

Dispersão dos poluentes CH_4 , H_2S e NH_3 do vazadouro a céu aberto de Bom Sucesso/PB simulada pelo modelo HYSPLIT

Dispersion of pollutants CH_4 , H_2S and NH_3 from the open air dump of Bom Sucesso/PB simulated by the HYSPLIT model

Erick Ferreira de Sousa¹, Joel Medeiros Bezerra¹, Jessica Rafaelly Almeida Lopes²

¹ Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Rio Grande do Norte, Brasil

² Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife, Brasil

Contato: efdesousa94@gmail.com

Palavras-Chave

modelagem matemática
poluição atmosférica
transporte de poluentes

Key-word

mathematical modeling
atmospheric pollution
transport of pollutants

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 e, conseqüentemente, danos à saúde humana e aos compartimentos ambientais. Devido ao local de disposição final muitas vezes não apresentar infraestrutura compatível e condições operacionais, faz-se necessário compreender a dinâmica de dispersão de tais poluentes no ambiente, decorrente tal emissão. Com isso, esta pesquisa teve como objetivo espacializar e avaliar a concentração dos gases metano (CH_4), sulfídrico (H_2S) e amônia (NH_3) advindos do vazadouro a céu aberto de Bom Sucesso/PB, através do modelo HYSPLIT. Sendo que inicialmente, foi necessário estimar a emissão de gases mediante determinação da composição gravimétrica, permitindo contabilizar a fração orgânica, bem como estimar a taxa de emissão dos gases. Com relação à simulação da dispersão dos gases levou-se em consideração o período chuvoso e seco, considerando os dias atípicos com maior precipitação e maior velocidade dos ventos, a menor temperatura do ano e maior velocidade dos ventos, respectivamente, procurando assim analisar a máxima distância e a área de maior concentração dos gases, tais dados foram provenientes do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). Com isso, o regime dos ventos teve predominância da direção Noroeste, sendo possível verificar que os gases não atingem a zona urbana do município, entretanto alcançam comunidades rurais e cidades próximas, diante do transporte das plumas de poluentes. Neste sentido, foi possível constatar que as concentrações máximas dos poluentes são maiores no período chuvoso principalmente o CH_4 a $6,5 \times 10^{-4} \text{ mg/m}^3$ e a NH_3 a $5,2 \times 10^{-6} \text{ mg/m}^3$, enquanto H_2S foi de $1,0 \times 10^{-5} \text{ mg/m}^3$. Já a pluma de dispersão dos poluentes, CH_4 , NH_3 e H_2S , atingem as maiores distâncias no período seco e de maiores velocidades do vento, variando de 170, 145 e 190 km, respectivamente.

ABSTRACT

The increased demand for natural resources for energy generation and production of consumer goods leads to greater generation of urban solid waste and, consequently, damage to human health and environmental compartments. Due to the place of final disposal often not having compatible infrastructure and operational conditions, it is necessary to understand the dynamics of dispersion of such pollutants in the environment, resulting from such emission. Thus, this research aimed to spatialize and evaluate the concentration of methane (CH_4), hydrogen sulphide (H_2S) and ammonia (NH_3) gases from the Bom Sucesso/PB open pit, through the HYSPLIT model. Initially, it was necessary to estimate the emission of gases by determining the gravimetric composition, allowing to account for the organic fraction, as well as estimating the rate of emission of gases. Regarding the simulation of the dispersion of gases, the rainy and dry seasons were taken into account, considering the atypical days with greater precipitation and higher wind speeds, the lowest temperature of the year and the highest wind speed, respectively, seeking to analyze the maximum distance and the area of greatest concentration of gases, such data came from the National Institute of Meteorology (INMET). With this, the wind regime had a predominance of the Northwest direction, being possible to verify that the gases do not reach the urban area of the municipality, however they reach rural communities and nearby cities, due to the transport of the pollutant plumes. In this sense, it was possible to verify that the maximum concentrations of pollutants are higher in the rainy season, mainly CH_4 at $6.5 \times 10^{-4} \text{ mg/m}^3$ and NH_3 at $5.2 \times 10^{-6} \text{ mg/m}^3$, while H_2S was $1.0 \times 10^{-5} \text{ mg/m}^3$. The pollutant dispersion plume, CH_4 , NH_3 and H_2S , reach the greatest distances in the dry period and the highest wind speeds, ranging from 170, 145 and 190 km, respectively.

Informações do artigo

Recebido: 21 de setembro, 2021

Aceito: 16 de abril, 2022

Publicado: 30 de abril, 2022

Introdução

Dentre as problemáticas atuais, a disposição final inadequada e posterior queima dos Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) são umas das mais estudadas. Esta última resulta na produção de gases tóxicos e um conjunto de outros poluentes lançados na atmosfera, trazendo danos à saúde humana (KHATRI et al., 2021).

Os agravantes oriundos dos gases provenientes da decomposição da matéria orgânica, como o metano (CH_4) ou a pluma de contaminação resultante da queima dos RSU a céu aberto, associado à amônia (NH_3) e o sulfeto de hidrogênio (H_2S), tornam-se imprescindíveis sua avaliação, tal como o monitoramento da qualidade do ar com vistas a proporcionar melhorias ambientais para a comunidade (SAXENA et al., 2021).

Com isso, vislumbrando avaliar os riscos da poluição ao meio ambiente sob a ótica de variáveis meteorológicas, alguns modelos matemáticos e computacionais são utilizados para analisar o comportamento dos contaminantes atmosféricos (MOREIRA, 2014). De acordo com Kakosimos e Assael (2013), a dispersão de poluentes tóxicos dentro do perímetro urbano é complexa, devido ao movimento do vento, e com isso, torna-se fundamental a aplicação de ferramentas computacionais para avaliar a dispersão dos gases.

Diversos estudos demonstram a relevância da utilização de modelos matemáticos buscando avaliar a dispersão dos gases oriunda da queima de resíduos sólidos. Morales et al. (2018) analisaram a dispersão de poluentes da queima de resíduos de aterro sanitário na região metropolitana de Santiago, Chile. Já Białowicz, Rogulko-Kozłowska e Krasuski (2021) verificaram as emissões de poluentes oriundos da queima de resíduos, e observaram que essas emissões são significativas na escala regional, de modo que seu impacto é notório na qualidade do ar, bem como na saúde da população.

