

X-015 – APLICAÇÃO DE MODELO RECEPTOR E MODELO GAUSSIANO DE DISPERSÃO ATMOSFÉRICA NA INVESTIGAÇÃO DA QUALIDADE DO AR EM REGIÃO URBANA INDUSTRIALIZADA E COSTEIRA

Rodrigo de Araujo Costa⁽¹⁾

Graduando de Engenharia Sanitária e Ambiental no Instituto Federal do Espírito Santo – IFES.

Bruno Furieri⁽²⁾

Doutor em Engenharia Ambiental, Professor da Coordenadoria de Engenharia Sanitária e Ambiental do Instituto Federal do Espírito Santo – IFES.

Endereço⁽¹⁾: Av. Vitória, 1729 - Jucutuquara, Vitória - ES, 29040-780 - Brasil - Tel: (27) 3331-2237 - e-mail: rodrigodearaujocosta@gmail.com

RESUMO

Cada vez mais a qualidade do ar vem ganhando importância na discussão dos potenciais efeitos de poluentes emitidos na atmosfera, devido principalmente aos seus impactos sobre a saúde humana. A expansão industrial traz benefícios econômicos, entretanto, esse desenvolvimento dos centros industriais deve ser acompanhado de um planejamento adequado. O trabalho visa avaliar a qualidade do ar em uma região urbana industrializada e costeira, utilizando o modelo de dispersão, AERMOD, e posterior (em um trabalho futuro) comparação com o modelo receptor, CMB, que investiga a culpabilidade pelas partículas depositadas sobre as superfícies de uso cotidiano. O poluente modelado foi o material particulado total (MPT) e os dados de emissões do poluente foram retirados do inventário de fontes da região. Como esperado, os locais mais próximos à área industrial apresentaram as maiores concentrações de MPT, e a qualidade do ar foi considerada boa, com concentrações bem abaixo dos limites máximos permitidos pela legislação para este cenário estudado. Uma futura análise do CMB permitirá uma complementação desse modelo receptor com o modelo de dispersão, comparação entre os modelos e com o inventário de emissões. Ademais, será importante para identificar as fontes com maior contribuição de MPT e seus elementos químicos, ajudando nas tomadas de decisões e gestão relacionadas às questões ambientais.

PALAVRAS-CHAVE: Poluição Atmosférica, Material Particulado, Modelagem Gaussiana, Modelos Regulatórios.

INTRODUÇÃO

A qualidade do ar tem sido uma causa de preocupação em todo o mundo com as concentrações de certos poluentes excedendo as normas em muitos lugares, particularmente em países em desenvolvimento, sendo o material particulado (MP) reconhecido como um dos principais poluentes com impacto negativo na saúde humana (PANT; HARRISON, 2012). A poluição atmosférica está entre os dez maiores fatores de risco que impactam a saúde humana mundialmente, tendo um impacto maior que outros fatores como alto índice de massa corporal, dieta rica em sódio ou saneamento não melhorado (LIM *et al.*, 2012 *apud* GALVIS *et al.*, 2015).

Segundo Chan e Yao (2008 *apud* TAIWO; HARRISON; SHI, 2014), o rápido desenvolvimento econômico e industrial levou ao aumento do consumo de energia, emissão de poluentes atmosféricos e baixa qualidade do ar nas principais cidades do mundo, especialmente em países em desenvolvimento. Por essa razão, existe uma necessidade pela quantificação, identificação e repartição desses poluentes, a fim de facilitar a sua redução através de planos de gestão adequados (TAIWO; HARRISON; SHI, 2014).

A identificação das fontes de poluentes e da quantificação das emissões das fontes individuais é uma das componentes chaves no plano de gerenciamento da qualidade do ar (SRIMURUGANANDAM; SHIVA NAGENDRA, 2012). A complexidade da avaliação da qualidade do ar levou ao desenvolvimento de modelos matemáticos preditivos da qualidade do ar para auxiliar no monitoramento e avaliação (ABDUL-WAHAB; SAPPURD; AL-DAMKHI, 2011). Os modelos de dispersão do ar são desenvolvidos para estudar o transporte

e destino dos poluentes emitidos na atmosfera, bem como seus níveis de concentração no ambiente e deposição atmosférica. Uma vez que são identificadas as fontes primárias de emissão que afetam o receptor de interesse, os modelos de dispersão podem ser utilizados para estimar seus impactos num local alvo e nos seus pontos receptores vizinhos (LI *et al.*, 2015). Um desses modelos de dispersão é o AERMOD, modelo computacional disponibilizado pela Agência Norte-Americana de Proteção Ambiental (USEPA). O AERMOD é um modelo de pluma de estado estacionário que calcula a dispersão atmosférica com base na estrutura de turbulência da camada limite planetária e em alguns conceitos de escala, e pode ser responsável tanto por fontes de superfície quanto por fontes elevadas (TARTAKOVSKY; BRODAY; STERN, 2013), além de poder ser utilizado em cenários de terrenos simples (planos) ou complexos (AERMOD, 2012 *apud* TARTAKOVSKY; BRODAY; STERN, 2013).

