



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO
CENTRO MULTIDISCIPLINAR DE PAU DOS FERROS
ENGENHARIA AMBIENTAL E SANITÁRIA

ERICK FERREIRA DE SOUSA

SIMULAÇÃO NUMÉRICA DA DISPERSÃO ATMOSFÉRICA DE RESÍDUOS GASOSOS
PROVENIENTES DO ATERRO COMUM DE BOM SUCESSO-PB

PAU DOS FERROS – RN

2018

ERICK FERREIRA DE SOUSA

SIMULAÇÃO NUMÉRICA DA DISPERSÃO ATMOSFÉRICA DE RESÍDUOS GASOSOS
PROVENIENTES DO ATERRO COMUM DE BOM SUCESSO-PB

Monografia apresentada à Universidade Federal Rural do Semi-Árido – UFERSA, Centro Multidisciplinar de Pau dos Ferros como requisito para obtenção do título de Engenheiro Ambiental e Sanitarista.

Orientador: Prof. Dr. Joel Medeiros Bezerra.

PAU DOS FERROS – RN

2018

© Todos os direitos estão reservados a Universidade Federal Rural do Semi-Árido. O conteúdo desta obra é de inteira responsabilidade do (a) autor (a), sendo o mesmo, passível de sanções administrativas ou penais, caso sejam infringidas as leis que regulamentam a Propriedade Intelectual, respectivamente, Patentes: Lei nº 9.279/1996 e Direitos Autorais: Lei nº 9.610/1998. O conteúdo desta obra tomar-se-á de domínio público após a data de defesa e homologação da sua respectiva ata. A mesma poderá servir de base literária para novas pesquisas, desde que a obra e seu (a) respectivo (a) autor (a) sejam devidamente citados e mencionados os seus créditos bibliográficos.

S725s Sousa, Erick Ferreira de.
Simulação numérica da dispersão atmosférica de
resíduos gasosos provenientes do aterro comum de
Bom Sucesso/PB / Erick Ferreira de Sousa. - 2018.
76 f. : il.

Orientador: Joel Medeiros Bezerra.
Monografia (graduação) - Universidade Federal
Rural do Semi-árido, Curso de Engenharia
Ambiental e Sanitária, 2018.

1. HYSPLIT. 2. Resíduos Sólidos Urbanos. 3.
Destinação. 4. Gravimetria. 5. Transporte de
poluentes. I. Bezerra, Joel Medeiros , orient.
II. Título.

O serviço de Geração Automática de Ficha Catalográfica para Trabalhos de Conclusão de Curso (TCC's) foi desenvolvido pelo Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação da Universidade de São Paulo (USP) e gentilmente cedido para o Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (SISBI-UFERSA), sendo customizado pela Superintendência de Tecnologia da Informação e Comunicação (SUTIC) sob orientação dos bibliotecários da instituição para ser adaptado às necessidades dos alunos dos Cursos de Graduação e Programas de Pós-Graduação da Universidade.

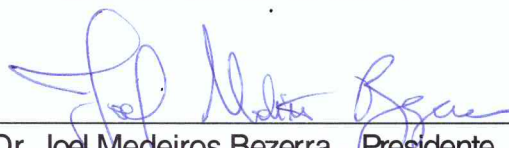
ERICK FERREIRA DE SOUSA

SIMULAÇÃO NUMÉRICA DA DISPERSÃO ATMOSFÉRICA DE RESÍDUOS GASOSOS
DO ATERRO COMUM DE BOM SUCESSO-PB

Monografia apresentada à Universidade
Federal Rural do Semi-Árido – UFERSA,
Centro Multidisciplinar de Pau dos Ferros
como requisito para obtenção do título de
Engenheiro Ambiental e Sanitarista.

Defendida em: 21 / 03 / 2018.

BANCA EXAMINADORA



Dr. Joel Medeiros Bezerra – Presidente

UFERSA – Campus Pau dos Ferros



Dr. Rafael Oliveira Batista - Examinador

UFERSA – Campus Mossoró



Dr. Paulo Cesar Moura da Silva - Examinador

UFERSA – Campus Mossoró

A Tereza Maria da Silva (*in memoriam*),
minha mãe/vó, por todo o seu esforço e
dedicação em me educar, amar, e me tornar
um homem. Obrigado por ter feito parte da
minha vida. A senhora estará para sempre em
meu coração. Te amarei sempre!

Ao meu primeiro filho, que embora o Senhor
não tenha permitido viver, despertou em mim
um sentimento forte e inexplicável: o amor
paterno.

Dedico esse trabalho a duas mulheres que são
especiais na minha vida: minha esposa Alana
Raquel de Lima Silva, por todo apoio,
compreensão e amor a mim dedicados; e a
minha sogra Maria de Lourdes de Lima Silva,
pelo apoio, atenção, os conselhos e por ser
para mim mais que uma mãe.

AGRADECIMENTOS

Ao meu Deus, Pai, a Jesus Cristo seu Filho e ao Espírito Santo por me capacitarem, me dando força, coragem e entendimento para chegar ao fim desse trabalho. Mais uma vez se cumpre a palavra do Senhor Jesus: “porque sem mim nada podeis fazer” Mt 15:5b.

Ao meu orientador Prof. Dr. Joel Medeiros Bezerra, pelas orientações, auxílios, conselhos e cobranças. Obrigado por aceitar orientar meu trabalho, mesmo que “de última hora”, percebi em você um amigo que posso contar a qualquer momento, formal e informalmente (Whatsapp), em todas as horas. Saiba que plantamos hoje para colhermos amanhã, não passará em branco ao meu Deus a ajuda que o senhor dedicou ao seu filho, o Senhor te recompensará.

Aos meus familiares, em especial a minha esposa Alana Raquel de Lima Silva e a minha sogra Maria de Lourdes de Lima Silva, por não medirem esforços para que eu chegasse a concretização desse sonho, vocês são companheiras de todas as horas, momentos bons e ruins passamos juntos e de uma coisa tenho certeza “até aqui nos ajudos o Senhor” I Sm 7.12.

Aos membros da banca examinadora, Prof. Dr. Rafael Oliveira Batista e Prof. Dr. Paulo Cesar Moura da Silva, que se destacam no corpo docente da UFERSA e me dão a oportunidade de ter o meu trabalho avaliado por tão boas mãos.

A todos os meus colegas do curso de Engenharia Ambiental e Sanitária, embora tenha relutado, necessito citar alguns nomes, pois vocês me ajudaram muito nessa caminhada acadêmica: a amada Jessica Rafaelly Almeida Lopes, irmã em Cristo, na vida (acadêmica, secular), conselheira, parceira de trabalhos, muito obrigado amada mais amada do Brasil, e a Larissa Nathane Lima de Moraes pela amizade, irmandade nessa caminhada Universitária que não foi nada fácil (Fenômenos de Transporte que o diga).

Aos membros da Igreja Evangélica Assembleia de Deus em Bom Sucesso/PB que levantaram as suas orações em meu favor.

A todos os professores do curso de Bacharelado de Engenharia Ambiental e Sanitária da UFERSA por me ensinarem que o segredo do sucesso é o trabalho.

A todas as pessoas que contribuíram direta e indiretamente para a realização desse trabalho.

“A natureza criada aguarda, com grande expectativa, que os filhos de Deus sejam revelados.

Pois ela foi submetida à futilidade, não pela sua própria escolha, mas por causa da vontade daquele que a sujeitou, na esperança de que a própria natureza criada será libertada da escravidão da decadência em que se encontra para a gloriosa liberdade dos filhos de Deus.

Sabemos que toda a natureza criada geme até agora, como em dores de parto.”

Romanos 8: 19-22

RESUMO

O aumento na demanda por recursos naturais para geração de energia e produção de bens de consumo acarreta maior geração de resíduos sólidos urbanos por parte dos consumidores. A disposição inadequada desses resíduos resulta na produção de gases tóxicos e estes em conjunto com outros poluentes originados da queima dos resíduos lançados na atmosfera trazem danos à saúde humana. No aterro comum de Bom Sucesso/PB ocorre a disposição inadequada dos resíduos sólidos urbanos, além da queima desses a céu aberto. Esta queima emite fumaça tóxica e provoca problemas a saúde da população, logo é de fundamental importância realizar a análise da dispersão dos poluentes nesta localidade, tendo em vista ser um trabalho pioneiro para a cidade e região. Desta forma, tem-se como opção o emprego de simulações matemáticas computacionais empregando-se o modelo HYSPLIT, um híbrido entre as aproximações Lagrangeana e Euleriana. Como objetivo geral da pesquisa propõe-se realizar a simulação numérica da dispersão dos poluentes atmosféricos advindos do aterro comum de Bom Sucesso/PB. O estudo se desdobrou em dois segmentos, sendo inicialmente realizado o levantamento de campo mediante análise da composição gravimétrica, utilizando da técnica de quarteamento, para fins de contabilização da fração orgânica, tal qual estimativa das taxas de emissão dos gases: metano (CH_4), gás sulfídrico (H_2S) e amônia (NH_3). Já para fins da avaliação da dispersão recorreu-se aos dados meteorológicos obtidos no Instituto Nacional de Meteorologia - INMET e em conjunto com o programa WRPLOT obteve-se a rosa dos ventos, com frequência de direção e velocidade, além de dados de precipitação, temperatura, que foram de fundamental importância para a classificação dos dias atípicos. Por fim, diante da identificação dos dias atípicos, realizou-se a modelagem matemática computacional por meio do modelo HYSPLIT, visando estimar a espacialização das plumas de poluentes e suas concentrações. Pela composição gravimetria observou-se um maior percentual de plástico nos resíduos sólidos urbanos municipais, sendo este um material reciclável. O aterro comum encontra-se a jusante da cidade no sentido dos ventos o que permite que os gases produzidos não adentrem o perímetro urbano. As plumas de poluentes apresentam maiores concentrações no período chuvoso, entretanto a dispersão dos poluentes é maior no período seco, devido as maiores velocidades dos ventos nessa época em comparação ao período chuvoso.

Palavras-chave: HYSPLIT. Resíduos Sólidos Urbanos. Destinação. Gravimetria. Transporte de poluentes.

ABSTRACT

The increase in demand for natural resources for energy generation and production of consumer goods leads to a higher generation of solid urban waste by consumers. Inadequate disposal of these wastes results in the production of toxic gases and these together with other pollutants from the burning of waste released into the atmosphere bring harm to human health. In the Bom Sucesso / PB common landfill there is an inadequate disposal of urban solid waste, in addition to the open burning. This burning emits toxic smoke and causes health problems of the population, so it is of fundamental importance to carry out the analysis of the dispersion of the pollutants in this locality, in view of being a pioneering work for the city and region. Thus, it is possible to use computational mathematical simulations using the HYSPLIT model, a hybrid between the Lagrangean and Eulerian approximations. As a general objective of the research, it is proposed to perform numerical simulation of the dispersion of atmospheric pollutants from the Bom Sucesso / PB landfill. The study was carried out in two segments. The field survey was performed by analyzing the gravimetric composition, using the quarrying technique, for the purpose of accounting for the organic fraction, as an estimate of the emission rates of the gases: methane (CH_4), sulfuric gas (H_2S) and ammonia (NH_3). For the purposes of the dispersion evaluation, we used meteorological data obtained from the National Institute of Meteorology (INMET) and, in conjunction with the WRPLOT program, we obtained the wind rose with frequency of direction and velocity, as well as precipitation, temperature, which were of fundamental importance for the classification of atypical days. Finally, before the identification of the atypical days, computational mathematical modeling was carried out using the HYSPLIT model, aiming to estimate the spatialization of pollutant feathers and their concentrations. A higher percentage of plastic was found in municipal solid waste, which is a recyclable material. The common landfill is downstream of the city in the direction of the winds which allows the gases produced not to enter the urban perimeter. The pollutant feathers have higher concentrations in the rainy season, however, the dispersion of the pollutants is higher in the dry period, due to the higher velocities of the winds at that time compared to the rainy season.

Keywords: HYSPLIT. Urban solid waste. Destination. Gravimetry. Transport of pollutants

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Utilização dos dispositivos de disposição final de resíduos no Brasil por tipo de destinação	16
Figura 2 – Distribuição da disposição dos resíduos sólidos urbanos no estado da Paraíba.	18
Figura 3 – Modelo de pluma Gaussiana	27
Figura 4 - Localização do município de Bom Sucesso/PB	29
Figura 5 - Localização do aterro comum em relação à cidade de Bom Sucesso/PB. Área urbana em preto. Corpos hídricos superficiais em azul. Aterro comum em vermelho.	30
Figura 6 - Metodologia de quarteamento para análise da composição gravimétrica: a) e b) Disposição das amostras sobre a lona; c) Abertura dos sacos contendo resíduos sólidos urbanos; d) separação dos materiais.	32
Figura 7 - Aterro comum de Bom Sucesso/PB: a) Queima dos resíduos e fumaça; b) resíduos de abatedouro; c) Catador sem uso de EPI; d) Corpo hídrico ao fundo da imagem.	38
Figura 8 – Composição gravimétrica dos RSU do município de Bom Sucesso/PB.	39
Figura 9 – Rosa dos ventos.....	43
Figura 10 – Distribuição de frequência dos ventos em classes	43
Figura 11 – Precipitação diária para o ano de 2017 em Bom Sucesso/PB.....	45
Figura 12 – Velocidade dos ventos no intervalo de 07:00 as 13:00 hrs no ano de 2017.....	46
Figura 13 –Temperaturas máximas e mínimas no intervalo de 07:00 as 13:00 hrs no ano de 2017.	46
Figura 14– Simulação da dispersão/concentração num período de 6h pelo modelo HYSPLIT do metano (CH_4) em mg/m^3 liberada pelo aterro comum de Bom Sucesso/PB em 18/02/2017. a) Zoom de 100 e raio de 5 km; b) Zoom de 80 e raio de 20 km.	48
Figura 15 – Simulação da dispersão/concentração num período de 6h pelo modelo HYSPLIT do sulfeto de hidrogênio (H_2S) em mg/m^3 liberada pelo aterro comum de Bom Sucesso/PB em 18/02/2017. a) Zoom de 100 e raio de 5 km; b) Zoom de 100 e raio de 20 km.	49
Figura 16 – Simulação da dispersão/concentração num período de 6h pelo modelo HYSPLIT da amônia (NH_3) em mg/m^3 liberada pelo aterro comum de Bom Sucesso/PB em 18/02/2017. a) Zoom de 90 e raio de 5 km; b) Zoom de 90 e raio de 20 km.	50
Figura 17– Simulação da dispersão/concentração num período de 6h pelo modelo HYSPLIT do metano (CH_4) em mg/m^3 liberada pelo aterro comum de Bom Sucesso/PB em 22/06/2017. a) Zoom de 100 e raio de 5 km; b) Zoom de 100 e raio de 60 km.	51

Figura 18 – Simulação da dispersão/concentração num período de 6h pelo modelo HYSPLIT do sulfeto de hidrogênio (H_2S) em mg/m^3 liberada pelo aterro comum de Bom Sucesso/PB em 22/06/2017. a) Zoom de 100 e raio de 5 km; b) Zoom de 100 e raio de 60 km.	52
Figura 19 – Simulação da dispersão/concentração num período de 6h pelo modelo HYSPLIT da amônia (NH_3) em mg/m^3 liberada pelo aterro comum de Bom Sucesso/PB em 22/06/2017. a) Zoom de 100 e raio de 5 km; b) Zoom de 100 e raio de 60 km.	53
Figura 20 – Simulação da dispersão/concentração num período de 6h pelo modelo HYSPLIT do metano (CH_4) em mg/m^3 liberada pelo aterro comum de Bom Sucesso/PB em 15/07/2017. a) Zoom de 100 e raio de 5 km; b) Zoom de 100 e raio de 60 km.	54
Figura 21 – Simulação da dispersão/concentração num período de 6h pelo modelo HYSPLIT do sulfeto de hidrogênio (H_2S) em mg/m^3 liberada pelo aterro comum de Bom Sucesso/PB em 15/07/2017. a) Zoom de 100 e raio de 5 km; b) Zoom de 80 e raio de 60 km.	55
Figura 22 – Simulação da dispersão/concentração num período de 6h pelo modelo HYSPLIT da amônia (NH_3) em mg/m^3 liberada pelo aterro comum de Bom Sucesso/PB em 15/07/2017. a) Zoom de 100 e raio de 5 km; b) Zoom de 100 e raio de 60 km.	56
Figura 23 – Simulação da dispersão/concentração num período de 6h pelo modelo HYSPLIT do metano (CH_4) em mg/m^3 liberada pelo aterro comum de Bom Sucesso/PB em 05/10/2017. a) Zoom de 100 e raio de 5 km; b) Zoom de 100 e raio de 50 km.	57
Figura 24 – Simulação da dispersão/concentração num período de 6h pelo modelo HYSPLIT do sulfeto de hidrogênio (H_2S) em mg/m^3 liberada pelo aterro comum de Bom Sucesso/PB em 05/10/2017. a) Zoom de 100 e raio de 5 km; b) Zoom de 80 e raio de 50 km.	58
Figura 25 – Simulação da dispersão/concentração num período de 6h pelo modelo HYSPLIT da amônia (NH_3) em mg/m^3 liberada pelo aterro comum de Bom Sucesso/PB em 05/10/2017. a) Zoom de 100 e raio de 5 km; b) Zoom de 100 e raio de 50 km.	58

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Valores para o parâmetro FCM	34
Tabela 2 – Teor de carbono orgânico degradável para cada componente do resíduos sólidos urbanos.	34
Tabela 3 – Parâmetros utilizados para o método do IPCC	41
Tabela 4 – Porcentagem dos constituintes encontrados no biogás de RSU	42
Tabela 5 – Concentração dos gases utilizados no HYSPLIT	47

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	12
2 REVISÃO TEÓRICA	14
2.1 RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS.....	14
2.2 DESCARTE DOS RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS	16
2.3 POLUIÇÃO PROVOCADA PELOS ATERROS COMUNS	19
2.3.1 Poluição do ar	20
2.4 PROBLEMAS AMBIENTAIS PROVOCADOS PELOS GASES PROVENIENTES DO RESÍDUO SÓLIDO URBANO E SUA QUEIMA.....	22
2.5 DISPERSÃO DE POLUENTES	24
2.6 VARIÁVEIS METEOROLÓGICAS QUE INFLUÊNCIAM OS GASES DOS ATERROS COMUNS E SUA DISPERSÃO.....	25
2.7 MODELOS NUMÉRICOS DE TRANSPORTE DE POLUENTES ATMOSFÉRICOS ..	26
2.7.1 Modelo HYSPLIT.....	28
3 METODOLOGIA.....	29
3.1 ÁREA DE ESTUDO	29
3.2 PARÂMETROS MEDIDOS	30
3.3 PROCEDIMENTOS DE CAMPO	31
3.4 ESTIMATIVA DO BIOGÁS	32
3.5 ROSA DOS VENTOS.....	35
3.6 MODELO HYSPLIT DE DISPERSÃO DE POLUENTES	35
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	38
4.1 COMPOSIÇÃO GRAVIMÉTRICA	38
4.2 ESTIMATIVA DO BIOGÁS	40
4.3 REGIME DOS VENTOS	42
4.4 CLASSIFICAÇÃO DO PERÍODO SECO E CHUVOSO.....	44
4.5 DIAS ATÍPICOS.....	45
4.6 SIMULAÇÃO NUMÉRICA DA DISPERSÃO DOS POLUENTES.....	46
4.6.1 Simulação no período chuvoso com maior precipitação	47
4.6.2 Simulação no período chuvoso com maior velocidade do vento	50
4.6.3 Simulação no período seco com menor temperatura do ano.....	53
4.6.4 Simulação no período seco com maior velocidade dos ventos	56
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	60
REFERÊNCIAS	62

1 INTRODUÇÃO

O crescimento populacional demanda maior uso e consumo dos recursos naturais para geração de energia e produção de bens de consumo, acarretando maior geração de resíduos sólidos urbanos (RSU) por parte dos consumidores, sendo que alguns fatores interferem na geração desses resíduos como: socioeconômicos e educacionais, além da obsolescência programada e a perceptiva.

Para Silva (2012) a obsolescência programada consiste em reduzir o ciclo de vida dos produtos para que estes sejam substituídos por outros com o objetivo de gerar o consumismo, sendo esta uma estratégia da indústria para produzir e comercializar mais. Entretanto, tendo em vista que os objetos não estragam numa velocidade rápida a ponto de manter a produção em larga escala, surge a obsolescência perceptiva que tem por finalidade modificar a aparência dos produtos levando os consumidores a desejarem possuir um objeto novo mesmo que o “velho” ainda esteja em bom funcionamento (AZEVEDO; GIL; CAMPOS, 2014).

Para Montenegro, Vale e Sousa (2014) com a obsolescência programada a indústria produz objetos com menor tempo de duração e estes quando não reciclados são direcionados a vazadouros a céu abertos, o que resulta em poluição, devido as condições locais de acondicionamento deste tipo de dispositivo. A disposição de resíduos sólidos urbanos diretamente sobre o solo resulta em contaminação, principalmente por metais pesados (PEREIRA; PINTO; PEREIRA, 2013). Quando as águas advindas das precipitações pluviométricas entram em contato com os resíduos ocorre a produção de lixiviado, líquido que causa impactos negativos ao meio ambiente e contamina os corpos hídricos superficiais e subterrâneos (BAZIENE; VAZAREVICIUS, 2012). Outro problema é a queima dos resíduos, produzindo substâncias tóxicas na emissão atmosférica e nas cinzas (WALDMAN, 2013).

Por se tratar de uma disposição desordenada faz-se necessário uma adequação da acomodação dos resíduos, visando preservar o meio ambiente e os recursos naturais. O manejo de forma adequada envolve coleta, transporte, tratamento e disposição final, de forma apropriada, e quando esse modelo não é seguido de forma correta acarreta problemas a saúde humana e impactos ambientais aos ecossistemas (BRASIL, 2010).

Para Gouveia (2012) a disposição inadequada dos RSU resulta em produção de gases tóxicos e estes em conjunto com outros poluentes originados da queima dos resíduos são lançados na atmosfera trazendo danos à saúde humana. As dioxinas, furanos, compostos clorados, metais pesados, gases sulfurosos, monóxido de carbono e óxido de nitrogênio são

contaminantes atmosféricos provenientes da queima desses resíduos, e estes em conjunto com as cinzas, são dispersos no ar e a sua inalação resulta em doenças respiratórias, cardiovasculares e diversos tipos de câncer (WALDMAN, 2013).

Em meio ao aumento dos problemas advindos da poluição do ar é imprescindível a avaliação, tal como o monitoramento, com vistas a proporcionar melhorias ambientais para a comunidade. A avaliação da dispersão dos contaminantes atmosféricos pode se utilizar de modelos matemáticos e computacionais, ferramentas estas que permitem avaliar os riscos da poluição ao meio ambiente sob a ótica de variáveis meteorológicas (MOREIRA, 2014). Para Kakosimos e Assael (2013) a dispersão de poluentes tóxicos dentro do perímetro urbano é complexa, devido ao movimento do vento, logo é necessária a utilização de modelos computacionais para avaliar a dispersão dos gases.

No aterro comum de Bom Sucesso/PB ocorre a disposição inadequada dos resíduos sólidos urbanos, além da queima de resíduos a céu aberto, o que é comum a maioria dos aterros comuns, pois a queima permite redução do volume de resíduos. Esta queima emite fumaça tóxica e provoca problemas a saúde da população, logo é de fundamental importância realizar a análise da dispersão dos poluentes nesta localidade, tendo em vista ser um trabalho pioneiro para a cidade e região. Desta forma, tem-se como opção o emprego de simulações matemáticas computacionais por meio do modelo HYSPLIT, um híbrido entre as aproximações Lagrangeana e Euleriana (MARIANO, 2006).

Como objetivo geral da pesquisa propõem-se realizar a simulação numérica da dispersão dos poluentes atmosféricos advindos do aterro comum de Bom Sucesso/PB, sejam os gases provenientes da decomposição da matéria orgânica, como o metano (CH_4) ou a pluma de contaminação resultante da queima dos resíduos sólidos urbanos a céu aberto, associado a amônia (NH_3) e o sulfeto de hidrogênio (H_2S), por meio do uso de modelagem computacional pelo modelo HYSPLIT, tal como implementação de variáveis meteorológicas.

Propõem-se ainda o desenvolvimento dos seguintes objetivos específicos:

- Estimar a produção dos gases amônia (NH_3), sulfeto de hidrogênio (H_2S) e metano (CH_4) no aterro comum de Bom Sucesso/PB;
- Obter a pluma de contaminação dos poluentes emitidos pelo aterro comum de Bom Sucesso/PB, através de simulação numérica pelo modelo HYSPLIT;
- Determinar a trajetória desses poluentes, bem como altura, área de deposição e a dispersão dos poluentes;
- Avaliar as localidades mais afetadas pela pluma de contaminação.

2 REVISÃO TEÓRICA

2.1 RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS

As definições de resíduos sólidos, embora variadas, apontam para um mesmo entendimento: algo inútil para o ser humano que depois de usado é descartado, porém algumas definições, baseadas em legislações, merecem destaque. A Norma Brasileira Regulamentadora – NBR 10.004/2004 (ABNT, 2004) define estes como resíduos no estado sólido ou semi-sólido, advindos de atividades industriais, domésticas, comerciais, hospitalares, agrícolas, serviços e varrição, além dos lodos provenientes de estações. Posterior a esta norma surge a Política Nacional de Resíduos Sólidos – PNRS, através da lei 12.305/2010, trazendo como definição para resíduos sólidos: material, substância, objeto ou bem descartado que resulte das atividades humanas em sociedade e que demanda uma destinação final ambientalmente adequada (BRASIL, 2010).

Já Santiago e Dias (2012) afirmam que os Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) advêm das atividades domésticas residenciais e de serviços de varrição e limpeza pública. Para Rezende et al. (2013) o consumo exagerado dos recursos naturais resulta em um grande crescimento na geração de RSU sendo estes compostos principalmente de matéria orgânica, recicláveis e rejeitos. Gbanie et al. (2013) propõem uma conceituação de RSU, denominando de resíduos sólidos municipais, como sendo embalagens, recipientes, restos de podas, de alimentos e material orgânico.