Os modelos de dispersão e transporte atmosférico são ferramentas importantes para entendimento, análise e previsão do movimento de massas de ar e materiais perigosos na atmosfera, permitindo a descrição dos numerosos e complexos processos que regem esses fenômenos e mostram através das simulações, suas possíveis regiões de impacto (NGAN et al., 2018). Nesse trabalho, optou-se pela utilização do modelo HYSPLIT (*Hybrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory*), um dos métodos mais utilizados para simulação numérica da dispersão dos resíduos gasosos.

Inserido neste contexto, tem-se o vazadouro a céu aberto de Bom Sucesso/PB, onde ocorre um cenário de disposição inadequada dos RSU, além da queima de resíduos a céu aberto, o que é comum em municípios de pequeno porte, visando reduzir o volume acumulado de resíduos. Esta queima emite fumaça tóxica e provoca problemas à saúde da população, logo é de fundamental importância realizar a análise da dispersão dos poluentes nesta localidade, tendo em vista a proximidade da área urbana e das comunidades rurais ao vazadouro a céu aberto.

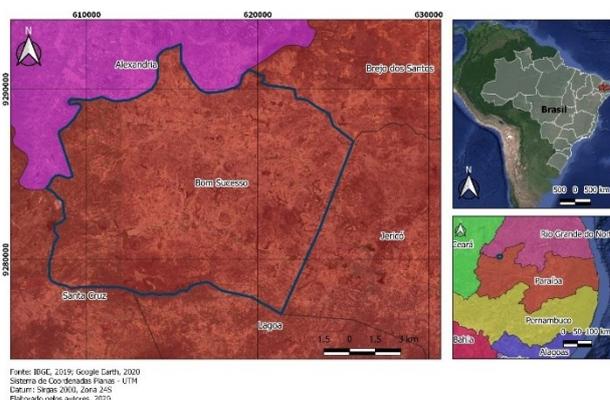
Neste sentido, esta pesquisa teve como objetivo espacializar e avaliar as concentrações dos gases: metano (CH_4), amônia (NH_3) e o sulfeto de hidrogênio (H_2S), advindos do vazadouro a céu aberto de Bom Sucesso/PB por meio do uso de modelagem computacional pelo modelo HYSPLIT, permitindo projetar a dispersão dos poluentes atmosféricos.

Material e Métodos

Área de Estudo

O vazadouro a céu aberto em estudo situa-se no município de Bom Sucesso, no sertão Paraibano, na microrregião de Catolé do Rocha (Figura 1).

Figura 1. Localização do município de Bom Sucesso/PB



Fonte: Sousa et al. (2020)

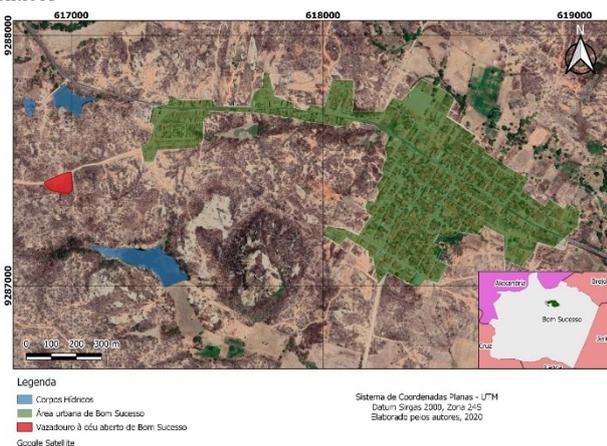
O vazadouro a céu aberto recebe resíduos urbanos, da construção civil, restos de abates de animais, além da presença de resíduos sanitários. A área não possui isolamento físico, aterramento dos resíduos, manta de drenagem subterrânea, captação e tratamento de chorume e biogás. No entanto, há um catador autônomo, que realiza a segregação e venda dos materiais recicláveis (SOUSA, BEZERRA e LOPES, 2020).

A Figura 2 apresenta a distância do vazadouro a céu aberto em relação ao centro da cidade de Bom Sucesso/PB e aos corpos hídricos, sendo distantes aproximadamente 1,5 km e 300 m, respectivamente.

Inserido no polígono das secas, o município de Bom Sucesso possui clima quente e úmido com chuvas no 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).

A estação chuvosa da Paraíba é bem definida em suas regiões. Segundo Silva et al. (2003) no sertão, região do estudo esse período se estende entre janeiro e 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.

Figura 2. Localização do vazadouro a céu aberto em relação à cidade de Bom Sucesso/PB e os corpos hídricos lânticos



Legenda: Área urbana em verde. Corpos hídricos superficiais em azul. Vazadouro a céu aberto em vermelho

Fonte: Sousa, Bezerra e Lopes (2020)

Parâmetros medidos

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, compreendendo o período de 13/01/2017 a 31/12/2017. Justifica-se a escolha desta estação, pois na localidade de estudo não possuía tal instrumentação, desta forma utilizou-se da 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.

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 vazadouro a céu aberto como o total de resíduos na fração orgânica dispostos na área, uma vez que este tipo de área degradada não dispõe de controle de entrada e saída de materiais, sendo utilizados os dados da composição gravimétrica obtidos por Sousa, Bezerra e Lopes (2020).

Rosa dos Ventos

Para obtenção da rosa dos ventos utilizou-se os dados de velocidade ($m.s^{-1}$) e direção ($^{\circ}$) do vento 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 do vento 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.

Para o presente trabalho definiu-se o período chuvoso de janeiro a junho e o período seco de julho a dezembro.

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 vazadouro a céu aberto 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.

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); E o dia 22/06/2017, ocorrendo o registro da maior velocidade do vento no período chuvoso (6,2 m/s) no intervalo de 07:00 as 13:00 horas. Enquanto para o período seco, os dias foram 15/07/2017 e 05/10/2017 por apresentarem a menor temperatura do ano (15,1 $^{\circ}C$) 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.

Para as simulações foram consideradas às condições meteorológicas atípicas em dois períodos: chuvoso (com maior precipitação e maior velocidade do vento) e seco (com menor temperatura do ano e maior velocidade do vento).

