

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS
CENTRO DE TECNOLOGIA
ENGENHARIA AMBIENTAL E SANITÁRIA**

HENRIQUE CORREIA MORITZ

**MODELAGEM DE DISPERSÃO ATMOSFÉRICA DO METANO E DO DIÓXIDO DE
CARBONO A PARTIR DAS EMISSÕES DE BIOGÁS NO ATERRO SANITÁRIO DE
MACEIÓ/AL**

**MACEIÓ
2022**

HENRIQUE CORREIA MORITZ

**MODELAGEM DE DISPERSÃO ATMOSFÉRICA DO METANO E DO DIÓXIDO DE
CARBONO A PARTIR DAS EMISSÕES DE BIOGÁS NO ATERRO SANITÁRIO DE
MACEIÓ/AL**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao colegiado do curso de Engenharia Ambiental e Sanitária, do Centro de Tecnologia da Universidade Federal de Alagoas, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Ambiental e Sanitária.

Orientadora: Professora Dra. Karina Ribeiro Salomon.

MACEIÓ

2022

Catálogo na Fonte
Universidade Federal de Alagoas
Biblioteca Central
Divisão de Tratamento Técnico

Bibliotecário: Jorge Raimundo da Silva– CRB-4 – 1528

M862m Moritz, Henrique Correia.

Modelagem de dispersão atmosférica do metano e do dióxido de carbono a partir das emissões de biogás no aterro sanitário de Maceió/Al / Henrique Correia Moritz. – 2022.

33 f. : il.

Orientadora: Karina Ribeiro Salomon.

Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso Engenharia Ambiental e Sanitária : bacharelado) – Universidade Federal de Alagoas. Centro de Tecnologia, Maceió, 2022.

Bibliografia: f. 29-33.

1. Gases do efeito estufa – dispersão. 2. Biogás – aterros sanitários. 3. Gestão integrada de resíduos sólidos – Maceió (Al.). I. Título.

CDU: 628.472.3

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer primeiramente aos meus pais, assim como minha avó, por sempre me incentivarem durante a graduação e me darem o suporte necessário para seguir firme nos estudos.

Em segundo lugar gostaria de agradecer a professora Karina por aceitar ser minha orientadora, não apenas neste trabalho de conclusão, mas também durante os ciclos do PIBIC que participei. Um agradecimento especial ao professor Silvio de Oliveira por ter ajudado muito durante este trabalho, com todo seu conhecimento meteorológico e de uso do software Aermod.

Por fim, gostaria de agradecer aos meus amigos da graduação que sempre me ajudaram a estudar para as provas, a realizar trabalhos e dividir conquistas e frustrações ao longo do curso. Assim como minha namorada, Clara, que me deu grande suporte com seu conhecimento técnico da ABNT e que me escutou e me apoiou quando reclamei ou comemorei durante o processo de conclusão deste trabalho.

RESUMO

A busca por formas de conter as emissões de gases do efeito estufa (GEE) e reduzir os impactos causados pela concentração desses gases na atmosfera se mostra cada vez mais urgente. Neste cenário, diversos estudos apontam que as áreas de disposição de resíduos sólidos urbanos (RSU), como aterros sanitários, são grandes responsáveis pela emissão de GEE no mundo, através do biogás, gerado pela digestão anaeróbia microbiana, que contém essencialmente metano e dióxido de carbono. Desta forma, o presente trabalho busca analisar a dispersão desses gases na atmosfera, a partir das emissões de biogás do aterro sanitário de Maceió, Alagoas, utilizando modelagem de dispersão atmosférica. Para isso, foram coletados dados de vazão do biogás em drenos contidos nas células do aterro e dados meteorológicos da região, que foram necessários para que fosse gerada a simulação numérica de dispersão atmosférica dos gases com o software AERMOD. A partir dos resultados da modelagem foi possível visualizar a concentração máxima de metano e do dióxido de carbono, cerca de 0,166 g/m³ e 0,335 g/m³, respectivamente, dentro da área do aterro, e as concentrações na área urbana em seu entorno variando de 0,03 a 0,05 g/m³ de metano e 0,05 a 0,09 g/m³ de dióxido de carbono.

Palavras-chave: Dispersão atmosférica; AERMOD; Biogás; Aterros sanitários; Resíduos sólidos.

ABSTRACT

The search for ways to contain the emission of greenhouse gases (GHG) and reduce the impacts caused by the concentration of these gases in the atmosphere is becoming increasingly urgent. In this scenario, several studies indicate that the disposal areas of solid urban waste (MSW), such as landfills, are largely responsible for GHG emissions in the world, through biogas, generated by microbial anaerobic digestion, which contains mainly methane and carbon dioxide. Thus, this work seeks to analyze the dispersion of these gases in the atmosphere, from the biogas emissions of the landfill of Maceió, Alagoas, using modeling of atmospheric dispersion. To this end, data will be collected on biogas flow in drains contained in the landfill cells and meteorological data from the region, which will be necessary to generate the numerical simulation of atmospheric dispersion of the gases with the software AERMOD. From the results of modeling, it was possible to visualize the highest concentration of methane and carbon dioxide, about 0.166 g/m³ and 0.335 g/m³, respectively, within the landfill area, and the concentrations in the surrounding urban area ranging from 0.03 to 0.05 g/m³ of methane and 0.05 to 0.09 g/m³ of carbon dioxide.

Keywords: Atmospheric Dispersion; AERMOD; Biogas; Landfill; Solid Waste.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Ilustração do comportamento da pluma gaussiana.....	16
Figura 2 - Área da CTR de Maceió/AL.....	18
Figura 3 - Fluxograma das atividades desenvolvidas.....	18
Figura 4 - Grade topográfica tridimensional da região da CTR Maceió.....	21
Figura 5 - Rosa dos ventos gerada pelo AERMET para o período considerado.....	22
Figura 6 - Rosa dos ventos sobreposta na área da CTR de Maceió.....	23
Figura 7 - Pontos demarcados.....	24
Figura 8 - Mapa de dispersão de Metano, gerado pelo AERMOD, no período considerado.....	25
Figura 9 - Mapa de dispersão do dióxido de carbono, gerado pelo AERMOD, no período considerado.....	26
Figura 10 - Mapa de dispersão no momento de maior concentração do período analisado.....	26

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	9
1.1. Objetivo Geral	11
1.2. Objetivos Específicos	11
2. REFERENCIAL TEÓRICO	11
2.1. Emissão de Biogás em Aterros Sanitários	11
2.1.1 Processo de formação do biogás	12
2.2. Impactos causados pela emissão do biogás	13
2.3 Modelos de controle de dispersão de gases	14
2.3.1. AERMOD	15
3. METODOLOGIA	17
3.1. Procedimento metodológico	17
3.2. Levantamento das emissões dos gases	19
3.3. Levantamento de dados meteorológicos	20
3.4. Modelagem e mapeamento da dispersão dos gases	20
4. DISCUSSÕES E RESULTADOS	22
REFERÊNCIAS	28

1. INTRODUÇÃO

A partir da terceira fase da revolução industrial, com o avanço tecnológico após a segunda guerra mundial, as linhas de produção se expandiram e se diversificaram de tal forma que os resíduos gerados a partir da produção, do consumo e do descarte se tornaram insustentáveis. Ainda que exista um avanço em estudos e técnicas de mitigação de impactos ambientais ao redor do mundo, os resíduos sólidos urbanos (RSU) seguem sendo gerados aos montes, poluindo solos, oceanos e a atmosfera.

Tratando-se da poluição de solos e oceanos, os poluentes e os impactos gerados são visíveis, ocasionando maior sensibilização nos investimentos para reduzi-los e, de certa forma, menos dificuldades. Contudo, segundo a Organização Mundial de Saúde (OMS), as doenças de obstrução pulmonar crônica e infecções respiratórias inferiores estão entre as cinco principais causas de morte no mundo (WHO, 2020), tendo a poluição atmosférica como agravante.

O controle da poluição atmosférica no Brasil conta, principalmente, com a Resolução CONAMA Nº 491/2018, que dispõe sobre os padrões de qualidade do ar e a Resolução CONAMA Nº 436/2011, que estabelece os limites máximos de emissões de poluentes atmosféricos para fontes fixas, definidas pelo Ministério do Meio Ambiente como fontes de área relativamente limitada, possibilitando a avaliação direta na fonte, ou seja, indústrias de transformação, mineração e produção de energia (MMA, s/a).

Atividades agrícolas e agropecuárias, como o plantio de arroz ou a criação de gado bovino e suíno, assim como a disposição de resíduos sólidos em aterros sanitários geram grandes quantidades de metano e dióxido de carbono, dois dos principais gases de efeito estufa (GEE) e não possuem legislação federal quanto ao limite de emissão desses gases.