Logo, unindo os conceitos de resíduos sólidos contidos na NBR e na PNRS, além dos pesquisadores supracitados pode-se definir os RSU como material, substância, objeto ou bem descartado, de origem doméstica, de varrição e de serviços públicos.

Quanto a tipologia a NBR 10004/2004 (ABNT, 2004) classifica os resíduos em:

- Perigosos, ou classe I, quando possuem características como inflamabilidade, corrosividade, reatividade, patogenicidade e toxicidade.
- Não perigosos, ou classe II, quando não possuem essas características de periculosidade. Os não perigosos são subdivididos em não – inertes (classe II – A), quando possuem características como biodegradabilidade, combustibilidade ou solubilidade em água; ou inertes (classe II – B), quando seus constituintes são solubilizados em concentrações inferiores ao padrão de potabilidade da água.

A lei 11.445/2007 que defini a Política Nacional de Saneamento Básico, classifica o manejo dos resíduos sólidos e a limpeza urbana como um dos quatro pilares que formam as diretrizes nacionais para o saneamento básico (BRASIL, 2007).

Outros termos são empregados para se referir aos resíduos sólidos, como: resíduos sólidos urbanos e rejeito. Braga et al. (2005) afirmam que lixo é a expressão vulgar para designar os resíduos sólidos, já rejeito é o resultado dos resíduos após aplicada todas as alternativas economicamente viáveis para tratamento e recuperação, resultando para eles uma única possibilidade que é a destinação final (BRASIL, 2010).

O resíduo sólido urbano é dotado de valor econômico sendo fonte de emprego e renda para trabalhadores envolvidos com a reciclagem, sejam autônomos ou através de cooperativas. O que para alguns é considerado refugio e, portanto, descartado, para outros torna-se um recurso (GBANIE, 2013). Silva et al. (2012) apresentaram resultados satisfatórios com a prática de reciclagem de resíduos sólidos para a cidade de Marechal Cândido Rondon – PR com uma economia anual de R\$ 3.361.389,00 além de geração de empregos e melhorias ambientais.

A geração dos RSU está ligada a alguns fatores como aumento da população e concentração na área urbana, fatores econômicos, sociais, culturais, hábitos de vida (GODECKE et al., 2012; CAMPOS, 2012). A grande produção de rejeitos é um problema ambiental, além de ser um desafio para os municípios, pois demanda gestão, sendo esta complexa (SANTIAGO; DIAS, 2012).

As atividades humanas geram resíduos e estes por sua vez devem ser gerenciados de forma a evitar poluição ambiental e consequentemente prejuízos a saúde e segurança dos seres vivos. O desenvolvimento do Brasil está levando a geração de resíduos a se igualarem com as dos países desenvolvidos, logo se faz necessária a discussão dos impactos ambientais com a sociedade visando a conscientização destes (CAMPOS, 2012).

No ano de 2016 a geração total de RSU no Brasil alcançou um montante de 214.405 ton/dia, com uma geração per capita de 1,04 kg/hab/dia. A cobertura de coleta no Brasil tem mostrado ligeiro progresso, principalmente na região Sudeste, chegando a valores de 195.452 ton/dia. Com relação a coleta seletiva 3.878 municípios apresentam alguma ação voltada a tal prática (ABRELPE, 2016).

Tendo em vista a geração dos RSU e a necessidade de adequação as legislações que tratam do assunto, uma das dificuldades que rodeiam a gestão de resíduos sólidos é o descarte de forma adequada.

2.2 DESCARTE DOS RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS

A disposição ordenada de rejeitos em aterros é a forma de disposição final ambientalmente adequada prevista pela PNRS, porém para que chegue ao aterro somente o material que não pode mais ser reaproveitado se faz necessário que alguns processos sejam feitos como: a reciclagem, reutilização, compostagem, recuperação e aproveitamento energético (BRASIL, 2010).

As formas de destinação final dos RSU podem ser: aterros sanitários, aterros controlados e os vazadouros a céu aberto. Sendo o dispositivo do aterro sanitário a melhor forma de disposição de rejeitos no solo, sem trazer prejuízos à saúde pública e a segurança, além de minimizar os impactos ambientais. Para sua construção e funcionamento são utilizados princípios de engenharia para acomodar os resíduos numa menor área possível de forma compactada (ABNT, 1992). Corroborando com tais apontamentos, Gbanie et al. (2013) mencionam que os aterros são a forma correta de destinar os RSU, sendo necessário local o aterro de forma apropriada com vistas a evitar custos socioeconômicos e ambientais.

No que se refere à disposição final, os lixões e aterros controlados ainda são comumente empregados no Brasil e recebem mais de 81 mil toneladas dia, resultando em impactos negativos ao meio ambiente e saúde pública (ABRELPE, 2016). A Figura 1 ilustra a distribuição da utilização dos dispositivos de disposição final dos resíduos no Brasil.

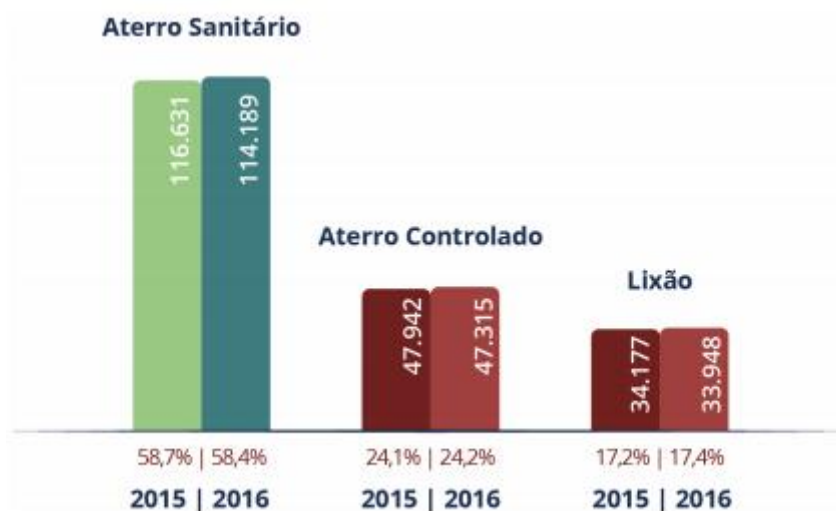


Figura 1 - Utilização dos dispositivos de disposição final de resíduos no Brasil por tipo de destinação
Fonte: ABRELPE (2016).

Nota-se pela Figura 1 que houve um decréscimo no percentual de resíduos levados para aterros sanitários do ano de 2015 para 2016, o que demonstra um retrocesso na disposição final dos RSU. Dos 5.570 municípios brasileiros, 1.559 ainda destinam seus resíduos para vazadouros a céu aberto, deste total, 836 municípios estão na região Nordeste, tornando essa região a que possui maior número de cidades que adotam essa modalidade de disposição final.

Na região Nordeste a geração de resíduos chegou a 55.056 ton/dia, com 43.355 ton/dia coletadas e deste montante 31,4% foi destinado a vazadouros a céu aberto, 33% a aterros controlados e 35,6% a aterros sanitários, é perceptível a predominância de destinação inadequada de 64,4% dos resíduos coletados (ABRELPE, 2016).

No semiárido a situação de disposição ainda se encontra inadequada em alguns estados. Na cidade de Juazeiro do Norte/CE, Cordeiro et al. (2012) constataram que o percolado advindo do aterro comum contamina o solo e a decomposição da matéria orgânica elimina para a atmosfera gases nocivos, resultando em consequências para os moradores do entorno. O município de Pau dos Ferros/RN também deposita seus resíduos em vazadouro a céu aberto que recebe, aproximadamente, 4 ton/dia. Na área do aterro comum percebe-se afloramento de chorume, presença de catadores, inexistência de isolamento físico e presença de animais. (LUNES et al., 2016; SANTOS, 2016).

No estado da Paraíba, no ano de 2015, foram gerados 3.551 ton/dia de RSU, sendo coletados 3.042 ton/dia. Deste total coletado, 943 ton/dia foram destinados a aterros sanitários, 1.113 ton/dia a aterros controlados e 986 ton/dia a aterros comuns (ABRELPE, 2015).

A Confederação Nacional de Municípios – CNM, desenvolveu no seu portal um site denominado observatório dos lixões, onde são disponibilizadas informações a nível nacional, estadual e municipal sobre a implementação da PNRS, fornecendo dados sobre a disposição final dos resíduos sólidos.

A partir deste verifica-se que no estado da Paraíba, dos 223 municípios, 74 destinam o RSU a aterros controlados ou comuns, porém nota-se que esse número pode ser bem maior, tendo em vista que 131 municípios paraibanos não informaram a CNM onde depositam seus resíduos. Algumas cidades estão se adequando as mudanças propostas pela PNRS, com iniciativa de 18 municípios de se adequarem as exigências legais, assentando seus rejeitos em aterros sanitários (CNM, 2017).

A Figura 2 representa por meio do mapa temático a distribuição espacial do estado da Paraíba com destaque às formas de destinação final dos RSU.

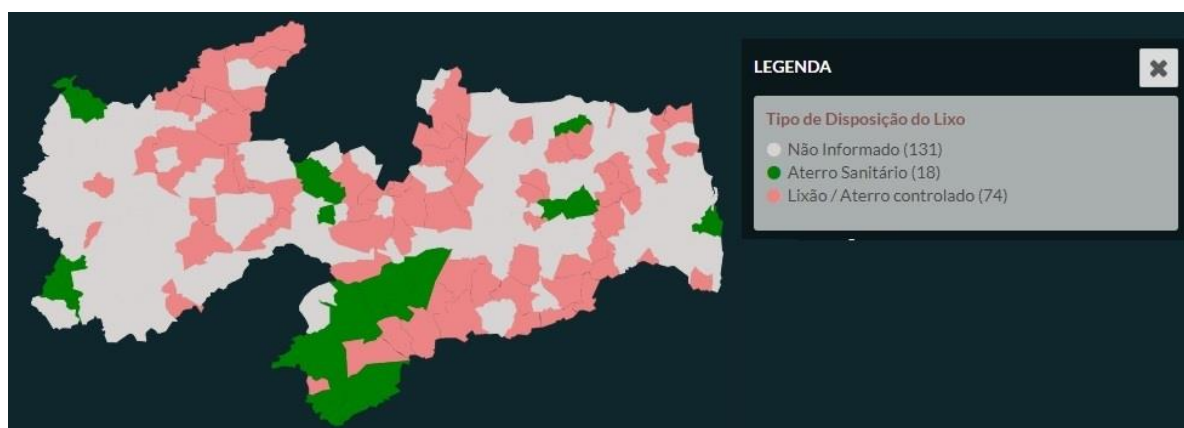


Figura 2 – Distribuição da disposição dos resíduos sólidos urbanos no estado da Paraíba.
FONTE: CNM (2017).

Algumas mudanças podem ser vistas no estado, em cidades de maior porte, a exemplo de Campina Grande no estado da Paraíba que destinava os resíduos a um aterro comum presente no mesmo município, ocupando uma área de 35 hectares, e adequou-se, passando a destinar seus rejeitos para um aterro sanitário no município vizinho de Puxinanã/PB (ALVES et al., 2013). Entretanto, cidades de menor porte também estão se adequando, a exemplo de Pedras de Fogo, que além de destinar seus resíduos ao aterro, ainda desenvolve políticas de coleta seletiva, e encaminham ao aterro somente o rejeito aumentando assim sua vida útil (SENA et al., 2015).

O município de Bom Sucesso/PB deposita os RSU no próprio município, em um aterro comum, sem nenhum tratamento dos resíduos, coleta seletiva, ou compostagem (CNM, 2017). É notório que a cidade de Bom Sucesso, a exemplo de outros municípios paraibanos, não se adequa nas determinações legais da PNRS, necessitando, portanto de adequações com finalidade de promover um gerenciamento ambiental adequado dos RSU.

A disposição em vazadouros atrai vetores de doenças, animais, seres humanos expostos a atividades de risco, além da geração de biogás e chorume. O biogás resultante da decomposição da matéria orgânica de forma anaeróbia é composto por gases danosos a vegetação, com odores desagradáveis, inflamáveis, e que contribuem com o efeito estufa. Já o chorume é resultante da decomposição da fração orgânica, porém resultando na forma líquida, composto de água, gorduras e lixiviados (ALMEIDA et al., 2014).

2.3 POLUIÇÃO PROVOCADA PELOS ATERROS COMUNS

Entende-se por poluição as alterações danosas ao meio biótico e abiótico, com o lançamento de resíduos, efluentes ou energias em discordância com padrões ambientais, que tragam prejuízos a saúde, segurança e bem-estar da população, ao desenvolvimento de suas atividades, resultando em degradação da qualidade do meio ambiente (BRASIL, 1981). Estudos sobre a poluição ambiental no Brasil têm sido desenvolvidos, a exemplo de Silva et al. (2016) que avaliaram a contaminação química e as decorrências contrárias que podem causar aos seres humanos a exemplo da magnificação trófica. Já Silva et al. (2013) abordaram a poluição hídrica decorrente da atividade de mineração de carvão, com a inserção de elementos químicos no Rio Tubarão no estado de Santa Catarina.

Nas áreas usadas como aterro comum não é diferente, ocorre à poluição do espaço onde os resíduos sólidos urbanos é depositado e do seu entorno. Para Oliveira et al. (2016) essas áreas utilizadas são ambientes com possibilidade de provocar poluição ambiental e alterações negativas a vida dos seres humanos. Através da análise de amostras de água detectou-se que o lixiviado advindo de um aterro de resíduos causou impactos ambientais negativos na qualidade da água na Polônia (MELNYK et al., 2014).

O despejo aberto, ou seja, a disposição em vazadouros, apresenta-se como uma forma barata e muito comum em países subdesenvolvidos ou em desenvolvimento, entretanto os riscos de poluição ambiental são altos, pois esta forma de disposição modifica os RSU através de processos físico-químicos e microbiológicos, resultando em matéria orgânica dissolvida e metais pesados dispostos no meio ambiente (AWASTHI; PANDEY; KHAN, 2017).

Os aterros comuns caracterizam-se como locais de destinação final do RSU em muitos municípios brasileiros, onde o RSU coletado é depositado diretamente sobre o solo, sem nenhuma impermeabilização, resultando em problemas de saúde pública, com a presença de vetores e mau cheiro advindo da decomposição da matéria orgânica (SANTOS; HARAGUCHI; LEITÃO, 2012).

Os vazadouros a céu aberto possuem uma característica intrínseca e particular que é a tríplice poluição, ou seja, degradação ambiental tripla: hídrica, edáfica e atmosfera (SANTOS; HARAGUCHI; LEITÃO, 2012; SALES et al., 2014; OLIVEIRA et al., 2016). Além das alterações adversas ao meio ambiente, a poluição constitui-se crime ambiental, prevista na Lei 9.605/1998, desde que cause danos a saúde humana, fauna e flora. Caso a poluição,

atmosférica ou hídrica, provoque deslocamento de habitantes ou falta de abastecimento de água, a pena é reclusão de um a cinco anos (BRASIL, 1998).

Para Posselt e Ries (2015) a disposição dos resíduos sólidos urbanos de forma inadequada resulta em contaminação do solo e da água pela percolação ou infiltração de chorume, que contamina corpos hídricos superficiais e subterrâneos, além da poluição do ar pelo biogás. Silva, Sá e Borges (2017) avaliaram os problemas advindos da queima dos resíduos sólidos urbanos presente em um aterro comum em Inhumas/GO, relatando: a presença de fumaça, pouca visibilidade na estrada, fuligem, mal cheiro e problemas de saúde.

2.3.1 Poluição do ar

Quando se fala sobre poluição do ar a preocupação em torno deste tema remota a década de 70 com o Decreto-Lei 1.413/1975, obrigando as indústrias a promoverem meios para evitar e/ou corrigir os efeitos adversos da degradação e contaminação ambiental, dentre eles os advindos da poluição do ar (BRASIL, 1975). No ano de 1980 através do zoneamento industrial, fica previsto o licenciamento par atividades industriais que emitam gases e vapores (BRASIL, 1980). Em 1981 com o surgimento do Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA fica atribuída a esse órgão estabelecer resoluções que controlem a poluição, dentre elas a atmosférica.

Conforme as resoluções do CONAMA a poluição do ar advem de fontes fixas (indústrias) ou móveis (veículos automotores). Em 1986, através da resolução 018 ficou instituído o Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores – PROCONVE, três anos após surge o Programa Nacional de Controle da Poluição do Ar – PRONAR (resolução 05/1989), ambos com o objetivo de estabelecer limites para as emissões atmosféricas, na busca de uma melhor qualidade do ar (BRASIL, 1986; BRASIL, 1989).

Entende-se por poluente atmosférico aquele que destoa dos níveis estabelecidos e que podem tornar o ar ofensivo à saúde e ao bem-estar público, além de causarem problemas a fauna, flora, materiais e as atividades humanas. Logo se faz necessário avaliar parâmetros que determinam a qualidade do ar, para tanto são determinados padrões primários e secundários de concentração de poluentes (BRASIL, 1990). Estas resoluções do CONAMA vêm sendo avaliadas e atualizadas ao longo dos anos, tanto para fontes fixas como para móveis.

A poluição do ar põe em risco a saúde dos seres humanos em todo o mundo, principalmente em países em desenvolvimento, provocando mortes prematuras, doenças

respiratórias e cardiovasculares. As pessoas que vivem em áreas urbanas estão expostas a poluição atmosférica, respirando um ar com níveis de concentração de poluente que excedem os limites estabelecidos pela Organização Mundial de Saúde (OMS). A população exposta fica susceptível a doenças respiratórias agudas e crônicas, câncer, doenças cardíacas e respiratórias, acidente vascular cerebral (AVC), sendo as crianças o grupo mais exposto. O preocupante é que os níveis de poluição vêm aumentando em ritmo acelerado, sendo necessário planejamento e estratégias de intervenção (NANDASENA; WICKREMASINGHE; SATHIAKUMA, 2013; FRIEDRICH, 2016; SHRIVASTAVA; SHRIVASTAVA; RAMASAMY, 2017).

No Brasil não é diferente, as emissões atmosféricas, sejam de fontes fixas ou móveis, tem causado transtornos a saúde da população. Um estudo realizado na cidade de Cuiabá e Várzea Grande aponta que os idosos que residem próximo a locais de grande fluxo de veículos tem uma maior probabilidade de morrer por doenças cardíacas, devido a poluição advinda dos veículos (RODRIGUES et al., 2017).

Drumm et al. (2014) associam a poluição atmosférica a fenômenos como: chuva ácida, efeito smog, efeito estufa. Um estudo desenvolvido em Cubatão/SP, que segundo os autores é uma cidade cronicamente poluída, correlacionou, através de uma análise de séries temporais, a concentração de poluentes atmosféricos e o numero de internações em crianças e adultos com doenças respiratórias e cardiovasculares, respectivamente, obtendo expressiva associação (NARDOCCI et al., 2013).

A poluição do ar por agrotóxicos, pouco difundida na comunidade acadêmica brasileira, carece de atenção devido ao seu grau de toxicidade, podendo ocasionar doenças como linfoma e esclerose (SOUZA et al., 2017). David, Rizol e Nascimento (2017) utilizaram um modelo computacional para avaliar as internações em crianças causadas pela poluição atmosférica, avaliando poluentes como material particulado (MP₁₀) e dióxido de nitrogênio (NO₂). Cristale et al. (2012) afirmam que a queima da cana de açúcar interfere na qualidade do ar, aumentando os níveis de hidrocarbonetos policíclicos aromáticos (HPA), o que acarreta risco a saúde publica.

Os processos físico-químicos e microbiológicos presentes em um aterro comum resultam em subprodutos como: biogás e chorume. O biogás é composto por gases de efeito estufa, já o chorume é composto por matéria orgânica, metais pesados, e a sua ação no solo e na água, superficial ou subterrânea, provoca danos ao meio ambiente. Vale salientar que a produção desses compostos perdura por anos mesmo após o encerramento das atividades de uma área destinada a receber RSU (PRATES et al., 2016).

2.4 PROBLEMAS AMBIENTAIS PROVOCADOS PELOS GASES PROVENIENTES DO RESÍDUO SÓLIDO URBANO E SUA QUEIMA

Na avaliação da composição gravimétrica dos resíduos sólidos domiciliares percebe-se uma grande fração de matéria orgânica, em que geralmente esse material possui a maior porcentagem. Alguns estudos desenvolvidos em diferentes cidades do país apontam o percentual de matéria orgânica dos resíduos: no município de Salinas – MG 46,45%; em Jaú – SP, 50%; em Porto de Moz – PA, 46%; em Mamborê - PR, 54%; em Barra de São Miguel – PB, 55,1%; logo é notório, pelos valores percentuais, a predominância de matéria orgânica nos RSU (COSTA et al., 2012; REZENDE et al., 2013; SOUTO; RAIMAM; ALBINO, 2013; ARAÚJO et al., 2015; GALDINO; MARTINS, 2016).

A presença de matéria orgânica desencadeia processos biogeoquímicos de ciclagem desta a fim de mineralizar os compostos, entretanto este processo, realizado por microrganismos, resulta em eliminação de gases do efeito estufa na área dos vazadouros (RESENDE et al., 2013; SANTOS et al., 2014). Para Song et al. (2015) o aterro de resíduos urbanos tem como função, dentre outras, a deterioração de compostos biodegradáveis graças a presença de comunidades microbianas, reduzindo substâncias complexas a simples.

De acordo com Zhou, Jiang e Zhao (2016) o resíduo sólido em decomposição é uma grande fonte de gases do efeito estufa, dentre eles: dióxido de carbono (CO_2), metano, (CH_4) e óxido de nitrogênio (NO_2). Segundo Islam (2017) estes gases estão associados a mudanças climáticas globais, em seu estudo o autor avalia as emissões de gases do efeito estufa e o fluxo de carbono advindo dos resíduos urbanos de Bangladesh. Já Zhou et al. (2015) abordam que o ciclo do carbono é alterado pelos resíduos urbanos, entretanto, quando estes são bem gerenciados, através do emprego de técnicas ambientais, pode-se reduzir as emissões de carbono. Sanci e Panarello (2016) utilizaram análises químicas em isótopos de carbono para detectar origem e migração do metano e dióxido de carbono advindo de resíduos sólidos urbanos.

O biogás, composto principalmente de metano (CH_4), dióxido de carbono (CO_2), sulfeto de hidrogênio (H_2S), amônia (NH_3), além de outros gases e vapor de água, é produzido em condições anaeróbias, sendo que o metano é vinte e cinco vezes mais poluente que o dióxido de carbono no processo do aquecimento global (RUBIO-ROMERO; ARJONA-JIMÉNEZ, LÓPEZ-ARQUILLOS, 2013; XU et al., 2014; HERNÁNDEZ; MARTÍNS, 2016; PLUGGE, 2017). Logo é notória a importância da coleta e tratamento desse subproduto,

tendo em vista que seu descarte para o meio é mais danoso. O biogás gerado na degradação dos resíduos é fonte de geração de energia e gera crédito de carbono, além de permitir autonomia energética, evitando sua importação e gerando benefícios econômicos (SILVA et al., 2009; PEDOTT; AGUIAR, 2014).

Outro problema na gestão dos resíduos sólidos urbanos é a queima, uma prática muito adotada nas zonas rurais, devido a ausência de dispositivos de descarte final adequado. Holgado-Silva et al. (2014) afirmam que a queima dos resíduos sólidos é a destinação mais utilizada pelos moradores. Ceretta, Silva e Rocha (2013) desenvolveram um trabalho na área rural de São João – PR, onde obtiveram como resultado que 37% das famílias entrevistadas queimam os resíduos recicláveis, ao passo que os rejeitos oriundo da higiene pessoal é queimado por 85% dos pesquisados.

Entretanto esta prática é vista, também, nos aterros comuns, onde para reduzir o volume dos resíduos sólidos urbanos adota-se a queima. Lopes et al. (2016) e Lunes et al. (2016) constataram a queima dos resíduos sólidos do aterro comum de Pau dos Ferros – RN, sendo que este vazadouro recebe todos os tipos de resíduos do município, chegando os autores a constatarem no local até material hospitalar.

Ismael, Leite e Silva (2013) constataram que no aterro comum de Pombal – PB ocorre à queima do material ali disposto e os gases originados dessa queima são tóxicos devido à composição química dos resíduos presentes. Este problema repete-se em outros países, Vreeland et al. (2016) apresentaram que a queima dos resíduos sólidos urbanos na Índia é comum, o que resulta em emissões atmosféricas prejudiciais a saúde humana. Já Wang et al. (2017) relataram a presença de metais pesados, como mercúrio (Hg), arsênio (As), chumbo (Pb), cádmio (Cd), cromo (Cr), selênio (Se), cobre (Cu), zinco (Zn) e o níquel (Ni) no ar da China, advindo da queima dos RSU. Na Indonésia Bastian et al. (2013) verificaram a presença de dibenzo-policlorados e dioxina dibenzofurano decorrentes da queima dos resíduos sólidos urbanos a céu aberto.

A combustão dos resíduos sólidos urbanos dispostos a céu aberto agrava a poluição atmosférica pela emissão de poluentes, gases de efeito estufa, material particulado tóxico, sendo que estas emissões não estão incluídas nos inventários, porém elas são significativas e merecem expressiva atenção tendo em vista os resultados sobre a saúde humana (WIEDINMYER; YOKELSON; GULLETT, 2014). Além das emissões atmosféricas, as cinzas resultantes da queima contaminam o solo e são lixiviadas até corpos hídricos e lençóis freáticos, provocando poluição hídrica (GWENZI et al., 2016).

A fim de se averiguar a distribuição em função do tempo e do espaço modelos matemáticos complexos são empregados mediante recursos computacionais visando simular a dispersão e transporte destes poluentes nos distintos compartimentos do ambiente.