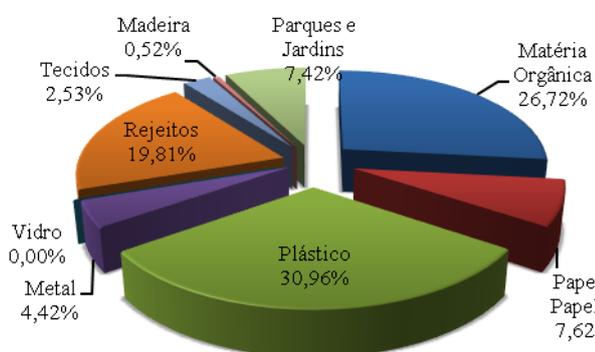
Sendo que para cada dia foram realizadas duas simulações, uma com maior detalhamento quanto ao raio de abrangência total da pluma, variando de 5, 20, 50 e 60 km, e outra com a espacialização da zona crítica com maior concentração do poluente, procurando assim analisar a máxima distância e a área de maior concentração dos gases, desta forma variando-se também o zoom (80, 90 e 100x), buscando obter uma melhor resolução e regionalização destes poluentes.

O cálculo da dispersão utilizou-se como tipo de versão *Unknown Material (Generic Mass, < 24 hrs)* que fornece as informações conhecidas em um intervalo 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.

Resultados e Discussões

A composição gravimétrica dos resíduos demonstrou um maior percentual de plástico, correspondendo a 30,96% do montante, seguido de matéria orgânica com 26,72% (Figura 3), assim como verificado por Sousa, Bezerra e Lopes (2020). A gravimetria do vazadouro a céu aberto 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 3. Composição gravimétrica dos RSU do município de Bom Sucesso/PB



Fonte: Sousa, Bezerra e Lopes (2020)

Tal fato pode ser decorrente da prática existente no município de Bom Sucesso/PB, em que os municípios recolhem os restos alimentares em recipientes nas suas residências e os criadores de suínos coletam o material, reutilizando e reincorporando na alimentação dos animais. Tal fato, pode justificar o percentual reduzido de matéria orgânica no vazadouro a céu aberto.

Estudo realizado por Silva et al. (2018) identificou a composição gravimétrica dos resíduos sólidos do Centro de Ciências e Tecnologia Agroalimentar da Universidade Federal de Campina Grande, Pombal, e concluíram que a matéria orgânica apresentou o maior percentual, representando um total de 66%, seguido por 13% de plásticos, 9% de papel/papelão e 8% de compósitos.

Tal divergência decorre das práticas culturais existentes no município de Bom Sucesso, em que ocorre a prévia segregação e aproveitamento da fração orgânica.

Estimativa do Biogás

Utilizando os dados obtidos da gravimetria e, aplicando as equações e parâmetros previstos na metodologia do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC, 1996), pode-se obter os resultados referentes a estimativa de produção de gás metano (CH₄) para o vazadouro a céu aberto de Bom Sucesso/PB. Algumas considerações foram feitas para o desenvolvimento do estudo, a saber os resultados apresentados na Tabela 1.

Tabela 1. 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 vazadouro a céu aberto	RSDf	Adimensional	1
Fator de correção do metano	FCM	Adimensional	0,4
Potencial de geração de metano dos resíduos sólidos urbanos	L0	kg CH ₄ / kg RSD	0,034
Carbono orgânico degradável no RSD	COD	kg C / kg RSD	0,09
Fração de COD dissociada	CODf	Adimensional	0,67
Massa específica do metano	ρ CH ₄	Kg / m ³	0,74

Fonte: Sousa, Bezerra e Lopes (2020)

Aplicando os dados da Tabela 1 na Equação 1 tem-se:

$$Q_{CH_4} = \frac{Pop\ urb_{hab} \cdot Taxa\ RSD_{kgRSD/hab.ano} \cdot RSDf \cdot L0_{kgCH_4/kgRSD}}{\rho_{CH_4_{kg/m^3}}} \quad Eq. (1)$$

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

A Tabela 2 apresenta um intervalo de porcentagem dos constituintes do biogás de resíduos sólidos urbanos. Para o presente estudo, sendo adotada 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 2. 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

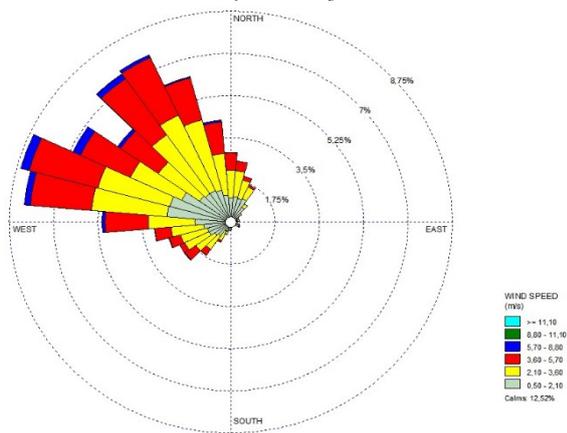
Fonte: Van Elk (2007)

Dado que 100% corresponde ao valor total de biogás e de posse do percentual de metano e do valor encontrado na Eq. 1 pode-se afirmar que a quantidade de biogás produzida no vazadouro a céu aberto 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.

Regime dos Ventos

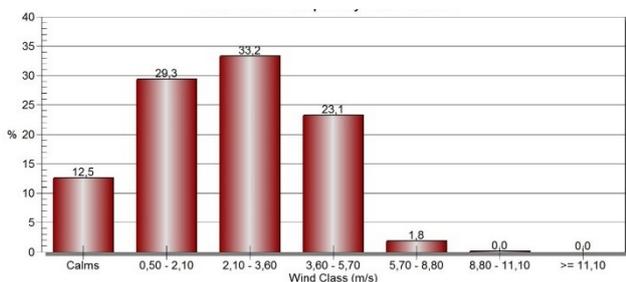
De posse dos dados de direção e velocidade horária do vento no período de janeiro a dezembro de 2017, adquiridos no site do INMET, foi possível, através do programa WRPLOT a obtenção da rosa dos ventos (Figura 4) e do gráfico de frequência de distribuição dos ventos conforme a velocidade (Figura 5).