Modelos de dispersão podem ser complementados por estudos de modelagem receptora. Um modelo receptor, como, por exemplo, o Balanço Químico de Massa (do inglês *Chemical Mass Balance* – CMB), faz a análise química das contribuições no receptor e nas fontes de emissão. Assim, é possível estimar o percentual proveniente de cada fonte, como, por exemplo, das indústrias e veículos. Já o modelo de dispersão, AERMOD, faz o caminho reverso do CMB, partindo das fontes de emissão para os receptores. Assim, é possível utilizar os resultados de ambas as modelagens de forma a obter uma caracterização mais completa da qualidade do ar na região de interesse.

O objetivo geral do presente trabalho é modelar matematicamente a dispersão atmosférica de material particulado emitido de fontes pontuais situadas em uma unidade industrial localizada em uma zona costeira. É descrito no presente trabalho detalhes da metodologia de implementação de tal modelo matemático, bem como uma comparação entre as plumas obtidas para diferentes tempos de média. Adicionalmente, buscamos no presente trabalho, demonstrar de forma qualitativa ao leitor a importância da combinação dos resultados de ambos os modelos. É prevista a etapa de correlacionar fontes e receptores utilizando o modelo CMB da USEPA para determinar a responsabilidade das fontes em uma região urbana industrializada e aplicar modelos gaussianos regulatórios para a dispersão atmosférica de material particulado, considerando as características de uma região urbana industrializada. A modelagem da dispersão utilizando-se da metodologia gaussiana é prevista objetivando a complementação dos resultados obtidos com a modelagem receptora. A aplicação das duas técnicas de forma conjunta surge como uma solução bastante interessante no que diz respeito à qualidade das discussões referentes à questão da qualidade do ar em ambientes urbano industrializados.

METODOLOGIA UTILIZADA

Para avaliar o impacto das emissões em uma região urbana industrializada e costeira foi utilizado um modelo atmosférico de dispersão gaussiano, o AERMOD, disponibilizado pela USEPA. O modelo é composto por três etapas: o pré-processador meteorológico do AERMOD, AERMET, o pré-processador de terreno do AERMOD, AERMAP, e o modelo de pluma gaussiana do AERMOD com camada limite planetária (ROY; SINGH; YADAV, 2016).

A concentração total obtida pelo modelo AERMOD, somando a contribuição de cada uma das três contribuintes, é dada pela Equação 1.

$$C(x, y, z) = C_d(x, y, z) + C_p(x, y, z) + C_r(x, y, z) \quad \text{equação (1)}$$

Onde C_d é a contribuição da fonte direta, C_p é a contribuição da fonte que penetra além do topo da camada limite convectiva, e C_r é a contribuição da fonte indireta. C_d e F_y são detalhados nas Equações 2 e 3, respectivamente.

$$C_d(x, y, z) = \frac{Qf_p}{\sqrt{2\pi u}} F_y \sum_{f=1}^2 \sum_{m=0}^{\infty} \frac{\lambda_f}{\sigma_{zj}} \left[\exp\left(-\frac{(z - \Psi_{dj} - 2mz_1)^2}{2\sigma_{zj}^2}\right) + \exp\left(-\frac{(z + \Psi_{dj} - 2mz_1)^2}{2\sigma_{zj}^2}\right) \right] \quad \text{equação (2)}$$

$$F_y = \left(-\frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_y}} \exp\left(-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right) \right) \quad \text{equação (3)}$$

Na Equação 2, $C_d(x,y,z)$ representa a concentração de um determinado poluente num ponto qualquer do espaço, a primeira parcela exponencial representa a parcela da concentração decorrente da dispersão vertical dos poluentes e a segunda parcela exponencial representa o acúmulo de poluentes que se dá em função da consideração do efeito do contorno sólido ou contorno de reflexão, devido ao solo. Já na Equação 3, F_y representa a função de distribuição horizontal de uma pluma coerente.

Os dados meteorológicos foram obtidos através da base de dados do *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA) para um período de, exatamente, um ano. Como não havia estação meteorológica com dados disponíveis exatamente na região de estudo, foi escolhida uma estação próxima com as mesmas características (direção e velocidade do vento mais frequentes). Os dados obtidos pelo NOAA foram então convertidos no *software* NCDC para tornar possível a leitura desses dados no modelo AERMOD. Para obtenção dos dados de radiossondagem, também foi utilizado a base de dados do NOAA. Os dados de topografia foram obtidos no *site* do WebGIS, no formato SRTM3, utilizando as coordenadas da região de estudo. Para o funcionamento no AERMOD, o dado topográfico foi convertido para o formato DEM, utilizando o *software* 3DEM.

Nas discussões apresentadas neste artigo, foram priorizadas e analisadas para a região urbana industrializada e costeira as fontes pontuais cuja emissão de material particulado total (MPT) era acima de 50 t/ano, detalhadas na Tabela 1. De posse dos dados de meteorologia, e estabelecendo no AERMAP o domínio de aproximadamente 17,7 x 32,6 km, o *grid*, com 1 km menor que o domínio em cada eixo, 50 receptores espaçados a cada 600 metros no eixo x e 50 receptores espaçados a cada 300 metros no eixo y, e a localização das nove fontes pontuais, foi feita a execução do AERMAP. Vale ressaltar que os parâmetros detalhados na Tabela 1 são essenciais na execução da modelagem gaussiana. A taxa de emissão é o principal parâmetro que embasa o cálculo da pluma de poluentes. A temperatura vai influenciar no cálculo da altura efetiva de lançamento, juntamente com a altura da fonte. Na Tabela 1 temos a seguinte nomenclatura para as variáveis: N é o número identificador da fonte, Q_s é a taxa de emissão, H é a altura da fonte, T é a temperatura de exaustão dos gases, V é a velocidade de saída dos gases da chaminé e D é o diâmetro da fonte pontual.

