tropical úmido e à contagem dos anos “cont ano”, acumulando assim, o resultado da produção de metano em “ESTOQUE:CH4”, onde consta a produção total de metano em  $m^3/CH_4$ /ano (Figura 3).

### **Modelagem do Potencial Energético**

O processamento do modelo no *MDEM* se inicia com a entrada das variáveis de taxa de nascimentos e imigração (2,3/dia) e taxa saída como a de mortalidade (0,54/dia) da cidade de Porto Seguro – BA. Tais dados foram obtidos na plataforma do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE, acumulados os resultados no processamento “População Urbana”, baseada como valor inicial a estimativa de população urbana aqui excluída a população rural para o ano de 2018 que foi de 120.423 (IBGE, 2019).

Em “Prod RS Pop” no MDEM (Figura 3) é calculada a produção de resíduos sólidos anual, multiplicando a população urbana pela produção *per capita* anual de RS. Para esta produção, considerou-se os valores obtidos por meio da pesagem dos caminhões coletores o valor médio da produção diária de resíduos sólidos de 150 t/dia, dividido pela população urbana de 120.423 e multiplicado por 365 dias do ano. Obtivemos como resultado um total de 454,647 kg/habitante/ano ou uma média de 1,25 kg/habitante/dia, bem acima da média nacional 380 kg/habitante/ano ou 1,09 kg/habitante/dia país (ABRELPE, 2019), o fato do município ser uma cidade turística influencia

nessa proporção, Dias *et al* (2012) apresenta correlações entre o aumento da produção de resíduos e fatores comportamentais como turismo e viagens de negócio, outros fatores que influenciam são o poder aquisitivo da população e o número de empregados de empresas, indústrias e serviços (CAMPOS, 2012, URBAN, 2016).

O item “*geração de resíduos sólidos*” no MDEM é alimentado com o resultado da produção de resíduos sólidos anual da população considerada. Esse resultado é acumulado no depósito do modelo como “*Acúmulo de RS*”, resultando no total "Rx" referente ao fluxo em toneladas de resíduos sólidos a cada 1 ano.

Nas Figuras 4 a 6 notamos o comportamento das variáveis referentes às projeções no MDEM para os próximos 20 anos. Todos os resultados foram pautados nas condições locais do aumento populacional ao longo do tempo e da produção dos resíduos sólidos urbanos depositados no Lixão de Porto Seguro – BA. Assim a modelagem do crescimento populacional para o Porto Seguro – BA projetou para 2039 uma população urbana do Município de aproximadamente 173.040 habitantes, utilizando-se um valor inicial de 120.423 habitantes na área urbana em 2019. Nessa perspectiva, podemos perceber que o município ainda está em um crescimento considerável. Isso implica que, para esse mesmo período (20 anos), a quantidade de resíduos sólidos produzidos também aumentará pois, no modelo temos uma deposição inicial anual de 54.749.955,681 kg/ano em 2019 para 78.672.403,170 kg/ano em 2039. Isto significa um valor médio diário de 215.540,83 kg/dia em 2039 um aumento de 43,69% em 20 anos na deposição diária.

O custo estimado, incluindo as etapas de pré-implantação e implantação de aterros de médio porte tipo II, para até 500 t/dia, é de R\$ 175.264.722,00 e para aterro médio tipo I, para até 1000 t/dia, é de R\$ 262.897.083,00, conforme a tabela 4 de custos de implementação de aterros sanitários. Esses equipamentos têm em média 42 anos de ciclo de vida, dos quais só 20 permitem que o aterro receba resíduos (ABETRE; FGV, 2009; VITAL *et al.*, 2014).

Tabela 4: Custos de implementação de aterros sanitários por etapa (em R\$).

	<b>Grande 2.000 t/dia</b>	<b>Médio I 1.000 t/dia</b>	<b>Médio II 500 t/dia</b>	<b>Pequeno 100 t/dia</b>
<b>Pré-Implantação</b>	4.065.461	2.032.730	1.355.153	608.087
<b>Implantação</b>	18.169.781	9.084.890	6.056.593	2.669.178
<b>Operação</b>	461.494.052	230.747.026	153.831.350	45.468.163
<b>Encerramento</b>	6.488.889	3.244.444	2.162.963	486.667

<b>Pós-encerramento</b>	35.575.984	177.87.992	11.858.661	3.212.354
<b>Total</b>	525.794.167	262.897.083	175.264.722	52.444.449

Fonte: (ABETRE; FGV, 2009; VITAL *et al.*, 2014).

Dessa forma, levando-se em consideração que o Município caracteriza-se como uma cidade turística, é necessário uma maior atenção quanto a população flutuante que influencia na quantidade de produção de resíduos, assim se faz necessário atender melhor a destinação e gerenciamento dos resíduos com um aterro de proporção adequada, com menor dano ao meio ambiente e que atenda às demandas ambientais e sociais emergentes (CAMPOS, 2012; DIAS *et al.*, 2012; URBAN, 2016).

### Produção de metano

Na Figura 4, nota-se que a vazão de metano inicial é de 307.056,39 m<sup>3</sup>/CH<sub>4</sub>/ano. Após um aumento constante na produção, estimou-se para 20 anos uma emissão de 27.598.752,04 m<sup>3</sup>/CH<sub>4</sub>/ano.