Figura 4 – Rosa dos ventos no período de janeiro a dezembro de 2017



Fonte: Autores (2021)

Figura 5. Distribuição de frequência dos ventos em classes no período de janeiro a dezembro de 2017



Fonte: Autores (2021)

Diante dos dados, verificou-se que a direção dos ventos ocorre de 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.

Conforme a Figura 5 a maior frequência (33,2%) não ultrapassa 3,6 m/s o que corresponde a uma brisa 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.

Simulação Numérica da Dispersão dos Poluentes

Os gases utilizados nesse trabalho para simulação foram: Metano (CH₄), Amônia (NH₃) e Sulfeto de hidrogênio (H₂S). 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, foi possível obter a quantidade liberada em kg desses gases relacionando-os com a sua densidade. Os valores da densidade utilizados foram 1,363 kg/m³ para o H₂S (BORBA; SOUZA, 2010), 0,694 kg/m³ e 0,65 kg/m³ para NH₃ e CH₄, respectivamente (VAN WYLEN; BORGNAKKE; SONNTAG, 2009).

A Tabela 3 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 3. 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

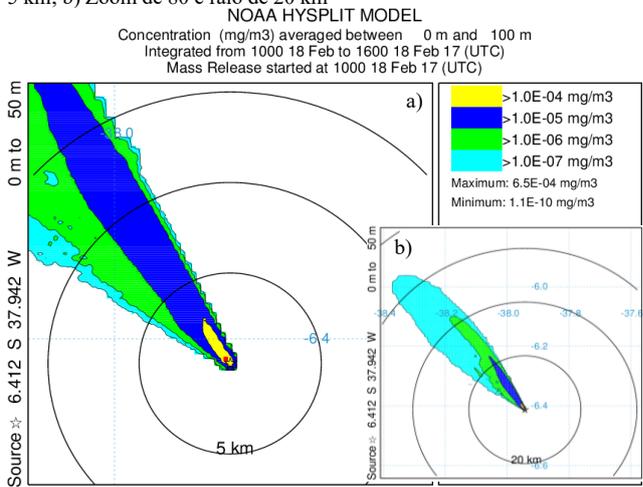
Fonte: Autores (2021)

O vazadouro a céu aberto 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 vazadouro a céu aberto não afetam os bairros da cidade, entretanto pequenas comunidades rurais e cidades próximas, a jusante da área do vazadouro a céu aberto, podem receber algumas concentrações dos gases aqui analisados, mediante transporte e emissão destes.

Simulação no período chuvoso com maior precipitação

O dia 18/02/2017 foi escolhido 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 6 apresenta a concentração de metano emitido pelo vazadouro a céu aberto de Bom Sucesso/PB durante as 6 hrs de análise. A máxima concentração de CH₄ para este dia foi de 6,5x10⁻⁴ mg/m³. A área de maior concentração, região amarela da Figura 6a, 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 6b observa-se que a pluma de contaminação atinge uma distância de aproximadamente 65 km do vazadouro a céu aberto na direção dos ventos.

Figura 6 – Simulação da dispersão/concentração num período de 6h pelo modelo HYSPLIT do metano (CH₄) em mg/m³ liberada pelo vazadouro a céu aberto 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

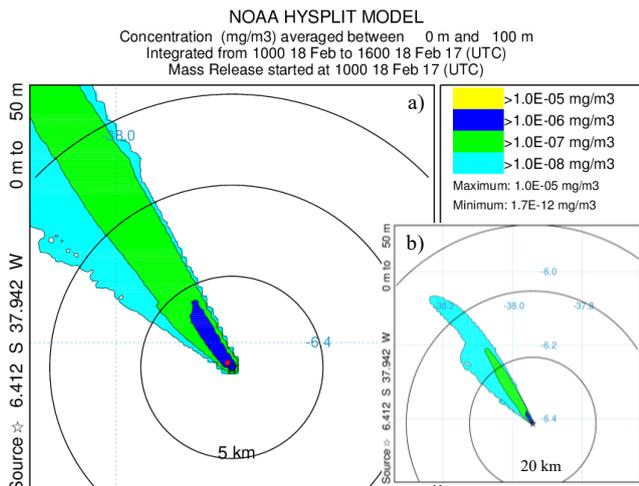


Fonte: Autores (2021)

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 7a, ficando restrita somente a área do vazadouro a céu aberto.

A pluma de contaminação por H₂S atingindo uma distância máxima de aproximadamente 50 km (Figura 7b). 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 7. Simulação da dispersão/concentração num período de 6h pelo modelo HYSPLIT do sulfeto de hidrogênio (H₂S) em mg/m³ liberada pelo vazadouro a céu aberto 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

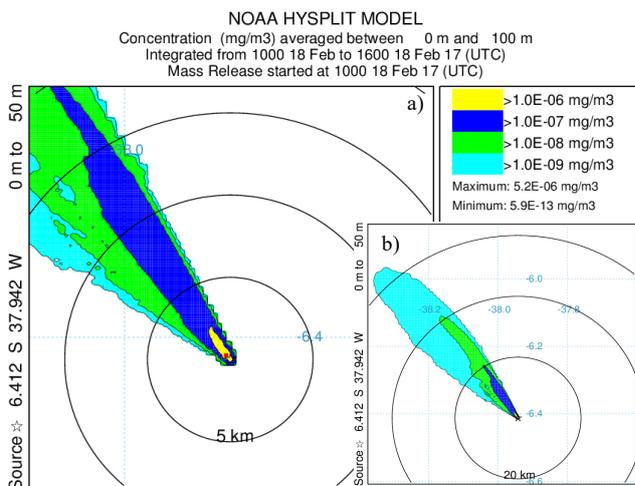


Fonte: Autores (2021)

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 5 km (Figura 8a), pela figura 8b pode-se notar que a pluma ultrapassa os 60 km chegando a aproximadamente 65 km, logo percebe-se uma semelhança entre as plumas de dispersão do CH₄ e do NH₃.