O Brasil possui um grande potencial de produção do biogás a partir de substratos da agropecuária, contudo, apenas 12% do volume total de biogás produzido no país vem das plantas de biogás que utilizam esses substratos. A maior parcela de produção de biogás vem das plantas que utilizam os RSU ou efluentes de estações de tratamento de esgoto, cerca de 76%, enquanto que os outros 12% vem de substratos da indústria (BNDES, 2021).

Ainda, de acordo com a Empresa de Pesquisa Energética (EPE), vinculada ao Ministério de Minas e Energias e criada a partir da Lei Federal Nº 10.847/2004, 51% do biogás produzido no Brasil vem de aterros sanitários (EPE, 2017).

A recuperação do gás de aterro para geração de energia, entretanto, não é uma realidade para a maioria dos aterros nos municípios brasileiros, incluindo a Central de Tratamento de Resíduos (CTR) de Maceió/AL, de forma que os gases de efeito estufa, que são emitidos a partir da disposição dos resíduos sólidos, são lançados na atmosfera sem que exista um controle da dispersão desses gases nas regiões próximas ao aterro.

Elmi *et al.* (2020) analisaram concentrações de metano e dióxido de carbono, comparando a dispersão dos poluentes gasosos nas quatro estações do ano, a partir de aterros localizados próximos a cidade de Kuwait, através do AERMOD, com dados meteorológicos do ano de 2008. As maiores concentrações de metano e dióxido de carbono corresponderam, respectivamente, a 0,266 g/m³ e 0,464 g/m³, no período de inverno, com metano se dispersando por até 10 km da fonte, e dióxido de carbono por até 25 km.

A utilização de modelos matemáticos para a simulação numérica da dispersão de poluentes na atmosfera tem se revelado como um instrumento fundamental no controle da poluição do ar. Portanto, o presente estudo buscou simular a dispersão de metano (CH₄) e dióxido de carbono (CO₂) emitidos na atmosfera pelo aterro sanitário de Maceió/AL, utilizando o modelo recomendado pela Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (USEPA), o AERMOD (AMS/EPA Regulatory Model) a fim de comparar os resultados com padrões indicados por estudos relacionados.

1.1. Objetivo Geral

Avaliar as emissões de Metano (CH₄) e Dióxido de Carbono (CO) provenientes da decomposição de resíduos sólidos no aterro sanitário de Maceió/AL.

1.2. Objetivos Específicos

- Caracterizar a área de estudo;
- Realizar o levantamento das emissões dos gases no aterro de Maceió;
- Modelar a dispersão dos gases gerados na CTR de Maceió aplicando um modelo de dispersão atmosférica;
- Analisar os problemas ambientais relacionados a dispersão dos poluentes atmosféricos.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

Por se tratar de um tema abrangente e de grande interesse, foram realizados estudos através de pesquisas, artigos e livros para contextualizar o intuito desta monografia.

2.1. Emissão de Biogás em Aterros Sanitários

A Política Nacional dos Resíduos Sólidos, estabelecida pela Lei Federal nº 12.305/2010, em seu artigo 3º, inciso VIII, determina como disposição final ambientalmente adequada a distribuição ordenada de rejeitos em aterros, buscando minimizar os impactos causados pela disposição de resíduos e o lixiviado gerado. Desde 2010 o município de Maceió, capital alagoana, conta com uma Central de tratamento que recebe toneladas de RSU diariamente, acondicionando-os e tratando o chorume por eles gerado, conforme determinado na Norma NBR 8.419/1992.

Do montante de resíduos que chegam ao aterro, a fração orgânica se mostra uma das mais importantes devido ao seu processo de biodegradação a partir de processos químicos desencadeados por ação microbiana, capaz de gerar o biogás, classificado como uma mistura de gases produzidos pela ação biológica na matéria orgânica em condições anaeróbias, composta principalmente de dióxido de carbono (CO₂) e metano (CH₄) em composições variáveis (ABNT, 1992). Se o biogás é

purificado, ou seja, constituído apenas por metano, ele pode ser utilizado para geração de energia (Karlsson, 2014), de forma que os impactos causados por sua emissão podem ser mitigados.

A partir do Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil do ano de 2020, constatou-se que 45,3% dos resíduos sólidos coletados no Brasil são compostos por matéria orgânica (ABRELPE, 2020), proporcionando, portanto, uma grande emissão de metano e dióxido de carbono, dois dos principais Gases do Efeito Estufa (GEE). De acordo com a Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (US EPA), os aterros sanitários são a terceira maior fonte de emissão de metano no país, contando com aproximadamente 14,5% das emissões, o equivalente a emissão de dióxido de carbono gerada pelo consumo de energia de 11,9 milhões de residências em um ano (USEPA, 2020). Apesar de não ser um gás significativamente gerado na maioria dos processos industriais, o metano possui um potencial de aquecimento 21 vezes maior que o de dióxido de carbono.

A concentração desses poluentes (que compõem o biogás, principalmente o metano) na atmosfera pode variar conforme reações químicas, fenômenos de transporte, fatores meteorológicos e a topografia (Lisboa, 2007) para uma dada região, o que pode dificultar o controle ou até mesmo a formulação de uma legislação federal que padronize os valores de concentração que possam ser emitidos e considerados nocivos à saúde do meio ambiente e da população. Ainda segundo Lisboa (2007), mesmo que as emissões de um dado poluente se mantenham constantes, a qualidade do ar pode piorar ou não, a depender das condições meteorológicas estarem favoráveis ou não para a dispersão do poluente.

Dada a relevância das emissões de GEE's como metano e dióxido de carbono, muitos estudos buscam estimar a quantidade desses gases que é emitida, usualmente em aterros sanitários, para, além de analisar os possíveis impactos à saúde e ao meio ambiente, dimensionar formas de recuperar o biogás produzido, aproveitando-o ao invés de lançá-lo na atmosfera. Conforme Talaiekhosani (2018), recuperar o metano é uma das melhores formas de prevenir a emissão de biogás.

2.1.1 Processo de formação do biogás

O metano é constantemente formado na natureza, desde que a matéria orgânica se decomponha sem a presença de oxigênio no ambiente (Karlsson, 2014). Nas condições necessárias, a decomposição da matéria orgânica, que irá

gerar o biogás, é dada pela ação microbiana através do processo de digestão anaeróbia, através de quatro etapas: hidrólise, fermentação, oxidação anaeróbia e a formação de metano.

Na hidrólise, os componentes mais complexos presentes na matéria orgânica são quebrados pela ação de bactérias, gerando compostos mais simples, como açúcares e aminoácidos, possibilitando que os microrganismos absorvam o material orgânico.

Durante a fermentação ocorrem reações químicas que formam ácidos orgânicos (como o acético, butírico e láctico), álcoois, amoníaco, hidrogênio e dióxido de carbono. Os produtos desta etapa dependem do tipo do material orgânico inserido no processo, dos microrganismos disponíveis e de fatores ambientais e os compostos simplificados na hidrólise seguem sendo quebrados em moléculas menores.

Também chamada de acetogênese, na fase da oxidação anaeróbia ocorre a conversão dos materiais simplificados nas fases anteriores em ácido acético, hidrogênio e dióxido de carbono, através das bactérias acetogênicas. Como as bactérias acetogênicas não resistem a grandes quantidades de hidrogênio, bactérias metanogênicas entram no processo (Karlsson, 2014).

Na etapa de formação do metano, a metanogênese, tem-se o metano como produto final, a partir da descarboxilação do ácido acético e da redução do CO_2 com o H_2 .

2.2. Impactos causados pela emissão do biogás

Fan Fei (2019) estimou o potencial energético do biogás gerado em aterros na China entre os anos de 1990 e 2020, concluindo que o volume de biogás disponível para ser utilizado em 2020 correspondia a 3,30 bilhões N m^3 , com capacidade de produção de 7,39 bilhões kWh de energia elétrica ou 1,70 bilhões N m^3 de gás natural, o equivalente a 85,5% do consumo de energia ou 25,3% do consumo de gás natural do setor de transporte no ano de 2014.

Em Delhi, capital da Índia, um dos países que mais contribuem para a emissão de metano a partir de aterros, foi estimado no ano de 2015 que o valor de eletricidade acumulada (kWh) pelos três aterros analisados equivaleram a 182,76 milhões kWh, 80,49 milhões kWh e 162,31 milhões kWh, de forma que 8 a 18

residências domésticas poderiam utilizar energia elétrica gerada pelo metano recuperado durante todo o ano de 2015 (Gosh *et al.*, 2019).

Piñas *et al.* (2016) estimou o potencial de geração de energia para o aterro sanitário de Três Corações, no estado de Minas Gerais, considerando os modelos LandGem (EPA) e Biogás (CETESB) para prever a produção de metano ao longo dos 20 anos de vida útil do aterro. Para o modelo LandGem, calculou-se 26.075.960 m³ de biogás acumulado e 27.476.360 m³ pelo modelo Biogás, de forma que equivalem a, respectivamente, 128,68 GWh e 141,31 GWh de energia acumulada.