2.5 DISPERSÃO DE POLUENTES

O crescimento dos grandes centros urbanos traz atrelado consigo a poluição do ar por fontes fixas e móveis, em contrapartida os cientistas almejam entender a dispersão dos poluentes na atmosfera (LEITE; MOREIRA, 2016). Para Shen, Cui e Zhang (2017) essa dispersão é um fator gerador da contaminação do ar nos ambientes urbanos onde os poluentes industriais e advindos de escapamentos de veículos estão presentes. Segundo Martins et al. (2017), fatores como a topografia montanhosa e a brisa do mar dificultam a dispersão dos poluentes na cidade do Rio de Janeiro.

Com o intuito de proteger a qualidade do ar, a investigação sobre o transporte e a dispersão de poluentes tem sido foco de estudos, principalmente no meio urbano onde se busca o conforto e melhor qualidade de vida dos seres humanos (LATEB et al., 2014). Para Ribes et al. (2016) a utilização de modelagem para estudar os fenômenos de dispersão de poluentes atmosféricos resulta em melhoria na qualidade da gestão da poluição.

A dispersão ocorre em outros meios que não seja o atmosférico, Silva, Pecly e Azevedo (2017) avaliaram a dispersão de poluentes em um rio utilizando a técnica de traçadores fluorescentes. Fan, Bravo e Collischonn (2016) utilizaram a modelagem para avaliar a dispersão de poluentes em corpos d'água. Já Batista e Harari (2017) avaliaram a dispersão de poluentes microbiológicos na água do mar.

Leite e Moreira (2016) utilizaram coeficientes de difusão vertical para avaliarem a dispersão de poluentes atmosféricos em uma camada limite convectiva. Já Pavani et al. (2016) utilizaram o modelo Brazilian developments on the Regional Atmospheric Modeling System – BRAMS, para simular a dispersão de cinzas vulcânicas na atmosfera. Iriart e Fisch (2016) utilizaram o modelo Weather Research and Forecasting - WRF-CHEM, para simular a dispersão de poluentes emitidos por veículos de lançar satélites.

Os modelos de dispersão que analisam a concentração de poluentes podem auxiliar no estudo de gases liberados em ataques terroristas ou vazamentos (SHEN; CUI; ZHANG, 2017). Para prever as concentrações de poluentes os modelos de dispersão utilizam

parâmetros meteorológicos, com destaque a direção e velocidade dos ventos (ANU et al., 2015; HOSSAIN; EASA, 2012).

2.6 VARIÁVEIS METEOROLÓGICAS QUE INFLUÊNCIAM OS GASES DOS ATERROS COMUNS E SUA DISPERSÃO

Os acontecimentos meteorológicos direcionam a dispersão dos poluentes haja vista que estes encontram-se presentes na atmosfera, logo é notória a relação da meteorologia com a qualidade do ar (MOREIRA; TIRABASSI; MORAES, 2008). Corroborando com tal apontamento Barros et al. (2013) citam algumas variáveis meteorológicas que estão ligadas a qualidade ambiental, tais como: a temperatura do ar, umidade, ventos, pressão atmosférica e precipitação pluviométrica.

Barros (2014) desenvolveu um trabalho relacionando as variáveis meteorológicas com a concentração de material particulado $< 10 \mu\text{m}$ (MP_{10}), encontrando correlações com a pressão, umidade, ventos e precipitação pluviométrica. Para a precipitação é inversamente proporcional, pois a chuva lava o poluente da atmosfera, já a pressão dificulta o transporte do poluente ocasionando maior concentração.

Anu et al. (2015) utilizaram o parâmetro meteorológico velocidade do vento para avaliar a dispersão de poluentes atmosféricos chegando a conclusão que a velocidade e a direção do vento estão diretamente relacionadas com a dispersão de poluentes do ar. Nourbakhsh, Mowla e Esmaeilzadeh (2013) ressaltam que a direção e a velocidade do vento podem orientar a direção, taxa e dispersão de contaminantes do ar, desta forma se a velocidade do vento aumentar ocorre o afastamento das partículas do ar para locais vizinhos.

Logo, diante de tais pressupostos, a dispersão de poluentes atmosféricos é um desafio permanente, provocada pela turbulência atmosférica, que resulta no surgimento de difusão anômala. Se não fosse a turbulência, os poluentes seguiriam as linhas arrojadas pela velocidade média dos ventos (GOULART, 2017).

Para Ferreira et al. (2017) a precipitação pluviométrica é importante na dispersão de poluentes atmosféricos atuando como uma barreira natural. Em meio a essa problemática os modelos numéricos para avaliar a dispersão de contaminantes atmosféricos são largamente utilizados para estudar estes fenômenos (MAZUR; BRATNICKI; ZWOZDZIAK, 2014)

2.7 MODELOS NUMÉRICOS DE TRANSPORTE DE POLUENTES ATMOSFÉRICOS

Mariano (2006) descreve dois métodos numéricos para avaliar a dispersão de poluentes: o Euleriano e o Lagrangeano. O primeiro apresenta, em um sistema fixo de coordenadas, o comportamento dos poluentes; o segundo é apresentado em um sistema de coordenadas que segue o movimento do fluido. O modelo gaussiano é um intermediário, caracterizado por apresentar a pluma de contaminação em forma de nuvens de material contaminante.

A dispersão no enfoque Euleriano é estudada por uma equação diferencial parcial para conservação da massa. Desta equação é possível analisar a dispersão de uma fonte através de condições de contorno e iniciais. Um exemplo deste modelo é a equação de advecção-difusão. Para esse modelo adota-se uma distribuição uniforme dos poluentes, logo este é o modelo utilizado para simular concentrações em camadas próximas do solo (MORAES, 2004; MARIO, 2012).

Já na aproximação Lagrangeana é formulado um modelo de trajetória para o movimento das partículas do fluido. Esta técnica dispensa a resolução da equação de advecção-difusão para obtenção de concentrações médias de poluentes. Este modelo evita incertezas numéricas, é eficiente na avaliação da dispersão de partículas e reproduz o escoamento da pluma de contaminantes (MORAES, 2004; MARIO, 2012).

Kota, Ying e Zhang (2013) utilizaram um modelo Euleriano tridimensional para simular a dispersão de gases, através da análise de poluentes como CO e NO_x. Nunes (2013) afirma que para este modelo a dispersão é avaliada através de uma equação diferencial parcial para a conservação da massa do poluente, logo obtém-se um modelo matemático aplicando-se condições de contorno e iniciais.

Pedone et al. (2017) utilizaram o modelo Lagrangeano para quantificar as emissões de CO₂ em conjunto com uma modelagem Euleriana para avaliar a dispersão desse poluente. A combinação dos dois modelos apresentou bons resultados, sendo um estudo inovador nesta área, permitindo quantificar a emissão, discriminá-la, e avaliar os impactos da pluma de CO₂ sobre áreas povoadas no sul da Itália.

O modelo Gaussiano, também conhecido como modelo da pluma Gaussiana é resolvido pela equação apresentada na Equação 1.

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

Sendo:

C: concentração de poluentes;

X: distância longitudinal;

Y: Distância latitudinal;

Z: Altura do solo;

Q: Vazão de lançamento de poluente;

U: Velocidade média do vento;

H: Altura da chaminé;

α : Coeficiente de reflexão;

σ_y : Coeficiente de dispersão lateral;

σ_z : Coeficiente de dispersão vertical.

Cheng, Huang e Dong (2015) desenvolveram um estudo utilizando o modelo gaussiano para avaliar a dispersão de poluentes sob incertezas de intervalos e variações sazonais. A Figura 3 apresenta o modelo de pluma gaussiana resultante da Equação 1.

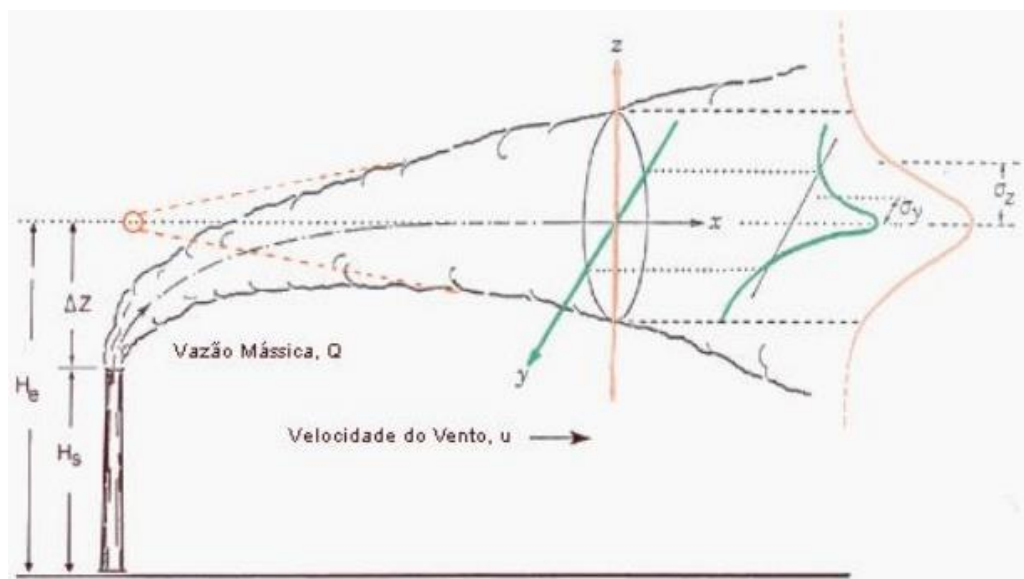


Figura 3 – Modelo de pluma Gaussiana
Fonte: Adaptada de Nunes (2013).

2.7.1 Modelo HYSPLIT

Segundo Mariano (2006) este sistema analisa a trajetória e simula a deposição de gases e partículas usando emissão de nuvens de partículas poluidoras, esse modelo é alimentado por dados meteorológicos, e caracteriza-se como uma mistura do método Euleriano e Lagrangeano. A sigla representa Hybrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory – HYSPLIT, foi desenvolvido pelo National Oceanic and Atmospheric Administration - NOAA.

Esta ferramenta tem sido amplamente empregada em trabalhos científicos. Cedraz (2017) utilizou para avaliar a concentração atmosférica de MP_{10} em três localidades do Rio de Janeiro, onde constatou que os resultados são limitados devida a baixa resolução, logo é necessário considerar as estações do ano, fatores climáticos e dados meteorológicos; Já Duarte (2016) utilizou a ferramenta para avaliar a origem e o destino de aerossóis atmosféricos sólidos finos em Natal – RN, constatando através da modelagem que o final de semana são os dias de menores concentrações de poluentes, tendo em vista o baixo fluxo de veículos;

Enquanto, Galvão (2016) avaliou a trajetória, altura, área e dispersão do material particulado advindo da queima da castanha de caju, em João Câmara/RN, encontrando uma predominância de partículas finas resultantes da queima da biomassa, além de elementos com Fe, K, Cl, S e Ca, sendo que estas partículas podem chegar a regiões distantes do ponto de emissão.

Chen et al. (2013) utilizaram o modelo para avaliar a dispersão de metais pesados contidos em aerossóis emitidos por uma indústria na Espanha. Ngan, Stein e Draxler (2015) utilizaram a ferramenta em conjunto com o modelo meteorológico Weather Research and Forecasting (WRF).

3 METODOLOGIA

3.1 ÁREA DE ESTUDO

O município de Bom Sucesso situa-se na região Oeste do sertão Paraibano, na microrregião de Catolé do Rocha (Figura 4). Faz fronteiras ao Norte com as cidades de Alexandria/RN e Brejo dos Santos/PB, ao Leste com Brejo dos Santos/PB e Jericó/PB, ao Sul com Lagoa/PB e ao Oeste com Alexandria/RN e Santa Cruz/PB. Criado pela lei nº 3.049 de 17 de Junho de 1963 e instalado em 02 de agosto de 1963. Bom Sucesso/PB possui uma área de 184,102 km² e uma população de 5.035 habitantes, de acordo com o último censo de 2010, possuindo uma densidade demográfica de 27,35 hab/km² de acordo com IBGE (2017).



Figura 4 - Localização do município de Bom Sucesso/PB
Fonte: Adaptado do Google Earth (2017).

O município deposita seus resíduos em um aterro comum, localizado em seus limites, estando situado nas proximidades da área urbana. O qual iniciou sua operação desde 2001, conforme lei nº 199/2001 que dispõem sobre a compra do terreno para implantação do aterro comum. O terreno adquirido pelo município para funcionamento do vazadouro possui as seguintes dimensões: 136 m ao Norte, 89 m ao Sul, 92,5 m ao Leste e 51 m ao Oeste.

O aterro comum recebe resíduos urbanos, da construção civil, restos de abates de animais, além da presença de uma vala para infiltrar efluentes advindos de fossa. A área não possui isolamento físico, aterramento dos resíduos, manta de drenagem subterrânea, captação

e tratamento de chorume e biogás. Tem-se ainda a presença de um catador autônomo, que segrega e vende materiais recicláveis. A Figura 5 apresenta a localização do aterro comum em relação a cidade de Bom Sucesso – PB, distante, aproximadamente 1,5 km do centro da cidade. Percebe-se a presença de corpos hídricos próximo a área do vazadouro, distantes, aproximadamente, 300 m do centro do aterro comum.

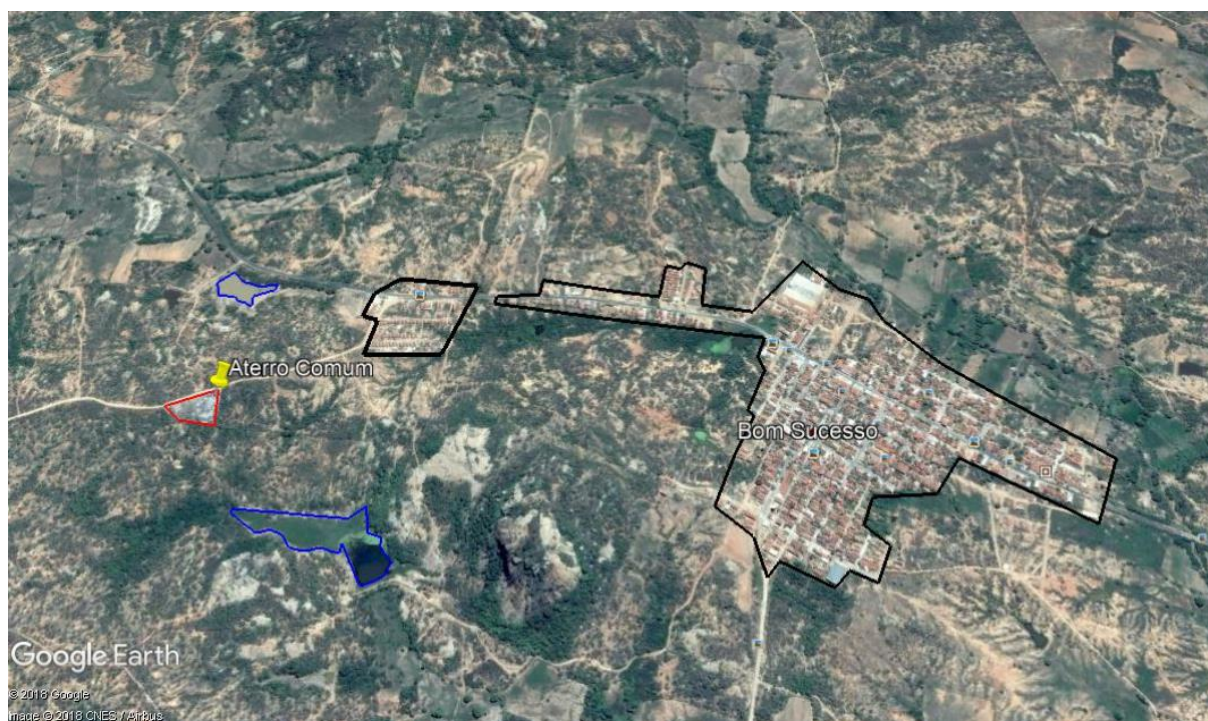


Figura 5 - Localização do aterro comum em relação à cidade de Bom Sucesso/PB. Área urbana em preto. Corpos hídricos superficiais em azul. Aterro comum em vermelho.

Fonte: Google Earth (2017).

3.2 PARÂMETROS MEDIDOS

Inserido no polígono das secas, o município de Bom Sucesso possui clima quente e úmido com chuvas de outono e inverno. De acordo com o zoneamento do Estado da Paraíba em regiões bioclimáticas o município apresenta clima Tropical, quente e de seca atenuada, variando entre 7 a 8 meses secos. Com pluviosidade média de 1.000 mm, vegetação do tipo Caatinga, e temperatura média anual entre 27°C a 28°C (SOUSA, 2016).

Para o presente estudo foram empregados dados meteorológicos do Instituto Nacional de Meteorologia – INMET, da estação meteorológica automática de São Gonçalo/PB, referentes aos dados de precipitação, temperatura e umidade do ar, direção e velocidade dos ventos, além da radiação global. Justifica-se a escolha desta estação, pois na localidade de

estudo não possuía tal instrumentação, desta forma utilizou-se da estação situada mais próxima em termo de distância, além de apresentar condições topográficas mais semelhantes.

Estes dados auxiliaram na identificação de dias atípicos e a influência da sazonalidade no transporte e dispersão dos poluentes atmosféricos.

3.3 PROCEDIMENTOS DE CAMPO

Para a determinação da composição dos resíduos sólidos e estimativa da produção dos gases realizou-se visita *in loco* para determinação da composição gravimétrica, adotaram-se procedimentos de quarteamento da amostra representativa. O procedimento de campo ocorreu no dia 06 de novembro de 2017.

Para a realização do quarteamento utilizou-se a metodologia empregada por Lunes (2017) adaptada de Alkmin e Ribeiro Júnior (2017). Após a descarga do caminhão coletor, por volta das 10:00 horas da manhã, foram separadas, através de um balde de 20 litros, 5 amostras de resíduos sólidos urbanos do montante despejado pelo caminhão compactador, sendo dispostas uma no topo e quatro na base da pilha de material, possibilitando promover maior representatividade.

Para este trabalho utilizaram-se os seguintes instrumentos: lona plástica, pá, enxada, sacos plásticos, balança e Equipamentos de Proteção Individual - EPI's. As amostras coletadas foram depositadas sobre a lona plástica (Figura 6a, b), abertas e reviradas (Figura 6c, d) objetivando a homogeneização do material. Em seguida procedeu-se o quarteamento, onde o montante de resíduos sólidos urbanos foi dividido em quatro partes iguais e em seguida eliminada duas partes opostas. Posteriormente foi feita a separação e pesagem dos resíduos nas seguintes categorias: matéria orgânica, papel e papelão, plásticos, metal, vidro, rejeitos, tecidos, madeira e resíduos de parques e jardins.

Para fins de obtenção de informações sobre a estrutura do aterro comum, tal como os materiais descartados, realizou-se entrevista com o catador existente na área. Desta forma, possibilitando obter um contexto histórico da importância da área frente a suas adversidades.

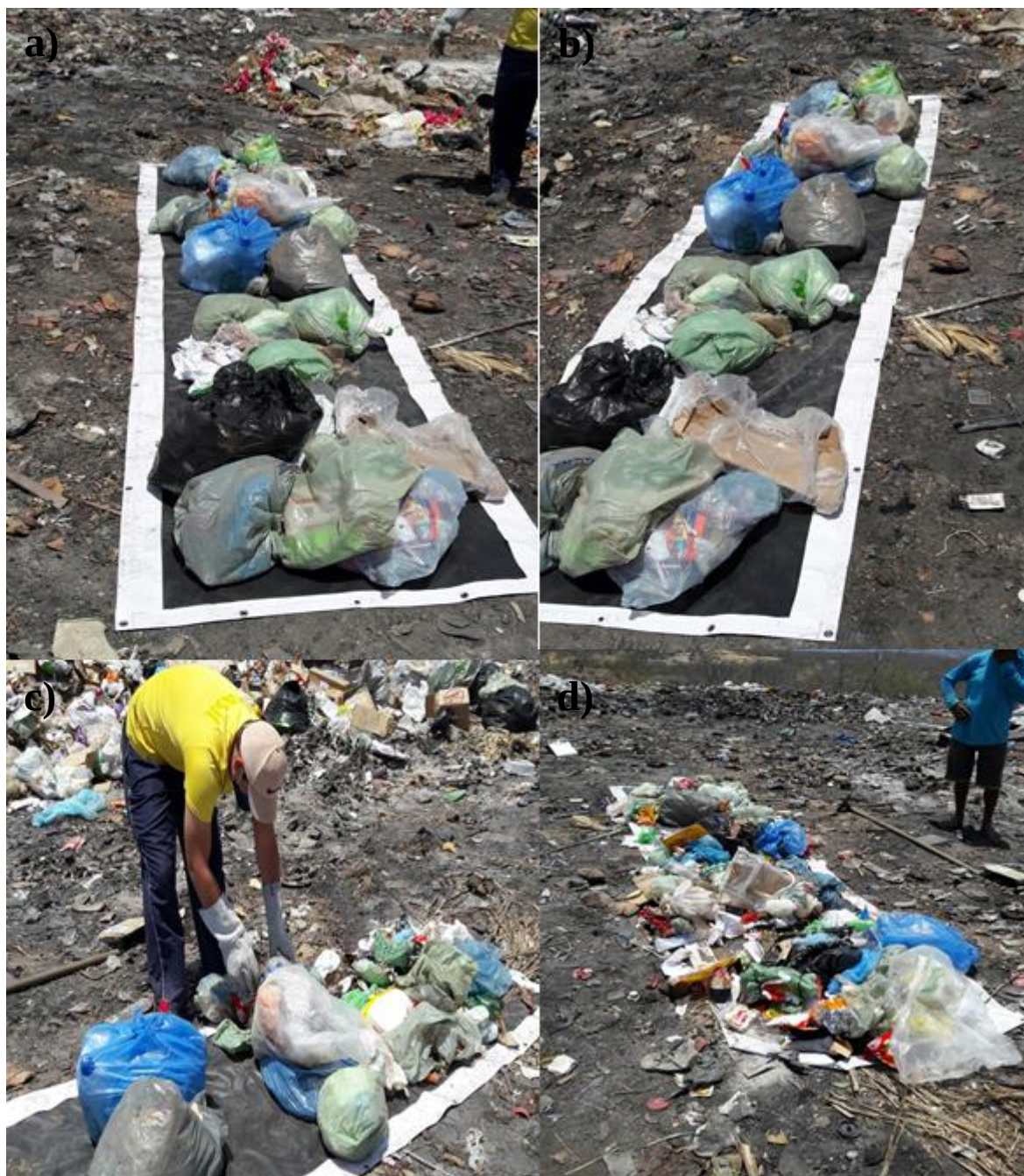


Figura 6 - Metodologia de quarteamento para análise da composição gravimétrica: a) e b) Disposição das amostras sobre a lona; c) Abertura dos sacos contendo resíduos sólidos urbanos; d) separação dos materiais.

Fonte: Própria do autor (2018)

3.4 ESTIMATIVA DO BIOGÁS

Para a estimativa do biogás gerado pela decomposição orgânica dos resíduos sólidos foi utilizada a metodologia proposta pelo Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC, 1996), conforme Salvador (2012) e Souza (2013). Para estimar o biogás foi

necessário aferir dados sobre o aterro comum como o total de resíduos dispostos na área uma vez que este tipo de área degradada não dispõe de controle de entrada e saída de materiais.

O método envolve a estimativa da quantidade de carbono orgânico (CO) degradável presente nos RSU, calculando assim a quantidade de metano (CH₄) que pode ser gerada por determinada quantidade de resíduo depositado, considerando diferentes categorias de resíduos sólidos domésticos. Utilizou-se a equação 2 para estimar a quantidade de metano gerado:

$$Q_{CH_4} = \frac{Pop_{urb} \cdot Taxa_{RSD} \cdot RSDf \cdot L_0}{\rho_{CH_4}} \quad \text{Eq. 2}$$

Em que:

Q_{CH_4} : metano gerado [m³CH₄/ano];

Pop urb: população urbana [habitantes];

Taxa RSD: taxa de geração de resíduos sólidos domiciliares por habitante por ano [kg de RSD/habitante/ano];

RSDf: fração de resíduos sólidos domésticos depositada em locais de disposição de resíduos sólidos [%];

L_0 : potencial de geração de metano do RSU [kg de CH₄/kg de RSD];

ρ_{CH_4} : massa específica do metano [kg/m³];

O potencial de geração de metano L_0 foi estimado através da composição dos resíduos. O valor do parâmetro L_0 foi estimado pela Equação 3, que se baseia no conteúdo de carbono do resíduo, na fração de carbono biodegradável e num fator de conversão estequiométrico.

$$L_0 = FCM \cdot COD \cdot CODf \cdot \left(\frac{16}{12}\right) \quad \text{Eq. 3}$$

Sendo:

L_0 : potencial de geração de metano do resíduo sólido urbano [kg de CH₄ /kg de RSD];

FCM: fator de correção de metano [%];

COD: carbono orgânico degradável [kg de C/kg de RSD];

CODf: fração de COD dissociada [%];

(16/12): fator de conversão de carbono em metano [kg de CH₄ /kg de C].

A Tabela 1 apresenta os valores para o parâmetro FCM. Esse valor varia em função do local de disposição.

Tabela 1 – Valores para o parâmetro FCM

Tipo de local de disposição	FCM
Aterro comum	0,4
Aterro controlado	0,8
Aterro Sanitário	1,0
Locais sem categoria	0,6

Fonte: IPCC (1996, apud Salvador, 2012)

Para a obtenção do parâmetro COD foi utilizado a equação 4, que se baseia na composição do RSU e no potencial de produção de carbono que cada componente apresenta (Tabela 2).

$$\text{COD} = (0,40.A) + (0,17.B) + (0,15.C) + (0,40.D) + (0,30.E) \quad \text{Eq. 4}$$

Sendo:

COD: carbono orgânico degradável [kg de C/kg de RSD];

A: fração de papel e papelão no RSU;

B: fração de resíduos de parques e jardins no RSU;

C: fração de restos de alimentos no RSU;

D: fração de tecidos no RSU;

E: fração de madeira no RSU.

Tabela 2 – Teor de carbono orgânico degradável para cada componente do resíduos sólidos urbanos.