Entre os meses de janeiro e fevereiro as velocidades dos ventos são mais baixas que nos demais meses, não ultrapassando 5 m/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 8 – Simulação da dispersão/concentração num período de 6h pelo modelo HYSPLIT da amônia (NH₃) em mg/m³ liberada pelo vazadouro a céu aberto 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

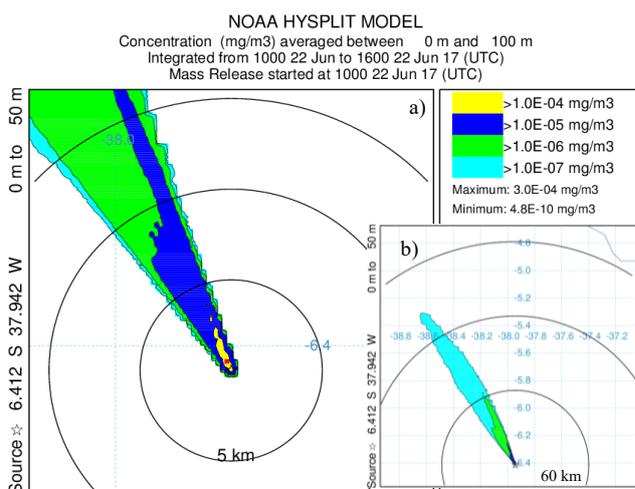


Fonte: Autores (2021)

Simulação no período chuvoso com maior velocidade do vento

O dia 22/06/2017 apresentou 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 9a) e atingindo uma distância máxima de aproximadamente 150 km (Figura 9b). Percebe-se que o CH₄ no dia 18/02 apresentou maior concentração, isso se dá 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.

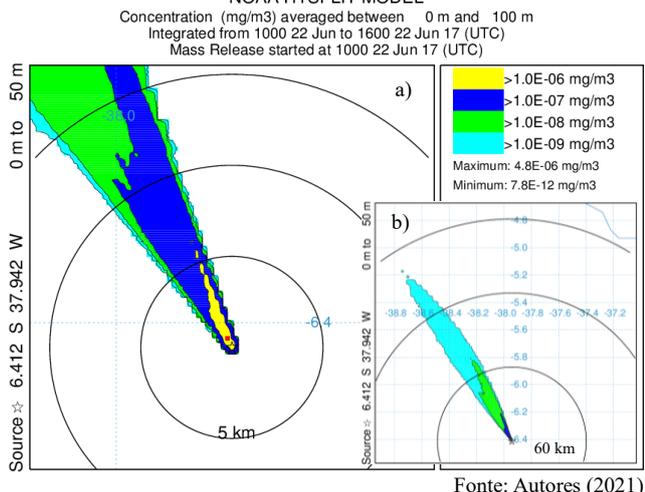
Figura 9 – Simulação da dispersão/concentração num período de 6h pelo modelo HYSPLIT do metano (CH₄) em mg/m³ liberada pelo vazadouro a céu aberto de Bom Sucesso/PB em 22/06/2017. a) Zoom de 100 e raio de 5 km; b) Zoom de 100 e raio de 60 km



Fonte: Autores (2021)

O H₂S apresentou máxima concentração de 4,8x10⁻⁶ mg/m³, com a área de maior concentração ultrapassando uma distância de 5 km (Figura 10a), entretanto percebe-se que a concentração é menor em relação ao dia 18/02 também justificado por causa dos ventos. Na Figura 10b nota-se que o sulfeto de hidrogênio atingiu uma distância máxima de aproximadamente 170 km.

Figura 10. Simulação da dispersão/concentração num período de 6h pelo modelo HYSPLIT do sulfeto de hidrogênio (H₂S) em mg/m³ liberada pelo vazadouro a céu aberto 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



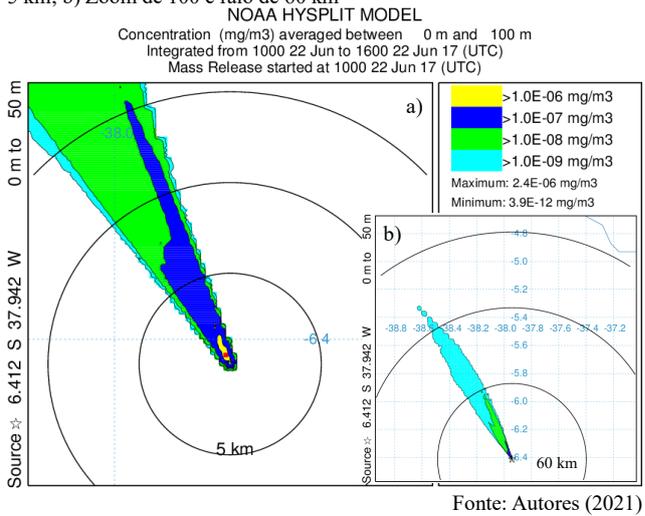
Já a amônia apresentou como distância e concentração máxima 130 km e 2,4x10⁻⁶ mg/m³, respectivamente (Figura 11b). A área de maior concentração foi de aproximadamente 2 km (Figura 11a).

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 a 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), justificando-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.

Tal cenário de maior velocidade dos ventos, influência diretamente nas condições de estabilidade atmosférica propiciando maior transporte das partículas e gases, diante da ausência de obstáculos topográficos, além da rugosidade da superfície.

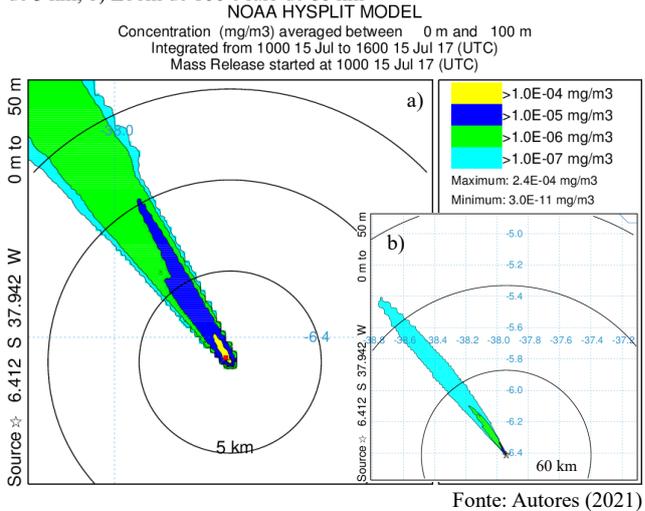
Figura 11. Simulação da dispersão/concentração num período de 6h pelo modelo HYSPLIT da amônia (NH₃) em mg/m³ liberada pelo vazadouro a céu aberto de Bom Sucesso/PB em 22/06/2017. a) Zoom de 100 e raio de 5 km; b) Zoom de 100 e raio de 60 km



