



## QUALIDADE DO AR

# QUALIDADE DO AR: DESENVOLVIMENTO DE ALGORITMO PARA AUXILIO NO ESTUDO DA DISPERSÃO DE POLUENTES NA ATMOSFERA

Ítala Tainá Alves de Souza<sup>1</sup>; Ana Flávia Gomes de Oliveira<sup>2</sup>; Isabella Pelosi Borges de Deus<sup>3</sup>; Daniele da Silva Targino<sup>4</sup>; Leodina Moura do Amaral<sup>5</sup>;

<sup>1,2,3,4,5</sup> Acadêmica do curso de Engenharia Ambiental, IF Goiano Campus Rio Verde - GO, italataina04@gmail.com, anafgoliveira@outlook.com, isabella\_pelosi@hotmail.com, danicont53@gmail.com, leodinaamaral@outlook.com.

## RESUMO

*Desde a segunda metade do século XX, a qualidade do ar atmosférico é uma das grandes preocupações no âmbito da saúde. Logo, monitoramento e o estudo da dispersão de poluentes na atmosfera se tornam instrumentos de extrema importância, uma vez que as etapas de monitoramento dos poluentes são fundamentais para a gestão da qualidade do ar nos centros urbanos. Com base nisso, o presente trabalho teve por objetivo a construção de um algoritmo para uso como uma ferramenta de apoio afim de facilitar o estudo da dispersão de poluentes na atmosfera bem como a qualidade do ar. A criação do algoritmo, em linguagem de programação C, foi realizada utilizando o software Dev-C++ e seu desenvolvimento teve como base a modelagem matemática de aproximação Gaussiana. Concluiu-se que a utilização do algoritmo facilita o monitoramento da qualidade do ar a partir da realização do seu cálculo bem como a confirmação dos resultados, apoiando de forma efetiva na resolução da equação gaussiana no estudo de dispersão de poluentes atmosféricos.*

**Palavras-chave:** Poluição atmosférica; Qualidade do ar; Modelo Gaussiano; Algoritmo.

## INTRODUÇÃO

No início do século XX pouca ou nenhuma importância era dada para a qualidade da atmosfera, pois pensava-se que o ar necessário para a respiração dos seres humanos e de outros seres estaria disponível constantemente de forma a manter a vida no planeta (RUSSO, 2010). No entanto, na metade do século houve um disparo da atividade industrial, do êxodo rural e do extrativismo, paralelo a escassez de leis de proteção ao meio ambiente e recursos financeiros. Tais fatos resultaram na degradação e poluição do meio ambiente (PAES, 2012).

Desde então, a qualidade do ar atmosférico é uma das grandes preocupações no âmbito da saúde (BRAGA et al., 2002; LEAL et al., 2006). Destaca-se problemas respiratórios e circulatórios, e, a diminuição do bem-estar da população como um dos principais danos à população. Nota-se que os danos não se restringem somente às áreas onde ocorre as emissões, pois os poluentes dispersam por correntes ultrapassando fronteiras regionais e nacionais (DRUMM et al., 2014).



De acordo com Moreira et al (2008), a meteorologia tem um papel fundamental quanto à qualidade do ar, pois são estes que guiam a dispersão dos poluentes e a sua deposição no solo. Logo, o monitoramento da qualidade do ar torna-se um instrumento de extrema importância dos órgãos ambientais, pois gera dados atuais e bases para guiar o gerenciamento de controle e tomadas de decisões políticas, no sentido de melhorar a qualidade do ar, tomar ações previstas na norma e alertar a população dos riscos à saúde.

As etapas de monitoramento dos poluentes são fundamentais para a gestão da qualidade do ar nos centros urbanos e as etapas de modelagem podem auxiliar por meio das previsões dos impactos das emissões na troposfera, seja este impacto causado por fontes fixas ou por fontes móveis (MARTINS et al., 2015).

Segundo a CETESB - Companhia Ambiental do Estado de São Paulo, na década de 60 e 70, houve muitos registros de procura aos serviços médicos de emergência por conta dos fortes odores causados pelo excesso de poluentes lançados pelas indústrias na atmosfera. Com a necessidade de estabelecer estratégias de controle, o CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente criou a Resolução CONAMA Nº 05/1989, que dispõe sobre o monitoramento da qualidade do ar e a Resolução CONAMA Nº 03, de 28 de junho de 1990 (Anexo 1), que estabelece os padrões nacionais de qualidade do ar.