Componente	Porcentagem de COD (em massa)
A) Papel e Papelão	40
B) Resíduos de parques e jardins	17
C) Restos de alimentos	15
D) Tecidos	40
E) Madeira	30

Fonte: IPCC (1996, apud Salvador, 2012).

Para obtenção do parâmetro da fração de carbono orgânico degradável (CODf) foi utilizada a Equação 5. O mesmo indica a fração de carbono que é disponível para a decomposição bioquímica.

$$\text{CODf} = (0,014.T) + 0,28 \quad \text{Eq. 5}$$

Sendo:

CODf: fração de COD dissociada [%];

T: temperatura na zona anaeróbia [°C].

3.5 ROSA DOS VENTOS

Para obtenção da rosa dos ventos utilizou-se os dados de velocidade (m.s^{-1}) e direção (°) dos ventos para o período de 13/01/2017 a 31/12/2017, obtidos no site do INMET (<http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=estacoes/estacoesAutomaticas>), referentes a estação automática de São Gonçalo/PB. Com a planilha contendo os dados horários de velocidade e direção dos ventos alimentou-se o programa WRPLOT e obteve-se um histograma das velocidades do vento e a rosa dos ventos. Desta forma, neste intervalo foi possível verificar a sazonalidade da dispersão dos poluentes em diferentes épocas (chuvosa e seca), considerando a ocorrência e identificação de dias atípicos.

3.6 MODELO HYSPLIT DE DISPERSÃO DE POLUENTES

Posteriormente foram realizadas as análises das direções da dispersão dos poluentes quanto aos locais atingidos e consequente determinação do distanciamento da propagação dos poluentes, quanto ao local de emissão. Para simulação numérica da dispersão dos poluentes do aterro comum foi utilizado o modelo HYSPLIT (HYbrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory), disponível em <http://www.arl.noaa.gov/ready/hysplit4.html>. Utilizando-se de gráficos de dispersão dos poluentes produzidos e visualizados através do próprio modelo.

Foram simulados diversos dias, sendo apresentados neste trabalho as simulações referentes as condições atípicas ou eventos extremos, por se tratarem de dias com características adversas, tais como intensa precipitação, direção do vento variável, variações de temperatura, em que classificaram-se os dias atípicos no período seco e chuvoso. Para o

cálculo da dispersão utilizou-se como tipo de versão *Unknown Material (Generic Mass, < 24 hrs)* que fornece uma pegada de dispersão provável com as informações conhecidas num período inferior a 24 horas; o banco de dados meteorológico utilizado foi o REANALYSIS (global, 1948 presente) sendo um conjunto de dados arquivados desde 1948 até o presente momento.

O modelo possui cinco subseções de informações sobre: Parâmetros do termo fonte (*source term parameters*), parâmetros de tempo de execução (*runtime parameters*), parâmetros de deposição (*deposition parameters*), opções avançadas (*advanced options*) e opções de exibição (*display options*).

Nos parâmetros do termo fonte (*source term parameters*) são requeridos os seguintes itens:

- *Dispersion direction*: direção da dispersão, podendo ser “*Forward*” (para frente) ou “*Backward*” (para trás). Neste trabalho utilizou-se o *Forward*, pois o intuito foi projetar a trajetória e dispersão dos poluentes do aterro comum de Bom Sucesso/PB.
- *Release starting time* (UTC): lançamento de tempo de início, onde é especificado ano, mês, dia, hora e minuto. Esta parte foi preenchida conforme os dias atípicos escolhidos com base nos dias que apresentaram características peculiares, adversas ou extremas.
- *Source* latitude/longitude: conforme dito anteriormente utilizou-se a latitude 6.412222 S e a longitude 37.942222 W, ponto referente ao local da queima dos resíduos presentes no aterro comum.
- *Release top*: altura máxima e mínima da fonte acima do solo, em metros. Utilizou-se o padrão do programa de 0 e 50 metros, respectivamente.
- *Release quantity*: quantidade de liberação de unidade de massa. Neste trabalho utilizou-se os valores obtidos em kg/h de CH₄, H₂S e NH₃, encontrados através da relação de percentual desses componentes no biogás, divididos pela densidade (kg/m³).
- *Release duration*: duração do lançamento. Adotou-se um período de duração de 6 hrs de queima dos resíduos, iniciando-se as 07:00 hrs prolongando-se até as 13:00 hrs. Este período é o mesmo utilizado no parâmetro *Release starting time* (UTC). Que corresponde a 10h e 16h no fuso norte americano, respectivamente.
- Já os parâmetros de tempo de execução (*runtime parameters*) remetem:
- *Total duration*: duração do calculo em horas, mesmos valores adotados no parâmetro *release duration*, um período de 6 hrs.

- *Averaging period/ Output interval*: período médio e intervalo de saída definido em horas. Utilizou-se também 6 hrs com a finalidade de se obter apenas um mapa resultante após este intervalo.
- *Top of averaged layer*: parte superior da camada média utilizou-se o valor adotado no programa de 100 metros
- Quanto aos parâmetros de deposição (*deposition parameters*) foram determinados:
- *Pollutant characteristic*: característica do poluente, gás ou partícula. Como está sendo analisado gases (CH₄, H₂S e NH₃) adotou-se a opção gás.
- *Dry deposition velocity* (m/s), como não se sabe o valor da deposição seca utilizou-se o padrão do programa de 0,001 m/s.
- *Henry's constant for wet deposition of a gas*, constante de Henry para deposição úmida do gás, como não é objetivo desse trabalho estudar deposição úmida utilizou-se um valor zero.
- *Wet deposition of particle: In-cloud (1/s) and below-cloud (1/s)*, depósito úmido de partícula na nuvem e abaixo da nuvem, como não é objetivo desse trabalho estudar deposição úmida utilizou-se um valor zero.
- *Sum deposition over total run time*, o modelo oferece a opção de poder acumular a deposição antes de cada período ou ter a soma dessa deposição durante a plotagem do modelo, neste caso essa foi a utilizada no trabalho.
- *radioactive decay half-life (days)*: decaimento dos poluentes transmitidos pelo ar e depositados, utilizou-se o valor zero nesse parâmetro.

Quanto as opções avançadas (*advanced options*) tem-se que alimentar os valores referentes a grade de concentração, seja a resolução, espaçamento, alcance, intervalo, número de partículas no *puff*, logo para estes parâmetros foram adotados os valores padrões do programa.

Já as opções de exibição (*display options*) estão os parâmetros relacionados à exibição, ou seja, o resultado final dos modelos. São parâmetros relacionados a detalhes técnicos, resolução, zoom, sobreposição de círculos, e a opção de criação de arquivos PDF. No que se refere a resolução utilizou-se a maior de 120 dpi, os valores de zoom e sobreposição de círculos foram variáveis, pois foram escolhidos os valores que melhor demonstravam a pluma de contaminantes, detalhando as zonas críticas e a abrangência territorial. O arquivo de saída escolhido foi .GIF pois esse formato possibilita o trabalho com imagens o que permitiu a montagem dos gráficos adotados nesse trabalho.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 COMPOSIÇÃO GRAVIMÉTRICA

O aterro comum do município de Bom Sucesso/PB está em funcionamento desde o ano de 2001, recebendo, de segunda a sexta-feira, os resíduos sólidos urbanos do município, recolhidos por caminhão compactador, no período da manhã. Além dos RSU, outros rejeitos são destinados à área, como pode ser observado nos registros fotográficos obtidos mediante visita *in loco* (ver Figura 7), como: resíduos de abatedouros, construção civil, comércios, agrícolas, varrição publica, resíduo eletrônico e lodo provenientes de limpeza de fossa. É notória a presença de animais, insetos, odor e fumaça advinda da queima desses resíduos, tornado uma condição insalubre. Próximo à área do aterro comum encontra-se corpos hídricos lânticos (pequenos açudes), ver Figuras 5. A Figura 7 apresenta a área do aterro comum, a presença da ação da queima dos materiais e os distintos tipos de resíduos dispostos.



Figura 7 - Aterro comum de Bom Sucesso/PB: a) Queima dos resíduos e fumaça; b) resíduos de abatedouro; c) Catador sem uso de EPI; d) Corpo hídrico ao fundo da imagem.

Fonte: Elaborada pelo autor (2018).

A cidade não possui coleta seletiva, porém existe um catador autônomo que faz a segregação entre recicláveis e rejeitos, todo material reciclado é vendido a atravessadores. Segundo informações fornecidas pelo catador, o mesmo recolhe mensalmente uma média de 1000 kg de plástico, 5 kg de cobre, 50 kg de alumínio e 100 kg de melissa.

Por meio da realização de prospecção com auxílio de trado holandês foi encontrado a presença de solo úmido em uma profundidade de 40 cm, o que indica a presença de chorume infiltrado no solo, haja vista o período de estiagem de chuvas prolongado na localidade; em contrapartida a presença de embasamento rochoso faz com que parte do chorume não infiltre e seja carregado para áreas mais baixas.

Para a composição gravimétrica dos resíduos foram coletadas amostras de matéria orgânica, papel e papelão, plástico, metal, vidro, rejeitos, tecidos, madeira e resíduos de parques e jardins. A composição gravimétrica (Figura 8) apresentou um maior percentual de plástico, correspondendo a 30,96% do montante, seguido de matéria orgânica com 26,72%. A gravimetria do município de Bom Sucesso/PB divergiu do que comumente se verifica em estudos desse tipo, pois o maior percentual geralmente está associado a fração de matéria orgânica (COSTA et al., 2012; REZENDE et al., 2013; SOUTO; RAIMAM; ALBINO, 2013; ARAÚJO et al., 2015; GALDINO; MARTINS, 2016).

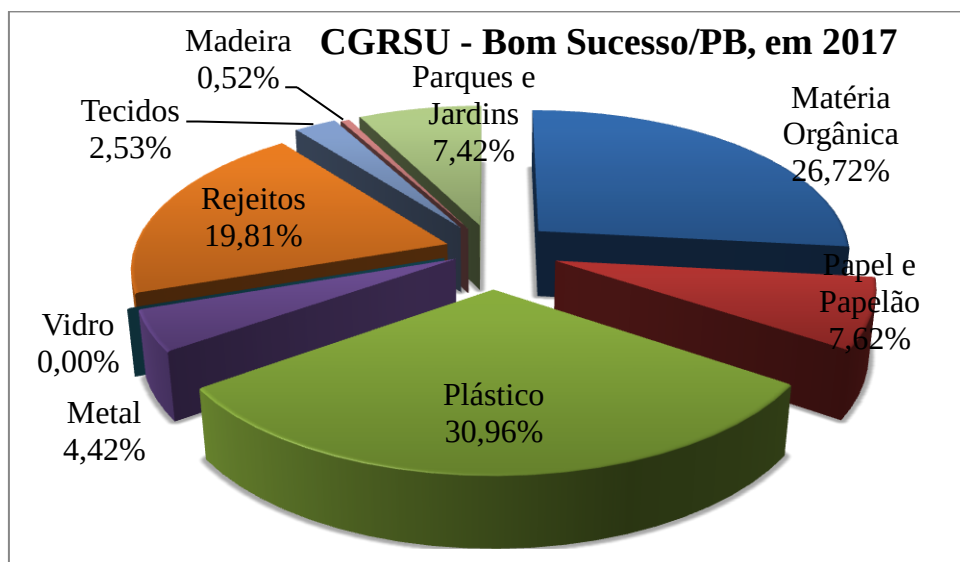


Figura 8 – Composição gravimétrica dos RSU do município de Bom Sucesso/PB.
Fonte: Elaborada pelo autor (2018).

Lunes (2017) apresenta um percentual de 45,40% de matéria orgânica para o aterro comum de Pau dos Ferros/RN o que demonstra predominância desse material. Entretanto no município de Bom Sucesso/PB existe uma cultura de criação de suínos com restos de

alimentos, desta forma reutilizando e reincorporando ao setor econômico, como forma de alimentação para tais animais. Os municípios recolhem os restos alimentares em recipientes nas suas residências e os criadores coletam o material. Desta forma, podendo justificar o percentual reduzido de matéria orgânica no aterro comum.

O plástico presente no aterro comum divide-se em “plástico duro” e “plástico mole”, como: garrafas, PET, sacolas plásticas, embalagens de produtos de limpeza, descartáveis, entre outros. Esses materiais são recicláveis, sendo catados e revendidos pelo catador a terceiros.

4.2 ESTIMATIVA DO BIOGÁS

Utilizando os dados obtidos em visita *in loco*, na gravimetria, e aplicando as equações e parâmetros previstos na seção 3.4, com o auxílio do programa Excel pode-se obter os resultados referentes a estimativa de produção de gás metano (CH_4) para o aterro comum de Bom Sucesso/PB. Algumas considerações foram feitas para o preenchimento das equações, a saber:

- Para a temperatura (T) da eq. 5 utilizou-se a média das temperaturas (do ar) máximas e mínimas do ano de 2017. $T = 27,9\text{ }^\circ\text{C}$;
- Na eq. 4 todos os parâmetros A, B, C, D e E foram utilizados, com base na gravimetria da Figura 8, adotando-se seis casas decimais;
- Para a eq. 3 utilizou-se o valor de FCM de 0,4 (Tabela 1) por se tratar de um aterro comum;
- Para a fração de RSD efetivamente depositados no aterro comum utilizou-se o valor de 100%, tendo em vista todos os RSU serem destinados ao aterro comum, não existindo outro local para destinação final;
- Conforme o censo de 2010 (IBGE, 2017) a população urbana era de 2030 hab de um total de 5035 hab, o que significa dizer que 40,32% corresponde a porcentagem da população urbana. Aplicando essa porcentagem na população estimada para 2017 (IBGE, 2017) encontrou-se um valor de 2005 habitantes na zona urbana da cidade;
- A quantidade em kg de resíduos sólidos urbanos coletados diariamente é de 1000 kg, logo em um ano, utilizando a população de 2005 hab, temos uma taxa de RSD de 182,08 kg/hab.dia;
- Massa específica do $\text{CH}_4 = 0,740\text{ kg/m}^3$.

Após as devidas considerações e realizados os cálculos chegou-se aos resultados apresentados na Tabela 3:

Tabela 3 – Parâmetros utilizados para o método do IPCC

Coefficiente	Símbolo	Unidade	Resultado
População Urbana	Pop urb	Habitantes	2005
Taxa de geração de RSD por habitante/ano	Taxa RSD	Kg RSD/habitante x ano	182,08
Fração de RSD efetivamente depositada no aterro comum	RSDf	Adimensional	1
Fator de correção do metano	FCM	Adimensional	0,4
Potencial de geração de metano dos resíduos sólidos urbanos	L ₀	kg CH ₄ / kg RSD	0,33922149
Carbono orgânico degradável no RSD	COD	kg C / kg RSD	0,09484645
Fração de COD dissociada	CODf	Adimensional	0,6706
Massa específica do metano	ρ CH ₄	Kg / m ³	0,740

Fonte: Elaborada pelo autor (2018)

Aplicando os dados da Tabela 3 na eq 2 temos:

$$Q_{CH_4} = \frac{2005_{hab} \cdot 182,08_{kgRSD/hab.ano} \cdot 1 \cdot 0,33922149_{kgCH_4/kgRSD}}{0,740_{kg/m^3}}$$

Que resultou em uma produção de 16.731,87 m³ CH₄ / ano.

A Tabela 4 apresenta um intervalo de porcentagem dos constituintes do biogás de resíduos sólidos urbanos. Para o presente estudo adotou-se a média dos intervalos para o metano, amônia (NH₃) e enxofre (sulfeto de hidrogênio – H₂S), logo 52,5%, 0,55% e 0,5% respectivamente.

Tabela 4 – Porcentagem dos constituintes encontrados no biogás de RSU

Componente	Porcentagem
Metano	45 – 60
Dióxido de carbono	40 – 60
Nitrogênio	2 – 5
Oxigênio	0,1 – 1,0
Enxofre, mercaptanas	0 – 1,0
Amônia	0,1 – 1,0
Hidrogênio	0 – 0,2
Monóxido de carbono	0 – 0,2
Gases em menor concentração	0,01 – 0,6

Fonte: van Elk (2007) apud Tchobanoglous et al (1994).

Dado que 100% corresponde ao valor total de biogás e de posse do percentual de metano e do valor encontrado na eq. 2 pode-se afirmar que a quantidade de biogás produzida no aterro comum de Bom Sucesso/PB, no ano de 2017, foi de 31.870,23 m³. De igual modo o volume produzido, relacionando os percentuais de NH₃ e H₂S, foi de 175,29 m³ e 159,35 m³, respectivamente.

4.3 REGIME DOS VENTOS

Para Oliveira Júnior et al. (2013) conhecer o regime dos ventos é importante no meio urbano devido a presença de prédios, o estudo da qualidade do ar, dos focos de incêndios e da dispersão de poluentes atmosféricos. Ainda de acordo com os autores o vento varia devido a parâmetros como radiação solar, latitude, relevo, vegetação e época do ano. Logo é de suma importância para o presente trabalho o conhecimento do regime dos ventos.

De posse dos dados de direção e velocidade horária dos ventos no período de janeiro a dezembro de 2017, adquiridos no site do INMET, foi possível, através do programa WRPLOT a obtenção da rosa dos ventos (Figura 09) e do gráfico de frequência de distribuição dos ventos conforme a velocidade (Figura 10).

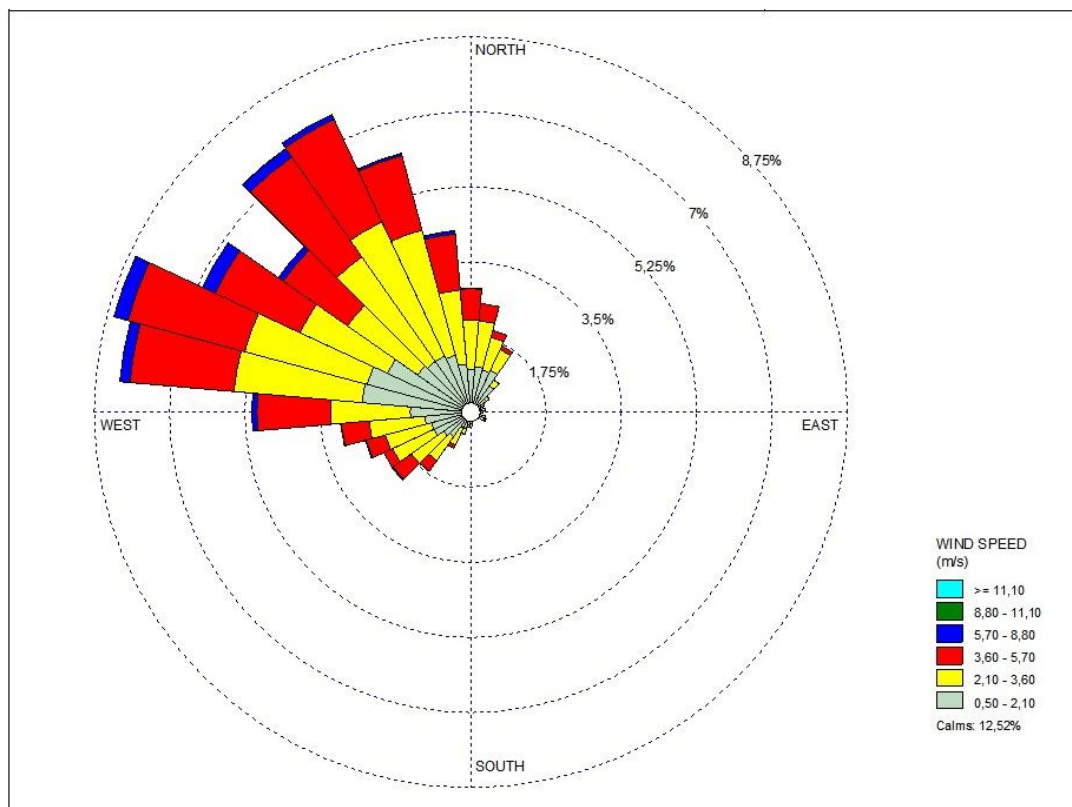


Figura 9 – Rosa dos ventos
Fonte: WRPLOT (2018)

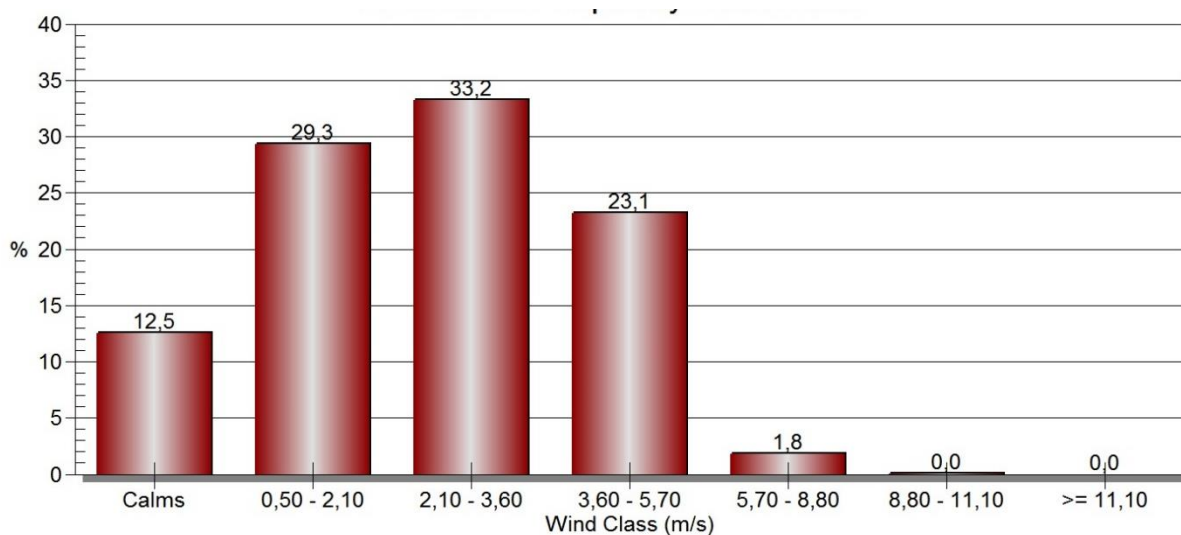


Figura 10 – Distribuição de frequência dos ventos em classes
Fonte: WRPLOT (2018)

Conforme se percebe pelas imagens a direção dos ventos é Norte (N) a Sudoeste (SO), com predominância da direção Noroeste e com uma maior frequência de ventos num intervalo de 2,10 a 3,60 m/s. A escala de Beaufort foi criada pelo Almirante britânico Sir Francis Beaufort, desenvolvida em 1805 para auxiliar os marinheiros a avaliar os ventos através de

observações visuais. Atualmente esta escala é utilizada para estimar os pontos fortes do vento (NATIONAL WEATHER SERVICE, 2018; STORM PREDICTION CENTER, 2018).

Conforme a Figura 10 a maior frequência (33,2%) não ultrapassa 3,6 m/s o que corresponde a escala 5 (Beaufort) e se caracteriza como uma brisa suave. A escala 6 apresenta um intervalo de 10,8 - 13,8 m/s, caracterizando-se como uma brisa forte, que podem movimentar ramos, derrubar baldes plásticos de RSU vazios, ou seja, nada de mais grave. A maior velocidade medida no ano de 2017 foi 10,9 m/s (escala 6), logo para a região percebe-se predominância de ventos calmos e brisas leve, suave, moderada, fresca ou forte. Para o período estudado não houve ocorrência de vendaval, tempestade ou furacão (WINDFINDER, 2018).

4.4 CLASSIFICAÇÃO DO PERÍODO SECO E CHUVOSO

O conhecimento do período seco e chuvoso é importante para a análise da dispersão dos poluentes, pois permite conhecer o comportamento dos gases em situações atmosféricas distintas. O município de Bom Sucesso/PB, onde se realizou o estudo, está localizado na mesorregião do sertão paraibano, caracterizada como uma área de poucas precipitações pluviométricas ocasionando período de estiagem (SILVA et al., 2003).

A estação chuvosa da Paraíba é bem definida em suas regiões, segundo Silva et al. (2003) no sertão é de Janeiro a Março. Macedo et al. (2010) realizaram um estudo analisando as precipitações no estado da Paraíba, definindo os meses de Janeiro a Junho como período chuvoso, com maiores intensidades de Fevereiro a Abril. Para o presente trabalho definiu-se o período chuvoso de Janeiro a Junho e o período seco de Julho a Dezembro.

A Figura 11 apresenta os volumes diários de precipitação para o ano de 2017, e corrobora para a definição de período seco e chuvoso adotado neste trabalho ao apresentar maiores volumes de precipitação no período de Janeiro a Junho.

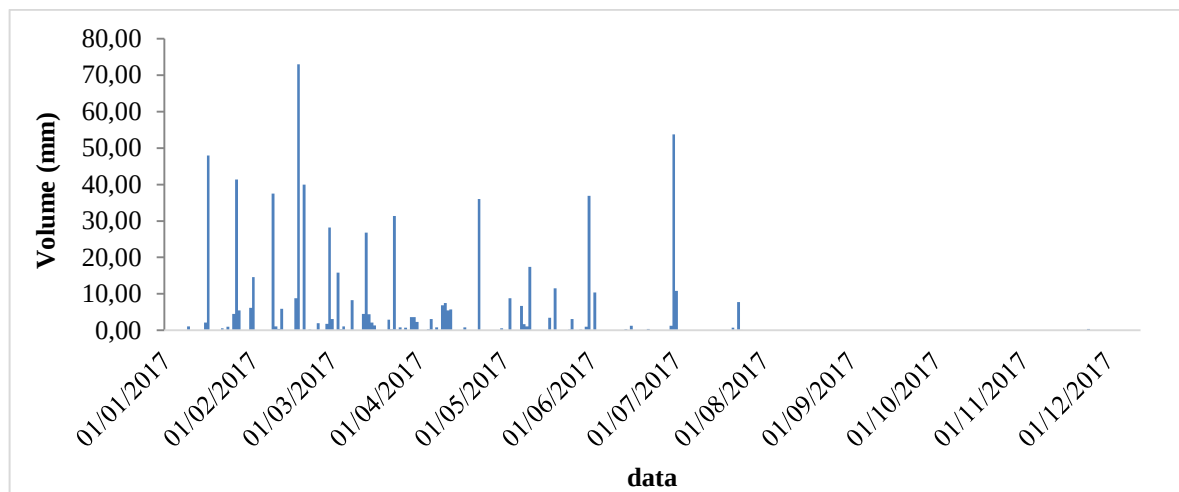


Figura 11 – Precipitação diária para o ano de 2017 em Bom Sucesso/PB.
Fonte: Elaborada pelo autor (2018).