Simulação no período seco com menor temperatura do ano

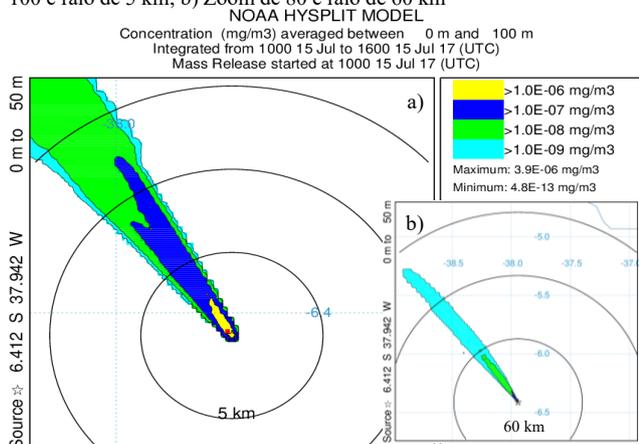
O primeiro dia do período seco analisado foi 15/07, caracterizou-se como um dia de alta radiação solar no período da tarde, porém baixa temperatura (15,1 °C) no período da manhã. A precipitação para esse dia foi 0 mm, logo a baixa umidade no solo, em conjunto com baixa temperatura reduz a produção de biogás (GIRARDI NETO; SILVA; PINHEIRO, 2017). A máxima concentração de metano para este dia foi de 2,4x10⁻⁴ mg/m³, valor inferior aos obtidos no período chuvoso. A área de maior concentração foi de aproximadamente 2 km e a distância máxima alcançada pela pluma corresponde a aproximadamente 150 km (Figura 12, a e b).

Figura 12. Simulação da dispersão/concentração num período de 6h pelo modelo HYSPLIT do metano (CH₄) em mg/m³ liberada pelo vazadouro a céu aberto 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



O gás 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 mais extensa que a do CH₄, com aproximadamente 2,5 km (Figura 13a) e maior raio de abrangência de 175 km (Figura 13b).

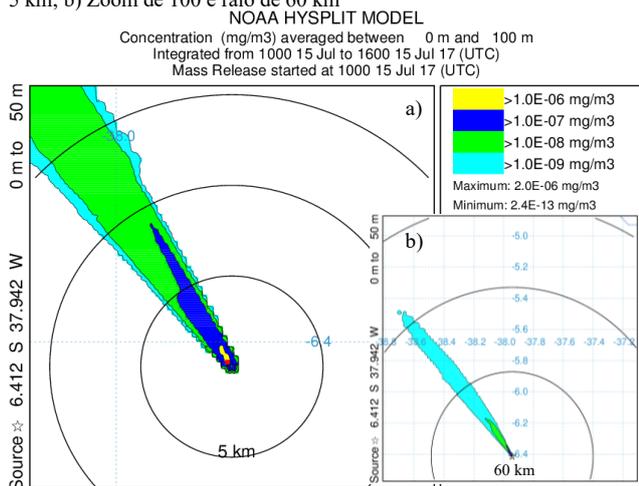
Figura 13. Simulação da dispersão/concentração num período de 6h pelo modelo HYSPLIT do sulfeto de hidrogênio (H₂S) em mg/m³ liberada pelo vazadouro a céu aberto de Bom Sucesso/PB em 15/07/2017. a) Zoom de 100 e raio de 5 km; b) Zoom de 80 e raio de 60 km



Fonte: Autores (2021)

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 14, a e b). Percebe-se a similaridade das distâncias máximas percorridas desta data com o dia 22/06, isso se dá ao fato da proximidade das datas e das características de velocidade dos ventos serem parecidas.

Figura 14. Simulação da dispersão/concentração num período de 6h pelo modelo HYSPLIT da amônia (NH₃) em mg/m³ liberada pelo vazadouro a céu aberto 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



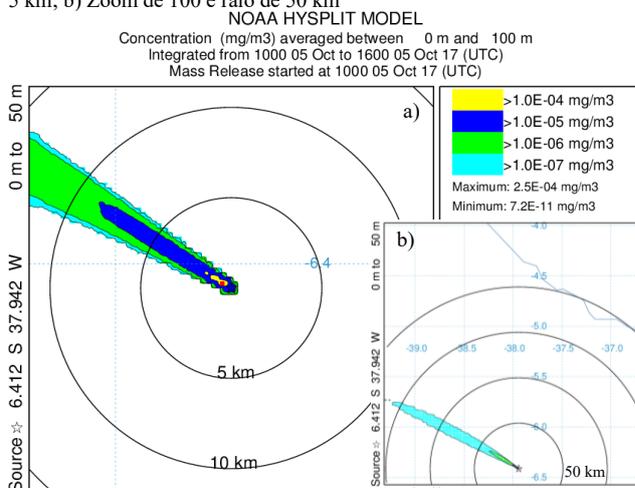
Fonte: Autores (2021)

Ressalta-se que baixas temperaturas minimizam o processo de decomposição da fração orgânica exposta a superfície pelas intempéries, além de favorecer ao retardamento da queima do material a superfície, decorrente de uma possível umidade residual presente nestes.

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 do vento maior que os demais dias estudados o alcance máximo foi superior, cerca de 170 km (Figura 15b), tendo a área de máxima concentração (região amarela) um raio de aproximadamente 2,5 km (Figura 15a).