Tabela 1: Descrição das fontes

N	IDENTIFICAÇÃO	SETOR	Q_s (g/s)	H (m)	T (°C)	V (m/s)	D (m)
1	Chaminé de Forno de Pelotização	Pelotização	12,45	43	139,4	11,60	8,5
2	Chaminé de Forno de Pelotização	Pelotização	9,61	43	140,3	13,77	5,0
3	Chaminé Principal de Forno de Pelotização	Pelotização	8,22	50	121,0	9,28	8,3
4	Chaminé de Forno de Pelotização	Pelotização	5,24	43	139,5	12,00	5,8
5	Chaminé de Forno de Pelotização	Pelotização	3,34	50	81,7	10,52	4,6
6	Entrada saída do forno e peneiramento da Usina	Pelotização	3,37	43	47,4	12,09	5,3
7	Caminhão/Descarga de Calcário Bruto	Preparação Moagem de Calcário	2,69	18	30,0	19,74	1,07
8	Entrada saída do forno e peneiramento da Usina	Pelotização	1,91	43	52,4	14,94	4,4
9	Chaminé de Forno de Pelotização	Pelotização	1,75	50	62,1	9,90	4,6

Para o AERMET, foi preciso definir a setorização do domínio, representada na Figura 1, e estimar valores para Albedo, Razão de Bowen e Rugosidade da Superfície com base no manual do AERSURFACE, disponibilizado pela USEPA, para cada setor do domínio e estações do ano, porém, devido à localização da região de estudo,

foi considerada uma uniformidade entre as estações por não haver variações climáticas significativas. Os valores considerados são mostrados na Tabela 2.



Figura 1: Setorização do domínio

Tabela 2: Valores adotados para Albedo, Bowen e Rugosidade em cada setor

SETOR	CLASSE	ALBEDO	BOWEN	RUGOSIDADE
1	Industrial	0,18	1,5	0,07
2	Mar	0,1	0,1	0,001
3	Residencial de baixa intensidade	0,16	0,8	0,40
4	Floresta mista	0,14	0,5	1,2

A escolha dos setores foi feita com base na tipologia que é mais representativa na área delimitada. No setor 1, por exemplo, existe uma mescla de região oceânica e terrestre. Porém, para este caso a área industrial foi escolhida devido à proximidade com as fontes. Com os dados de meteorologia, de radiossondagem, a angulação de cada setor do domínio, obtida com o auxílio do *software* Meazure, e os valores adotados para os parâmetros, foi feita a execução do AERMET. Para execução do AERMOD, foram colocadas as coordenadas das fontes, idênticas às fornecidas ao AERMAP, e a altitude, obtida no arquivo de saída do AERMAP depois de executado, junto com seus parâmetros de taxa de emissão, altura de emissão da fonte, temperatura de exaustão da saída do poluente, velocidade de saída do poluente e diâmetro da fonte, obtidos através do inventário da região de estudo.

Os arquivos gerados na execução do AERMOD (modelagem gaussiana efetivamente) foram utilizados para criar isolinhas de concentração no *software* Surfer a fim de permitir a visualização da dispersão do material particulado total (MPT) na região. Já para a criação da rosa dos ventos para a região estudada, foi utilizado o *software* WRPlot.

RESULTADOS OBTIDOS E DISCUSSÃO

A presente seção concentra os principais resultados e discussões obtidos para este artigo. O texto está organizado da seguinte maneira: (i) caracterização da meteorologia local, (ii) plumas gaussianas de dispersão e (iii) avaliação qualitativa da modelagem receptora. A rosa dos ventos para a região urbana industrializada e costeira pode ser verificada na Figura 2, que mostra diretamente a predominância dos ventos norte e nordeste. A distribuição da frequência dos ventos por classe está representada na Figura 3, sendo possível observar que os ventos mais comuns na região têm velocidade na faixa de 3,60 a 5,70 m/s. Tal classe de ventos é bastante favorável à dispersão dos poluentes emitidos a partir de fontes industriais.