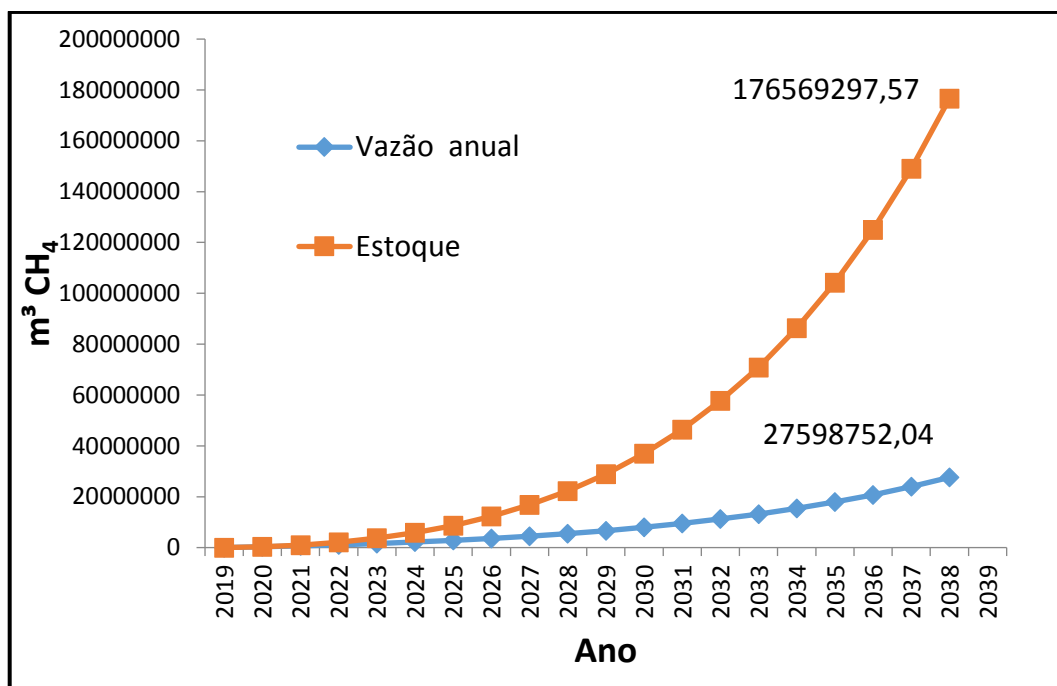


Figura 4: Geração de metano, vazão anual e estoque.

O montante acumulado da produção de metano ao final de 20 anos, resultou em um total de 176.569.297,57 m<sup>3</sup>/CH<sub>4</sub> para 2039. Utilizando-se do valor da densidade do metano que de acordo com Coelho e Oliveira (2012) é de 0,0007168 t/m<sup>3</sup> e multiplicando pelo resultado acumulado da produção de metano, obteve-se o valor de 126.564,87 toneladas de metano.

## Potência Gerada e Energia elétrica disponível

Na Figura 5, nota-se a geração anual inicial em uma Potência disponível de 345.944,75kW no primeiro ano e sobe para uma potência disponível de 35.691.307,88kW no ano de 2039. Ao final de 20 anos, obteríamos o acúmulo de potência energética em 198.931.606,50 kW.

Levando-se em consideração o consumo de Porto Seguro, a partir de dados disponíveis no site da ANEEL de 2014, a cidade consome 458.466,06 kWh. Conforme abordado acima, o “lixão” tem possibilidade de produzir 126.564,87 ton/CH<sub>4</sub>, sendo 22.709,09 kWh em 20 anos (Figura 5). Isto corresponde a 5% do consumo de Porto Seguro, ou 1.135 casas com um consumo médio de 200 kWh/mês. Ao convertermos em valores atualmente praticados de 0.72 reais o kWh, teríamos um retorno de R\$ 16.350,54 por ano após 20 anos de aterro.