Figura 15. Simulação da dispersão/concentração num período de 6h pelo modelo HYSPLIT do metano (CH₄) em mg/m³ liberada pelo vazadouro a céu aberto 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

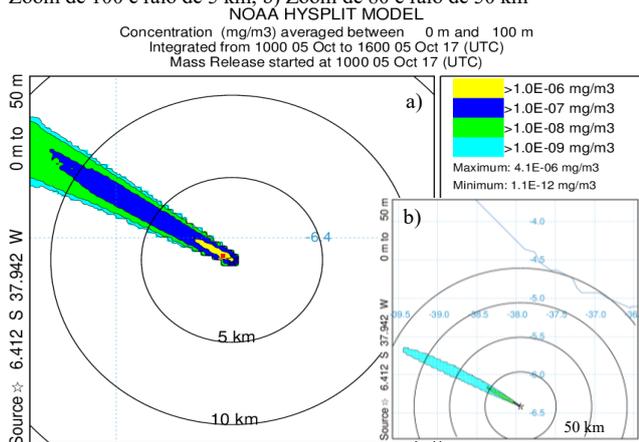


Fonte: Autores (2021)

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 16, a e b). Já a amônia atingiu uma distância máxima de 145 km (Figura 17b), com máxima concentração de $2,0 \times 10^{-6}$ mg/m³ e área de maior concentração com raio de 0,5 km (Figura 17a). 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.

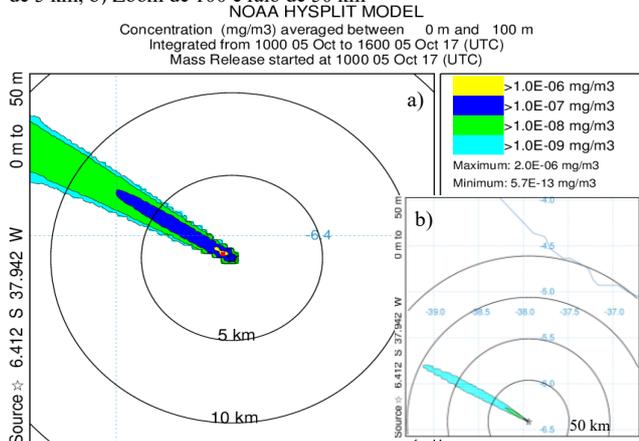
Pela análise dos gráficos obtidos pelo HYSPLIT nota-se as divergências na dispersão dos poluentes no período seco e chuvoso. O CH₄ possui maiores concentrações no período chuvoso que no seco, devido à ação bacteriana decorrente da umidade e das altas temperaturas e radiações solares, corroborando com o observado por Mariano (2006). As concentrações do sulfeto de hidrogênio e da amônia também decrescem no período chuvoso para o seco.

Figura 16. Simulação da dispersão/concentração num período de 6h pelo modelo HYSPLIT do sulfeto de hidrogênio (H₂S) em mg/m³ liberada pelo vazadouro a céu aberto 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: Autores (2021)

Figura 17. Simulação da dispersão/concentração num período de 6h pelo modelo HYSPLIT da amônia (NH₃) em mg/m³ liberada pelo vazadouro a céu aberto 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: Autores (2021)

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 H₂S 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.

Ferreira et al. (2020) afirmam que o sulfeto de hidrogênio é tóxico, asfíxiante e explosivo, além de estar relacionado a doenças e morte. O odor emitido pelo H₂S e NH₃ 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 referência.

O CH₄ é um hidrocarboneto inflamável, mais leve que o ar, asfíxiante e explosivo. Com relação à toxicidade para ser perceptível pelo olfato humano deve-se ter um valor de 200 ppm ou seja 130,88 mg/m³, 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 asfíxiante, simples para um período de exposição de 48 horas (PASQUALINI; DUARTE; PAULINO, 2015).

Para a amônia os limites propostos pelas agências de saúde e segurança ocupacional norte-americanas são 14 mg/m³, 17 mg/m³, 24 mg/m³ e 35 mg/m³, no presente trabalho nenhum desses valores foi ultrapassado, entretanto caracteriza-se como um substância carcinogênica, que afeta olhos, pele e sistema respiratório, sendo, portanto, prejudicial à saúde humana (CAMPOS e COSTA, 2017).

O sulfeto de hidrogênio (H₂S) em concentração de 12 mg/m³ provoca irritação na mucosa nasal e olfativa, enquanto em altas concentrações mata um ser humano em minutos (PASQUALINI; DUARTE; PAULINO, 2015). As concentrações encontradas no trabalho são baixas, entretanto a literatura não é clara sobre os efeitos da exposição a baixas concentrações de H₂S (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.

Conclusão

As simulações realizadas no HYSPLIT para dispersão dos gases metano (CH₄), amônia (NH₃) e sulfeto de hidrogênio (H₂S), considerando às situações meteorológicas extremas, demonstraram concentrações máximas no período chuvoso, enquanto a pluma de dispersão atingiu as maiores distâncias em período seco, sob condições de maior velocidade do vento.

As concentrações máximas dos poluentes foram alcançadas no período chuvoso, principalmente o CH₄, com 6,5x10⁻⁴ mg/m³, e a NH₃, com 5,2x10⁻⁶ mg/m³, enquanto H₂S atingiu concentrações mais baixas, de 1,0x10⁻⁵ mg/m³.

Já as plumas de dispersão dos poluentes, CH₄, NH₃ e H₂S, apresentaram as maiores distâncias no período seco e as maiores velocidades, variando de 170, 145 e 190 km, respectivamente.

O regime dos ventos teve predominância da direção Noroeste, sendo possível verificar que os gases não atingem a zona urbana do município de Bom Sucesso/PB, entretanto alcançam comunidades rurais e cidades próximas, diante do transporte das plumas de poluentes.

Contribuição dos autores

Os autores desse artigo declaram que contribuíram de forma igualitária na sua elaboração.

Referências

- 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*, Santa Maria, v. 19, n. 3, p. 67-72, set-dez. 2015, DOI: 105902/2236117017584.