4.5 DIAS ATÍPICOS

De posse dos dados do INMET pode-se executar uma análise dos dados e aferir quatro dias atípicos para o período avaliado, divididos em dois dias no período chuvoso e dois no período seco. No período chuvoso os dias escolhidos foram 18/02/2017 por apresentar a maior precipitação diária do ano (73 mm), conforme se pode notar na Figura 12; E o dia 22/06/2017, pois neste ocorreu a maior velocidade do vento no período chuvoso (6,2 m/s) no intervalo de 07:00 as 13:00 horas (Figura 13), que corresponde ao intervalo de estudo especificado no tópico 3.6. Para o período seco os dias foram 15/07/2017 e 05/10/2017 por apresentarem a menor temperatura do ano (15,1 °C) e a maior velocidade dos ventos (8,2 m/s) no intervalo de 07:00 as 13:00 hrs, entre os meses de julho a dezembro, respectivamente (Figuras 12 e 13).

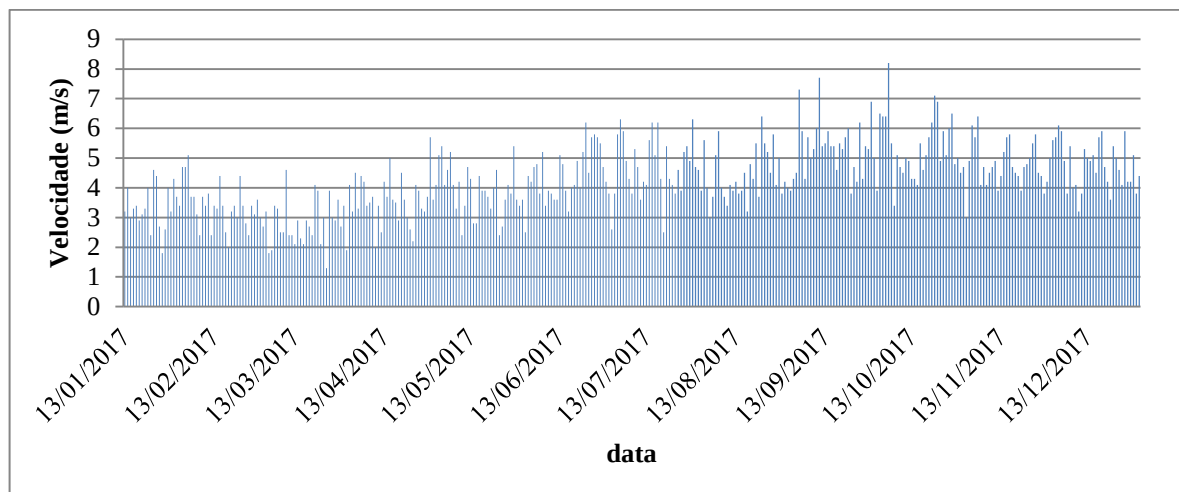


Figura 12 – Velocidade dos ventos no intervalo de 07:00 as 13:00 hrs no ano de 2017.
Fonte: Elaborada pelo autor (2018).

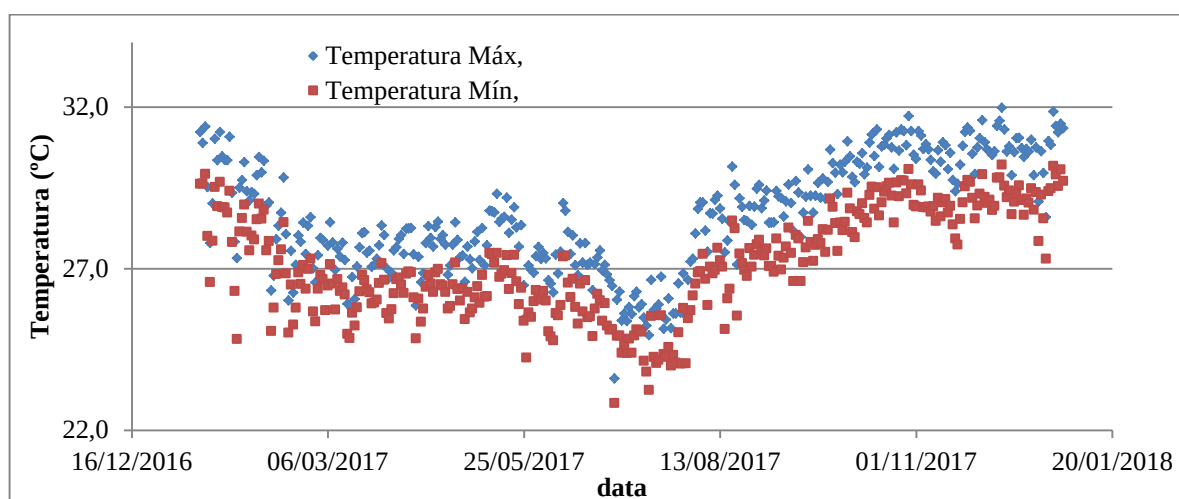


Figura 13 – Temperaturas máximas e mínimas no intervalo de 07:00 as 13:00 hrs no ano de 2017.
Fonte: Elaborada pelo autor (2018)

4.6 SIMULAÇÃO NUMÉRICA DA DISPERSÃO DOS POLUENTES

Os gases utilizados nesse trabalho para simulação foram: Metano (CH_4), Amônia (NH_3) e Sulfeto de hidrogênio (H_2S). Um dos dados de entrada necessários no HYSPLIT é a quantidade liberada desses gases em unidade de massa, logo com os valores obtidos na equação do metano e na correlação dos demais gases através do percentual destes na composição do biogás (Seção 4.2) foi possível obter a quantidade liberada em kg desses gases relacionando-os com a sua densidade. Os valores da densidade utilizados foram $1,363 \text{ kg/m}^3$ para o H_2S (BORBA; SOUZA, 2010), $0,694 \text{ kg/m}^3$ e $0,65 \text{ kg/m}^3$ para NH_3 e CH_4 , respectivamente (VAN WYLEN; BORGNAKKE; SONNTAG, 2009).

A Tabela 5 apresenta os valores obtidos após relacionar a quantidade dos gases em m³/dia com as respectivas densidades. Os valores utilizados como dado de entrada para obtenção da dispersão são os da coluna kg/h.

Tabela 5 – Concentração dos gases utilizados no HYSPLIT

Gases	m ³ /dia	kg/dia	kg/h
CH ₄	45,84	29,89	1,25
H ₂ S	0,44	0,60	0,02
NH ₃	0,48	0,33	0,01

Fonte: Elaborada pelo autor (2018)

Para cada dia foi realizada duas simulações, uma com maior detalhamento quanto ao raio de abrangência total da pluma e outra com a espacialização da zona crítica com maior concentração do poluente, procurando assim analisar a máxima distância e a área de maior concentração dos gases, desta forma variando-se também o zoom, buscando obter uma melhor resolução e regionalização destes poluentes.

O aterro comum encontra-se na zona Oeste da cidade, a montante da área urbana, como os ventos tem direção predominante Noroeste os gases advindos da queima dos resíduos na área do aterro comum não afetam nenhum bairro da cidade, entretanto pequenas comunidades rurais e cidades próximas, a jusante da área do aterro comum, podem receber algumas concentrações dos gases aqui analisados, mediante transporte e imissão destes.

4.6.1 Simulação no período chuvoso com maior precipitação

Essa data foi escolhida por apresentar a maior precipitação diária do ano de 2017, logo percebe-se a distribuição espacial do transporte e dispersão dos gases no período chuvoso. A Figura 14 apresenta a concentração de metano emitido pelo aterro comum de Bom Sucesso/PB durante as 6 hrs de análise. A máxima concentração de CH₄ para este dia foi de $6,5 \times 10^{-4}$ mg/m³. A área de maior concentração, região amarela da Figura 14a, não ultrapassou um raio de 5km na direção dos ventos, entretanto nota-se que essa região é maior em comparação aos outros gases para o mesmo dia, devido a produção de metano ser maior. Pelo detalhe da Figura 14b observa-se que a pluma de contaminação atinge uma distância de aproximadamente 65 km do aterro comum na direção dos ventos.

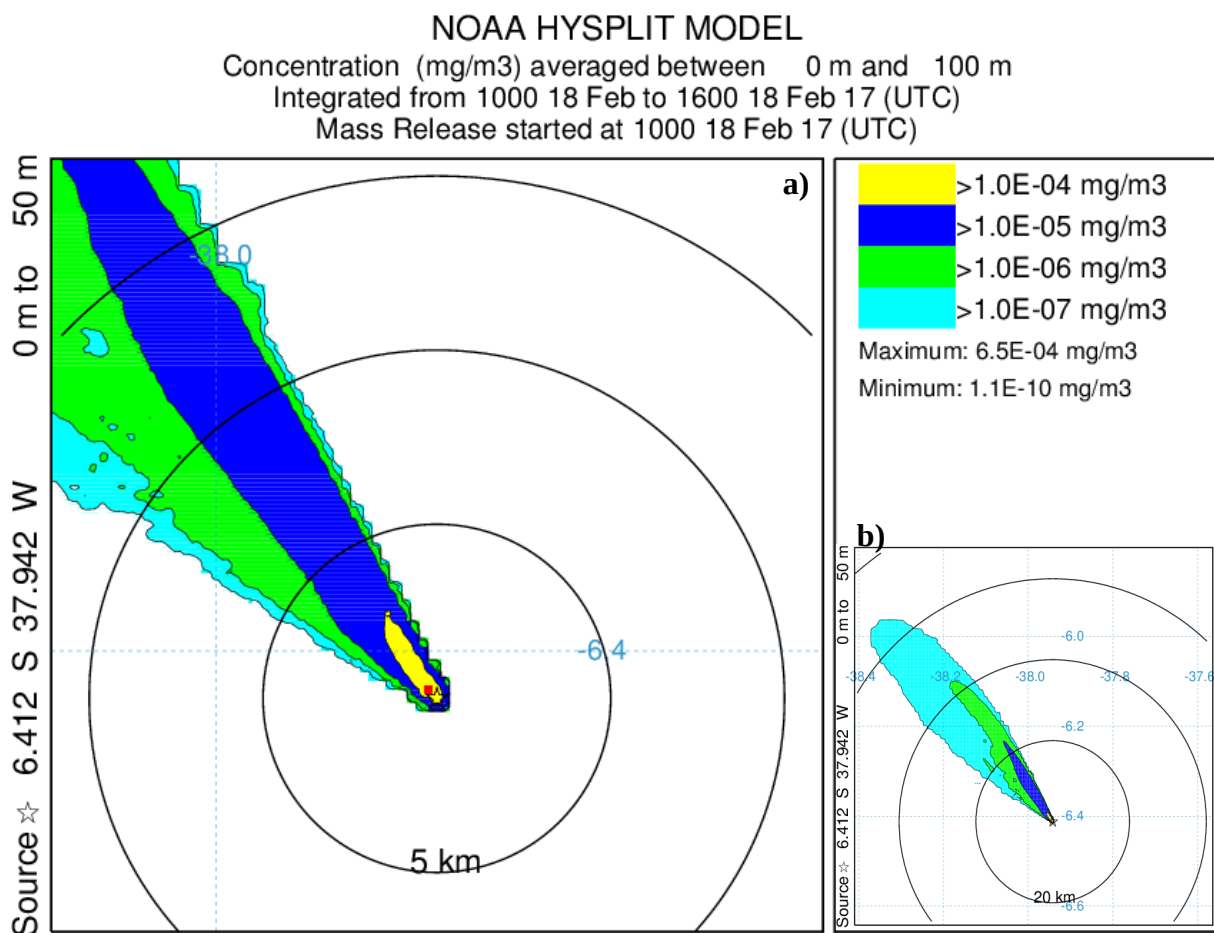


Figura 14– Simulação da dispersão/concentração num período de 6h pelo modelo HYSPLIT do metano (CH₄) em mg/m³ liberada pelo aterro comum de Bom Sucesso/PB em 18/02/2017. a) Zoom de 100 e raio de 5 km; b) Zoom de 80 e raio de 20 km.

Fonte: HYSPLIT (2018).

Para o sulfeto de hidrogênio a maior concentração foi de $1,0 \times 10^{-5}$ mg/m³. A região amarela (área de maior concentração) não aparece na Figura 15a, ficando restrita somente a área do aterro comum. A pluma de contaminação por H₂S atingiu uma distância máxima de aproximadamente 50 km (Figura 15b). A concentração mais baixa desse gás, em relação aos demais gases estudados no mesmo dia, justifica a menor distância percorrida e, portanto a menor dispersão deste na atmosfera para o dia 18/02/2017.

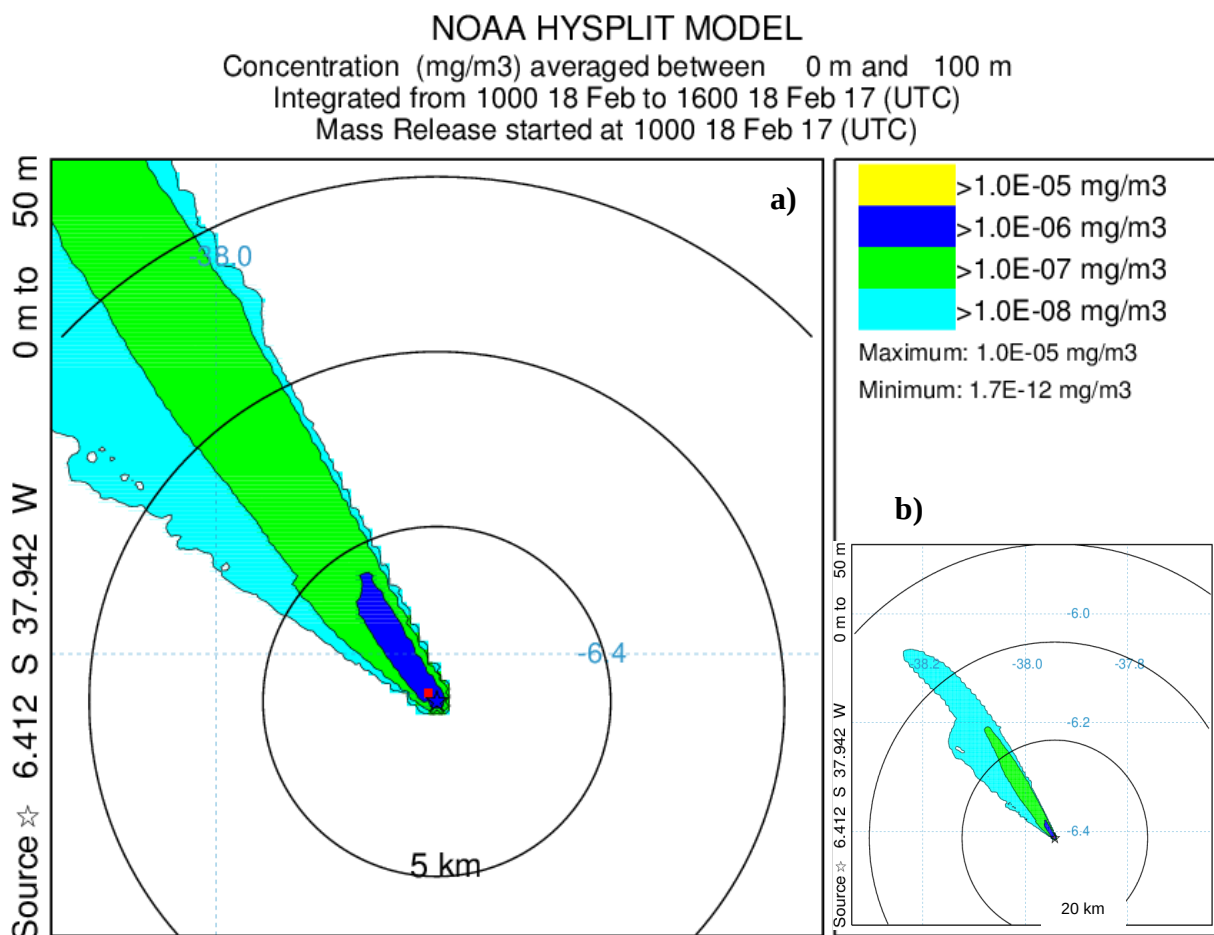


Figura 15 – Simulação da dispersão/concentração num período de 6h pelo modelo HYSPLIT do sulfeto de hidrogênio (H₂S) em mg/m³ liberada pelo aterro comum de Bom Sucesso/PB em 18/02/2017. a) Zoom de 100 e raio de 5 km; b) Zoom de 100 e raio de 20 km.

Fonte: HYSPLIT (2018).

Para a amônia a maior concentração foi de $5,2 \times 10^{-6}$ mg/m³. A região amarela, caracterizada pela maior concentração de NH₃ não ultrapassa um raio de 5km (figura 16a), pela figura 16b pode-se notar que a pluma ultrapassa os 60km chegando a aproximadamente 65km, logo percebe-se uma semelhança entre as plumas de dispersão do CH₄ e do NH₃. Pela Figura 12 percebe-se que nos meses de Janeiro e Fevereiro as velocidades do vento são mais baixas que nos demais meses, não ultrapassando 5m/s, logo se justifica as pequenas distâncias percorridas pelos gases. Para o dia 18/02 a maior velocidade do intervalo de 6 hrs foi de 0,7 m/s com predominância de ventos NO.

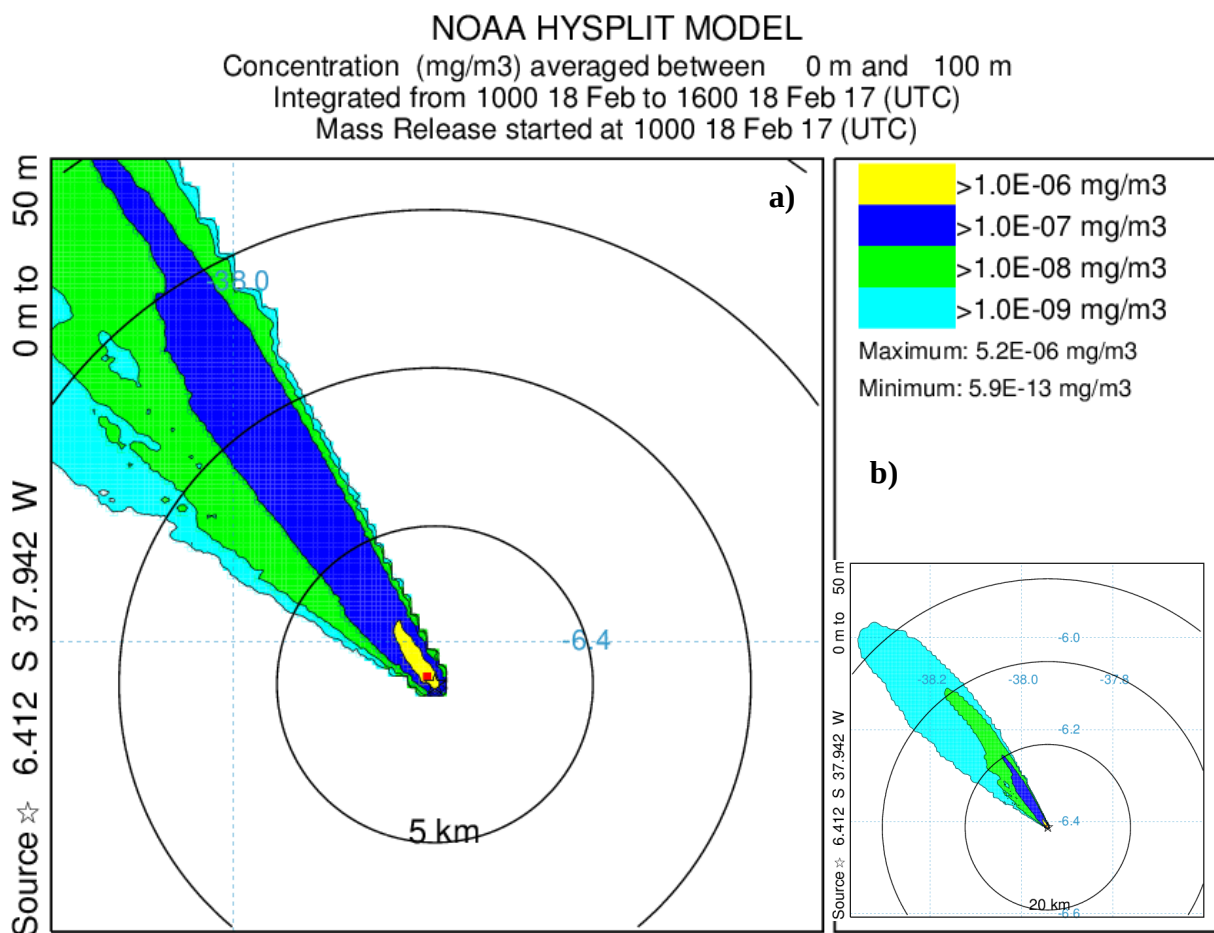


Figura 16 – Simulação da dispersão/concentração num período de 6h pelo modelo HYSPLIT da amônia (NH₃) em mg/m³ liberada pelo aterro comum de Bom Sucesso/PB em 18/02/2017. a) Zoom de 90 e raio de 5 km; b) Zoom de 90 e raio de 20 km.

Fonte: HYSPLIT (2018).

4.6.2 Simulação no período chuvoso com maior velocidade do vento

Este dia foi escolhido por apresentar a maior velocidade média dos ventos para o período chuvoso (6,2 m/s). O CH₄ apresentou máxima concentração de $3,0 \times 10^{-4}$ mg/m³, com área de máxima concentração (amarela) aproximadamente 3,5 km (Figura 17a) e atingindo uma distância máxima de aproximadamente 150km (Figura 17b). Percebe-se que o CH₄ no dia 18/02 apresentou maior concentração, isso se da ao fato de que a velocidade dos ventos neste dia era menor em comparação ao dia 22/06, logo a velocidade do vento atua como fator importante na dispersão.

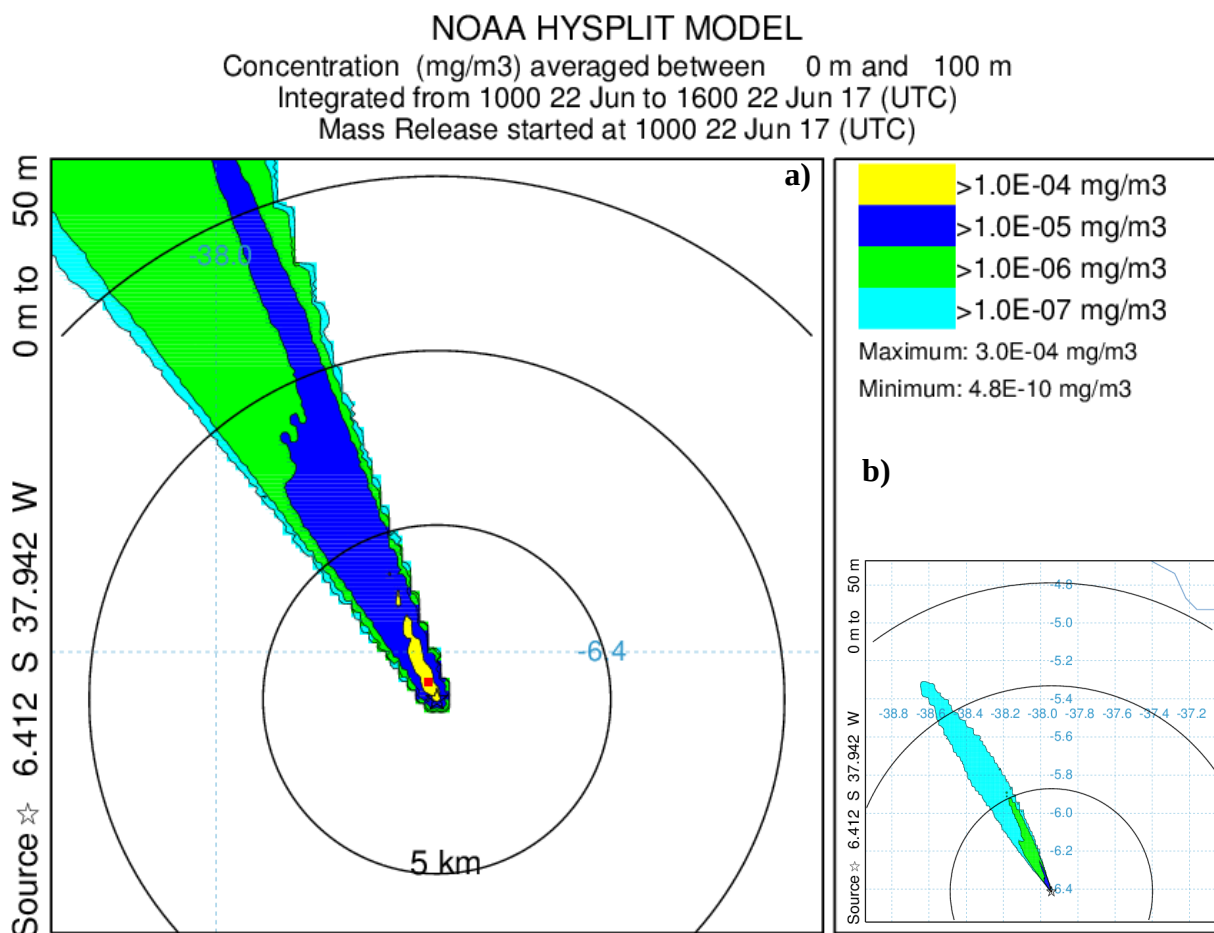


Figura 17– Simulação da dispersão/concentração num período de 6h pelo modelo HYSPLIT do metano (CH₄) em mg/m³ liberada pelo aterro comum de Bom Sucesso/PB em 22/06/2017. a) Zoom de 100 e raio de 5 km; b) Zoom de 100 e raio de 60 km.