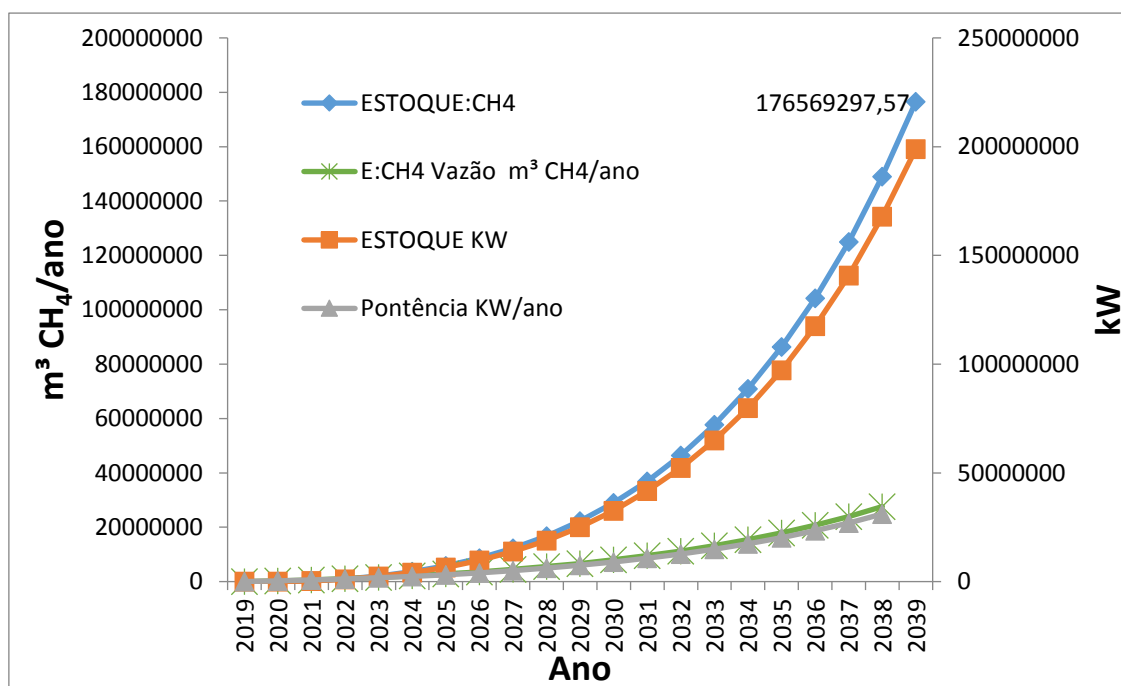


Figura 5: Conversão de CH<sub>4</sub> gerando potência.

Na Figura 8, verifica-se como ocorre a produção exponencial da geração anual de energia. Nota-se que, no primeiro ano o valor inicial era de 39,49 kWh/ano, aumentando para 4.074,35 kWh/ano em 2039, chegando a uma valor de geração em 20 anos de 22.709,09 kWh disponíveis.

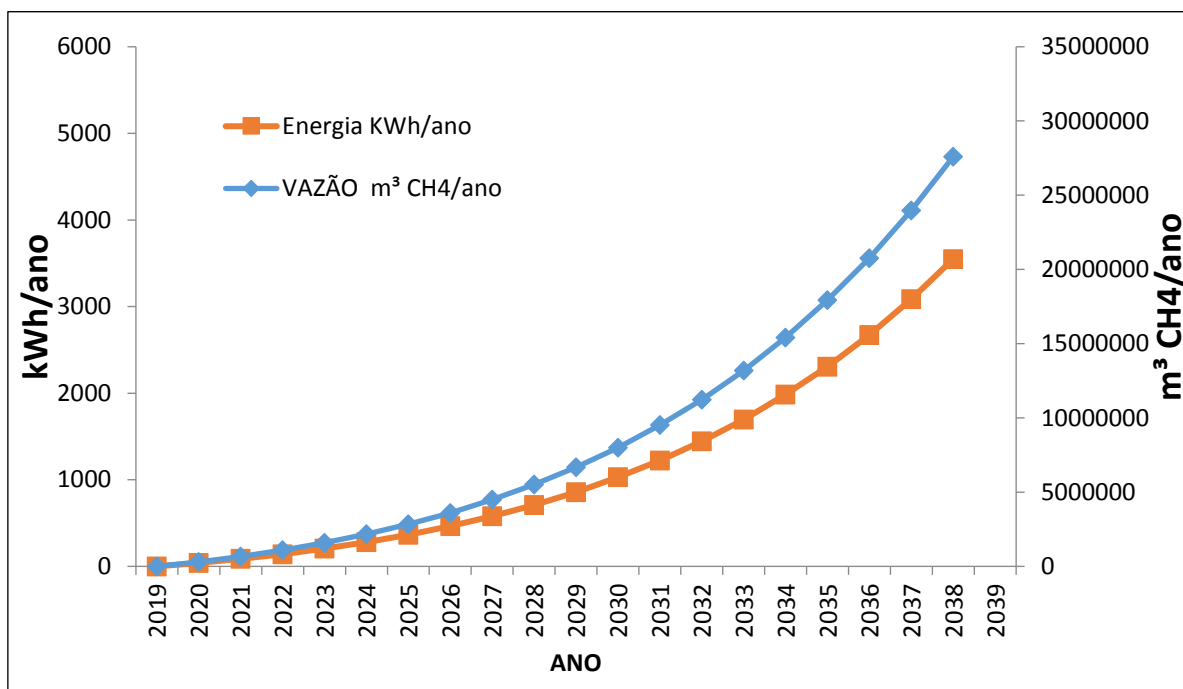


Figura 6: Conversão de CH<sub>4</sub> para energia elétrica.

Nos aterros, a quantidade de biogás produzido pode trazer além da autossuficiência energética, a geração de excedentes que quando comercializados podem agregar mais renda no gerenciamento de um aterro bem planejado. Para se obter um retorno ideal do investimento, é necessário que os aterros tenham a estrutura adequada para escoar o excedente de biogás que eles geram.

Levando em consideração os valores aqui apresentados de produção energética e o preço da energia elétrica para venda nas condições propostas para o modelo, cada m<sup>3</sup> de CH<sub>4</sub> produz 1,66 kWh, que entregarão um retorno líquido com a venda desta energia produzida pelo metano. Porém, segundo Goldemberg *et al.*, (2008), um sistema de geração de energia elétrica de motores Otto, com capacidade de 85 kW, tinha em 2008 um custo médio de R\$ 200.000,00 ou aproximadamente R\$ 320.000,00 em valores atualizados pela inflação IGP-DI do período 2008 – 2018.