- BIHAŁOWICZ, J. S.; ROGULA-KOZŁOWSKA, W.; KRASUSKI, A. Contribution of landfill fires to air pollution – An assessment methodology. *Waste Management*, v. 125, p. 182-191, abril 2021, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2021.02.046>.
- 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_BAILO_TEOR_D_E_CARBO>. Acesso em 13 de setembro de 2021.
- CAMPOS, R. F. F.; COSTA, D. D. Análise do impacto ambiental pela dispersão de poluentes atmosféricos, através da queima de resíduos. *Interfacs – Saúde, Meio Ambiente e Sustentabilidade*, São Paulo, v. 12, n. 1, p. 182-191, jun. 2017.
- 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*, Aquidabã, v. 3, n. 2, p. 73-90, jun., jul., ago., set., out., nov. 2012, DOI: <https://doi.org/10.6008/ESS2179-6858.2012.002.0005>.
- FERREIRA, H. G. R.; PEDROSO, G. M.; ALVES, R. G.; CAHLI, G. M.; MELLO, S. C. R. P. Resíduos Sólidos Urbanos (RSU): uma análise do setor energético em ascensão com base no impacto ambiental e na qualidade de vida. *Formação (Online)*, v. 27, n. 51, p. 65-83, maio-ago. 2020.
- GALDINO, S. J.; MARTINS, C. H. Composição gravimétrica dos resíduos sólidos urbanos da coleta convencional de um município de pequeno porte. *Tecno-lógica*, Santa Cruz do Sul, v. 20, n. 1, p. 01-08, jan./jun. 2016, DOI: <https://doi.org/10.17058/tecnolog.v20i1.6060>.
- GIRARDI NETO, J.; SILVA, J. D.; PINHEIRO, I. G. Balanço de massa no tratamento de resíduos sólidos orgânicos provenientes de restaurantes em biorreator. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, v. 22, n. 3, p. 491-499, maio/jun. 2017, DOI: <https://doi.org/10.1590/S1413-41522017150094>.
- INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA (INMET). **Dados históricos anuais**. Disponível em: <<http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=estacoes/estacoesAutomatizadas>>. Acesso em 15 de setembro de 2021.
- INTERNATIONAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). **Guidelines for National Greenhouse Inventories: Reference Manual**, v. 1, 1996.
- 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.
- KHATRI, K. L.; MUHAMMAD, A. R.; SOOMRO, S. B.; TUNIO, N. A.; ALI, M. M. Investigation of possible solid waste power potential for distributed generation development to overcome the power crises of Karachi city. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 143, p. 1-13, fev. 2021, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.110882>.
- 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. *Ambi-Água*, Taubaté, v. 5, n. 1, p. 204-214, 2010.
- MARIANO, Glauber Lopes. **Simulação numérica da dispersão dos poluentes H₂S e NH₃ provenientes do lixão de Maceió-AL nas épocas seca e chuvosa: estudo de casos**. 2006. 150f. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) - Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2006.
- MORALES, R. G. E.; TORO, A. R.; MORALES, L.; LEIVA, M. A. Landfill fire and airborne aerosols in a large city: lessons learned and future needs. *Air Quality, Atmosphere & Health*, v. 11, p. 111-121, out. 2018, DOI:10.1007/s11869-017-0522-8.
- 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.
- NGAN, F.; STEIN, A.; FINN, D.; ECKMAN, R. Dispersion simulations using HYSPLIT for the Sagebrush Tracer Experiment. *Atmospheric Environment*, v. 186, p. 18-31, ago. 2018, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2018.05.012>.
- PASQUALINI, A. A.; DUARTE, K. M. R.; PAULINO, V. T. Qualificação do potencial tóxico dos gases de biodigestores. *Revista Educação Ambiental em Ação*, v. 14, n. 54, p. 1-8, 2015.
- 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 Sanitária e Ambiental*, v. 18, n. 1, p.1-8, jan./mar. 2013, DOI: <https://doi.org/10.1590/S1413-41522013000100001>.
- SALVADOR, Fábio Leonardo Ramos. **Elaboração de um plano de recuperação de área degradada (PRAD) para um antigo lixão no município de Garopaba**. 2012. 82f. TCC (Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2012.
- SAXENA, P.; SONWANI, S.; SRIVASTAVA, A.; JAIN, M.; SRIVASTAVA, A.; BHARTI, A.; RANGRA, D.; MONGIA, N.; TEJAN, S.; BHARDWAJ, S. Impact of crop residue burning in Haryana on the air quality of Delhi, India. *Helion*, v. 7, n. 5, p. 1-14, maio 2021, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e06973>.
- SILVA, C. M.; TSURUTA, F.; RODRIGUES, J. C.; VIEIRA, F.; ARBILLA, G. Simulação das Trajetórias de Poluentes em Eventos Naturais e Antropogênicos. *Revista Virtual de Química*, v. 10, n. 6, p. 1828-1848, nov./dez. 2018, DOI: 10.21577/1984-6835.20180120.
- SILVA, E. M.; ALBUQUERQUE, W. G.; SOBRINHO, L. G. A.; MEDEIROS, A. N. Estimativa da geração e composição gravimétrica dos resíduos sólidos da Universidade Federal de Campina Grande, Pombal, Paraíba. *Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável*, Pombal, v.13, n. 1, p. 66-73, jan./mar. 2018, DOI: <http://dx.doi.org/10.18378/rvads.v13i1.5428>.
- 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, ago. 2003, DOI: <https://doi.org/10.1590/S1415-43662003000200014>
- SOUZA, Erick Ferreira de. **Uso da Barragem Subterrânea no município de Bom sucesso/PB**. 2016. 59f. TCC (Graduação em Ciência e Tecnologia) - Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Pau dos Ferros, 2016.
- SOUZA, E. F.; BEZERRA, J. M.; LOPES, J. R. A. Estimativa da produção de biogás e composição gravimétrica dos resíduos sólidos do município de Bom Sucesso-PB. *Novos Cadernos NAEA*, v. 23, n. 2, p. 201-219, maio/ago. 2020, DOI: <http://dx.doi.org/10.5801/ncn.v23i2.7317>.
- 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, Augusto Ehlers. **Elaboração de um plano de recuperação de área degradada (PRAD) para o antigo lixão do Itacorubi, Florianópolis (SC)**. 2013. 128f. TCC (Graduação em Engenharia Ambiental e Sanitária) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2013.
- STOKSTAD, E. 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 set. 2021.

VAN ELK, A. G. H. P. **Redução de emissões na disposição final**. Coordenação de Karin Segala – Rio de Janeiro: IBAM, p. 40, 2007.

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

WINDFINDER. **Calculadora de velocidade do vento**. Disponível em: <https://pt.windfinder.com/wind/windspeed.htm>. Acesso em: 13 set. 2021.