Em 17 de março de 2022 foi inaugurada a primeira usina de biogás no Estado de Alagoas, no município de Pilar, e conta com uma capacidade de produção de 8,5 GWh. A CTR de Maceió, objeto deste estudo, entretanto, ainda não conta com um sistema de aproveitamento do biogás emitido na biodegradação dos componentes orgânicos nela depositados. Todo o biogás gerado no aterro sanitário de Maceió é lançado na atmosfera através de "flares", equipamento responsável pela queima do biogás, convertendo o metano em dióxido de carbono ou gás carbônico, através da combustão, reduzindo minimamente os impactos.

Apesar de o metano ter um excelente potencial energético, quando o biogás não é recuperado, a concentração de CH₄ e CO₂ que se dispersam pela atmosfera podem causar sérios impactos. Além do forte odor e da degradação de plantas, o CO₂, por ser mais denso que o ar, pode aderir ao solo e às águas subterrâneas, enquanto que o CH₄, com seu alto potencial inflamável, pode ocasionar fogo em concentrações entre 5% e 15% (Talaiekhosani *et al.*, 2016).

2.3 Modelos de controle de dispersão de gases

No âmbito de buscar avaliar os impactos ambientais e à saúde da população, ocasionados por fontes de emissão de gases, os modelos de dispersão atmosférica se mostram ser as melhores alternativas. Conforme indicado por Martins *et al.* (2015), os modelos de dispersão de poluentes atmosféricos se utilizam de equações matemáticas para indicar a dispersão e os processos químicos e físicos que decorrem devido à pluma gasosa, emitida por uma determinada fonte, na atmosfera. Além de equações matemáticas, as características meteorológicas, e do relevo da região são de grande importância para os modelos de dispersão.

Em 2017, foi realizada uma revisão do guia de modelos de análise da qualidade do ar pela Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (US EPA),

indicando quais modelos são recomendados e quais devem ser descartados. Modelos como CALINE 3, normalmente utilizado para avaliar o impacto de fontes móveis em relevo não complexo, e CALPUFF, utilizado para análise da dispersão em grandes distâncias, com relevo relativamente complexo, deixaram de ser recomendados pela EPA.

Quanto ao CALINE 3, a EPA recomenda a substituição pelo AERMOD, devido às melhorias nele apresentadas, incluindo situações de análise mais diversificadas, enquanto que o CALPUFF deixa de ser um modelo recomendado por não considerarem a necessidade de um modelo que avalie a dispersão em grandes distâncias, além de 50 km (EPA, 2017).

Os modelos recomendados para análise da dispersão de poluentes atmosféricos pelo guia da EPA correspondem ao AERMOD, que pode ser utilizado para uma grande variedade de fontes; ao CTDM PLUS, utilizado para regiões de relevo complexo em condições estáveis; e ao OCD, utilizado para avaliar o impacto de fontes de emissões no mar (offshore) sobre a qualidade do ar de regiões costeiras (EPA, 2017).

2.3.1. AERMOD

Conforme supracitado, modelos de dispersão atmosférica se utilizam de equações matemáticas para calcular a concentração dos gases no espaço a partir de uma fonte emissora. O modelo da pluma gaussiana, é o mais utilizado para análise da dispersão de gases, sendo capaz de prever a distribuição estatística da concentração do poluente em torno da linha central da pluma (Tan, 2014). A equação 1 apresenta como as concentrações são calculadas a partir do modelo, enquanto que a figura 1 indica o comportamento da pluma gaussiana.

$$c(x, y, z) = \frac{Q}{2\pi \bar{u} \sigma_y \sigma_z} \exp\left(-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right) \times \left[\exp\left(-\frac{(z-H)^2}{2\sigma_z^2}\right) + \alpha \exp\left(-\frac{(z+H)^2}{2\sigma_z^2}\right) \right] \quad \text{Eq. 1}$$

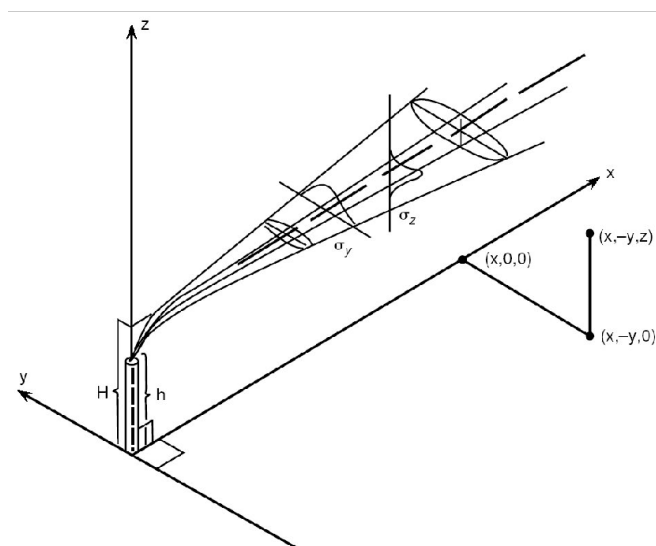
Onde:

- C (x, y, z) é a concentração do poluente a jusante da fonte no ponto (x, y, z);
- X é a distância horizontal da fonte;
- Y é a distância horizontal perpendicular ao eixo central da pluma;

- Z é a altura do solo;
- Q é a vazão mássica de emissão;
- u é a velocidade média do vento;
- H é a altura efetiva da fonte;
- α é o coeficiente de reflexão;
- σ_y é o coeficiente de dispersão lateral;
- σ_z é o coeficiente de dispersão vertical

Vale ressaltar que estes coeficientes são dependentes da estrutura turbulenta da atmosfera (Moraes, 2004). Um dos softwares que se utilizam do modelo da pluma gaussiana é o AERMOD View, que será utilizado neste estudo.

Figura 1 - Ilustração do comportamento da pluma gaussiana



A USEPA classifica o AERMOD como um modelo de pluma de estado estacionário que determina a dispersão do ar baseado na estrutura de turbulência da camada limite do planeta e em conceitos de escala, incluindo o tratamento de fontes superficiais e elevadas e terrenos simples ou complexos (USEPA, 2021). As fontes de emissão abordadas no modelo podem ser de ponto, área ou volume, considerando processamento horário dos dados meteorológicos para estimar concentrações, tornando-o adequado para analisar a emissão fugitiva dos gases do aterro.

Em tempo, cabe ressaltar que a empresa canadense *Lakes Environmental Software* tornou o modelo amigável através do incremento da interface com sistema Windows, que passou a se denominar ISC-AERMODView, version 11.0.1 (Thé, 2022), utilizada no presente estudo.

Um estudo realizado por Perry *et al.* (2005), utilizou 17 bancos de dados, dos quais 10 não consideravam a influência de prédios na dispersão dos gases e 7 estritamente focados nesta influência de prédios, buscando avaliar a performance e a qualidade dos dados obtidas pelo AERMOD.

Para os casos em que a influência de prédios foi desconsiderada, o modelo obteve excelentes resultados, enquanto que para os casos em que se considerou a influência dos prédios foram obtidos resultados interessantes com algumas variabilidades, porém já esperadas devido ao comportamento meteorológico variar conforme a geometria e disposição dos prédios, de forma que o AERMOD se mostra superior em comparação a outros modelos, como o também conhecido ISCST3.

Hanna *et al.* (2001) realizaram um estudo com 5 dados de entrada, sendo eles uma refinaria no sudeste do Texas (EUA), um campo aberto em uma área arborizada na Carolina do Norte (EUA), uma usina elétrica em região agrícola, relativamente plana em Illinois (EUA), uma usina elétrica em uma área urbana em Indianápolis (EUA) e uma usina elétrica em região rural e montanhosa em Nova York (EUA). O estudo comparou os modelos ISC3, ADMS e AERMOD, utilizando os mesmos dados de entrada e concluiu que os modelos AERMOD e ADMS apresentam performances similares, mas bem melhores que o ISC3.

A revisão desses dois estudos é importante para demonstrar a qualidade dos dados obtidos pelo AERMOD, software utilizado nesta monografia.

3. METODOLOGIA

3.1. Procedimento metodológico

Para a realização da análise das emissões dos gases que compõem o biogás produzido no aterro sanitário de Maceió foram utilizados os dados do artigo “Geração quantitativa e qualitativa da emissão de biogás no aterro sanitário de Maceió”, realizado por Silva e companhia (2020). A área de estudo está localizada nas coordenadas 9°33’44” Sul e 35°41’38” Oeste, com área estimada em 430.928

m², a partir de traçado de poligonal utilizando o Google Earth Pro, conforme figura 2, no bairro do Benedito Bentes.