Fonte: HYSPLIT (2018).

O H₂S apresentou máxima concentração de $4,8 \times 10^{-6}$ mg/m³, com a área de maior concentração ultrapassando um raio de 5km (Figura 18a), entretanto percebe-se que a concentração é menor em relação ao dia 18/02 também justificado por causa dos ventos. Na Figura 18b nota-se que o sulfeto de hidrogênio atingiu uma distância máxima de aproximadamente 170 km.

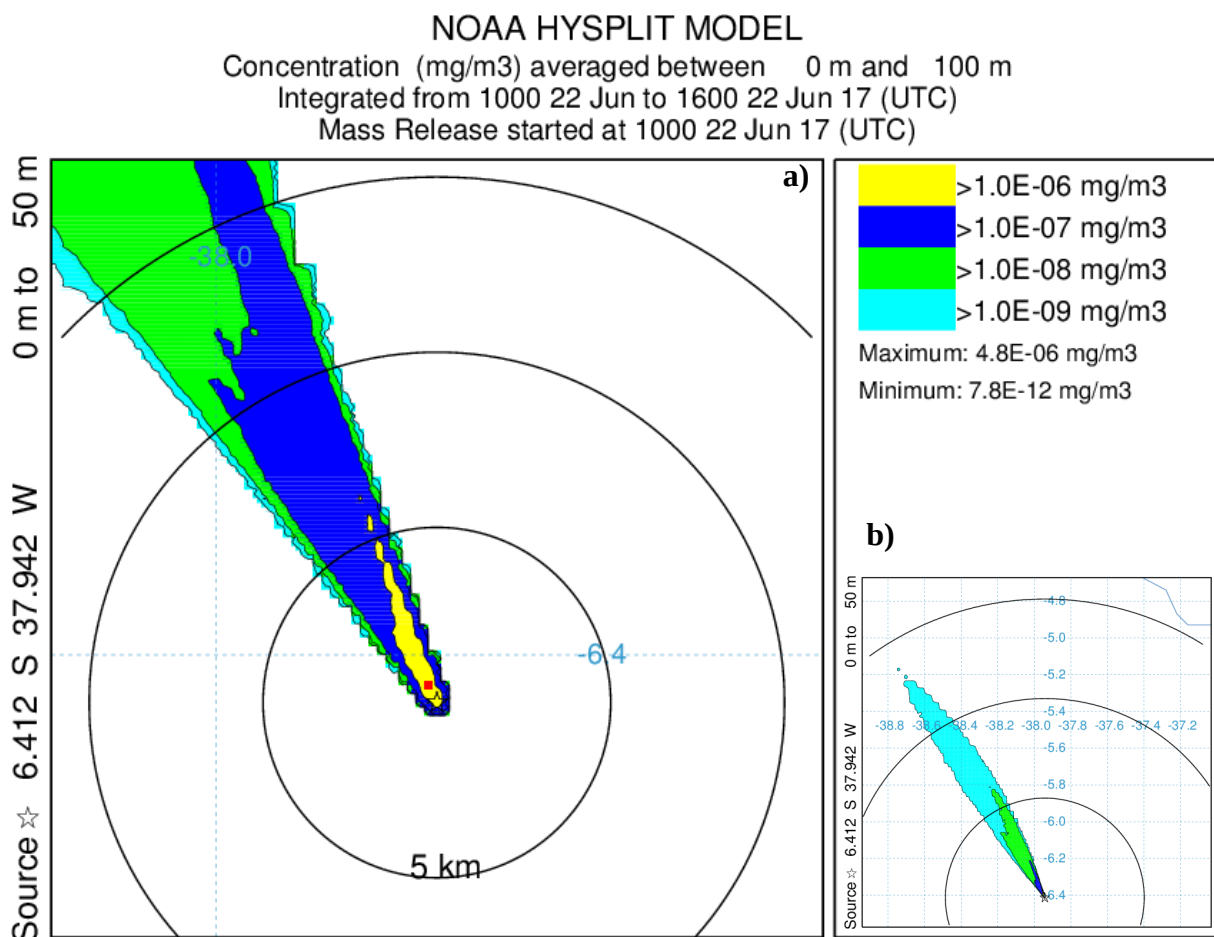


Figura 18 – Simulação da dispersão/concentração num período de 6h pelo modelo HYSPLIT do sulfeto de hidrogênio (H₂S) em mg/m³ liberada pelo aterro comum de Bom Sucesso/PB em 22/06/2017. a) Zoom de 100 e raio de 5 km; b) Zoom de 100 e raio de 60 km.

Fonte: HYSPLIT (2018).

Já a amônia apresentou como distância e concentração máxima 130 km e $2,4 \times 10^{-6}$ mg/m³, respectivamente (Figura 19b). A área de maior concentração foi de aproximadamente 2 km (Figura 19a). É notório para esse segundo dia do período chuvoso que o aumento da velocidade dos ventos fez com que a pluma de contaminação atingisse maiores distâncias chegando a municípios próximos como Alexandria/RN e comunidades rurais como Oiticica em Bom Sucesso/PB. Embora estivesse no período chuvoso à radiação solar para os dois dias foi alta, isso permite que a umidade proveniente das chuvas e o calor proveniente da radiação aumente a atividade bacteriana e consequentemente a produção de biogás (MARIANO, 2006) daí justifica-se a alta concentração de poluentes produzidos nesses dias, principalmente no dia 18/02 onde teve a maior concentração de chuvas e consequentemente mais umidade no solo.

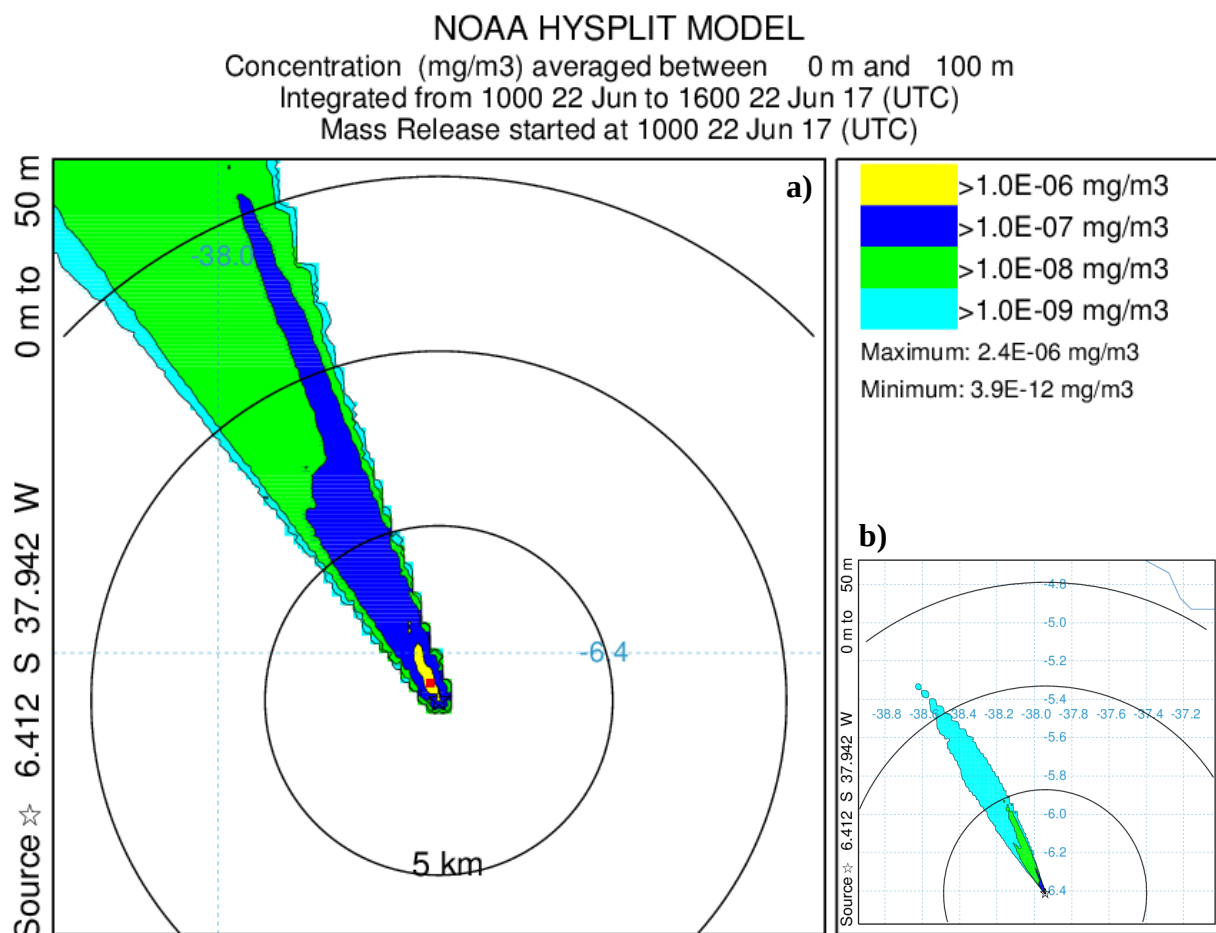


Figura 19 – Simulação da dispersão/concentração num período de 6h pelo modelo HYSPLIT da amônia (NH₃) em mg/m³ liberada pelo aterro comum de Bom Sucesso/PB em 22/06/2017. a) Zoom de 100 e raio de 5 km; b) Zoom de 100 e raio de 60 km.

Fonte: HYSPLIT (2018).

4.6.3 Simulação no período seco com menor temperatura do ano

O primeiro dia do período seco analisado foi 15/07, caracterizou-se como um dia de alta radiação solar no período da tarde, porém baixa temperatura (15,1 °C) no período da manhã. A precipitação para esse dia foi 0 mm, logo a baixa umidade no solo, em conjunto com baixa temperatura reduz a produção de biogás (GIRARDI NETO; SILVA; PINHEIRO, 2017). A máxima concentração de metano para este dia foi de $2,4 \times 10^{-4}$ mg/m³, valor inferior aos obtidos no período chuvoso. A área de maior concentração foi de aproximadamente 2 km e a distancia máxima alcançada pela pluma corresponde a aproximadamente 150 km (Figura 20, a e b).

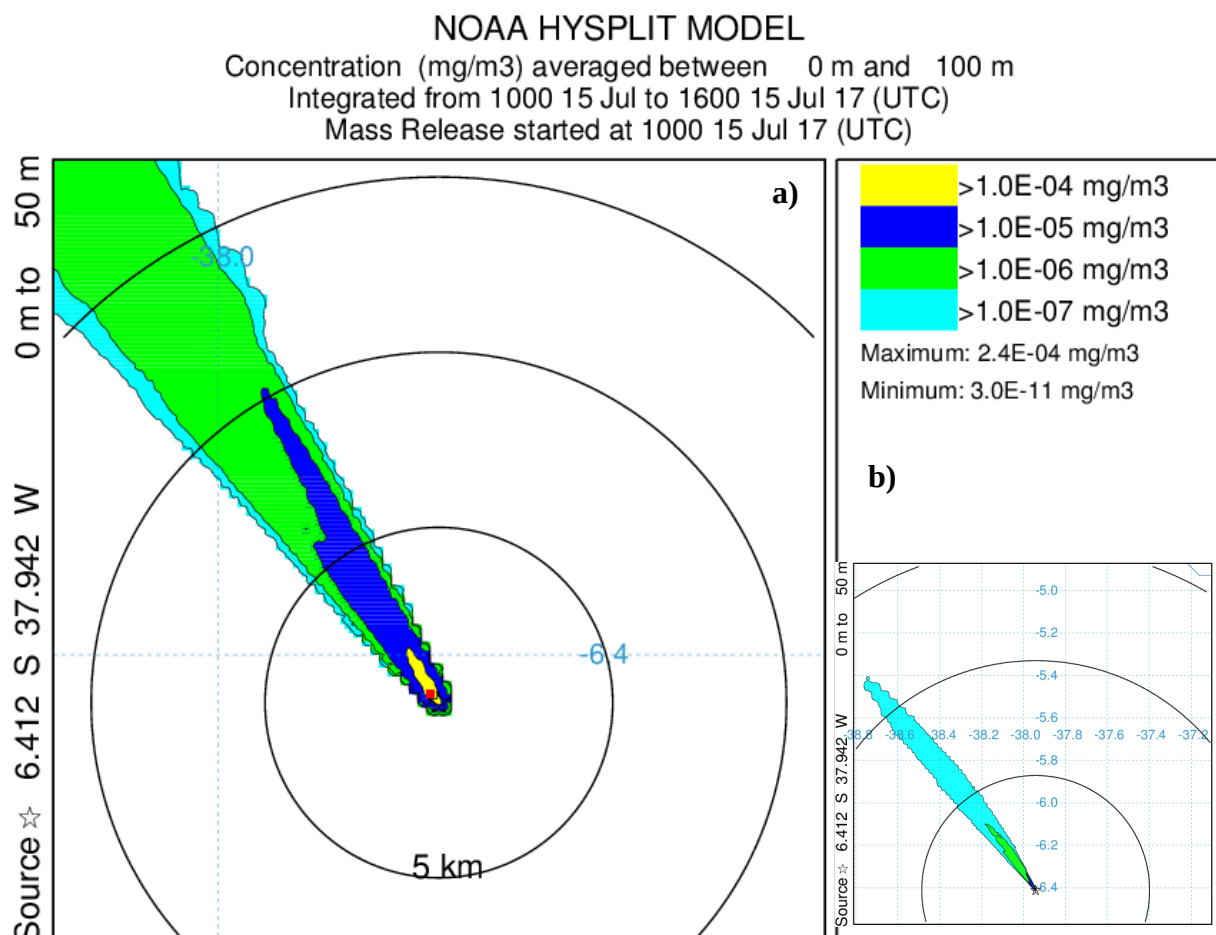


Figura 20 – Simulação da dispersão/concentração num período de 6h pelo modelo HYSPLIT do metano (CH₄) em mg/m³ liberada pelo aterro comum de Bom Sucesso/PB em 15/07/2017. a) Zoom de 100 e raio de 5 km; b) Zoom de 100 e raio de 60 km.

Fonte: HYSPLIT (2018).

O ácido sulfídrico apresentou uma concentração máxima de $3,9 \times 10^{-6}$ mg/m³, menor do que os valores obtidos no período chuvoso. A área de maior concentração foi maior que a do CH₄, com aproximadamente 2,5 km (Figura 21a) e maior raio de abrangência de 175 km (Figura 21b).

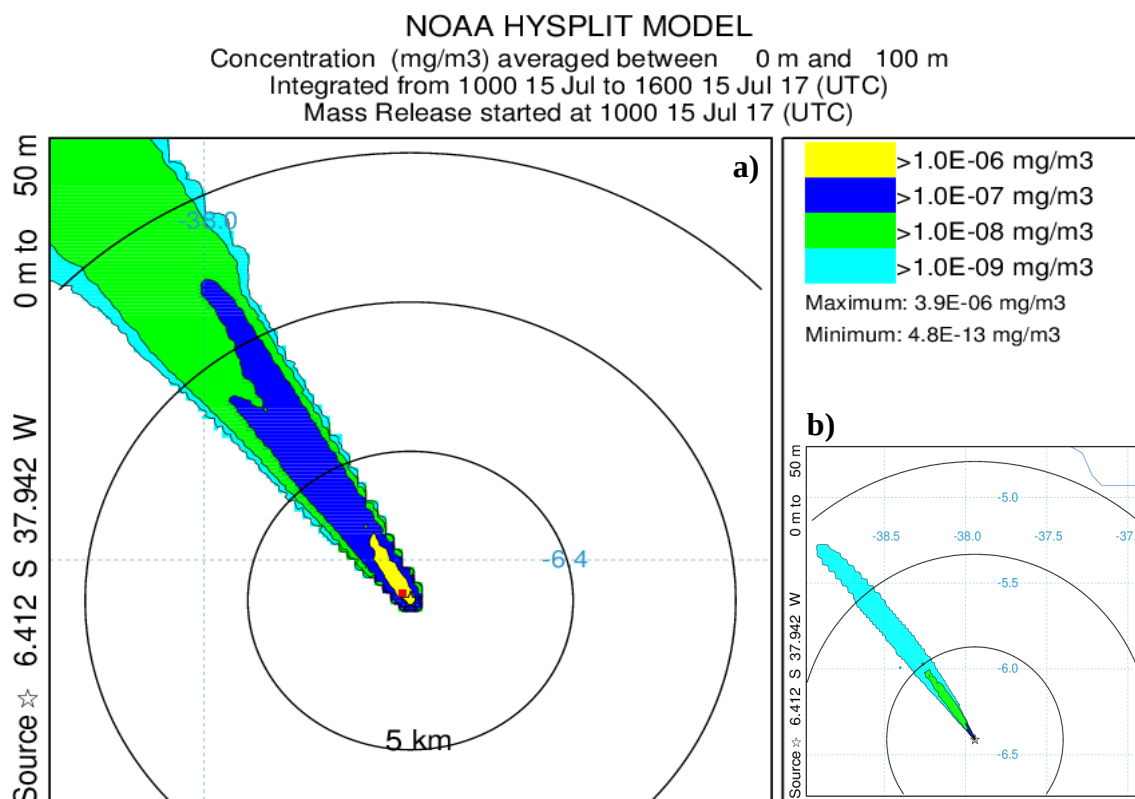


Figura 21 – Simulação da dispersão/concentração num período de 6h pelo modelo HYSPLIT do sulfeto de hidrogênio (H₂S) em mg/m³ liberada pelo aterro comum de Bom Sucesso/PB em 15/07/2017. a) Zoom de 100 e raio de 5 km; b) Zoom de 80 e raio de 60 km.
 Fonte: HYSPLIT (2018).

Já a amônia apresentou uma distância máxima de dispersão menor, aproximadamente 130 km, a área amarela que representa a maior concentração ficou em 1km com máxima concentração no valor de $2,0 \times 10^{-6}$ mg/m³ (Figura 22, a e b). percebe-se a similaridade das distâncias máximas percorridas desta data com o dia 22/06, isso se da ao fato da proximidade das datas e das características de velocidade dos ventos serem parecidas.

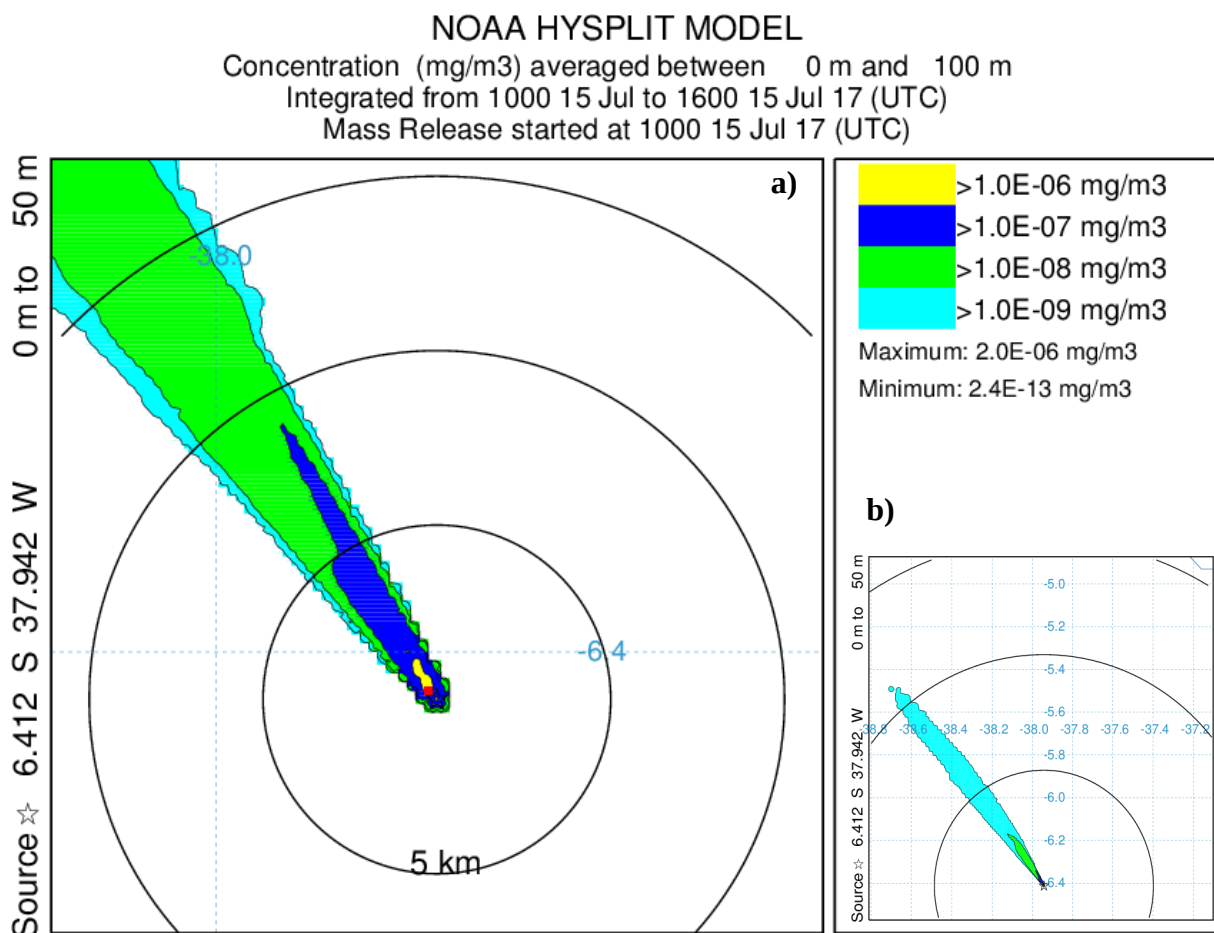


Figura 22 – Simulação da dispersão/concentração num período de 6h pelo modelo HYSPLIT da amônia (NH₃) em mg/m³ liberada pelo aterro comum de Bom Sucesso/PB em 15/07/2017. a) Zoom de 100 e raio de 5 km; b) Zoom de 100 e raio de 60 km.

Fonte: HYSPLIT (2018).

4.6.4 Simulação no período seco com maior velocidade dos ventos

Neste dia registrou-se uma alta radiação e nenhuma precipitação, logo conforme visto anteriormente a produção de biogás tende a diminuir (GIRARDI NETO; SILVA; PINHEIRO, 2017). A concentração de metano foi de $2,5 \times 10^{-4}$ mg/m³, valor próximo ao obtido no dia 15/07/2017, devido as características serem parecidas. Por apresentar uma velocidade dos ventos maior que os demais dias estudados o alcance máximo foi maior, cerca de 170 km (Figura 23b), tendo a área de máxima concentração (região amarela) um raio de aproximadamente 2,5 km (Figura 23a).

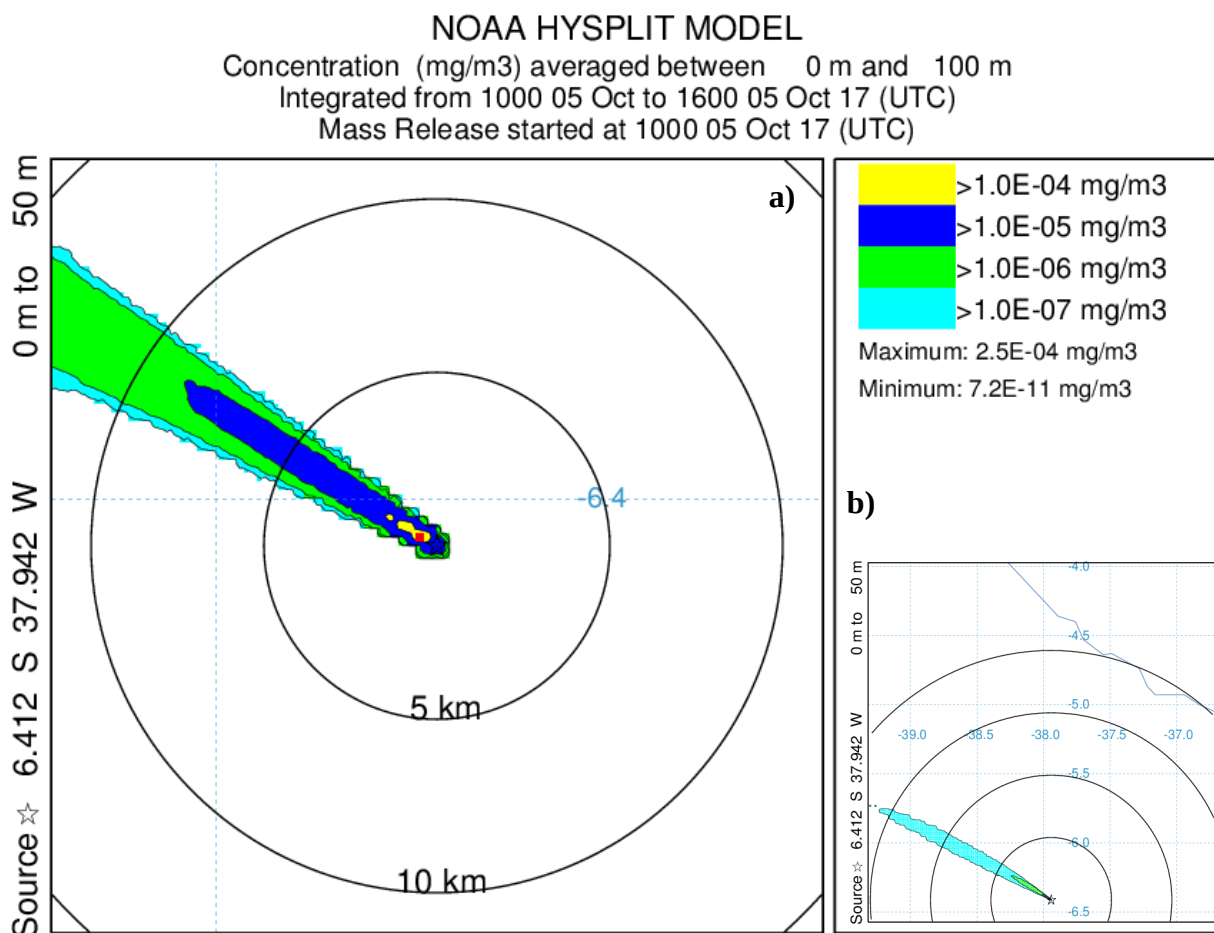


Figura 23 – Simulação da dispersão/concentração num período de 6h pelo modelo HYSPLIT do metano (CH₄) em mg/m³ liberada pelo aterro comum de Bom Sucesso/PB em 05/10/2017. a) Zoom de 100 e raio de 5 km; b) Zoom de 100 e raio de 50 km.