Modelos de dispersão usam formulações matemáticas para caracterizar os fenômenos de dispersão de poluentes emitidos para a atmosfera e podem prever a concentração de determinada partícula ou gás em pontos específicos, baseando-se em informações de emissões e condições meteorológicas da área estudada (BOLOGNESI, 2011). Finzi e cols. (1991 apud VORMITTAG et al., 2014) propõem a utilização de um modelo de dispersão Gaussiano. Entretanto, o modelo é bastante complexo e demorado para fins de cálculo manual, mas muitos programas de computador têm sido desenvolvidos incorporando extensões do Modelo Gaussiano. Além disso, a computação está envolvida em diversas atividades no contexto atual e por esta causa as linguagens de programação são desenvolvidas para diferentes metas.

## **OBJETIVOS**

O presente trabalho teve por objetivo desenvolver um algoritmo para ser utilizado como uma ferramenta de apoio afim de facilitar o estudo da dispersão de poluentes na atmosfera bem como a qualidade do ar, classificando-a segundo a CONAMA 3/90.



## MATERIAL E MÉTODOS

A criação do algoritmo em linguagem de programação C foi realizada utilizando o software Dev-C++.

Para o seu desenvolvimento baseou-se na modelagem matemática de aproximação Gaussiana (1). Nele o poluente varia do local de emissão contínua de uma chaminé até o ponto de medição, ou avaliação, que se encontra a uma distância  $x$ , conduzido horizontalmente do centro da pluma a uma distância  $y$  e a uma altura definida  $z$ , segundo a equação 1 (TURNER, 1994; KAWANO, 2003).

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

Onde:  $C(x, y, z)$  = concentração do poluente no ponto de coordenadas  $x, y, z$  (g/m<sup>3</sup>);  $Q$  = taxa de emissão do poluente na chaminé (g/s);  $\sigma_y$  = Coeficiente de dispersão horizontal da concentração da pluma, em função da direção do vento e da distância da fonte (m);  $\sigma_z$  = coeficiente de dispersão vertical da concentração da pluma, em função da direção do vento e da distância da fonte (m);  $v$  = velocidade média do vento na altura da chaminé (m/s);  $x$  = distância horizontal do emissor ao receptor (m);  $z$  = altura do receptor ou ponto de medição (m);  $y$  = distância horizontal do ponto de medição a uma distância  $y$  da linha central da pluma (m).

### Classe de Estabilidade Atmosférica

Faz necessário, primeiramente, saber qual a substância de maior concentração. Em seguida se determina a classe de estabilidade atmosférica conforme Pasquill-Gifford apresentado na tabela 1. Definida através da relação entre velocidade do vento e a insolação.

Tabela 1- Classificação da estabilidade atmosférica.

Classe	Descrição
A	Extremamente instável
B	Moderadamente instável
C	Levemente instável
D	Neutro
E	Levemente estável
F	Moderadamente estável

Fonte: SEINFELD (1986)

## Velocidade do Vento e Insolação

Essas variáveis podem ser obtidas através do site do CRESESB (Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio Brito). Para definição da intensidade da insolação SEINFELD (1986) apresenta um quadro que relaciona a radiação solar com a faixa de radiação, para a estabilidade atmosférica, de uma forma mais simplificada apresentada na tabela 2.

Tabela 2- Classificação da insolação com as faixas de radiação solar.

Radiação solar incidente	Langley/min.	W/m <sup>2</sup>
Forte	$I > 1,0$	$I > 700$
Moderada	$0,5 \leq I \leq 1,0$	$350 \leq I \leq 700$
Fraca	$I < 0,5$	$I < 350$

Fonte: SEINFELD (1986).

Caso seja noite é possível se obter a nebulosidade através do INMET (Instituto Nacional de Meteorologia) e comparar com o parâmetro do quadro 1 para se definir a classe.

Quadro 1 - Classificação da classe turbulenta para Pasquill-Gifford a partir de dados meteorológicos.

Velocidade do vento a superfície (m/s)	Radiação solar incidente (dia)			Nebulosidade (noite)	
	FORTE	MODERADA	FRACA	$\geq 4/8$	$\leq 3/8$
<2	A	A-B	B	-	-
2-3	A-B	B	C	E	F
3-4	B	B-C	C	D	E
4-6	C	C-D	D	D	D
>6	C	D	C	D	D

Fonte: SCHNELLE e DEY (2000).