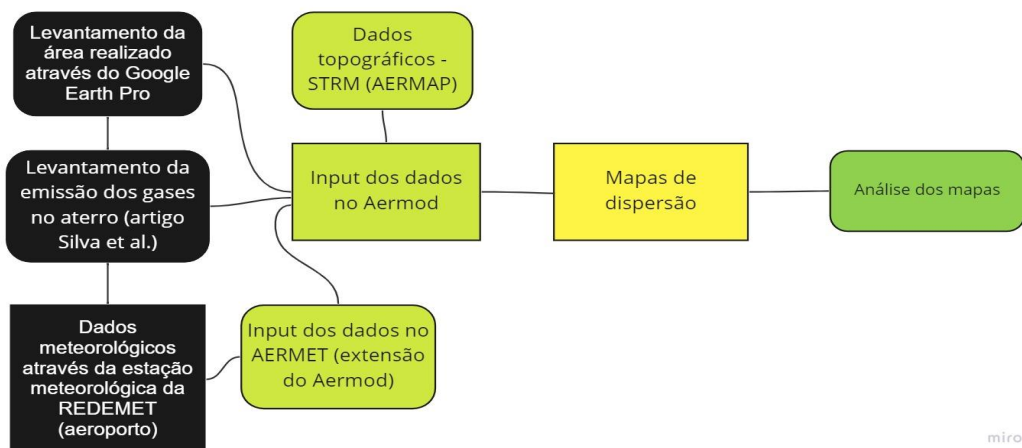
Figura 2: área da CTR de Maceió/AL



Fonte: Google Earth Pro elaborado pelo autor (2022)

A partir dos dados coletados e da caracterização da área de estudo serão feitos o levantamento das emissões de gases do efeito estufa; a modelagem da dispersão atmosférica; o mapeamento das emissões fugitivas e, posteriormente, a análise a respeito do mapeamento encontrado, conforme indicado pelo fluxograma contido na Figura 3.

Figura 3: Fluxograma das atividades desenvolvidas



Fonte: autor (2022)

3.2. Levantamento das emissões dos gases

Quanto às taxas de emissão dos gases analisados, foi utilizado como referência o artigo publicado por Silva et al (2020). Para a medição do biogás os pesquisadores utilizaram: analisador de gás portátil, da marca Biogás 5000, para medição de temperatura, pressão e composição do biogás - metano (CH_4), dióxido de carbono (CO_2), oxigênio (O_2) e sulfeto de hidrogênio (H_2S); e anemômetro, da marca Geotech, utilizado para medir a vazão do biogás nos drenos verticais. O biogás coletado foi analisado por meio da Cromatografia Gasosa (GC), modelo Clarus 580 GC - ARNL5840 modificado, marca PerkinElmer, equipado com Detector por Condutividade Térmica (TCD) para leitura de CH_4 , CO_2 , H_2 , O_2 e N_2 e Detector Fotométrico de Chama (FPD) para identificação de H_2S .

As colunas utilizadas no ensaio foram empacotadas (Hayesep e Peneira Molecular), o gás de arraste utilizado foi argônio e o gás de combustão para o FPD foi o hidrogênio, a temperatura do forno foi de 60°C e as temperaturas dos detectores foram 250°C para o TCD e 325°C para o FPD. O software utilizado foi o Total Chrom & Int. LINK.

A leitura da vazão do biogás foi realizada por procedimento adaptativo, utilizando-se um tubo de PVC 100 mm, de 1m de comprimento e diâmetro 9,7 cm (área de seção de passagem do fluido), com um furo, introduzindo-se no dreno de gás (Silva et al., 2020). O procedimento foi realizado em 9 drenos e a vazão volumétrica encontrada foi dada em Nm^3/h , de forma que foi necessária a conversão para m^3/h devido ao formato de entrada do dado no AERMOD.

Para a análise de dispersão de metano e dióxido de carbono, neste estudo, foram desconsideradas as composições dos outros gases presentes no biogás, devido à baixa concentração dos mesmos, mas que não deixam de possuir sua relevância, como por exemplo o Sulfeto de Hidrogênio (H_2S), responsável pelo odor desagradável presente no biogás. Também foi feita a consideração de que a emissão média dos 9 drenos analisados se equivale aos 130 drenos (Silva et al., 2020) presentes no aterro. Além disso, a taxa de emissão que deve ser utilizada como dado de entrada no software deve ser dada em g/s, de forma que foram

multiplicadas as vazões volumétricas parciais dos gases por suas densidades, sendo 0,717 kg/m³ para o metano e 1,977 kg/m³ para o dióxido de carbono.

3.3. Levantamento de dados meteorológicos

Para que a modelagem da dispersão atmosférica dos gases possa ser realizada, foi necessário o uso de dados meteorológicos horários, composto dos parâmetros: cobertura de nuvens, temperatura de bulbo seco, umidade relativa, pressão atmosférica na estação, direção e velocidade do vento, precipitação e radiação solar global. Os dados foram coletados na estação meteorológica do Aeroporto Internacional Zumbi dos Palmares, pertencente à REDEMET da aeronáutica, localizada a uma distância de 12,5 km do aterro sanitário de Maceió. Foram utilizados dois anos de dados referentes ao período de 2020 e 2021, que foram processados por (Oliveira, 2022) com o pré-processador meteorológico Lakes-AERMET (Thé, 2022).

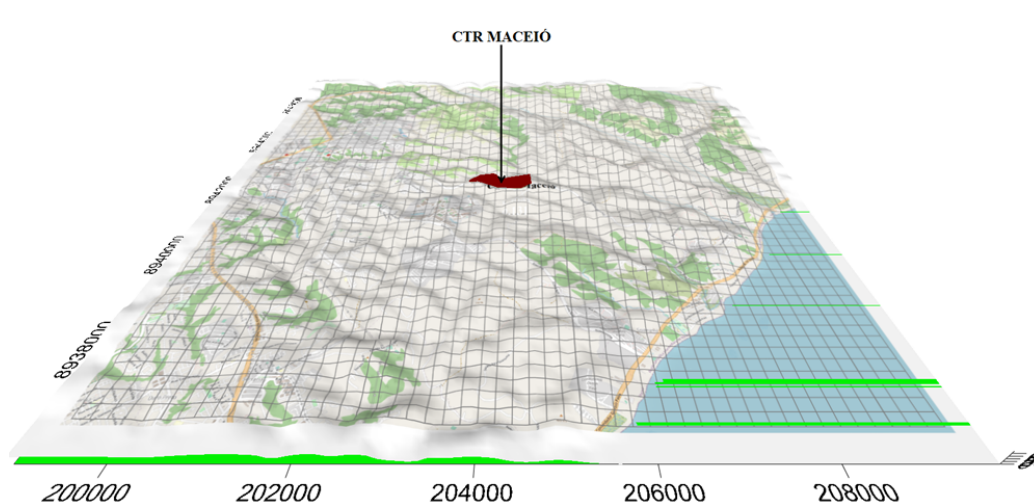
3.4. Modelagem e mapeamento da dispersão dos gases

Nessa etapa foi utilizado o Software AERMOD View versão 11.0.1., com os dados meteorológicos processados com o pré-processador meteorológico AERMET View, para produzir os arquivos com extensão *.SFC e *.PFL para entrada no modelo. Após o processamento dos dados utilizou-se o algoritmo WRPLOT (Thé, 2022) para o processamento estatístico dos dados para produzir o gráfico da rosa dos ventos sobre o aterro para visualizar a tendência do fluxo do vento em relação ao transporte da pluma dos poluentes, através das direções predominantes do vento na região. O arquivo de dados deve ser preenchido com 8.760 horas por ano, sem falhas, caso contrário o software não será capaz de modelar e gerar a distribuição espacial das concentrações dos poluentes sobre uma grade definida. Considerando o clima tropical de Maceió, o software foi configurado para o modo climático verão para todo o ano, tendo em vista a pequena variação ao longo das quatro estações do ano.

Para a aplicação do modelo foi definida uma grade (grid), cuja área foi definida por dimensões de 8 km x 4 km, correspondente a 32 km², para o modelo realizar os cálculos das concentrações dos gases sobre 861 quadrículos de 200 metros de lado cada, conforme mostra a Figura 4. Em seguida, foi realizado o levantamento da topografia da região sobre essa grade a partir do link do sistema

SRTM1/SRTM3 - Shuttle Radar Topography Mission terrain data files, disponibilizado no sistema americano de topografia global USGS (<http://www.webgis.com/> e <ftp://e0srp01u.ecs.nasa.gov/srtm/>)⁴).