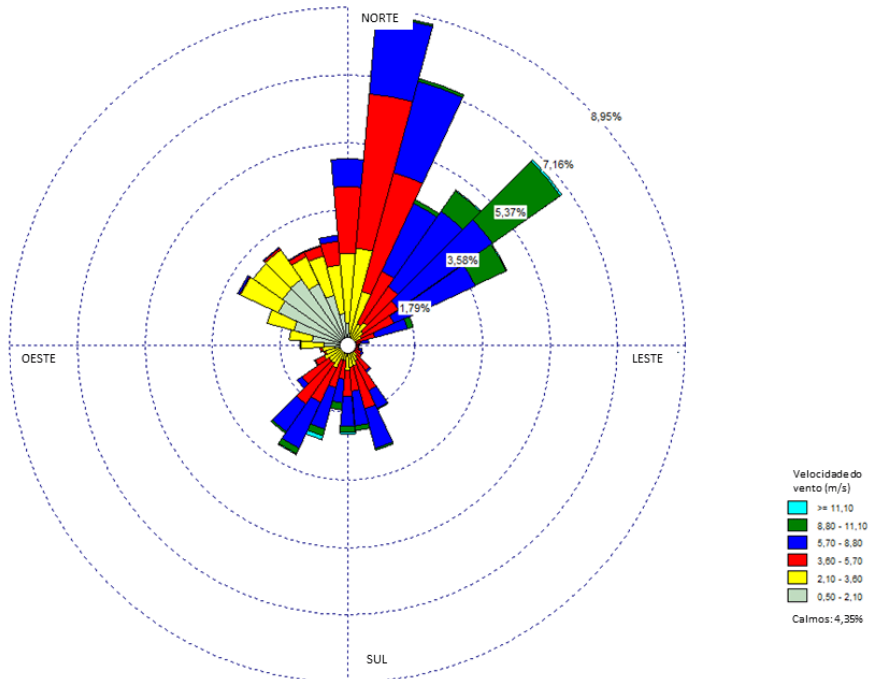


Figura 2: Rosa dos ventos para a região de estudo

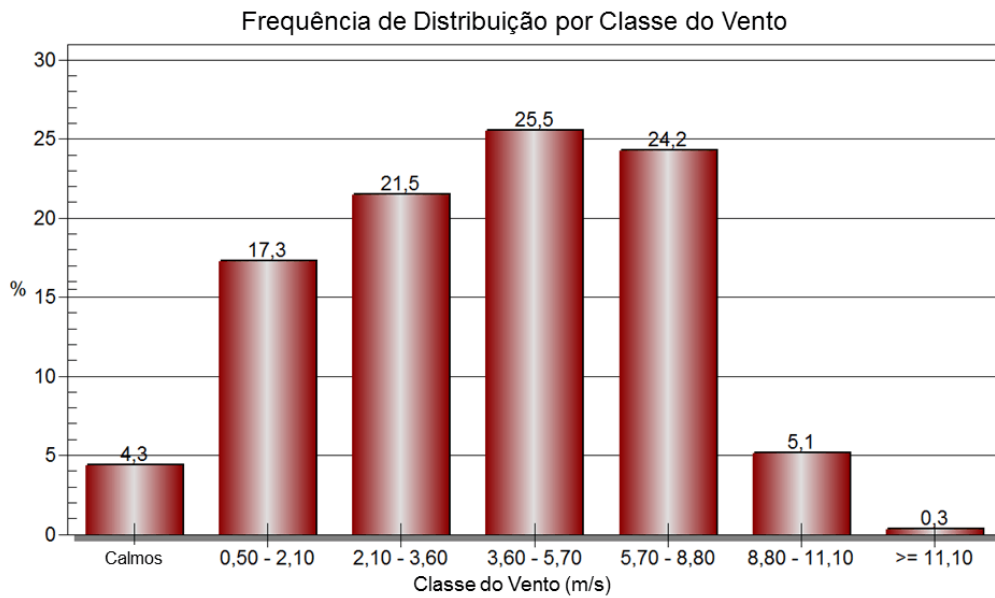


Figura 3: Frequência de distribuição por classe do vento

A legislação local (Decreto Estadual de Padrões de Qualidade do Ar) estabelece os padrões de qualidade do ar para material particulado total apenas para concentrações médias de 24 horas consecutivas e concentrações médias anuais. As Figuras 4 a 7 mostram a concentração para as máximas das médias de 1 hora, 8 horas e 24 horas, além da concentração média para o período de 1 ano observado.