## Correção de Altura para Terrenos Irregulares

A modificação do terreno pode ser corrigida através da equação 2.

$$H' = H + Z_s - Z - RHT \quad (2)$$



Onde:  $H'$  = é a altura de estabilização da pluma;  $H$  = é a altura efetiva da chaminé;  $Z_s$  = é a altura da base da chaminé em relação ao nível do mar;  $Z$  = é a altura do terreno no receptor em relação ao nível do mar;  $RHT$  = é a altura do receptor acima da altura do terreno.

A altura efetiva da emissão na chaminé é obtida através da equação 3. Que é a elevação em que uma pluma passa a ser passiva e seguindo o movimento do ar atmosférico.

$$H = h + \Delta h \quad (3)$$

Onde:  $H$  = Altura efetiva da chaminé;  $\Delta h$  = Elevação da pluma acima da chaminé;  $h$  = Altura física da chaminé.

Para calcular a elevação da pluma optou-se pela utilização da equação 4, conhecida como equação de Holland.

$$\Delta h = \left( \frac{V_s \cdot d}{\bar{u}} \right) \cdot \left( 1,5 + \left( 2,68 \cdot 10^{-3} \cdot p \cdot \left( \frac{\Delta t}{T_s} \right) \cdot d \right) \right) \quad (4)$$

Onde:  $\Delta h$  = Elevação da pluma acima da chaminé (m);  $V_s$  = Velocidade do gás na chaminé (m/s);  $d$  = Diâmetro interno da chaminé (m);  $\bar{u}$  = Velocidade média do vento na altura física da chaminé (m/s);  $p$  = Pressão atmosférica (mbar);  $\Delta t$  = Diferença de temperatura ( $T_s - T_{ar}$ );  $T_s$  = Temperatura do gás da chaminé na saída da chaminé (K);  $T_{ar}$  = Temperatura ambiente (K);  $2,68 \cdot 10^{-3}$  = constante ( $\text{mbar}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$ ).

### **Velocidade do Vento na Altura da Chaminé**

Considerando a correção da velocidade do vento em relação à altura da chaminé aplica-se a equação 5.

$$V_2 = V_1 \cdot \left( \frac{h_2}{h_1} \right)^2 \quad (5)$$

Onde:  $V_2$  = velocidade do vento corrigida na altura  $h_2$  (m/s);  $V_1$  = velocidade do vento medida na altura  $h_1$  (m/s);  $h_2$  = altura na qual será corrigida a velocidade do vento (m);  $h_1$  = altura onde foi medida a velocidade do vento (m);  $p$  = expoente que depende da estabilidade atmosférica presente.

Para cada tipo de área de terreno, seja ele urbano ou rural, e para cada classe de estabilidade têm-se um expoente “ $p$ ” diferente, de acordo com o quadro 2.

Quadro 2 – Expoente “p” segundo as classes de estabilidade de Pasquill-Gifford e o tipo de terreno.

Classe	Área rural	Área urbana
A ou B	0,07	0,15
C	0,10	0,20
D	0,15	0,25
E	0,35	0,30
F	0,55	0,30

Fonte: TURNER (1994)

Para o ajuste de dispersão as tabelas 3 e 4 trazem equações para a estimar o valor de  $\sigma_y$  e  $\sigma_x$ .

Tabela 3 - Parâmetros de dispersão urbana (para distâncias entre 100 m à 10.000 m).

Classe de estabilidade	Coeficiente de dispersão	
	horizontal - $\sigma_y$ (m)	vertical - $\sigma_x$ (m)
A – B	$0,32.x.(1+0,0004.x)^{-0,5}$	$0,24.x.(1+0,001.x)^{0,5}$
C	$0,22.x.(1+0,0004.x)^{-0,5}$	$0,20.x$
D	$0,16.x.(1+0,0004.x)^{-0,5}$	$0,14.x.(1+0,0003.x)^{-0,5}$
E – F	$0,11.x.(1+0,0004.x)^{-0,5}$	$0,08.x.(1+0,00015.x)^{-0,5}$

Fonte: ZANNETTI (1990)

Tabela 4 - Parâmetros de dispersão rural (para distâncias entre 100 m à 10.000 m).