Figura 4 - Grade topográfica tridimensional da região da CTR Maceió



Fonte: AERMOD, elaborado pelo autor (2022)

Feita a consideração de que todos os flares presentes no aterro estejam emitindo a mesma quantidade de biogás que a média de emissão estimada no artigo, o valor da taxa de emissão dos gases será inserido no AERMOD, considerando-se a área, de forma que o valor de entrada no software será dado em gramas por segundo por metro quadrado (g/s.m^2). Normalmente o AERMOD é utilizado para a modelagem da dispersão de gases de chaminés que contenham a pluma gasosa, cinza, de forma que se faz necessário determinar a localização da chaminé, seu diâmetro, sua altura e a taxa de emissão, porém, para gases incolores, como o metano e o dióxido de carbono emitidos pelos flares, é necessário que a dispersão seja modelada considerando a taxa que sai de toda a área emissora, nesse caso a área do aterro.

Após inseridos todos os dados necessários, o programa será capaz de gerar o modelo esperado, apresentando a concentração dos gases ao longo da área delimitada, indicando o ponto de concentração máxima, possibilitando a análise da dispersão dos gases considerados. Considerando os dados meteorológicos de 01 de janeiro de 2020 a 31 de dezembro de 2021, o mapa de dispersão gerado pelo AERMOD irá corresponder ao dia de maior concentração ao longo do período

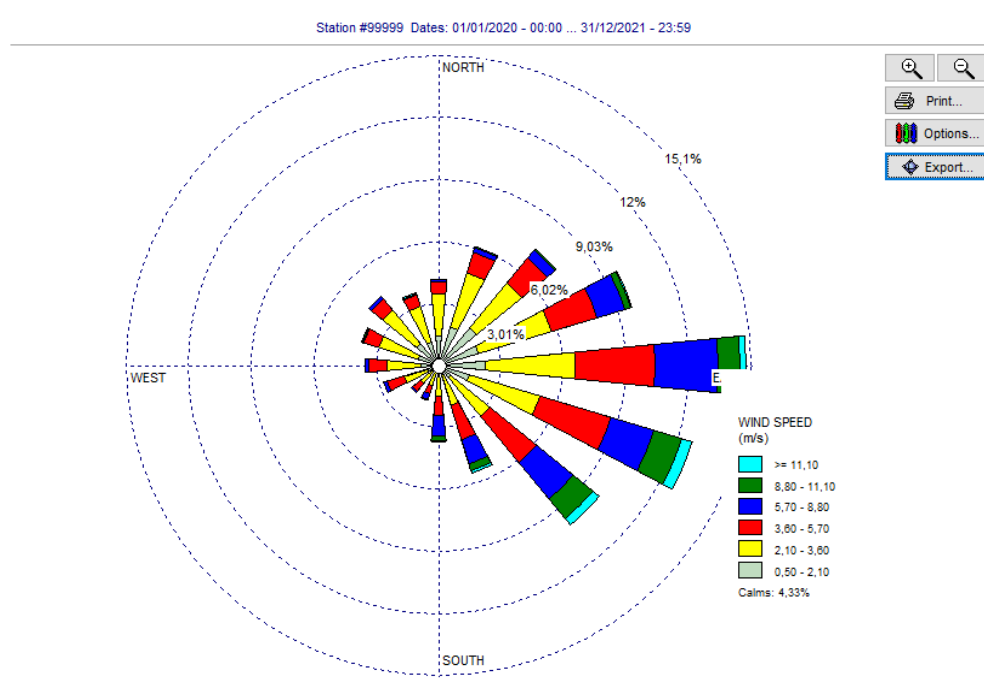
analisado. Cabe ressaltar que é possível analisar a dispersão horária através da pluma de animação, também gerada pelo software.

Concentrações em volume acima de 6% de CO₂ no ambiente podem causar dores de cabeça, palpitações e dificuldade de respirar (HPA, 2022), enquanto que a concentração de CH₄, como citado anteriormente, entre 5% e 15% possui potencial inflamável. Ainda que a concentração desses gases em áreas abertas normalmente se encontre abaixo desses valores, a verificação a partir do modelo gerado é importante para garantir que os funcionários do aterro não estejam sofrendo esses possíveis impactos.

4. DISCUSSÕES E RESULTADOS

A partir da rosa dos ventos gerada pelo AERMET é indicada uma predominância do vento nas direções nordeste, leste e sudeste, com velocidade variando de 2 m/s a 11 m/s, conforme Figura 5.

Figura 5 - Rosa dos ventos gerada pelo AERMET para o período considerado

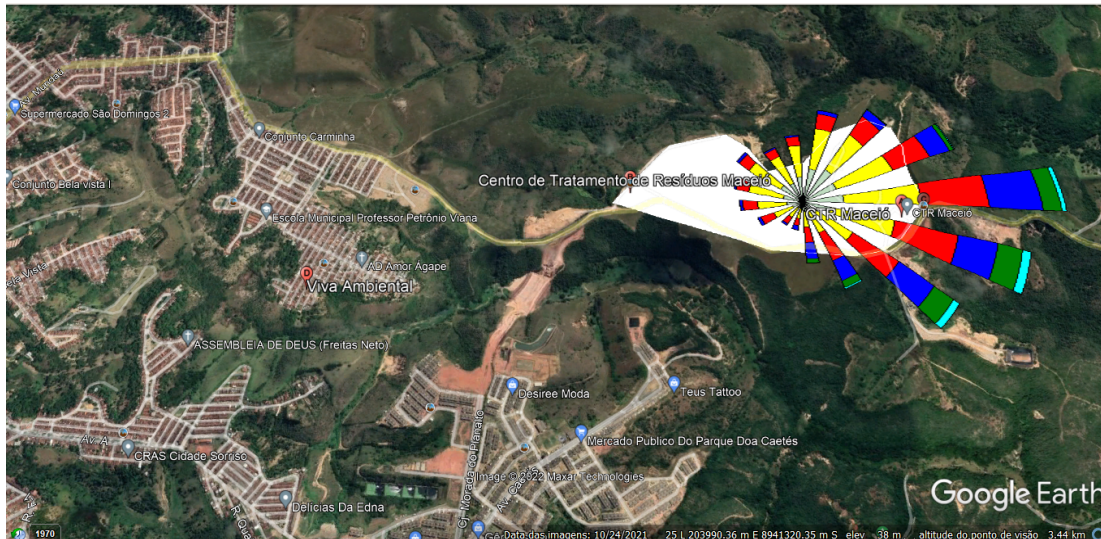


Fonte: AERMET elaborado pelo autor (2022)

Sabendo-se que a direção do vento corresponde ao seu ponto cardeal, ou seja, o vento de leste está soprando do leste para o oeste e assim por diante. A partir da Figura 6 é possível destacar que durante a maior parte do tempo o vento

sopra do aterro para a área urbana do bairro do Benedito Bentes, de forma que contribui para que os gases sejam dispersos nesta região.

Figura 6 - Rosa dos ventos sobreposta na área da CTR de Maceió



Fonte: Google Earth Pro, elaborado pelo autor (2022)

Quanto à emissão dos gases, os resultados apresentados no artigo totalizaram uma vazão média de Biogás por dreno de 13,44 Nm³/h, com uma composição de 56,86% de metano (CH₄) e 41,72% de dióxido de carbono (CO₂). Para encontrar a vazão em m³/h foi considerada uma Temperatura do gás na saída do dreno de 42°C e pressão atmosférica de 1,01325 Bar. Ao converter a vazão para m³/h, foi encontrada uma vazão média de biogás por dreno de 15,3 m³/h, de forma que as vazões médias por dreno de CH₄ e CO₂ correspondem, respectivamente, a 8,7 m³/h e 6,4 m³/h.

Utilizando a densidade dos gases foram encontradas as vazões mássicas de CH₄ e CO₂ em g/s, equivalentes a, respectivamente, 1,73 g/s e 3,5 g/s por dreno. Considerando que o aterro possui 130 drenos, a vazão mássica total estimada corresponde a 225 g/s de metano (CH₄) e 455 g/s de dióxido de carbono (CO₂).

Além do ponto de maior concentração dos gases no período analisado, foram selecionados quatro pontos na região próxima ao aterro, distando de 1 a 2,5 quilômetros, conforme Figura 7, no bairro do Benedito Bentes, para analisar a concentração máxima dos gases nesses pontos. Os pontos correspondem à Assembléia de Deus (Freitas Neto), a Escola Municipal Professor Petrônio Viana, a

Unidade de Saúde Professor Didimo Otto Kummer e a Reserva Natural Aldeia Verde. Nestes pontos, a maior concentração de metano variou de 32233,35 mg/m³ a 43134,12 mg/m³, enquanto que a maior concentração de dióxido de carbono variou de 65183 mg/m³ a 67892,62 ug/m³.

Figura 7 - Pontos demarcados



Fonte: Google Earth Pro, elaborado pelo autor (2022)

O ponto de concentração mais baixa foi a Reserva Natural Aldeia Verde, e o de concentração mais alta correspondeu a Escola Municipal Professor Petrônio Viana. Os dias de maior concentração variaram entre abril e julho do ano de 2020 entre 20h e 04h, conforme indicado na Tabela 1.