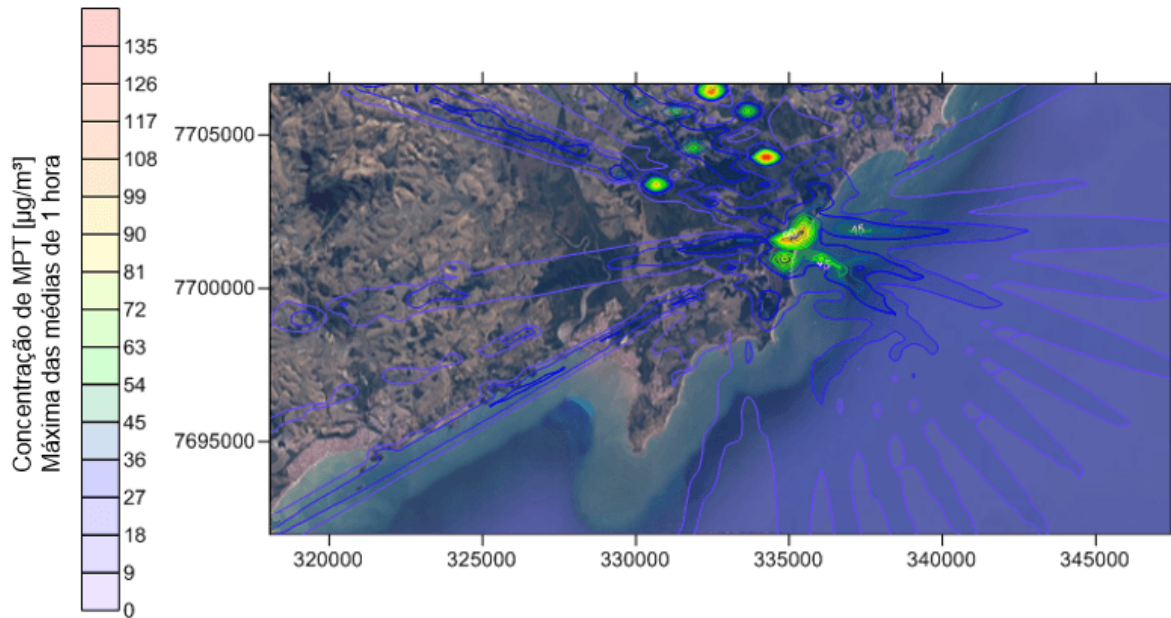


Figura 4: Concentração de MPT para máxima das médias de 1 hora

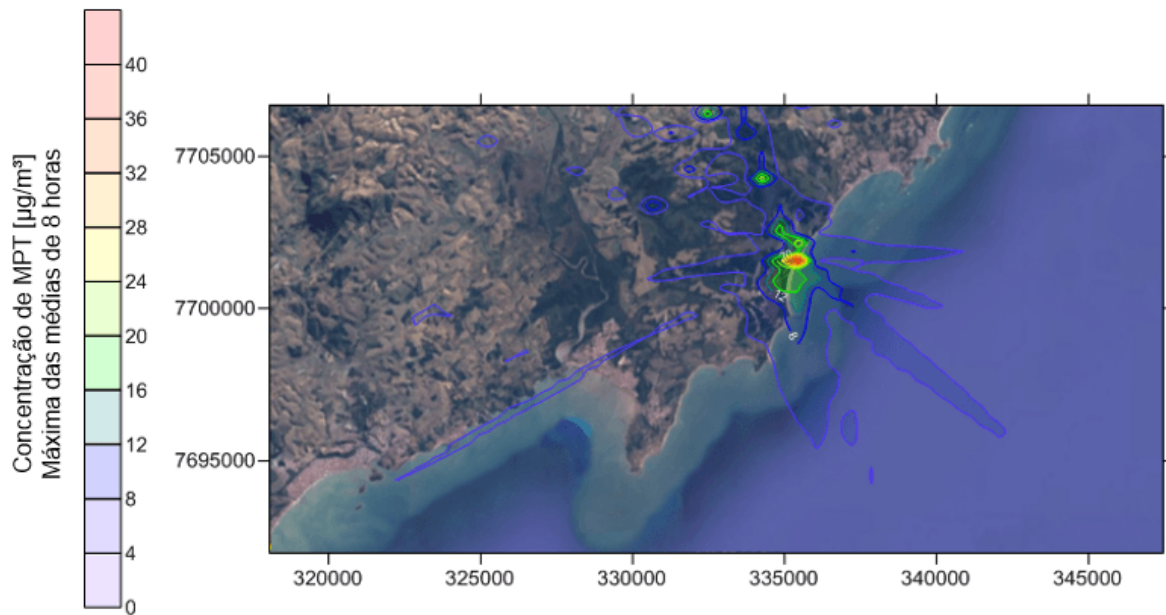


Figura 5: Concentração de MPT para máxima das médias de 8 horas

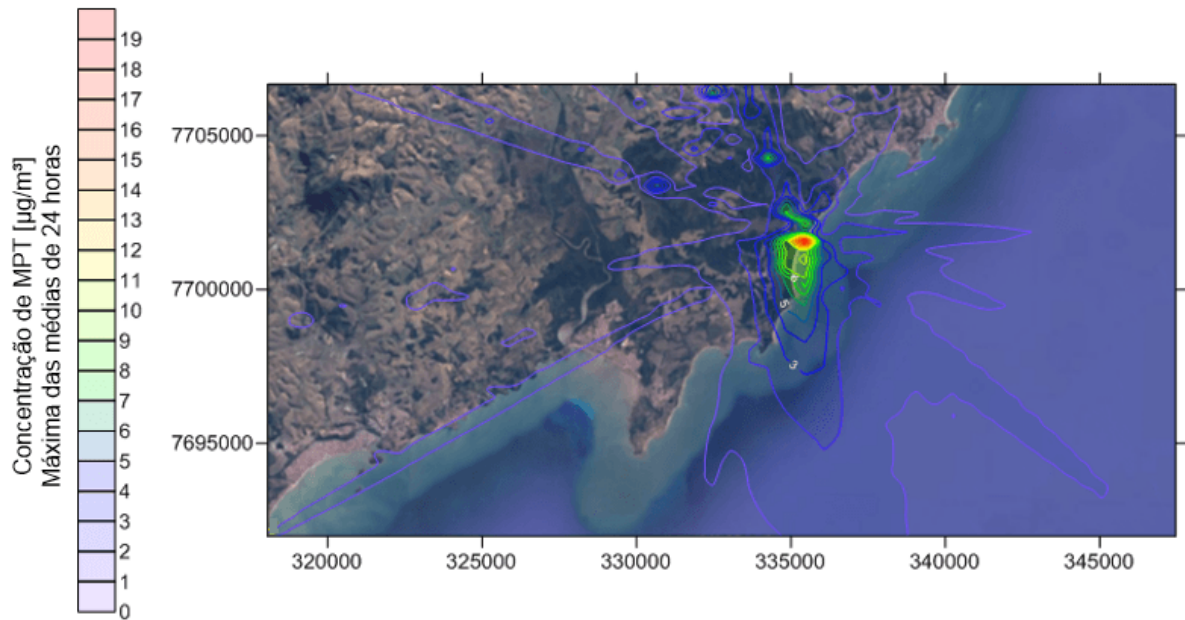


Figura 6: Concentração de MPT para máxima das médias de 24 horas

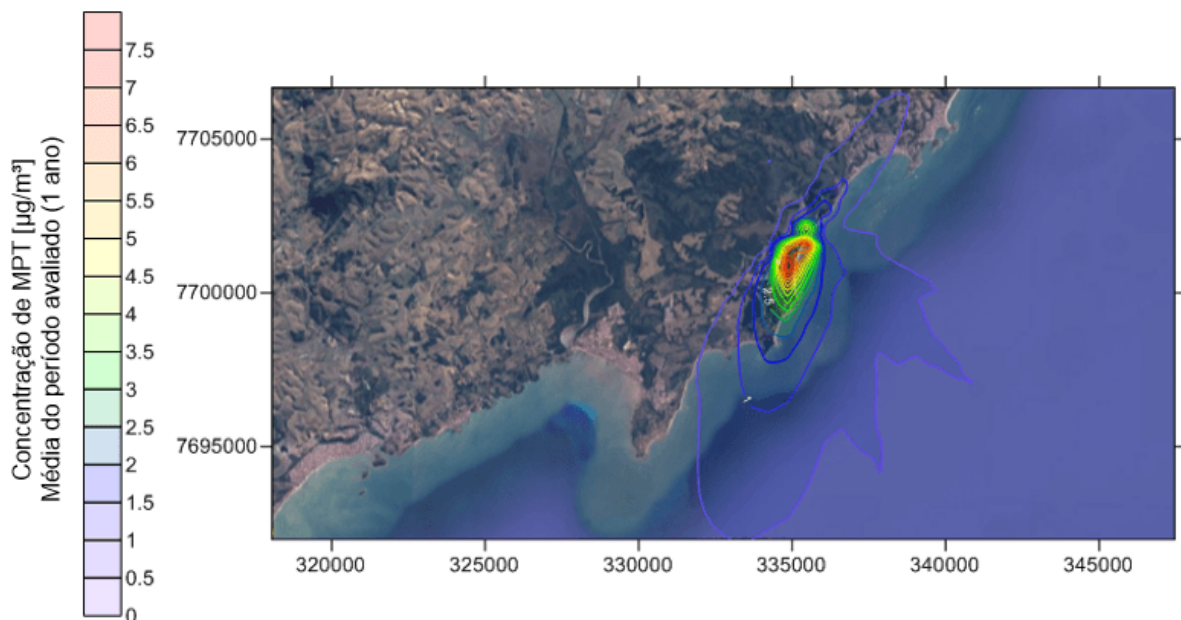


Figura 7: Concentração média de MPT para o período de 1 ano do estudo

Percebe-se uma considerável diferença entre a dispersão do MPT para a concentração da máxima média de 1 hora, em que o MPT percorre várias direções, e das médias de 24 horas e do período de 1 ano do estudo, que chegam a uma dispersão mais gaussiana. Observa-se na Figura 4 que a pluma representando a máxima média de 1 hora atinge os receptores a distâncias maiores que 15 km. Isto evidencia o fato de que picos de concentração podem exceder os padrões da legislação mesmo distante das fontes. Especificamente para a região de estudo, as concentrações modeladas para a média de 1 hora estão bastante próximas da região mais habitada da cidade investigada, localizada na porção sudoeste do domínio computacional. Complementando a análise da Figura 4, regiões de intensa concentração são percebidas na porção norte do domínio. Estas regiões são elevações identificadas no domínio computacional. As partículas emitidas de uma chaminé são mais facilmente depositadas em regiões de meia altura. Na Figura 7 a curva gaussiana é facilmente identificável na distribuição de concentrações por estar representando uma média anual, ou seja, uma média realizada com um grande número de observações indicando uma grande quantidade de resultados instantâneos sobrepostos. Uma

exposição prolongada a estas fontes somente é significativamente impactante em um raio de 5 km ao sul das fontes industriais.

A Figura 8 identifica a altitude do terreno da região urbana industrializada e costeira. A oeste do domínio tem-se o maior pico de altitude, da ordem de 340 m, enquanto próximo das fontes existem pequenos picos, o maior de aproximadamente 180 m. A influência desta configuração da elevação do terreno foi discutida nos parágrafos anteriores onde foram interpretadas as plumas de concentração de material particulado.