Com esses resultados a conversão do gás metano do “lixão” de Porto Seguro – BA em energia elétrica demonstra ser insuficiente para obter um retorno financeiro imediato, segundo estudo do MMA 2004 o ideal para retorno satisfatório do investimento são de aterros que recebem RS de mais de 1 milhão de habitantes, no entanto a partir de 500 mil habitantes já é possível um potencial médio de geração de energia elétrica e sua viabilidade desde que atendam ao critérios de qualidade de drenagem do biogás que não é o caso do aterro atual. Pelas projeções apontadas na

pesquisa, o retorno do investimento ocorreria após 15 a 20 anos do início de sua instalação. Uma alternativa ao mesmo tempo ecológica e econômica seria o estabelecimento de um consórcio com outros municípios do entorno de Porto Seguro como sugerido pelo Consórcio de Desenvolvimento Sustentável da Costa do Descobrimento – CONDESC (2018) em seu Diagnóstico territorial dos resíduos sólidos dos municípios. Assim, seria possível compensar a construção e implantação de um aterro de maior porte e obter retorno do investimento de uma usina de biogás, projetando um depósito de resíduos sólidos de maior capacidade centralizando os custos de operação e restringindo a área de manejo (URBAN, 2016; BRASIL, 2010; NASCIMENTO et al. 2019).

### **Créditos de Carbono**

Por meio do Protocolo de Quioto, foi criado um mercado global de carbono com o objetivo de atingir as metas de redução de emissões. Graças a esse protocolo também foi criado um mercado acessível aos países que não possuem metas de redução de emissões por meio do desenvolvimento de projetos de MDL (Mecanismo de Desenvolvimento Limpo), o que levará às chamadas reduções certificadas de emissões (RCE) conhecidas popularmente com créditos de carbono, obtida por cada tonelada de CO<sub>2</sub> não emitidas, reduzida ou sequestrada. O RCE podem ser comercializados em um mercado próprio (CRUZ, 2012; LATTANZI *et al.*, 2019). De acordo com Nascimento et al. 2019 foram registrados 59 projetos do MDL visando à captação de biogás, onde 31 são voltados à geração de energia elétrica e biometano; 8 à queima do biogás em flare(s) enclausurado(s), com possibilidade futura de gerar energia elétrica ou biometano; e 20 somente à queima do biogás.

Dessa forma a Figura 7 apresenta uma quantidade de produção de metano em 20 anos de 126.564,87 toneladas métricas e uma vazão anual inicial de 220,10 t/CH<sub>4</sub>/ano. Ao final de 2039, de acordo com os dados obtidos através do modelo, houve uma vazão de 22.707,63 t/CH<sub>4</sub>/ano, teríamos então um montante de produção de 126.564,87 t/CH<sub>4</sub>. Isto representa um total de 102.010 toneladas de Carbono equivalente (tCO<sub>2e</sub>), ou seja, 102.010 créditos de carbono que podem ser convertidos em Redução Certificadas de Emissão – RCE, através de projetos que podem ser desenvolvidos para tal objetivo seguindo os parâmetro do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo – MDL.

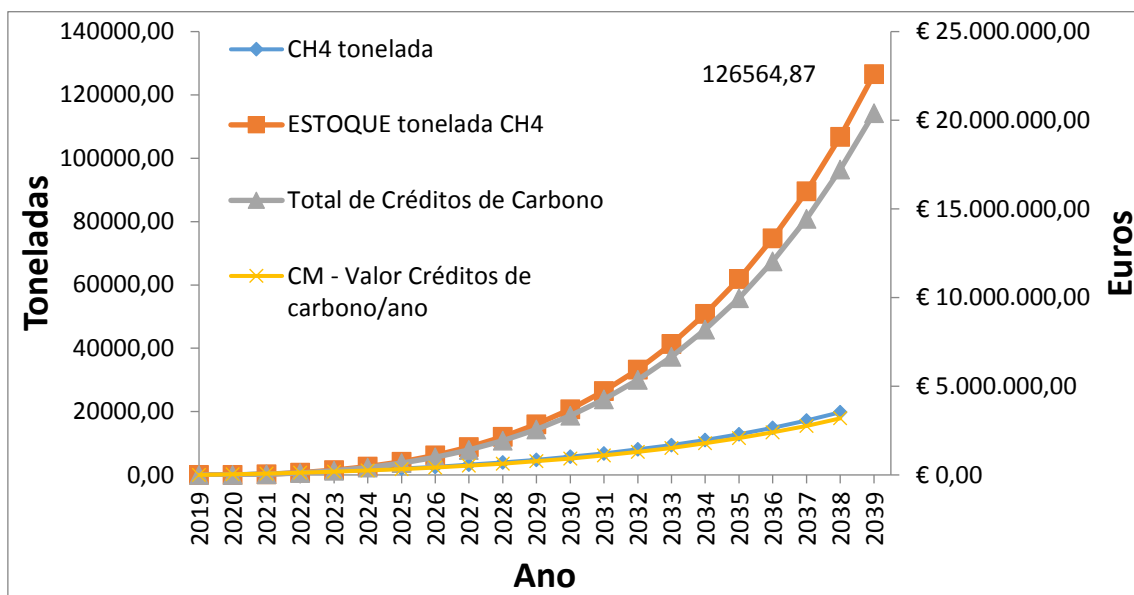


Figura 7: Créditos de Carbono.