Tabela 1 - Maior concentração dos gases nos pontos destacados

Local	Dia de maior concentração	Horário de maior concentração	Maior concentração de CH ₄ (mg/m ³)	Maior concentração de CO ₂ (mg/m ³)
Assamblea de Deus	08/04/2020	01 hora	33573,27	67892,62
Escola Municipal	03/06/2020	21 horas	43134,12	87226,77
Unidade de Saúde	11/04/2020	20 horas	41205,42	83326,52
Aldeia Verde	21/07/2020	24 horas	32233,35	65183

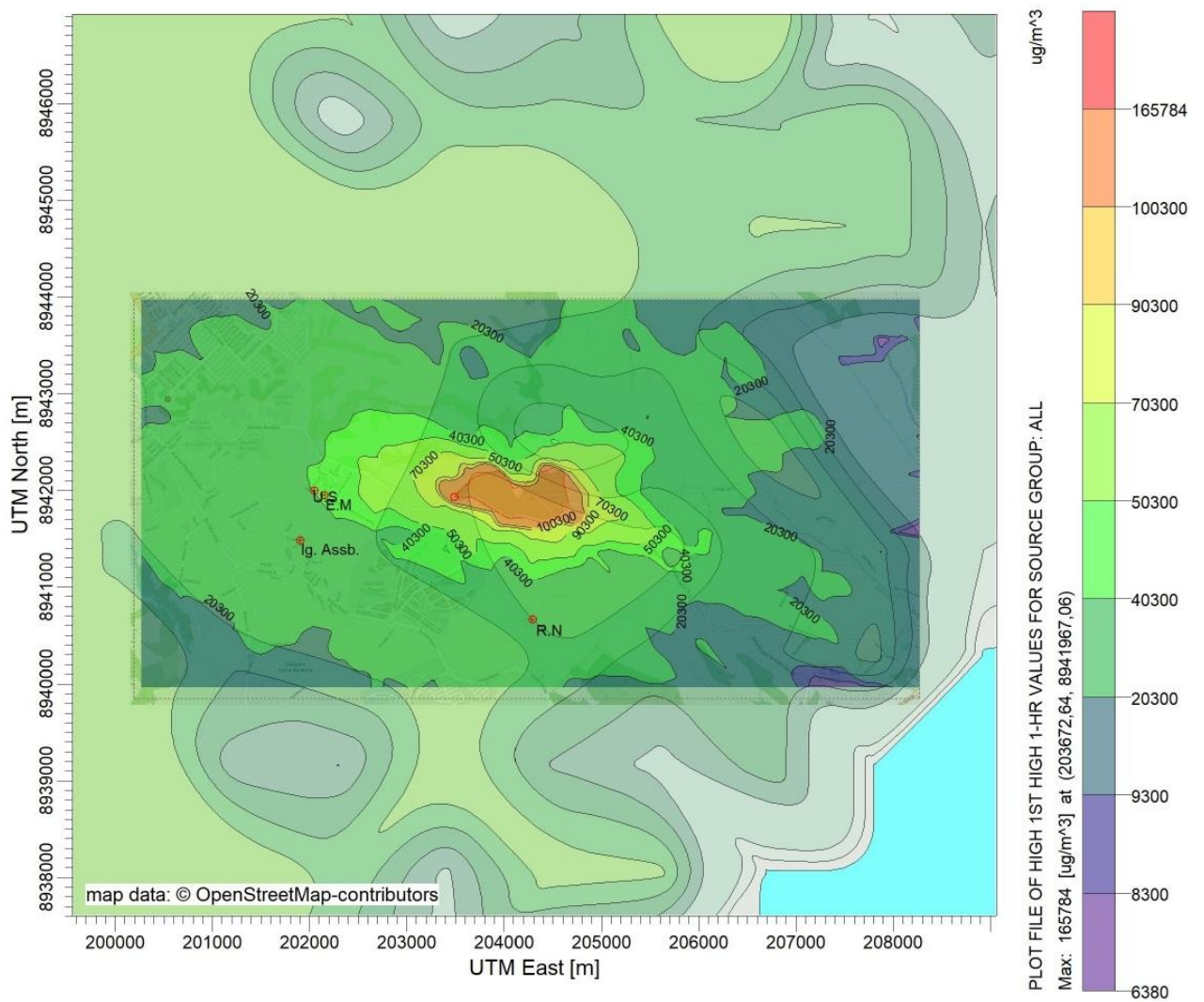
Fonte: autor (2022)

O ponto de maior concentração, conforme esperado, se encontra dentro da área do aterro, no dia 29/08/2020 às 03 horas. A maior concentração de metano pelos dados do artigo foi de 165.783,83 mg/m³, enquanto que a maior concentração de dióxido de carbono foi de 335.251,72 mg/m³. Os mapas de dispersão do período avaliado podem ser visualizados a partir das figuras 8 e 9. Além disso, a figura 10 apresenta o mapa de dispersão no dia e no horário de maior concentração, supracitado, obtido através da animação da pluma.

A partir dos mapas gerados pelo software é possível indicar a presença constante desses gases na área urbana do bairro do Benedito Bentes, mesmo que em concentrações baixas.

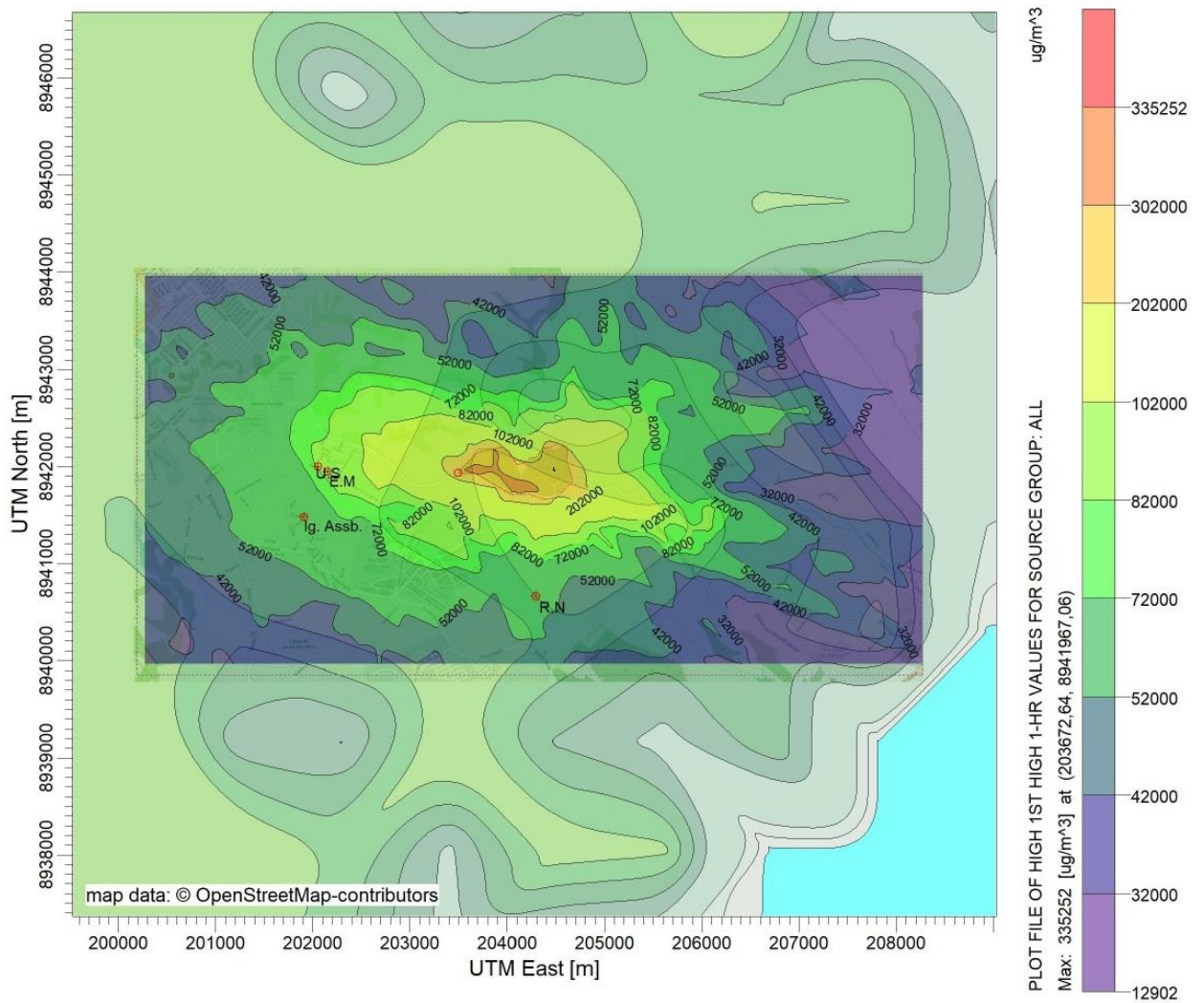
Corrêa *et al.* (2011), realizaram um estudo que destacou que crianças de até 13 anos que moravam em área próxima a um aterro sanitário tinham 30% a mais de chances de apresentarem tosse ou chiadeira, entre os 15 dias anteriores à entrevista para a pesquisa, em relação a crianças que moravam em uma área socioeconomicamente semelhante mas longe do aterro. O estudo, assim como outros citados na publicação, destacou que morar em áreas próximas a um aterro agravam doenças respiratórias em crianças de 0 a 13 anos, mas não foi conclusivo em relação à principal causa (material particulado, compostos gasosos, etc.).