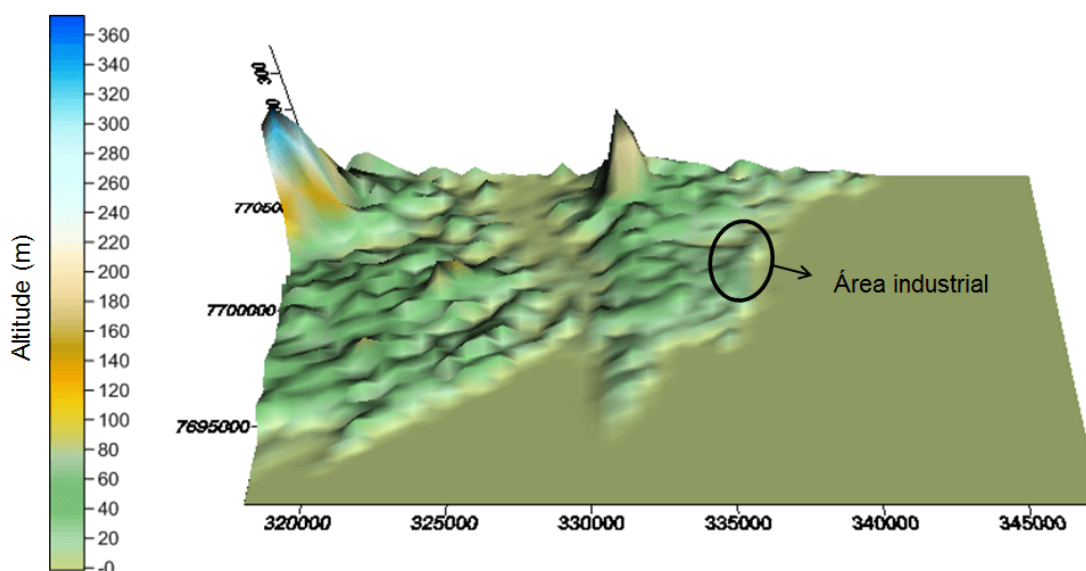


Figura 8: Modelo Digital de Elevação do terreno estudado

As maiores concentrações observadas se encontram justamente na área industrial da região de estudo, seguidos de alguns pontos de maior altitude. É possível perceber a influência dos ventos na dispersão do MPT, que tendem a seguir o mesmo sentido. A distribuição espacial da concentração de MPT no domínio mostra que na área industrial essa concentração chega a um valor máximo de $7,46 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para a média anual e $18,25 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para a média de 24 horas, enquanto que para as médias de 1 hora e 8 horas, esses valores são de $134,33 \mu\text{g}/\text{m}^3$ e $39,55 \mu\text{g}/\text{m}^3$, respectivamente. Os valores encontrados são inferiores ao limite máximo estabelecido pela legislação local e CONAMA 03/1990 para os padrões finais, de $150 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para a média de 24 horas e de $60 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para a média anual. A qualidade do ar na região estudada, seguindo critérios do Índice de Qualidade do Ar, é considerada boa, visto que as concentrações estão entre 0 e $80 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Porém, é essencial ressaltar que somente foram quantificadas as fontes de maior taxa de emissão segundo o inventário local.

RESULTADOS ESPERADOS

O modelo de dispersão e o modelo receptor se complementam. O Balanço Químico de Massa utiliza da análise química das contribuições no receptor e nas fontes de emissão para encontrar uma distribuição percentual dos principais responsáveis pelo material particulado depositado nas estações de monitoramento. Assim, é possível estimar o percentual proveniente de cada fonte, como, por exemplo, das indústrias e veículos. Já o modelo de dispersão, AERMOD, faz o caminho reverso do CMB, partindo das fontes de emissão para os receptores. O modelo receptor, CMB, será executado para posteriormente fazer uma análise entre o modelo receptor e de dispersão, para ver a relação entre eles, se os resultados obtidos estão de acordo com o esperado e qual a precisão de cada modelo. Os resultados obtidos através dos programas, seus percentuais de contribuição de cada fonte, serão úteis para tomadas de decisão e gestão relacionadas às questões ambientais.

De forma mais concreta, a análise conjunta dos modelos de dispersão e receptor funcionará da maneira explicada no diagrama apresentado na Figura 9. Nesta representação podemos compreender a significativa importância desta metodologia em uma análise complexa e completa da qualidade do ar em uma região com inúmeros fatores de influência.