Fonte: HYSPLIT (2018).

O H₂S apresentou máxima concentração de $4,1 \times 10^{-6}$ mg/m³, com área de máxima concentração de aproximadamente 3 km e distância máxima percorrida de 190 km (Figura 24, a e b). Já a amônia atingiu uma distância máxima de 145 km (Figura 25b), com máxima concentração de $2,0 \times 10^{-6}$ mg/m³ e área de maior concentração com raio de 0,5 km (Figura 25a). É notório que as simulações feitas neste dia apresentaram as maiores distâncias percorridas pelos gases devido a ação da velocidade dos ventos ser maior nesse dia (8,2 m/s), percebe-se um aumento nas áreas em amarelo no dia 05/10 em comparação com o dia 15/07, bem como da concentração máxima, como as condições climáticas são parecidas, justifica-se esse aumento devido a temperatura ser maior no segundo dia estudado, o que proporciona maior produção de biogás.

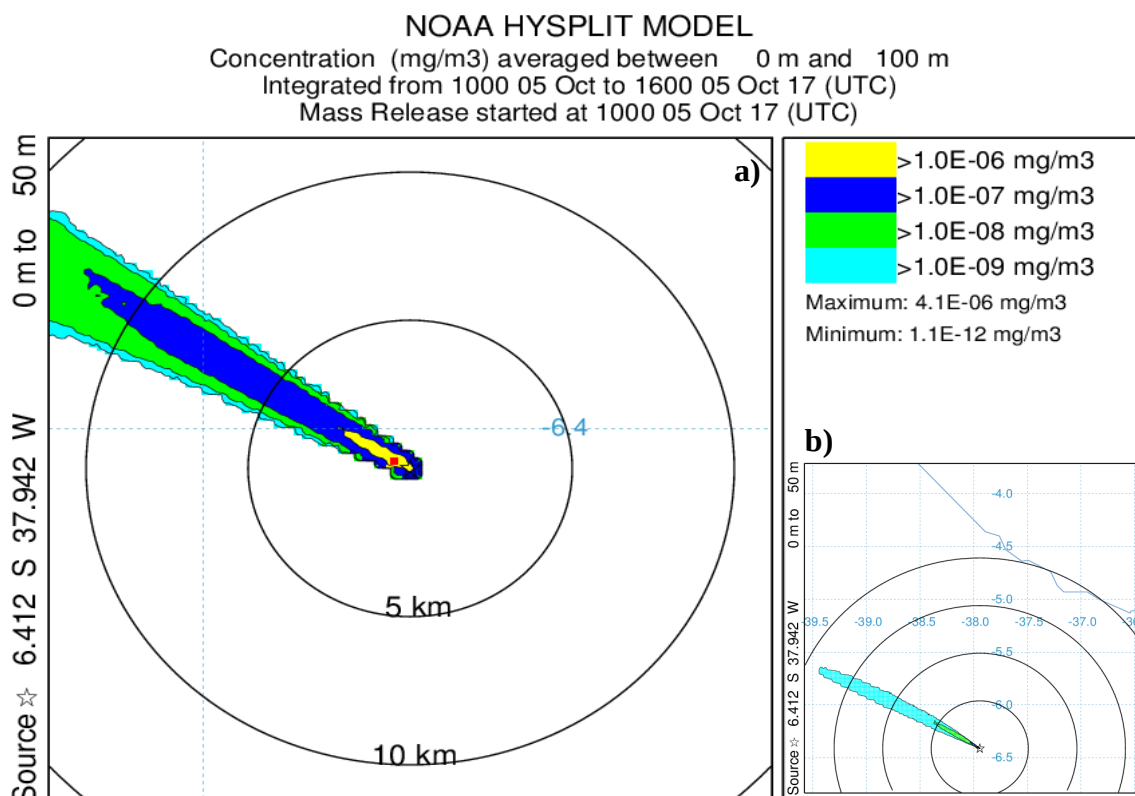


Figura 24 – Simulação da dispersão/concentração num período de 6h pelo modelo HYSPLIT do sulfeto de hidrogênio (H₂S) em mg/m³ liberada pelo aterro comum de Bom Sucesso/PB em 05/10/2017. a) Zoom de 100 e raio de 5 km; b) Zoom de 80 e raio de 50 km.

Fonte: HYSPLIT (2018).

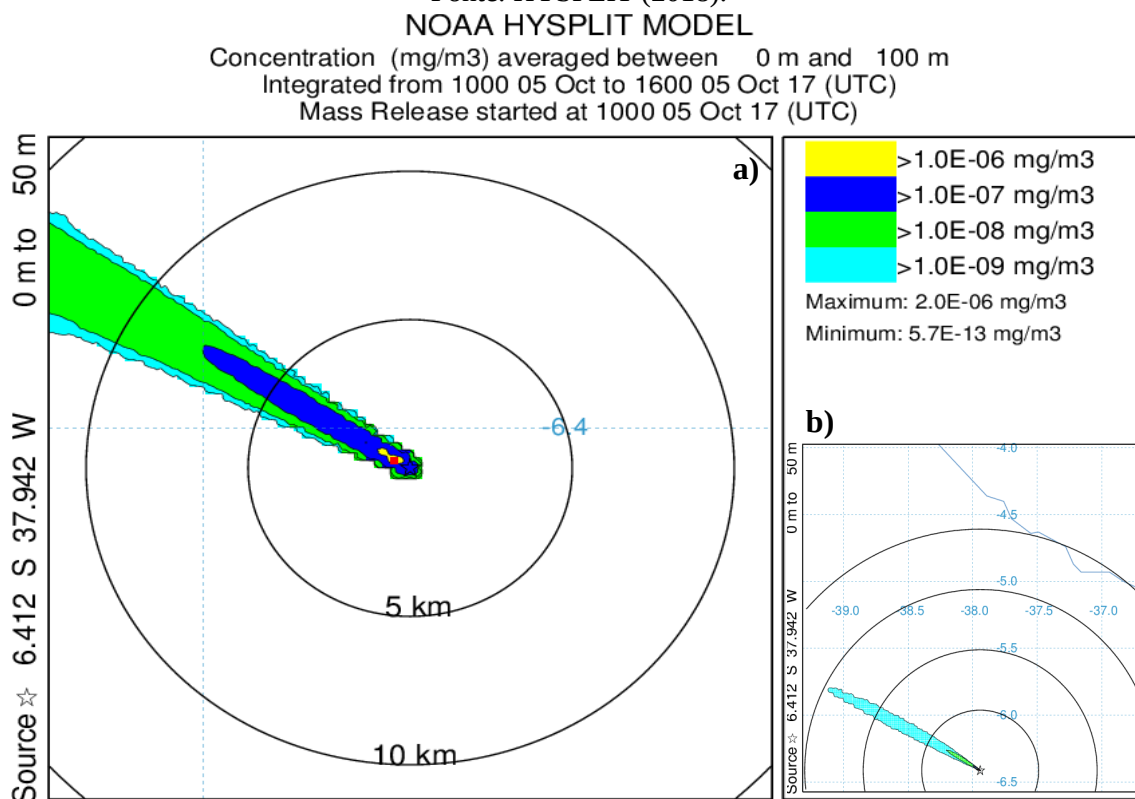


Figura 25 – Simulação da dispersão/concentração num período de 6h pelo modelo HYSPLIT da amônia (NH₃) em mg/m³ liberada pelo aterro comum de Bom Sucesso/PB em 05/10/2017. a) Zoom de 100 e raio de 5 km; b) Zoom de 100 e raio de 50 km.

Fonte: HYSPLIT (2018).

Pela análise dos gráficos obtidos pelo HYSPLIT notam-se as divergências na dispersão dos poluentes no período seco e chuvoso. O CH_4 possui maiores concentrações no período chuvoso que no seco, devido à ação bacteriana decorrente da umidade e das altas temperaturas e radiações solares, corroborando com o observado por Mariano (2006). As concentrações do sulfeto de hidrogênio e da amônia também decrescem no período chuvoso para o seco.

Paralelo às concentrações, a área de maior concentração dos gases também é maior no período chuvoso, diminuindo a concentração no período seco, com destaque para o H_2S que, com exceção do dia 18/02, apresentou as maiores abrangências territoriais. Em contrapartida a dispersão dos poluentes é maior no período seco devido as maiores velocidades dos ventos nessa época em comparação ao período chuvoso.

Aires et al. (2018) afirmam que o sulfeto de hidrogênio é tóxico, asfixiante e explosivo, além de estar relacionado a doenças e morte. O odor emitido pelo H_2S e NH_3 incomodam aqueles expostos pelo mau odor emitido que se configura como problema para a saúde pública (MARIANO et al., 2018). Num estudo feito por Stokstad (2014) notou-se que a amônia emitida pela queima entra em contato com óxidos de nitrogênio e enxofre e transformam-se em partículas com 2,5 microns de largura sendo um poluente perigoso, pois não existe um nível seguro de referencia.

O CH_4 é um hidrocarboneto inflamável, mais leve que o ar, asfixiante e explosivo. Com relação à toxicidade para ser perceptível pelo olfato humano deve-se ter um valor de 200 ppm ou seja $130,88 \text{ mg/m}^3$, logo em nenhum dos cenários estudados este gás apresenta concentração suficiente para ser percebível ao olfato humano. O limite de tolerância adotado no Brasil para esse gás é asfixiante simples para um período de exposição de 48 horas (CETESB, 2018; PASQUALINI; DUARTE; PAULINO, 2018). Para a amônia os limites propostos pelas agencias de saúde e segurança ocupacional norte-americanas são 14 mg/m^3 , 17 mg/m^3 , 24 mg/m^3 e 35 mg/m^3 , no presente trabalho nenhum desses valores foi ultrapassado entretanto caracteriza-se como um substancia carcinogênica, que afeta olhos, pele e sistema respiratório, sendo portanto, prejudicial a saúde humana (TOTAL QUIMICA, 2018). O sulfeto de hidrogênio (H_2S) em concentração de 12 mg/m^3 provoca irritação na mucosa nasal e olfativa, em altas concentrações mata um ser humano em minutos (PASQUALINI; DUARTE; PAULINO, 2018). As concentrações encontradas no trabalho são baixas, entretanto a literatura não é clara sobre os efeitos da exposição a baixas concentrações de H_2S (MAINIER; VIOLA, 2018), portanto as pessoas expostas a estes gases estão sujeitas a problemas de saúde além de serem gases que agravam o efeito estufa.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Ao analisar a logística da geração, coleta e destino final dos RSU do município de Bom Sucesso/PB, bem como os tipos de resíduos destinados ao aterro comum municipal, verificou-se que o município encontra-se dentre as cidades paraibanas que ainda destinam seus resíduos sólidos a vazadouros a céu aberto, sem segregação de recicláveis, sem impermeabilização do solo, o que permite a tríplice poluição, do solo e da água pelo chorume e atmosférica pelos gases resultantes da decomposição microbiana, associada com a queima.

A composição gravimétrica do resíduos sólidos urbanos possibilitou identificar uma predominância de material plástico, 30,6% seguido de MO com 26,72%, este fato justifica-se pelo costumes locais dos habitantes recolherem os resíduos alimentares para alimentação de suínos.

A estimativa da geração de metano apontou valores pequenos se comparados a grandes cidades, porém vale salientar que a geração do biogás contribui para o agravamento do aquecimento global, além da emissão de gases danosos a saúde pública. É necessário o encerramento das atividades do aterro comum imediatamente e aplicação de técnicas de remediação e bioengenharia buscando minimizar os impactos ambientais advindos dele.

O regime de ventos aponta uma predominância de direção Noroeste, este fator corroborado com o fato de que o município encontra-se a montante do aterro comum promove condição que os gases produzidos não atinjam os bairros da cidade, entretanto alcança comunidades rurais e cidades próximas, diante do transporte das plumas de poluentes, as quais podem chegar a até cerca de 190 km do aterro comum.

Embora sejam baixas as concentrações dos poluentes avaliados, a máxima distância alcançada pela pluma de contaminação obtidas no HYSPLIT mostra o poder de dispersão dos poluentes em favor dos ventos.

As concentrações máximas dos poluentes são maiores no período chuvoso do que no seco, porém os ventos são mais fortes no período seco, logo, embora ocorra maior concentração no período chuvoso as maiores distâncias de dispersão ocorrem no período seco. Embora os gases não atinjam os bairros do município, as pessoas que transitam da zona rural para a cidade ficam sujeitas a inalação de poluentes tóxicos, além dos efeitos que os mesmos causam ao meio ambiente.

O trabalho prefigura-se como inédito para um município pequeno do interior do Nordeste, porém de grande importância para saúde pública e ambiental, tal como a gestão

ambiental municipal. Logo, cabe o desenvolvimento de pesquisas acerca dessa temática objetivando aumentar e difundir o conhecimento científico da engenharia ambiental e sanitária.

REFERÊNCIAS

ABRELPE – Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais. **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil em 2016**. São Paulo: ABRELPE 2016.

ABRELPE – Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais. **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil em 2015**. São Paulo: ABRELPE 2015.

AIRES, K. O.; GUEDES, M. J. F.; CELESTINO, M. A. S.; ARAÚJO NETO, C. L.; MONTEIRO, V. E. D. Análise das concentrações de CO E H₂S provenientes da biodegradação dos Resíduos Sólidos Urbanos. Disponível em: <http://www.editorarealize.com.br/revistas/conapesc/trabalhos/TRABALHO_EV058_MD1_SA85_ID24_06052016235200.pdf>. Acesso em 05 de março de 2018.

ALKMIN, D. V; RIBEIRO JUNIOR, L. U. **Determinação da composição gravimétrica dos resíduos sólidos urbanos (RSU) do lixão do município de Maria da Fé, estado de Minas Gerais**. Caminhos de Geografia Uberlândia v. 18, n. 61 Março/2017 p. 65–82.

ALMEIDA, F. A.; VIANA, A. P. S.; RITTER, Á. M.; SELLITO, M. A.. Cooperativas de catadores de resíduos e cadeias logísticas reversas: estudo de dois casos. **Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental**, v. 17, n. 17, p.3376-3387, 2014.

ALVES, T. L. B.; GUIMARÃES, J. B. R.; SILVA, J. R.; ALVES, I. J. B. R.; ABREU, I. G. Lixão de Campina Grande-PB versus Aterro Sanitário de Puxinanã: Transferência de Problema Socioambiental. **Polêmica**, v. 12, n. 3, p. 460-468, 2013.

ANU, N.; RANGABHASHIYAM, S.; ANTONY, R.; SELVARAJU, N. Optimization of wind speed on dispersion of pollutants using coupled receptor and dispersion model. **Sadhana**, v. 40, n. 5, p.1657-1666, 2015.

ARAUJO, N. C.; QUEIROZ, A. J. P.; GUIMARÃES, P. L. F.; GOMES, A. A.. Gravimetria e abordagem econômica dos resíduos sólidos urbanos do município de Barra de São Miguel – Paraíba. **Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental**, v. 19, n. 3, p.67-72, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. Norma Brasileira **NBR 10.004**, Classificação de Resíduos Sólidos, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. Norma Brasileira **NBR 8419**, Apresentação de projetos de aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos, 1992.

AWASTHI, A. K.; PANDEY, A. K.; KHAN, J.. An eco-friendly approach for minimizing pollution of metal from municipal solid waste leachate in India. **Journal of Cleaner Production**, v. 140, p.1618-1625, 2017.

AZEVEDO, C.; GIL, C.; CAMPOS, J. L.. **O design como problema e solução**: uma reflexão sob a ótica do pensamento de Félix Guattari e Vilém Flusser. 2014. Disponível em: <<http://www.bocc.ubi.pt/pag/azevedo-gil-campos-2014-design-problema-solucao.pdf>>. Acesso em: 11 de dezembro de 2017.

BARROS, J. D.; FURTADO, M. L. S.; COSTA, A. M. B.; MARINHO, G. S.; SILVA, F. M.. Sazonalidade do vento na cidade de Natal/RN pela distribuição de Weibull. **Sociedade e Território**, v. 25, n. 2, p.78-92, 2013.

BARROS, L. V. L.. **Avaliação da relação entre parâmetros meteorológicos e concentrações de material particulado inalável (MP10) no campus da UFSC**. 2014. 88 f. monografia (Graduação) - Curso de Engenharia Sanitária e Ambiental, Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2014.

BASTIAN, L.; YANO, J.; HIRAI, Y.; SAKAI, S.. Behavior of PCDD/Fs during open burning of municipal solid waste in open dumping sites. **Journal of Material Cycles and Waste Management**, v. 15, n. 2, p.229-241, 2013.

BATISTA, S. S.; HARARI, J.. Modelagem da dispersão de coliformes termotolerantes e enterococos em duas enseadas na região costeira de Ubatuba (SP), Brasil. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, v. 22, n. 2, p.403-413, 2017.

BAZIENE, K.; VASAREVICIUS, S.. Analysis of a municipal landfill drainage layer using tyre shreds and rubble/Savartyno drenazo sluoksniu uzsikimsimo tyrimas naudojant smulkintas padangas ir skalda. **Science - Future of Lithuania**, v.4, n° 5, p.430-434, 2012.

BORBA, A. P.; SOUZA, J. **Modelagem de filtro para retirada de H₂S do biogás através do processo de sinterização de aço baixo teor de carbono**. 2010. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/274735801_MODELAGEM_DE_FILTRO_PARA_RETIRADA_DE_H2S_DO_BIOGAS_ATRAVES_DO_PROCESSO_DE_SINTERIZACAO_DE_ACO_BAIXO_TEOR_DE_CARBONO>. Acesso em: 13 fev. 2018.

BRAGA, B.; HESPANHOL, I.; CONEJO, J. G. L.; MIERZWA, J. C.; BARROS, M. T. L.; SPENCER, M.; PORTO, M.; NUCCI, N.; JULIANO, N.; EIGER, S.. **Introdução a Engenharia Ambiental**. 2ª Edição, São Paulo: Pretince Hall, 2005.

BRASIL, **Lei n. 11.445, de 05 de janeiro de 2007**. Estabelece diretrizes nacionais para o saneamento básico; altera as Leis nºs 6.766, de 19 de dezembro de 1979, 8.036, de 11 de maio de 1990, 8.666, de 21 de junho de 1993, 8.987, de 13 de fevereiro de 1995; revoga a Lei nº 6.528, de 11 de maio de 1978; e dá outras providências. 2007. Disponível em: < http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2007/lei/l11445.htm>. Acesso em: 06 de dezembro de 2017.

BRASIL, **Lei n. 12.305, de 02 de agosto de 2010**. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos, altera a lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998, e dá outras providências. 2010. Disponível em: < http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm>. Acesso em: 06 de dezembro de 2017.

BRASIL, **Lei n. 6.938, de 31 de agosto de 1981**. Dispõe sobre a Política Nacional do Meio Ambiente, seus fins e mecanismos de formulação e aplicação, e dá outras providências. 1981. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/L6938.htm>. Acesso em: 06 de dezembro de 2017.

BRASIL, **Lei n. 9.605, de 12 de fevereiro de 1998**. Dispõe sobre as sanções penais e administrativas derivadas de condutas e atividades lesivas ao meio ambiente, e dá outras providências. 1998. Disponível em: < http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/L9605.htm>. Acesso em: 06 de dezembro de 2017.

BRASIL. **Decreto-Lei n. 1413, de 31 de julho de 1975**. Dispõe sobre o controle da poluição do meio ambiente provocada por atividades industriais. 1975. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/decreto-lei/1965-1988/Del1413.htm>. Acesso em: 06 de dezembro de 2017.

BRASIL. **Lei n. 6.803 de 02 de julho de 1980**. Dispõe sobre as diretrizes básicas para o zoneamento industrial nas áreas críticas de poluição, e dá outras providências. 1980. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/L6803.htm>. Acesso em: 06 de dezembro de 2017.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente, Conselho Nacional de Meio Ambiente – CONAMA. **Resolução CONAMA nº 003/1990**, de 28 de junho de 1990. Dispõe sobre padrões de qualidade do ar, previstos no PRONAR. Publicado no D.O.U. de 22 de agosto de 1990. Seção 1, p. 15937-15939. 1990. Disponível em: < <http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=100>>. Acesso em: 06 de dezembro de 2017.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente, Conselho Nacional de Meio Ambiente – CONAMA. **Resolução CONAMA nº 005/1989**, de 15 de junho de 1989. Dispõe sobre o Programa Nacional de Controle da Poluição do Ar – PRONAR. Publicado no D.O.U. de 25 de agosto de 1989. Seção 1, p. 14713-14714. 1989. Disponível em: <

<http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=81>>. Acesso em: 06 de dezembro de 2017.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente, Conselho Nacional de Meio Ambiente – CONAMA. **Resolução CONAMA nº 018/1986**, de 06 de maio de 1986. Dispõe sobre a criação do Programa de Controle de Poluição do Ar por veículos Automotores – PROCONVE. Publicado no D.O.U. de 17 de junho de 1986. Seção 1, p. 8792-8795. 1986. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=41>>. Acesso em: 06 de dezembro de 2017.

CAMPOS, H. K. T.. Renda e evolução da geração per capita de resíduos sólidos no Brasil. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, v. 17, n. 2, p.171-180, 2012.

CEDRAZ, M. O.. **Análise estatística das concentrações atmosféricas do material particulado PM₁₀ em três regiões distintas do estado do Rio de Janeiro**. 2017. 103f. Dissertação (Mestrado em Ciências Climáticas) - Centro de Ciências Exatas e da Terra, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2017.

CERETTA, G. F.; SILVA, F. K.; ROCHA, A. C.. Gestão Ambiental e a problemática dos resíduos sólidos domésticos na área rural do município de São João - PR. **Revista Admpg Gestão Estratégica**, Ponta Grossa, v. 6, n. 1, p.17-25, 2013.

CETESB. **Metano**. Disponível em:
<http://sistemasinter.cetesb.sp.gov.br/produtos/ficha_completa1.asp?consulta=METANO>.
Acesso em: 06 mar. 2018

CHEN, B.; STEIN, A. F.; MALDONADO, P. G. CAMPA, A. M. S. L.; GONZALEZ-CASTANEDO, Y.; CASTELL, N.; ROSA, J. D. L.. Size distribution and concentrations of heavy metals in atmospheric aerosols originating from industrial emissions as predicted by the HYSPLIT model. **Atmospheric Environment**, v. 71, p.234-244, jun. 2013.

CHENG, G.; HUANG, G.; DONG, C.. Synchronic interval Gaussian mixed-integer programming for air quality management. **Science Of The Total Environment**, v. 538, p.986-996, dez. 2015.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DE MUNICÍPIOS – CNM. Observatório de lixões. Disponível em: http://resíduos_sólidos_urbanos.cnm.org.br/. Acesso em: 03 de dezembro de 2017.

CORDEIRO, C. J. D.; PEREIRA, P. S.; DUARTE, A. E.; BARROS L. M.; SOUZA, M. M.. Prejuízos causados aos catadores que trabalham no lixão do município de Juazeiro do Norte – CE. **Enciclopédia Biosfera**, v.8, n.15; p. 2553-2562, 2012.

COSTA, L. E. B.; COSTA, S. K.; REGO, N. A. C.; SILVA JUNIOR, M. F.. Gravimétrica dos resíduos sólidos urbanos domiciliares e perfil socioeconômico no município de Salinas, Minas Gerais. **Revista Ibero-americana de Ciências Ambientais**, v. 3, n. 2, p.73-90, 2012.

CRISTALE, J.; SILVA, F. S.; ZOCCOLO, G. J.; MARCHI, M. R. Influence of sugarcane burning on indoor/outdoor PAH air pollution in Brazil. **Environmental Pollution**, v. 169, p.210-216, 2012.

DAVID, G. S.; RIZOL, P. M. S. R.; NASCIMENTO, L. F. C.. Modelos computacionais Fuzzy para avaliar efeitos da poluição do ar em crianças. **Revista Paulista de Pediatria**, v. 13,P. 1-7, 2017.

DRUMM, F. C.; GERHARDT, A. E.; FERNANDES, G. D.; CHAGAS, P.; SUCOLOTTI, M. S.; KEMERICH, P. D. C. Poluição atmosférica proveniente da queima de combustíveis derivados do petróleo em veículos automotores. **Revista Eletronica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental**, v. 18, n. 1, p. 66-78, 2014.

DUARTE, E. S. F.. **Análise e caracterização do material particulado atmosférico fino em uma região metropolitana de Natal-RN**. 2016. 104 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-graduação em Ciências Climáticas, Departamento de Ciências Atmosféricas e Climáticas, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2016.

FAN, F. M.; BRAVO, J. M.; COLLISCHONN, W.. Modelagem baseada em agentes para a simulação da dispersão de poluentes em cursos d'água. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, v. 21, n. 4, p.739-746, 2016.

FERREIRA, M. L.; RIBEIRO, A. P.; ALBUQUERQUE, C. R.; FERREIRA, A. P. N. L.; FIGUEIRA, R. C. L.; LAFORTEZZA, R.. Air contaminants and litter fall decomposition in urban forest areas: The case of São Paulo - SP, Brazil. **Environmental Research**, v. 155, p.314-320, 2017.

FRIEDRICH, M. J.. Air Pollution Highest in World's Poorest Cities. **Jama**, v. 316, n. 3, p.259-259, 2016.

GALDINO, S. J.; MARTINS, C. H.. Composição gravimétrica dos resíduos sólidos urbanos da coleta convencional de um município de pequeno porte. **Tecno-lógica**, v. 20, n. 1, p.01-08, 2016.