Figura 8 - Mapa de dispersão de Metano, gerado pelo AERMOD, no período considerado



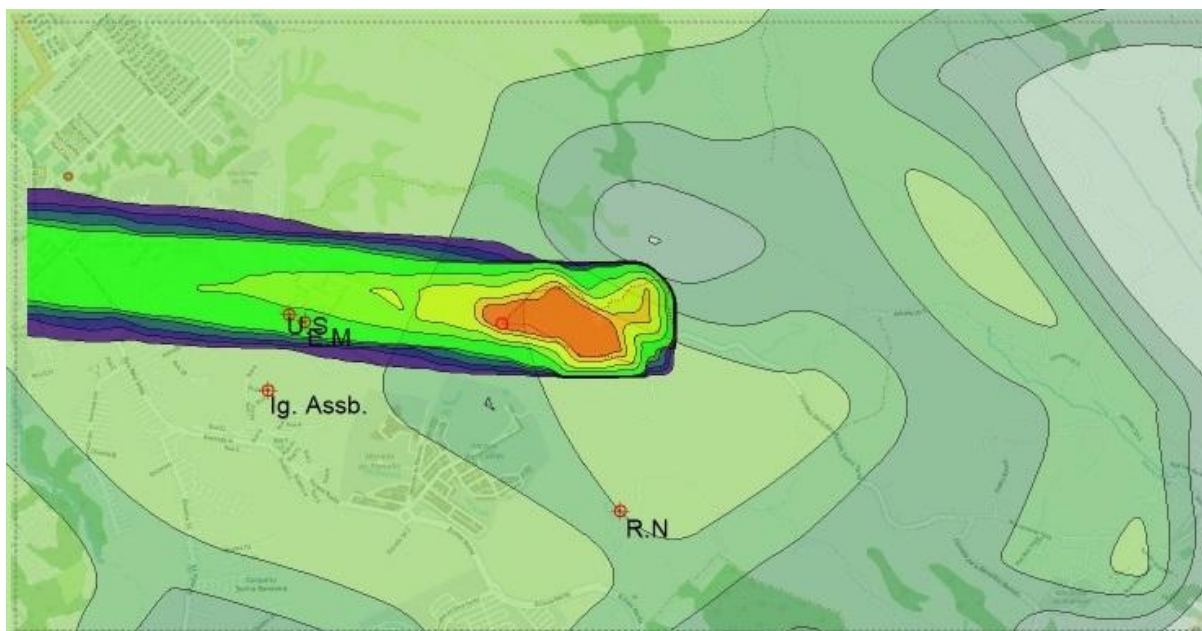
Fonte: AERMOD elaborado pelo autor (2022)

Figura 9 - Mapa de dispersão do dióxido de carbono, gerado pelo AERMOD, no período considerado



Fonte: AERMOD elaborado pelo autor (2022)

Figura 10 - Mapa de dispersão no momento de maior concentração do período analisado



Fonte: AERMOD elaborado pelo autor (2022)

5. CONCLUSÃO

Na área urbana no entorno da CTR de Maceió a concentração de metano no ar não apresenta riscos de explosão, assim como a concentração de dióxido de carbono não é suficiente para diminuir a concentração de oxigênio no ambiente, a ponto de causar asfixia ou mal estar, ambas abaixo de 1%. No entanto, os impactos à saúde da população exposta constantemente a esses gases é inconclusiva.

Em âmbito Federal, não existem limites de emissão de gases como metano e dióxido de carbono, presentes no biogás, que por mais que, naturalmente, não sejam prejudiciais a saúde, os impactos causados a exposição constante por um longo espaço de tempo (além do efeito estufa) são, de certa forma, desconhecidos.

A partir disso, este trabalho sugere que sejam realizados estudos a respeito das concentrações e do tempo de exposição desses gases capazes de gerar impactos significativos na saúde da população que reside em áreas próximas a aterros sanitários, bem como da vegetação e corpos d'água presentes, devido a possibilidade desses gases infiltrarem os solos, a fim de fomentar políticas de controle de dispersão dos gases poluentes.

Quanto aos impactos ambientais, com foco no aquecimento global, o Decreto Federal Nº 11.003, de 21 de março de 2022, institui a Estratégia Federal de Incentivo ao Uso Sustentável de Biogás e Biometano, abrangendo instrumentos como o Fundo Nacional Sobre Mudança do Clima (Lei Nº 12.114, de 9 de dezembro de 2009) e o Programa Nacional de Crescimento Verde (Decreto Nº 10.846, de 25 de outubro de 2021), que visam incentivos econômicos para fomentar iniciativas de redução da emissão de metano e o desenvolvimento sustentável.

Este trabalho, portanto, também sugere que o Estado de Alagoas vise políticas de incentivo fiscal para detentores de atividades com alto índice de geração de biogás que busquem recuperá-lo, de forma a aproveitá-lo como energia elétrica ou mesmo como combustível (GNV). A exemplo do Estado do Rio de Janeiro que apresentou o Projeto de Lei Nº 5475/2022, que sugere redução do ICMS sobre o biogás e o biometano.

Além disso, conforme indicado por Silva *et al.* (2020), o aterro de Maceió demonstra ter potencial para gerar energia a partir do biogás nele produzido, a solução mais viável para o controle dos impactos causados por esses gases. Portanto, a construção de uma estação de recuperação do biogás na central de tratamento de resíduos de Maceió que possibilite a geração de energia elétrica, ou mesmo gás de cozinha, especialmente para população próxima a área do aterro, como forma de compensação, se mostra a alternativa mais viável para o desenvolvimento sustentável e mitigação de impactos por ações antrópicas.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS (ABRELPE). **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2020**. São Paulo: Abrelpe, 2020. Disponível em: <<https://abrelpe.org.br/panorama-2020/>>. Acesso em: 10 Jun. 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8419**: apresentação de projetos de aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos. 1992. Disponível em: <<http://www.ipaam.am.gov.br/wp-content/uploads/2021/01/NBR-8419-92-Apresentacao-de-Projetos-de-Aterros-Sanitarios-de-Residuos-Solidos-Urbanos.pdf>>. Acesso em: 10 Jun. 2022.

BANCO NACIONAL DE DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO E SOCIAL (BNDES). Departamento do Complexo Agroalimentar e de Biocombustíveis da Área de Indústria e Serviços e Comércio Exterior. **Biogás: Evolução Recente e Potencial**

de uma Nova Fronteira de Energia Renovável para o Brasil. BNDES, Rio de Janeiro, vol. 27, n. 53, p. 188, mar. 2021. Disponível em: <https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/bitstream/1408/20801/1/PR_Biogas_215276_P_BD.pdf>. Acesso em: 19 nov. 2022.

BRASIL. Decreto Federal n. 11003, de 21 de março de 2022. Institui a estratégia federal de incentivo ao uso sustentável de biogás e biometano. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil**, Brasília, DF, 21 mar. 2022. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2019-2022/2022/decreto/D11003.htm#:~:text=DECRETO%20N%C2%BA%2011.003%2C%20DE%2021,Sustent%C3%A1vel%20de%20Biog%C3%A1s%20e%20Biometano>. Acesso em: 19 nov. 2022.

BRASIL. Lei n. 12305, de 02 de agosto de 2010. Institui a política nacional de resíduos sólidos. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil**, Brasília, DF, 02 ago. 2010. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm>. Acesso em: 10 Jun. 2022.

BRASIL, Ministério do Meio Ambiente. **Fontes fixas.** Disponível em: <<https://antigo.mma.gov.br/cidades-sustentaveis/qualidade-do-ar/fontes-fixas.html>>. Acesso em: 27 Jun. 2022.

BRASIL, Ministério de Minas e Energia, Empresa de Pesquisa Energética. **Impactos da Participação do Biogás e do Biometano na Matriz Brasileira.** IV fórum do biogás, São Paulo, SP, 17 out. 2017. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-244/topico-257/EPE_IV%20FORUM%20BIOGAS_JOSE%20MAURO_2017_1710.pdf>. Acesso em 11 jun. 2022.