Classe de estabilidade	Coeficiente de dispersão	
	horizontal - $\sigma_y$ (m)	vertical - $\sigma_x$ (m)
A	$0,22.x.(1 + 0,0001. x)^{-0,5}$	$0,20.x$
B	$0,16.x.(1 + 0,0001. x)^{-0,5}$	$0,12.x$
C	$0,11.x.(1 + 0,0001. x)^{-0,5}$	$0,08.x.(1 + 0,0002.x)^{-0,5}$
D	$0,08.x.(1 + 0,0001. x)^{-0,5}$	$0,06.x.(1 + 0,0015.x)^{-0,5}$
E	$0,06.x.(1 + 0,0001. x)^{-0,5}$	$0,03.x.(1 + 0,0003.x)^{-1}$
F	$0,04.x.(1 + 0,0001. x)^{-0,5}$	$0,016.x.(1 + 0,0003 x)^{-1}$

Fonte: ZANNETTI (1990)



## Variação da Concentração ao Longo do Tempo

Em caso de diferença de concentração ao longo do tempo escolheu-se utilizar a equação 6 sugerida por TURNER (1994), para se estimar a concentração para tempos de amostragem de até 2 h.

$$C_2 = C_1 \cdot \left(\frac{t_1}{t_2}\right)^{pt} \quad (6)$$

Onde:  $C_2$  = Concentração desejada no tempo de amostragem  $t_2$ ;  $C_1$  = Concentração média para tempo de amostragem  $t_1$  (aproximadamente 10 min.);  $pt$  = Expoente que pode variar de 0,17 - 0,2 dependendo de fatores como a estabilidade e a rugosidade do terreno.

Para a verificação dos resultados da concentração dos poluentes utilizou os limites de lançamentos estabelecidos pela CONAMA 3/90.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

O algoritmo (figura 1) desenvolvido é uma ferramenta voltada para a efetuação e confirmação dos cálculos de monitoramento da qualidade do ar em qualquer ponto de emissão de poluentes por meio da modelagem Gaussiana, a qual, de acordo com Moreira e Tirabassi (2004), se fundamenta na suposição teórica de que o poluente se dispersa em uma turbulência análoga.