GALVÃO, M. F. O.. **Caracterização do material particulado e avaliação do risco ocupacional e mecanismos moleculares associados à queima artesanal da castanha de caju**. 2016. 138f. Tese (Doutorado em Bioquímica) - Centro de Biociências, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2016.

GBANIE, S. P.; TENGBE, P. B.; MOMOH, J. S.; MEDO, J.; KABBA, V. T. S.. Modelling landfill location using Geographic Information Systems (GIS) and Multi-Criteria Decision Analysis (MCDA): Case study Bo, Southern Sierra Leone. **Applied Geography**, v. 36, p.3-12, 2013.

GIRARDI NETO, J.; SILVA, J. D.; PINHEIRO, I. G. Balanço de massa no tratamento de resíduos sólidos orgânicos provenientes de restaurantes em biorreator. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, v. 22, n. 3, p.491-499, 2017.

GODECKE, M. V.; NAIME, R. H.; FIGUEIREDO, J. A. S.; O consumismo e a Geração de Resíduos Sólidos Urbanos no Brasil. **Rev. Elet. em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental**, v. 8, n. 8, p. 1700-1712, 2012.

GOOGLE. **Google Earth**. 2017. Bom Sucesso/PB.

GOULART, A. G. O.; LAZO, M. J.; SUAREZ, J. M. S.; MOREIRA, D. M.. Fractional derivative models for atmospheric dispersion of pollutants. **Physica A: Statistical Mechanics and its Applications**, v. 477, p.9-19, 2017.

GOUVEIA, N. Solid urban waste: socio-environmental impacts and prospects for sustainable management with social inclusion. **Ciência & Saúde Coletiva**, v. 17, n. 6, p. 1503-1510, 2012.

GWENZI, W.; GORA, D.; CHAUKURA, N.; TAURO, T.. Potential for leaching of heavy metals in open-burning bottom ash and soil from a non-engineered solid waste landfill. **Chemosphere**, v. 147, p.144-154, 2016.

HERNÁNDEZ, B.; MARTÍN, M.. Optimal Process Operation for Biogas Reforming to Methanol: Effects of Dry Reforming and Biogas Composition. **Industrial & Engineering Chemistry Research**, v. 55, n. 23, p.6677-6685, 2016.

HOLGADO-SILVA, H. C.; PADUA, J. B.; CAMILO, L. R.; DORNELES, T. M.. A qualidade do saneamento ambiental no assentamento rural Amparo no município de Dourados-MS. **Sociedade & Natureza**, v. 26, n. 3, p.535-545, 2014.

HOSSAIN, K. M. A.; EASA, S. M.. Pollutant dispersion characteristics in Dhaka city, Bangladesh. **Asia-pacific Journal Of Atmospheric Sciences**, v. 48, n. 1, p.35-41, 2012.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **IBGE Cidades**. Disponível em: <<https://cidades.ibge.gov.br/brasil/pb/bom-sucesso/panorama>>. Acesso em: 13 de dezembro de 2017.

IPCC. International Panel on Climate Change. Guidelines for National. **Greenhouse Inventories: Reference Manual** (Vol.3), 1996.

IRIART, P. G.; FISCH, G.. Uso do Modelo WRF-CHEM para a Simulação da Dispersão de Gases no Centro de Lançamento de Alcântara. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 31, n. 41, p.610-625, 2016.

ISLAM, K. M. N.. Greenhouse gas footprint and the carbon flow associated with different solid waste management strategy for urban metabolism in Bangladesh. **Science Of The Total Environment**, v. 580, p.755-769, 2017.

ISMAEL, F. C. M.; LEITE, J. C. A.; SILVA, K. B.. Proposta de um Plano de Recuperação para Área do lixão em Pombal-PB. INTESA: Informativo Técnico do Semi-árido. **Revista Gvaa**, v. 7, n. 1, p.01-19, 2013.

KAKOSIMOS, K. E.; ASSAEL, M. J.. Application of Detached Eddy Simulation to neighbourhood scale gases atmospheric dispersion modelling. **Journal Of Hazardous Materials**, v. 261, p.653-668, out. 2013.

KOTA, S. H.; YING, Q.; ZHANG, Y.. Simulating near-road reactive dispersion of gaseous air pollutants using a three-dimensional Eulerian model. **Science Of The Total Environment**, v. 454-455, p.348-357, jun. 2013.

LATEB, M.; MASSON, C.; STATHOPOULOS, T.; BÉDARD, C.. Simulation of near-field dispersion of pollutants using detached-eddy simulation. **Computers & Fluids**, v. 100, p.308-320, 2014.

LEITE, M. F. S.; MOREIRA, D. M.. Um Estudo Comparativo Entre Coeficientes de Difusão Verticais na Simulação da Dispersão de Poluentes em uma Camada Limite Convectiva. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 31, n. 4, p.518-526, 2016.

LOPES, J. R. A.; MORAIS, L. N. L.; BEZERRA, J. M.; LUNES, A. R. S.; SOUSA, E. F. de. Uso de imagens aéreas para detecção da contaminação do aterro comum de Pau dos Ferros-

RN. In: Semana das Engenharias Química, Ambiental e Sanitária do Oeste Potiguar, 1., 2016, Pau dos Ferros. **Anais...** Pau dos Ferros: UFERSA, 2016.

LUNES, A. R. DA S. **Proposta de técnicas de recuperação de área degradada para o lixão de Pau Dos Ferros/RN.** 2017. 71 p. Monografia (Graduação Bacharelado Curso de Ciência e Tecnologia) - Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Pau dos Ferros, 2017.

LUNES, A. R. S.; SOUSA, E. F.; BEZERRA, J. M.; LOPES, J. R. A.; MORAIS, L. N. L.. Avaliação do lixão do município de Pau Dos Ferros – RN através dos métodos IQR e IQR-Valas. In: Semana das Engenharias Química, Ambiental e Sanitária do Oeste Potiguar, 1., 2016, Pau dos Ferros. **Anais...** Pau dos Ferros: UFERSA, 2016.

MACEDO, M. J. H.; GUEDES, R. V. S.; SOUSA, F. A. S. S.; DANTAS, F. R. C. Analysis of the standardized precipitation index for the Paraíba state, Brazil. **Ambiente e Agua - An Interdisciplinary Journal Of Applied Science**, v. 5, n. 1, p.204-214, 2010.

MAINIER, F. B.; VIOLA, E. D. M. **O Sulfeto de Hidrogênio (H₂S) e o meio ambiente.** Disponível em: <https://www.aedb.br/seget/arquivos/artigos05/261_H2S.pdf>. Acesso em: 06 mar. 2018.

MARIANO, G. L. **Simulação numérica da dispersão dos poluentes H₂S e NH₃ provenientes do lixão de Maceió-AL nas épocas seca e chuvosa: estudo de casos.** 2006. 150 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-Graduação em Meteorologia, Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2006.

MARIANO, G. L.; MOURA, M. A. L.; QUERINO, C. A. S.; CHAGAS, E. V.; JORGE, M. P. P. M. Comparação da dispersão do poluentes H₂S e NH₃ do lixão de Maceió- Al simulada pelo modelo hysplit e por um modelo gaussiano – estudo de caso. Disponível em: <<http://mtc-m16b.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/mtc-m17@80/2006/12.19.18.28/doc/mariano.compara%e7%e3o.pdf>>. Acesso em 05 de março de 2018.

MARIO, J. P. M.. **Poluição atmosférica como condicionante no processo de ocupação do espaço urbano:** Análise na cidade de Porto Alegre, RS. 2012. 87 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-graduação em Planejamento Urbano e Regional, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012.

MARTINS, E. M.; MEIRELES, A. R.; MAGALHAES, F. R.; CARVALHO, J. B. B.; RIBEIRO, M. M.. Concentrações de poluentes atmosféricos no Rio de Janeiro em relação a normas nacionais e internacionais. **Revista Internacional de Ciências**, v. 7, n. 1, p.32-48, 2017.

MAZUR, A.; BARTNICKI, J.; ZWOŹDZIAK, J.. Atmospheric aerosol dispersion models and their applications to environmental risk assessment. **Medycyna Środowiskowa**, v. 17, n. 1, p.7-15, 2014.

MELNYK, A.; KUKLINSKA, K.; WOLSKA, L.; NAMIESNIK, J.. Chemical pollution and toxicity of water samples from stream receiving leachate from controlled municipal solid waste (MSW) landfill. **Environmental Research**, , v. 135, p.253-261, 2014.

MONTENEGRO, R.; VALE, A.; SOUSA, E. C.. **A percepção de jovens estudantes universitários sobre consumo, obsolescência programada e equilíbrio sustentável**. Disponível em: < <http://www.engema.org.br/XVIENGEMA/6.pdf>>. Acesso em: 25 de outubro de 2017.

MORAES, M. R.. **Ferramenta para a previsão de vento e dispersão de poluentes na micro-escala atmosférica**. 2004. 166 f. Tese (Doutorado) - Curso de Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2004.

MOREIRA, D. M.; TIRABASSI, T.; MORAES, M. R.. Meteorologia e Poluição Atmosférica. **Ambiente & Sociedade**, v. 11, n. 1, p.1-13, 2008.

MOREIRA, H. B. C. **Aplicação da teoria fuzzy em um modelo de transporte de massa, para avaliar o risco da dispersão dos poluentes atmosféricos**. 2014. 107 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil: Saneamento Ambiental) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2014.

NANDASENA, S.; WICKREMASINGHE, A. R.; SATHIAKUMAR, N.. Indoor air pollution and respiratory health of children in the developing world. **World Journal Of Clinical Pediatrics**, v. 2, n. 2, p.6-15, 2013.

NARDOCCI, A. C.; FREITAS, C. U.; LEON, A. C. M. P.; JUNGER, W. L.; GOUVEIA, N. C.. Poluição do ar e doenças respiratórias e cardiovasculares: estudo de séries temporais em Cubatão, São Paulo, Brasil. **Cadernos de Saúde Pública**, v. 29, n. 9, p.1867-1876, 2013.

NATIONAL WEATHER SERVICE. Beaufort Wind Scale. Disponível em: < <https://www.weather.gov/mfl/beaufort>>. Acesso em: 13 de fevereiro de 2018.

NGAN, Fong; STEIN, Ariel; DRAXLER, Roland. Inline Coupling of WRF–HYSPLIT: Model Development and Evaluation Using Tracer Experiments. **Journal Of Applied Meteorology And Climatology**, v. 54, n. 6, p.1162-1176, jun. 2015.

NOURBAKHS, H.; MOWLA, D.; ESMAEILZADEH, F.. Predicting the Three Dimensional Distribution of Gas Pollutants for Industrial-type Geometries in the South Pars Gas Complex Using Computational Fluid Dynamics. **Industrial & Engineering Chemistry Research**, v. 52, n. 19, p.6559-6570, 2013.

NUNES, G. A. L.. **Estudo e análise da Dispersão de Poluentes: um estudo de caso para a cidade de Rio Grande/RS**. 2013. 120 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-graduação em Modelagem Computacional, Universidade Federal do Rio Grande, Rio Grande, 2013.

OLIVEIRA JÚNIOR, J. F.; SOUZA, J. C. S.; DIAS, F. O.; GOIS, G.; GONÇALVES, I. F. S.; SILVA, M. S. da. Caracterização do Regime de Vento no Município de Seropédica, Rio de Janeiro (2001-2010). **Floresta e Ambiente**, v. 20, n.4, p.447-459, 2013.

OLIVEIRA, B. O. S.; TUCCI, C. A. F.; NEVES JÚNIOR, A. F.; SANTOS, A. A.. Avaliação dos solos e das águas nas áreas de influência de disposição de resíduos sólidos urbanos de Humaitá, Amazonas. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, v. 21, n. 3, p.593-601, 2016.

PASQUALINI, A. A.; DUARTE, K. M. R.; PAULINO, V. T. **Qualificação do potencial tóxico dos gases de biodigestores**. Disponível em: <<http://www.revistaea.org/pf.php?idartigo=2216>>. Acesso em: 06 mar. 2018.

PAVANI, C. A. B.; FREITAS, S. R.; LIMA, W. F. A.; COELHO, S. M. S. C.; ROSÁRIO, N. M. É.; MOREIRA, D. S.; YOSHIDA, M. C.. Incluindo Funcionalidades no Modelo BRAMS para Simular o Transporte de Cinzas Vulcânicas: Descrição e Análise de Sensibilidade Aplicada ao Evento Eruptivo do Puyehue em 2011. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 31, n. 4, p.377-393, 2016.

PEDONE, M.; GRANIERI, D.; MORETTI, R.; FEDELE, A.; TROISE, C.; SOMMA, R.; NATALE, G.. Improved quantification of CO₂ emission at Campi Flegrei by combined Lagrangian Stochastic and Eulerian dispersion modelling. **Atmospheric Environment**, v. 170, p.1-11, dez. 2017.

PEDOTT, J. G. J.; AGUIAR, A. O Biogás em aterros sanitários: Comparando a geração estimada com a quantidade validada em projetos de mecanismo de desenvolvimento limpo. **Holos**, v. 4, p.195-211, 2014.

PEREIRA, K. L.; PINTO, L. V. A.; PEREIRA, A. J.. Potencial fitorremediador das plantas predominantes na área do lixão de Inconfidentes/MG. **Revista Agrogeoambiental**, v. 1, n. 1, p.25-29, 31 jul. 2013.

PLUGGE, C. M.. Biogas. **Microbial Biotechnology**, v. 10, n. 5, p.1128-1130, 2017.

POSSELT, H. C.; RIES, L. A. S.. **Avaliação do processo de biodigestão anaeróbia na geração de biogás a partir de chorume com suplementação de glicerina residual bruta.** 2015. Disponível em:

<http://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/137668/Resumo_43188.pdf?sequence=1> . Acesso em: 13 dez. 2017.

PRATES, L. F. S.; FISCHER, K.; AMARAL, Karen; NEUFFER, Daniela; MENZEL, Uwe. **Experiência Alemã com tratamento mecânico biológico de resíduos sólidos urbanos.** 2016. Disponível em:

<<http://www.institutoventuri.org.br/ojs/index.php/firs/article/view/22/18>>. Acesso em: 13 dez. 2017.

RESENDE, A. S.; CAMPELLO, E. F. C.; SILVA, G. T. A.; RODRIGUES, K. M.; OLIVEIRA, W. R. D.; CORREIA, M. E. F.. Artropodes do solo durante o processo de decomposição da matéria orgânica. **Agronomía Colombiana**, v. 31, n. 1, p.89-94, 2013.

REZENDE, J. H.; CARBONI, M.; MURGEL M. A. T.; CAPPS, A. L. A. P.; TEIXEIRA, H. L.; SIMÕES, G. T. C.; RUSSI, R. R.; LOURENÇO, B. L. R.; OLIVEIRA, C. A.. Composição gravimétrica e peso específico dos resíduos sólidos urbanos em Jaú (SP). **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, v. 18, n. 1, p.1-8, 2013.

RIBES, J. L. B.; NARDINO, M.; CORRÊA, E. R.; QUADROS, R. S.; BARROS, W. S.; BUSKE, D.. Caracterização de Modelos para a Predição de Poluentes Atmosféricos. **Revista de Informática Aplicada**, v. 12, n. 1, p.34-40, 2016.

RODRIGUES, P. C. O.; SANTOS, E. S., HACON, S. S.; IGNOTTI, E.. Fatores de risco para mortalidade por doenças cardiovasculares associados à alta exposição ao tráfego veicular. **Revista Brasileira de Epidemiologia**, v. 20, n. 3, p.423-434, 2017.

RUBIO-ROMERO, J. C.; ARJONA-JIMÉNEZ, R.; LÓPEZ-ARQUILLOS, A.. Profitability analysis of biogas recovery in Municipal Solid Waste landfills. **Journal Of Cleaner Production**, v. 55, p.84-91, 2013.

SALES, M. L. S.; CIZENANDO, T. A. L.; COSTA, A. G.; LOPES, T. C. S.; OLIVEIRA, L. C. S.; MACÊDO, I. R. C.. Aspectos e impactos ambientais perceptíveis dos resíduos sólidos: um estudo de caso no lixão de Assú (RN). **Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais**, v.5, n.1, p.265-283, 2014.

SALVADOR, F. L. R. **Elaboração de um plano de recuperação de área degradada (PRAD) para um antigo lixão no município de Garopaba.** Florianópolis: UFSC/CTC/ENS, 2012. 82 p.

SANCI, R.; PANARELLO, H. O.. Carbon stable isotopes as indicators of the origin and evolution of CO₂ and CH₄ in urban solid waste disposal sites and nearby areas. **Environmental Earth Sciences**, v. 75, n. 4, p.1-13, 2016.

SANTIAGO, L. S.; DIAS, S. M. F.. Matriz de indicadores de sustentabilidade para a gestão de resíduos sólidos urbanos. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, v. 17, n. 2, p.203-212, 2012.

SANTOS, A. L. F.; HARAGUCHI, M. T.; LEITÃO, G. C. Índice de qualidade de aterro de resíduos (IQR), como subsídio para avaliar o sistema de disposição final do município de Anápolis-GO. **Scientia Plena**, v. 8, n. 10, p. 1-20, 2012.

SANTOS, A. T. L.; HENRIQUE, N. S.; SHHLINDWEIN, J. A.; FERREIRA, E.; STACHIW, R.. Aproveitamento da fração orgânica dos resíduos sólidos urbanos para produção de composto orgânico. **Revista Brasileira de Ciências da Amazônia**, v. 3, p. 15-28, 2014.

SANTOS, L. A. V.. **Gerenciamento de resíduos em torno da bacia hidrográfica do rio Apodi-Mossoró (RN)**. 2016. 95 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Mestrado em Ciências Naturais, Programa de Pós-graduação em Ciências Naturais - PPGCN, Universidade do Estado do Rio Grande do Norte, Mossoró/RN, 2016.

SENA, J. L.; NASCIMENTO, S. T.; BEZERRA, I. S. B.; BARBOSA; G. S.. Análise estratégica do plano de gerenciamento integrado de resíduos sólidos do município de Pedras de Fogo – Paraíba. Faculdade Internacional da Paraíba. **Revista Ambiental**, v.1, n. 2, p. 21-33, 2015.

SHEN, Z.; CUI, G.; ZHANG, Z.. Turbulent dispersion of pollutants in urban-type canopies under stable stratification conditions. **Atmospheric Environment**, v. 156, p.1-14, 2017.

SHRIVASTAVA, S.; SHRIVASTAVA, P.; RAMASAMY, J.. Responding to the challenge of rising air pollution levels in world's poorest cities. 2017. Disponível em: < <http://go-galegroup.ez13.periodicos.capes.gov.br/ps/i.do?&id=GALE|A501556457&v=2.1&u=cap&it=r&p=AONE&sw=w&authCount=1> >. Acesso em: 06 de dezembro de 2017.

SILVA, A. M. F.; PAVESI, T.; ROSA, A. C. S.; SANTOS, T. P.; TABALIPA, M. M.; LEMES, V. R. R.; ALVES, S. R.; SARCINELLI, P. N.. Organochlorines and polychlorinated biphenyl environmental pollution in south coast of Rio De Janeiro state. **Marine Pollution Bulletin**, v. 108, n. 1-2, p.325-331, 2016.

SILVA, C. L.; RABELO, J. M. O.; RAMAZZOTTE, V. C. B.; ROSSI, L. F. S.; BOLLAMANN, H. A.. A cadeia de biogás e a sustentabilidade local: uma análise

socioeconômica ambiental da energia de resíduos sólidos urbanos do aterro da Caximba em Curitiba. **Revista Innovar**, v. 19, n. 34, p.83-98, 2009.

SILVA, L. F. O.; VALLEJUELO, S. F. O.; ARKARAZO, I. M.; CASTRO, K.; OLIVEIRA, M. L. S.; SAMPAIO, C. H.; BRUM, I. A. S.; LEÃO, F. B.; TAFFAREL, S. R.; MADARIAGA, J. M. Study of environmental pollution and mineralogical characterization of sediment rivers from Brazilian coal mining acid drainage. **Science of the Total Environment**, v. 447, p.169-178, 2013.

SILVA, M. B. O.. Obsolescência programada e teoria do decrescimento versus direito ao desenvolvimento e ao consumo (sustentáveis). **Veredas do Direito**, v.9, n.17, p.181-196, 2012.

SILVA, P. C. S.; SILVA, N. L. S.; FEIDEN, A.; ZONIN, W. J.; MROZINSKI, C. R.; CLOSS, M. Estudo da viabilidade econômica do destino final do resíduos sólidos urbanos urbano de Marechal Cândido Rondon, PR. **Revista Varia Scientia Agrária**, v. 2, n. 2, p.119-133, 2012.

SILVA, P. V. R. M.; PECLY, J. O. G.; AZEVEDO, J. P. S.. Uso de traçadores fluorescentes para determinar características de transporte e dispersão no Rio Piabanha (RJ) para a modelagem quali-quantitativa pelo HEC-RAS. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, v. 22, n. 3, p.463-472, 2017b.

SILVA, T. O.; SÁ, F. P.; BORGES, E. C. L.. Incêndio no lixão da cidade de Inhumas/GO/Brasil e sua repercussão para a população do município. **Revista Meio Ambiente e Sustentabilidade**, v. 12, n. 6, p.6-23, 2017a.

SILVA, V. P.R.;CAVALCANTI, E. P.; NASCIMENTO, M. G.; CAMPOS, J. H. B. C.. Análises da precipitação pluvial no Est pluvial no Estado da Paraíba com base na teoria da entropia. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 7, n. 2, p. 269-274, 2003.

SONG, L.; WANG, Y.; TANG, W.; LEI, Y.. Archaeal community diversity in municipal waste landfill sites. **Applied Microbiology and Biotechnology**, v. 99, p. 6125-6137, 2015.

SOUSA, Erick Ferreira de. **Uso da Barragem Subterrânea no município de Bom sucesso/PB**. 2016. 59 f. TCC (Graduação) - Curso de Ciência e Tecnologia, Universidade Federal Rural do Semi Árido, Pau dos Ferros/RN, 2016.

SOUTO, F. B. D.; RAIMAM, M. P.; ALBINO, U. B.. Resíduos sólidos urbanos em Porto De Moz –PA: problemas e oportunidades. **Revista Geográfica Acadêmica**, v. 7, n. 2, p.85-94, 2013.

SOUZA, A. E. Elaboração de um plano de recuperação de área degradada (PRAD) para o antigo lixão do Itacorubi, Florianópolis (SC). Florianópolis: UFSC/CTC/ENS, 2013. 125

SOUZA, G. S.; COSTA, L. C. A.; MACIEL, A. C.; REIS, F. D. V.; PAMPLONA, Y. A. P.. Presença de agrotóxicos na atmosfera e risco à saúde humana: uma discussão para a Vigilância em Saúde Ambiental. **Ciência & Saúde Coletiva**, v. 22, n. 10, p.3269-3280, 2017.

STOKSTAD, Erik. Ammonia Pollution From Farming May Exact Hefty Health Costs. **Science**, v. 343, p. 238, 2014.

STORM PREDICTION CENTER. Beaufort Wind Scale. Disponível em: <<http://www.spc.noaa.gov/faq/tornado/beaufort.html>>. Acesso em: 13 de fevereiro de 2018.

TOTAL QUÍMICA INDÚSTRIA E COMÉRCIO LTDA. **SEGURANÇA – Amônia Anidra (NH₃)**. Disponível em: <[http://www.totalquimica.com.br/seguranca-amonia-anidra-NH₃/](http://www.totalquimica.com.br/seguranca-amonia-anidra-NH3/)>. Acesso em: 06 mar. 2018.

van ELK, A. G. H. P. **Mecanismo de desenvolvimento limpo aplicado a resíduos sólidos**: Redução de emissões na disposição final. 2007. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/estruturas/srhu_urbano/_publicacao/125_publicacao12032009023918.pdf>. Acesso em: 13 fev. 2018.

van WYLEN, G.; BORGNACKE, C.; SONNTAG, R. E. **Fundamentos da Termodinâmica**. 7. ed., Blucher, 2009. 661 p.

VREELAND, H.; SCHAUER, J. J.; RUSSELL, A. G.; MARSHALL, J. D.; FUSHIMI, A.; JAIN, G.; SETHURAMAN, K.; VERMA, V.; TRIPATHI, S. N.; BERGIN, M. H.. Chemical characterization and toxicity of particulate matter emissions from roadside trash combustion in urban India. **Atmospheric Environment**, v. 147, p.22-30, 2016.

WALDMAN, M.. Resíduos sólidos urbanos domiciliar brasileiro: Modelos de gestão e impactos ambientais. *Boletim Goiano de Geografia*, v. 33, n. 2, p. 11-26, 2013.

WANG, Y.; CHENG, K.; WU, W.; TIAN, H.; YI, P.; ZHI, G.; FAN, J.; LIU, S.. Atmospheric emissions of typical toxic heavy metals from open burning of municipal solid waste in China. **Atmospheric Environment**, v. 152, p.6-15, 2017.

WIEDINMYER, C.; YOKELSON, R. J.; GULLETT, B. K.. Global Emissions of Trace Gases, Particulate Matter, and Hazardous Air Pollutants from Open Burning of Domestic Waste. **Environmental Science & Technology**, v. 48, n. 16, p.9523-9530, 2014.

WINDFINDER. Disponível em: < <https://pt.windfinder.com/wind/windspeed.htm>>. Acesso em: 13 de fevereiro de 2018.

XU, Q.; JIN, X.; MA, Z.; TAO, H.; KO, J. H.. Methane production in simulated hybrid bioreactor landfill. **Bioresource Technology**, v. 168, p. 92-96, 2014.

ZHOU, C.; HUANG, H.; CAO, A.; XU, W.. Modeling the carbon cycle of the municipal solid waste management system for urban metabolism. **Ecological Modelling**, v. 318, p.150-156, 2015.

ZHOU, C.; JIANG, D.; ZHAO, Z.. Quantification of Greenhouse Gas Emissions from the Predisposal Stage of Municipal Solid Waste Management. **Environmental Science & Technology**, v. 51, n. 1, p.320-327, 2016.