Em vinte e um de outubro de 2019, a corretora Investing.com (2020) anunciou a abertura de valores de crédito de Crédito Carbono em € 25,73 euros. Foi constatado que, no período de abril de 2017 a junho de 2019, o valor do crédito de carbono aumentou de €4,57 para €27,95 ao longo desse período. Usando esses valores no modelo aqui apresentado, o valor de retorno sobre os Créditos de Carbono seria de €20.408.574,30 euros em 20 anos, o que apresenta um valor médio aproximado de mais de €1 milhão de euros por ano de retorno. Considerando o valor do Euro na data de 02/05/2020, com o câmbio de 1 euro no valor R\$6,09 reais, teríamos o retorno no valor total de R\$124.245.053,05 em 20 anos em vendas de créditos de carbono. Isso implica em um retorno de mais da metade do valor de implementação de um aterro sanitário (Tabela 4) só com os créditos de carbono.

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

Por meio dos estudos realizados, pode-se afirmar que o aproveitamento do biogás gerado no Lixão de Porto Seguro - BA tem potencial quantitativo para investimentos de geração e captação de biogás. Levando-se em consideração que a estimativa de emissão de metano para os próximos 20 anos, entende-se que a gestão dos resíduos sólidos pode ser benéfica tanto ambientalmente quanto economicamente, desde que seja adequado o local de deposição dos resíduos e implantadas tecnologias de captura desse gás do efeito estufa.

Dado o exposto, investimentos mais amplos como a de geração energética em conjunto com outros projetos de Mecanismo de Desenvolvimento Limpo, como a obtenção de créditos de carbono, são alternativas que devem ser pensados para o longo prazo, objetivando retorno para a operação, encerramento e realocação do aterro sanitário. Isso implica dizer que a venda de créditos de carbono, somadas à geração de energia do metano produzido pelo material orgânico torna o empreendimento rentável numa fração de duas vezes o seu custo, isto sem incluir a venda dos materiais recicláveis que são depositados e sem a devida destinação.

Os resultados produzidos por esta pesquisa permitiram compreender o potencial das emissões de biogás no Lixão de Porto Seguro, podendo ratificar projetos técnicos e ambientais para o aproveitamento energético do biogás, como a implantação de uma pequena matriz energética e do MDL. Sendo assim, necessita-se de estratégias no sentido de contornar os malefícios da emissão de gás metano em conversão benéfica, tanto ambientalmente quanto economicamente.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABETRE – Associação Brasileira de Empresas de Tratamento de Resíduos, FGV – Fundação Getúlio Vargas. **Estudo sobre os aspectos econômicos e financeiros da implantação e operação de aterros sanitários**. Rio de Janeiro: FGV, 2009.

ABNT, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR – 10007. **Amostragem de resíduos sólidos**. Rio de Janeiro, 2004.

ABRELPE - Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais. **Panorama de Resíduos Sólidos no Brasil 2018/2019** ABRELPE. Nov. 2019 Disponível em: < <http://abrelpe.org.br/panorama/> > Acessado em: 20-01-2020

BAHIA. Desafio do lixo: problemas, responsabilidades e perspectivas: Relatório 2006/2007 / **Ministério Público do Estado da Bahia**. Centro de Apoio Operacional às Promotorias de Justiça de Meio Ambiente - Salvador: Ministério Público, 2007. Disponível em:< [http://www.mpggo.mp.br/portalweb/hp/9/docs/rsudoutrina\\_18.pdf](http://www.mpggo.mp.br/portalweb/hp/9/docs/rsudoutrina_18.pdf) > acesso em 17 de mar. 2018.

BANDEIRA, M. da S. F. TAVARES, A. J. BANDEIRA M. L. S. de F. Avaliação dos planos, programas e projetos de resíduos sólidos do Plano de Desenvolvimento Diretor Urbano do município de Porto Seguro, Bahia - **Revista Eletrônica Multidisciplinar Pindorama do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Bahia** – IFBA Nº 01 – Ano I – Agosto/2010 – Disponível em: < [www.revistapindorama.ifba.edu.br](http://www.revistapindorama.ifba.edu.br) > acesso em 23 de mar. 2018.

BORBA, Silvia Mary Pereira. Análise de Modelos de Geração de Gases em Aterros Sanitários: Estudo de Caso. 2006. 134 f. Dissertação (Mestrado) - **Curso de Programas de Pós-graduação de Engenharia**, Coppe, UFRJ, Rio de Janeiro-RJ, 2006. Disponível em: <[http://www.getres.ufrj.br/pdf/BORBA\\_SMP\\_06\\_t\\_M\\_int.pdf](http://www.getres.ufrj.br/pdf/BORBA_SMP_06_t_M_int.pdf)>. Acesso em: 26 maio 2018.



BRASIL. Lei Federal nº 12.305 de 02 de agosto de 2010. **Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos**. Brasília, DF. Disponível em: < [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2007-2010/2010/lei/112305.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/112305.htm)>. Acesso em: 16 de abril de 2018.

BRITO FILHO, L. F. de. Estudo de gases em aterros de resíduos sólidos urbanos. **Dissertação de mestrado**, 149 f - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2005.