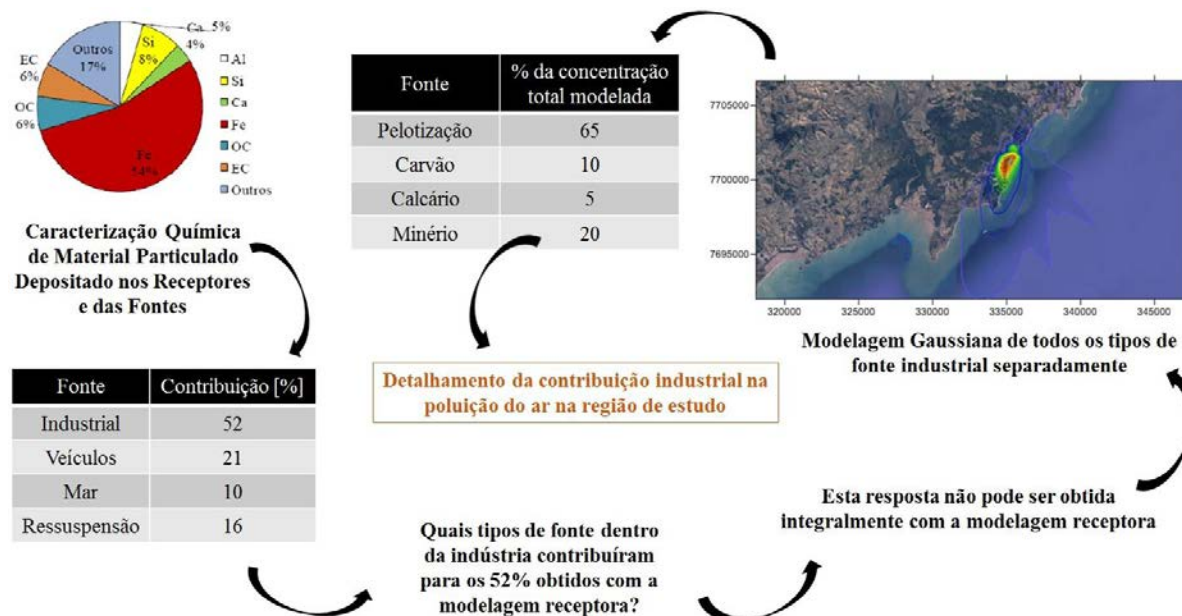


Figura 9: Exemplo de metodologia de avaliação conjunta da modelagem gaussiana da dispersão e modelagem receptora

No diagrama pode ser notado que a metodologia proposta irá detalhar o resultado do CMB de forma a dizer quais fontes industriais estão contribuindo com a geração de material particulado. Observando o exemplo na Figura 9, o modelo receptor indicou que, de todo o material depositado na estação de monitoramento, 65% tem origem nas diferentes fontes do setor de pelletização e somente 5% de calcário. Em regiões em que muitas fontes com caracterização química parecida se sobrepõem, esta metodologia se torna muito eficiente.

CONCLUSÃO

No presente estudo, o impacto causado pela emissão de MPT das fontes pontuais de uma unidade industrial localizada em uma região urbana e costeira foi realizado usando a técnica do modelo de dispersão gaussiano. O *software* AERMOD foi introduzido de forma a simplificar a complexidade da modelagem, ainda assim sendo consideradas as fontes na área de estudo, terreno e influências meteorológicas. Os resultados de concentração obtidos neste estudo mostram o atendimento (parcial) da legislação para os Padrões de Qualidade do Ar, não ultrapassando os limites permitidos. Estes resultados podem ajudar em estratégias efetivas que visem à minimização do impacto de MPT na atmosfera. As plumas de concentração do poluente avaliado mostram que o maior impacto das emissões está próximo às instalações da indústria da região. Porém, um resultado alarmante a ser destacado são as grandes distâncias atingidas pelo poluente quando estamos analisando as máximas médias de 1 hora. Mesmo não tendo sido observadas ultrapassagens dos padrões para o cenário testado, uma análise completa de todas as fontes do inventário muito provavelmente indicará problemas na qualidade do ar local. Segundo o Índice da Qualidade do Ar (IQA), a qualidade do ar na região urbana industrializada e costeira estudada neste cenário, pode ser considerada boa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ABDUL-WAHAB, S., SAPPURD, A., AL-DAMKHI, A. *Application of California Puff (CALPUFF) model: a case study for Oman. Clean Technologies and Environmental Policy*, v. 13, p. 177-189, 2011.
2. AERMOD. *Technical Guide 1995-2011*. US EPA, 2012.
3. BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Resolução CONAMA nº 03, de 28 de junho de 1990. Dispõe sobre padrões de qualidade do ar, previstos no PRONAR. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=100>. Acesso em: 24 mai. 2017.
4. CHAN, K. C., YAO, X. *Air pollution in mega cities in China. Atmospheric Environment*, v. 42, p. 1-42, 2008.

5. GALVIS, B. *et al.* Air quality impacts and health-benefit valuation of a low-emission technology for rail yard locomotives in Atlanta Georgia. *Science of the Total Environment*, v. 533, p. 156-164, 2015.
6. LI, H. *et al.* Impacts of hazardous air pollutants emitted from phosphate fertilizer production plants on their ambient concentration levels in the Tampa Bay area. *Air Quality, Atmosphere and Health*, v. 8, p. 453-467, 2015.
7. LIM, S. S. *et al.* A comparative risk assessment of burden of disease and injury attributable to 67 risk factors and risk factor clusters in 21 regions, 1990-2010: a systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2010. *The Lancet*, v. 380, n. 9859, p. 2224-2260, 2012.
8. PANT, P., HARRISON, R. M. Critical review of receptor modelling for particulate matter: A case study of India. *Atmospheric Environment*, v. 49, p. 1-12, 2012.
9. ROY, D., SINGH, G., YADAV, P. Identification and elucidation of anthropogenic source contribution in PM₁₀ pollutant: Insight gain from dispersion and receptor models. *Journal of Environmental Sciences*, v. 48, p. 69-78, 2016
10. SRIMURUGANANDAM, B., SHIVA NAGENDRA, S. M. Source characterization of PM₁₀ and PM_{2.5} mass using a chemical mass balance model at urban roadside. *Science of the Total Environment*, v. 433, p. 8-19, 2012.
11. TAIWO, A. M., HARRISON, R. M., SHI, Z. A review of receptor modeling of industrially emitted particulate matter. *Atmospheric Environment*, v. 97, p. 109-120, 2014.
12. TARTAKOVSKY, D., BRODAY, D. M., STERN, E. Evaluation of AERMOD and CALPUFF for predicting ambient concentrations of total suspended particulate matter (TSP) emissions from a quarry in complex terrain. *Environmental Pollution*, v. 179, p. 138-145, 2013.