CORRÊA, C.R.S; ABRAHÃO, C.E.C; CARPINTERO, M.C.C; FILHO, F.A. O aterro sanitário como fator de risco para doenças respiratórias em crianças. **Jornal de Pediatria** (Rio J). 2011;87(4):319-24. Disponível em: <<https://www.scielo.br/j/jped/a/qLCwtMQRTv7z8D55Rg9JpzM/?format=pdf&lang=pt>>. Acesso em: 15 set. 2022.

ELMI, A; AL-HARBI, M; YASSIN, M.F; AL-AWADHI, M.M. Modeling gaseous emissions and dispersion of two major greenhouse gases from landfill sites in arid hot environment. **Environmental Science and Pollution Research** (2021) 28:15424–15434. Disponível em: <<https://link.springer.com/article/10.1007/s11356-020-11760-6>>. Acesso em: 14 set. 2022.

FEI, F.; WEN, Z.; CLERCQ, D. Spatio-temporal estimation of landfill gas energy potential: A case study in China. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 103, p. 217-226, 2019. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S136403211830830X>>. Acesso em: 11 Jun. 2022.

GHOSH, P.; SHAH, G.; CHANDRA, R.; SAHOTA, S.; KUMAR, H., VIJAY, V.K.; THAKUR, I.S. Assessment of methane emissions and energy recovery potential from the municipal solid waste landfills of Delhi, India. **Bioresource Technology**, v. 272, p. 611-615, 2019. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0960852418315013?via%3Dihub>>. Acesso em: 10 jun. 2022.

HANNA, S. R.; EGAN, B. A.; PURDUM, J.; WAGLER, J. Evaluation of the ADMS, AERMOD and ISC3 dispersion models with de Optex, Duke, Forest, Kinkaid, Indianapolis and Lovett Field data sets. **International Journal of Environment and Pollution**, v. 16, n. 1-6, p. 301-314, 2001. Disponível em: <<https://www.inderscienceonline.com/doi/abs/10.1504/IJEP.2001.000626>>. Acesso em: 11 Jun. 2022.

HEALTH PROTECTION AGENCY. **Impact on Health of Emissions From Landfill Sites**. Documents of the Health Protection Agency, 2011. Disponível em: <https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/334356/RCE-18_for_website_with_security.pdf>. Acesso em: 10 Jun. 2022.

KARLSSON, T.; KONRAD, O.; LUMI, M.; SCHMEIER, N. P.; MARDER, M. CASARIL, C. E.; KOCH, F. F.; PEDROSO, A. G. **Manual básico de biogás**. 1 ed. Lajeado: Editora Univates, 2014. p. 9-12. Disponível em: <https://www.univates.br/editora-univates/media/publicacoes/71/pdf_71.pdf>. Acesso em: 10 Jun. 2022.

LISBOA, H. M. Capítulo VIII - Meteorologia e Dispersão. In: LISBOA, H. M. **Controle da Poluição Atmosférica**. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 2010.

MARTINS, E. M.; FORTES, J. D. N.; LESSA, R. A. Modelagem de dispersão de poluentes atmosféricos: avaliação de modelos de dispersão de poluentes emitidos por veículos. **Revista Internacional de Ciências**, v. 5, n.1, 2015. p. 2-19. Disponível em: <<https://www.e-publicacoes.uerj.br/index.php/ric/article/view/14498>>. Acesso em: 26 Jun. 2022.

MORAES, M. R. **Ferramenta para a previsão de vento e dispersão de poluentes na micro-escala atmosférica**. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 2004. p. 18-19.

Oliveira, S. (2022)- SECA - Sistema de Estudos Climáticos e Ambientais, São Paulo, SP. <<https://www.seca-ambiental.com.br>>. (fornecido através de e-mail)

SILVA, C. O.; KONRAD, O.; CALLADO, N. H.; MARDER, M.; ARAÚJO, L.G.S.. Geração quantitativa e qualitativa da emissão de biogás no aterro sanitário de Maceió. *Revista Ibero Americana de Ciências Ambientais*, v.11, n.5, p.401-408, 2020.

<<http://www.sustenere.co/index.php/rica/article/view/CBPC2179-6858.2020.005.0037>>. Acesso em 12 ago. 2022.

PERRY, S. V.; CIMORELLI, A. J.; PAINE, R. J.; BRODE, R. W.; WEIL, J. C.; VENKATRAM, A.; WILSON, R. B.; LEE, R. F.; PETERS, W. D. AERMOD: A Dispersion Model for Industrial Source Applications. Part II: Model Performance against 17 Field Study Databases. **Journal of Applied Meteorology**, v. 44, n. 5, 2005. Disponível em: <<https://journals.ametsoc.org/view/journals/apme/44/5/jam2228.1.xml>>. Acesso em: 11 Jun. 2022.

PIÑAS, J. A. V.; VENTURINI, O. J.; LORA, E. E. S.; OLIVEIRA, M. A.; ROALCABA, O. D. C. Aterros sanitários para geração de energia elétrica a partir da produção de biogás no Brasil: comparação dos modelos LandGEM (EPA) e Biogás (Cetesb). **R. bras. Est. Pop.**, Rio de Janeiro, v. 33, n. 1, p.175-188, jan./abr. 2016. Disponível em: <<https://www.scielo.br/j/rbepop/a/rJhdgmRnnkM3LgDXPSSQNWQ/abstract/?lang=es>>. Acesso em: 11 Jun. 2022.

REDE DE ESTAÇÕES METEOROLÓGICAS DA AERONÁUTICA (REDEMET). Fornecido por Silvio de Oliveira. <<https://www.redemet.aer.mil.br/>>. Última consulta em 24/05/2022.

TALAEKHOZANI, A. R.; BAGHERI, M.; ROSTAMI-NAJAFABADI, N.; BORNA, E. Effect of nearly one hundred percent of municipal solid waste recycling in Najafabad city on improving of its air quality. **Journal of Air Pollution and Health**, v. 1, n. 2, p. 111-122, 2016. Disponível em: <<https://japh.tums.ac.ir/index.php/japh/article/view/41>>. Acesso em: 11 Jun. 2022.

TALAEKHOZANI, A. R.; DOKHANI, M.; DEHKORDI, A. A.; ESKANDARI, Z.; REZANIA, S. Evaluation of emission inventory for the emitted pollutants from landfill of Borujerd and modeling of dispersion in the atmosphere. **Urban Climate**, v. 25, p. 82–98, 2018. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2212095518301895>>. Acesso em: 10 Jun. 2022.

TAN, Z. **Air Pollution and Greenhouse Gases: From Basic Concepts to Engineering Applications for Air Emission Control**. Singapore: Springer, 2014. p. 329.

THÉ, J. L., and et al., User's Guide ISC-AERMOD View- AERMETView Version 11.0.1 Windows Interface for the USEPA. Lakes Environmental Software, Volume I, 2022. Acesso em 23 nov. 2022.

THÉ, J. L., and et al.,(2022) WRPLOT Version 11.0.1 Windows Interface for the USEPA. Lakes Environmental Software. <<http://www.weblakes.com/products/wrplot/index.html>>. Acesso em 23 nov. 2022.

US ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (EPA). **Air Quality Dispersion Modeling - Preferred and Recommended Models**. Disponível em: <<https://www.epa.gov/scram/air-quality-dispersion-modeling-preferred-and-recommended-models>>. Acesso em: 20 Jun. 2022.

US ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (EPA). **Basic Information About Landfill Gas**. 21 Abr. 2022. Disponível em: <[https://www.epa.gov/lmop/basic-information-about-landfill-gas#:~:text=Note%3A%20All%20emission%20estimates%20from,and%20Sinks%3A%201990%E2%80%932020.&text=Municipal%20solid%20waste%20\(MSW\)%20landfills,of%20these%20emissions%20in%202020.](https://www.epa.gov/lmop/basic-information-about-landfill-gas#:~:text=Note%3A%20All%20emission%20estimates%20from,and%20Sinks%3A%201990%E2%80%932020.&text=Municipal%20solid%20waste%20(MSW)%20landfills,of%20these%20emissions%20in%202020.)>. Acesso em: 28 jun. 2022.

US ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (EPA). Revisions to the Guideline on Air Quality Models: Enhancements to the AERMOD Dispersion Modeling System and Incorporation of Approaches To Address Ozone and Fine Particulate Matter. **Federal Register**, v. 82, n. 10, 2017. p. 5190, 5194-5195, 5231-5235. Disponível em: <https://www.epa.gov/sites/default/files/2020-09/documents/appw_17.pdf>. Acesso em: 27 Jun. 2022.

WORLD HEALTH ORGANIZATION. **The top 10 causes of death**. 09 Dez. 2020. Disponível em: <<https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/the-top-10-causes-of-death>>. Acesso em: 18 Jun. 2022.