CAMPOS, Heliana Kátia Tavares. Renda e evolução da geração per capita de resíduos sólidos no Brasil. Eng. Sanit. Ambient., Rio de Janeiro, v. 17, n. 2, p. 171-180, jun. 2012. Disponível em <[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1413-41522012000200006&lng=pt&nrm=iso](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1413-41522012000200006&lng=pt&nrm=iso)>. acessos em 04 jul. 2020. <https://doi.org/10.1590/S1413-41522012000200006>.

CANDIANI, G.; MOREIRA, J. M. L. Avaliação dos parâmetros cinéticos da geração de metano em uma célula experimental de resíduos sólidos. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, [S.L.], v. 23, n. 3, p. 459-470, jun. 2018. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s1413-41522018162393>.

CATAPRETA, C. A. A; SIMÕES, G. F. Monitoramento da qualidade do biogás gerado em um aterro sanitário experimental. In: **XXV Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental**, Recife-PE, 2009.

CRUZ, Silvia Regina Stuchi. **Mercado de carbono em aterros sanitários como instrumento para a inovação em serviços públicos**. 2012. 192 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Política Científica e Tecnológica, Instituto de Geociências, Unicamp, Campinas, 2012. Disponível em: [http://www.socialcarbon.org/wp-content/uploads/2012/11/CruzSilviaReginaStuchi\\_M1.pdf](http://www.socialcarbon.org/wp-content/uploads/2012/11/CruzSilviaReginaStuchi_M1.pdf). Acesso em: 25 jun. 2020.

COELHO, S. T.; VELAZQUEZ, S. M. S. G.; SILVA, O. C. Geração de energia elétrica a partir do biogás proveniente do tratamento de esgoto. In: ENCONTRO DE ENERGIA NO MEIO RURAL, 6. 2006, Campinas. **Proceedings online...** Available from: <[http://www.proceedings.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=MSC0000000022006000100070&lng=en&nrm=abn](http://www.proceedings.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=MSC0000000022006000100070&lng=en&nrm=abn)>. Acesso: 23 Oct. 2019.

COELHO, T. C.; OLIVEIRA, R. M. S. de. Estimativa da produção teórica do metano gerado no aterro Sanitário de Palmas - TO. **Engenharia Ambiental** –Espírito Santo do Pinhal, v. 9, n. 1, p.177-189, jan. /mar, 2012.

CONDESC. CONSÓRCIO DE DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL DA COSTA DO DESCOBRIMENTO. **Diagnóstico territorial dos resíduos sólidos dos municípios pertencentes ao CONDESC**. 2018. Disponível em: <http://www.condesc.org/residuos/mobile>. Acesso em: 04 jun. 2020.

COSTA, L.E.B.; COSTA, S.K.; REGO, N.A.C.; SILVA JUNIOR, M.F. Gravimetria dos resíduos sólidos urbanos domiciliares e perfil socioeconômico no município de Salinas, Minas Gerais. **Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais**, Aquidabã, v.3, n.2, p.73-90, 2012. Escola Superior de Sustentabilidade. <http://dx.doi.org/10.6008/ess2179-6858.2012.002.0005>.

COSTANZA, R.; GOTTLIEB, S. Modelling ecological and economic systems with STELLA: Part II. **EcologicalModelling**, v. 112, n. 2–3, p. 81–84, 1998.

DAVIES, F. D.; STULP, S. DETERMINAÇÕES DE GÁS METANO (CH<sub>4</sub>) GERADO EM ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE EFLUENTES, COM AVALIAÇÃO DO PODER CALORÍFICO PARA QUEIMA EM CALDEIRA. **Revista Destaques Acadêmicos**, [S.l.], v. 8, n. 4, dez. 2016. ISSN 2176-3070. Disponível em: <<http://univates.br/revistas/index.php/destaques/article/view/1213>>. Acesso em: 23 out. 2019. doi:<http://dx.doi.org/10.22410/issn.2176-3070.v8i4a2016.1213>.

DIAS, D. M.; MARTINEZ, C. B.; BARROS, R. T. V.; LIBÂNEO, M. Modelo para estimativa da geração de resíduos sólidos domiciliares em centros urbanos a partir de variáveis socioeconômicas conjunturais. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, v. 17, n. 3, p. 325-332, 2012. Acesso em:

FNR - FACHAGENTUR NACHWACHSENDE ROHSTOFFE e. V. (FNR). Guia Prático do Biogás – Geração e utilização. 5ª edição, totalmente revista e atualizada, Publicado com o apoio do **Ministério da Nutrição, Agricultura e Defesa do Consumidor da Alemanha**, Gülzow, 2010.

FELICORI, T. de C. *et al.* Identificação de áreas adequadas para a construção de aterros sanitários e usinas de triagem e compostagem na mesorregião da Zona da Mata, Minas Gerais. **EngSanitAmbient**, v. 21, n. 3, p. 547-560, 2016.

GOMES, F. S. *et al.* Geração, coleta e impacto dos resíduos sólidos produzidos no carnaval de Recife. **HOLOS Environment**, v. 7, n. 2, p. 191-201, 2007.

GOLDEMBERG, J.; COELHO S.T.; PECORA V. Perspectivas da utilização de biogás como fonte de energia. in **Potência Brasil : gás natural, energia limpa para um futuro sustentável /** Organizadores: Omar L. de Barros Filho e Sylvia Bojunga. – Porto Alegre : Laser Press Comunicação, 2008. Disponível em: <<http://www.iee.usp.br/sites/default/files/biblioteca/producao/2008/Livros/goldembergperspectivas.pdf>> Acessado em 21/10/2019.

GRZEBIELUCKAS , C. CAMPOS, L. M. S. BORNIA, A. C. SELIG, P. M. Integrando o custo ambiental do metano (CH<sub>4</sub>) e os Créditos de Carbono (CERS) em análise de investimento agrícola, um estudo no Cerrado brasileiro. **XVII Congresso Brasileiro de Custos – Belo Horizonte - MG**, Brasil, 3 a 5 de novembro de 2010. Disponível em <<https://anaiscbc.emnuvens.com.br/anais/article/view/679>> Acessado em 20 out. 2019.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. População de Porto Seguro-BA. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/ba/porto-seguro/panorama>> acessado em 10 de setembro de 2019.

ICLEI – BRASIL. Manual para aproveitamento do biogás: volume um, aterros sanitários. **ICLEI - Governos Locais pela Sustentabilidade**, Secretariado para América Latina e Caribe, Escritório de projetos no Brasil, São Paulo, 2009.

INVESTING. **Crédito Carbono Futuros - Dez 19 (CFI2Z9)**: Dados derivados atuais. Moeda em EUR. 2019. 2007-2019 Fusion Media Limited. Disponível em: <<https://br.investing.com/commodities/carbon-emissions>>. Acesso em: 02 mai. 2020.

IPCC, Intergovernmental Panel on Climate Change. **Guia para inventários nacionais de gases de efeito estufa**. Módulo 6: Lixo. Volume 2: Livro de trabalho, 2006. Disponível em: <<http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/gl/invs6.html>>. Acesso em: 22 abr 2018.

LATTANZI, I. E; PRATA FILHO, D. A.; QUELHAS, O. G. 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. : estudo de caso do Aterro MTR Santa Maria Madalena, RJ, Brasil. **Sistemas & Gestão**, [s.l.], v. 14, n. 4, p. 483-491, 2019.

LIMA, Luiz Mário Queiroz. **Remediação de Lixões Municipais: Aplicações da Biotecnologia**. São Paulo: Hemus, 2005.

MORAES, E. Diagnóstico da gestão de resíduos sólidos urbanos de sete municípios da região metropolitana de Maringá, Paraná. 2011. 139 f. Maringá, 2011. Disponível em: <<http://www.peu.uem.br/Discertacoes/Eliene.pdf>>. Acesso em: 26 maio 2018.

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. **Eng. Sanit. Ambient.**, Rio de Janeiro , v. 24, n. 1, p. 143-155, Feb. 2019 . Available from <[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1413-41522019000100143&lng=en&nrm=iso](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1413-41522019000100143&lng=en&nrm=iso)>. access on 01 Jul. 2020. Epub Apr 01, 2019. <https://doi.org/10.1590/s1413-41522019171125>

PREFEITURA MUNICIPAL DE PORTO SEGURO. Plano Municipal de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos. 2017.

RAMOS, M. A B. ROCHA, A. J. D. ABRAM, M. B. Projeto Porto Seguro - Santa Cruz Cabrália: seleção de áreas para disposição de resíduos sólidos urbanos – Etapa I – Aplicação de critérios eliminatórios / Maria Angélica Barreto Ramos, Antônio José Dourado Rocha e Maísa Bastos Abram. – Salvador: CPRM, 2000. Disponível em: < <http://www.cprm.gov.br/> > acesso em 24 de mar. 2018.

ROSA, M.F. *et al.* **Processo agroindustrial: obtenção de pó de casca de côco verde**. Fortaleza: EMBRAPA, 2001 disponível em <[https://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:djnz5131xb8J:https://www.agencia.cnptia.embrapa.br/Repositorio/obtencaodepocascadecocoverde\\_000fdes48mh02wx5eo0a2ndxyqtwggf5.pdf+&cd=2&hl=pt-BR&ct=clnk&gl=br](https://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:djnz5131xb8J:https://www.agencia.cnptia.embrapa.br/Repositorio/obtencaodepocascadecocoverde_000fdes48mh02wx5eo0a2ndxyqtwggf5.pdf+&cd=2&hl=pt-BR&ct=clnk&gl=br)> acessado em 15 out de 2019.

SANTOS, M. M. ; ROMANEL, C.; VAN ELK, A. G. H. P. Análise da eficiência de modelos de decaimento de primeira ordem na previsão da emissão de gás de efeito estufa em aterros sanitários brasileiros. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, [s.l.], v. 22, n. 6, p.1151-1162, dez. 2017. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s1413-41522017156311>.

SEI – Superintendência de Estudos Econômicos e Sociais da Bahia. Mapas Estaduais Físico-ambientais - tipologias climáticas de Koppen e Thornthwaite&Matther, 1998. Disponível em <[https://www.sei.ba.gov.br/index.php?option=com\\_content&view=article&id=2669&Itemid=710](https://www.sei.ba.gov.br/index.php?option=com_content&view=article&id=2669&Itemid=710)> acesso em 30 de set. 2019.

SILVA, Cleber Gomes da. Acondicionamento e coleta de resíduos sólidos: um estudo sob a perspectiva dos prestadores de serviços turísticos da Praia do Atalaia-PA, **Revista Turismo - Visão e Ação - Eletrônica**, Vol. 16 - n. 1 - jan. - Abr. 2014. Disponível em: <<https://siaiap32.univali.br/seer/index.php/rtva/article/viewFile/5938/3232> >. Acessado em: 26 de maio de 2018.

URBAN, Rodrigo Custódio. Índice de adequação do gerenciamento de resíduos sólidos urbanos como ferramenta para o planejamento: aplicação no estado de são paulo. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, v. 21, n. 2, p. 367-377, 20 jun. 2016. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s1413-41522016140543>.

VITAL, Marcos Henrique Figueiredo; PINTO, Marco Aurélio Cabral; INGOUVILLE, Martin. **Estimativa de investimentos em aterros sanitários para atendimento de metas estabelecidas pela Política Nacional de Resíduos Sólidos entre 2015 e 2019**. Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social - BNDES/ BNDS Setorial nº 40. Rio de Janeiro, RJ, set de 2014. Disponível em: <<http://web.bndes.gov.br/bib/jspui/handle/1408/3041>>. Acesso em: 21 out. 2019.

ZANCHI, F. B.; SILVA, L. C.; CRUZ, R. S.; PEREIRA, R. M. Modelo Dinâmico de Emissão De Metano. 2020.

## CONCLUSÃO

Esta proposta buscou evidenciar por meio dos dois artigos a importância da elaboração de um modelo dinâmico voltado para quantificação da emissão do gás metano, visto que este é um problema mundial que tem sido amplamente debatido e retificado a redução das emissões com o acordo de Quioto, em 2015. Assim sendo, o primeiro artigo visou estimar a emissão de CH<sub>4</sub> para os próximos vinte. O modelo em questão foi elaborado a partir de variáveis fornecidas pelo software STELLA. A base para a sua elaboração se baseou, também, no Waste Model, do Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Entretanto, considerou-se, também, outras possibilidades, como, por exemplo, o cálculo de conversão energética e os valores dos créditos de carbono.

Sugeriu-se ainda um método de avaliação no Artigo I. E nesta proposta foi explorada a metodologia utilizada pela Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB) para validação. O referido modelo da CETESB teve como objetivo a validação da modelagem dinâmica do modelo proposto no Artigo I intitulado Modelo Dinâmico de Emissão de Metano-MDEM que também é voltado ao gerenciamento dos resíduos sólidos e previsão da emissão do metano. A ferramenta MDEM foi proposta em razão da necessidade de se pensar em estratégias para diminuir os impactos ambientais causados no meio ambiente. Nesse sentido, o modelo contribuiu para com o desenvolvimento econômico e sustentável do município em questão.

O Artigo II, por sua vez, discorreu na investigação sobre os lixões. A proposta nasceu em razão do fato de que o lixo é um dos maiores problemas ambientais quando se pensa nas emissões de gás metano (CH<sub>4</sub>). Ele é um dos principais gases do efeito estufa, o que torna a sua discussão indispensável e relevante. Tal aumento da emissão está relacionado com alguns fatores, como, por exemplo, o aumento da população, a geração de resíduos sólidos e com o aumento constante do nível de consumo. Assim sendo, o Artigo II se propôs a pensar em alternativas para a redução dessa emissão no município de Porto Seguro, localizado na Bahia. A fim de auxiliar os responsáveis nessa diminuição, a proposta apresentou uma modelagem dinâmica com base nas diretrizes do IPCC. Objetiva-se, com o modelo, que a cidade em questão reduza essa emissão nos próximos vinte anos.

O Artigo II apresentou, ainda, uma análise acerca da viabilidade energética e do retorno do crédito de carbono. Nesse sentido, para que fosse possível conhecer o percentual de resíduos orgânicos que foi utilizado pelo modelo foi feita uma caracterização dos resíduos sólidos produzidos na cidade de Porto Seguro, Bahia. Tal caracterização foi feita a partir da análise da composição gravimétrica e por meio do método de amostragem por quarteramento da produção de

resíduos sólidos do município em questão. Com a referida análise gravimétrica do lixão de Porto Seguro identificou-se que 44,51% dos resíduos são orgânicos; 15,56% são papel ou papelão; 3,11% são madeiras e 6,07% são tecidos e fraldas. Esses dados foram utilizados como parâmetros para a construção do modelo dinâmico criado a partir do *software* STELLA.

A partir da pesquisa pôde-se concluir, com base na projeção para os próximos vinte anos do município de Porto Seguro, situado na Bahia, que haverá um aumento da deposição de resíduos sólidos de 150t/dia para 215,5t/dia, o que acarretará, dessa forma, no total de 27.598.752,04 m<sup>3</sup>/CH<sub>4</sub> emissões, com potencial de geração de 22.709,09 kWh. Haverá, assim, oportunidades para a realização de projetos, como, por exemplo, o Mecanismo de Desenvolvimento Limpo e também há a possibilidade de acesso a títulos de créditos de carbono, o que acarretará retorno de R\$124.245.053,05 em 20 anos. Pode-se chegar a esses resultados a partir da comercialização do metano no mercado de carbono. Os resultados da pesquisa apontam que a execução de políticas públicas socioambientais é fundamental para que se diminua as emissões nos próximos vinte anos.