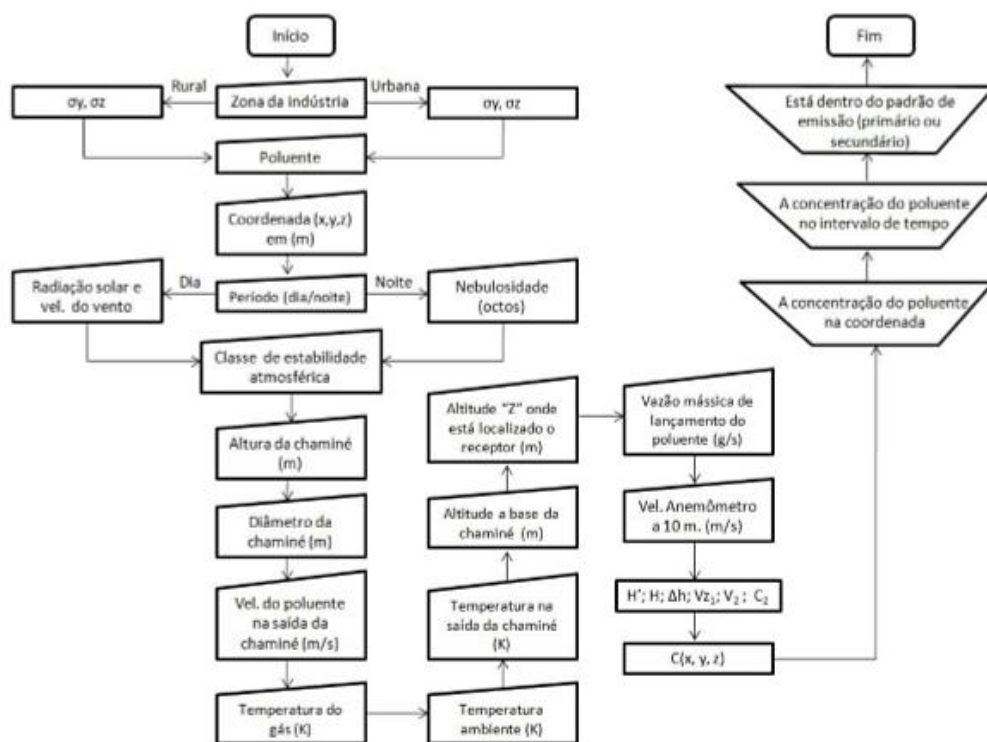
Figura 1: Janela de compilação do algoritmo.

```
C:\Users\Tábita\Documents\PROJETO\algoritmo Dispersão de Poluentes Atm.exe
Este algoritmo calcula a Dispersão de Poluentes na atmosfera através do Modelo Matemático Gaussiano da Pluma.
Digite (1) para começar e (2) para sair.
1
Informe se o local de emissão esta localizado em zona rural (101) ou zona urbana (102):
102
Informe o poluente que esta sendo emitido - PTS (201), SO2 (202), CO (203), O3 (204), PI (205), NO2 (206):
202
Informe o tempo de amostragem do poluente de acordo com a Legislação:
1
Informe as coordenadas (x, y e z em (m)) para cálculo de concentração:
10
2
0
Informe o período que ocorreu a emissão - (4) dia ou (5) noite:
5
Informe a quantidade de nuvens (dados em octos (8/8) - referencia-> céu parcialmente dublado >= 4/8 octos digite 50) e a velocidade do vento:
50
4.5
Informe a altura (m) e o diâmetro(m) da chamine e a velocidade na saída da chamine (m/s):
53
2.6
10
Informe a temperatura do gas (em K), a temperatura ambiente (em K) e a temperatura na saída da chamine:
400
303
370
Informe a altura da base da chamine e a altura Z (m) do terreno onde esta localizado o receptor, em relação ao nível do mar (m):
10
780
Informe a vazão mássica de lançamento do gas (g/s):
204686
Concentração: 0.000000 [microgramas/m3]
Concentração no tempo de amostragem de 1 horas: 0.000000 [microgramas/m3]
Dentro dos padrões.
Pressione qualquer tecla para continuar. . .
Process exited after 147 seconds with return value 0
Pressione qualquer tecla para continuar. . .
Ativar o Windows
Acesse Configurações para ativar o Windows.
Linha: 160
```

O algoritmo é dividido em três grupos de dados de interesse no estudo, sendo eles: as características da fonte, as características do poluente e as condições meteorológicas. Segundo Kawano (2003), em geral há três tipos de cálculos são necessários para estimar a concentração do poluente ao longo do tempo os quais são determinados por uma complexa interação de características físicas da fonte, das características físicas e químicas dos poluentes, das condições meteorológicas na proximidade da fonte e da topografia das áreas no entorno.

A ordem de execução e compilação dos dados do algoritmo, conforme o fluxograma (figura 2), inicia-se com a inserção da zona da fonte para a determinação da classe de estabilidade da atmosfera de Pasquill-Gifford. Estas são baseadas em observações meteorológicas rotineiras e provaram ser muito úteis nos cálculos de dispersão atmosférica que utilizam o modelo de pluma gaussiana (BOÇON, 1998). Além disso, conforme explica Tavares (2009), para a avaliação da dispersão de poluentes atmosféricos, deve-se levar em consideração que este depende principalmente do relevo da região escolhida, do tipo de morfologia do terreno, das condições meteorológicas e das fontes emissoras.

Figura 2: Fluxograma da ordem de execução do algoritmo



Fonte: Elaborada pelos autores



O produto final do algoritmo é a compilação de todos os dados de entrada para a obtenção dos dados de saída, sendo a concentração final do poluente na coordenada do receptor, esta em relação ao tempo e, com base no dado obtido, a avaliação da fonte de emissão acordo com a regulamentação CONAMA 3/90.

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

Visto que o modelo Gaussiano para a dispersão de poluentes atmosféricos se trata de um cálculo extenso e que devido a isso possa vir a apresentar resultados errados, a utilização de uma ferramenta de apoio facilita seu cálculo bem como a confirmação dos resultados, promovendo uma melhor análise e compreensão acerca da qualidade do ar.

Desta forma, conclui-se que a utilização do algoritmo apoiará de forma efetiva na resolução da equação gaussiana no estudo de dispersão de poluentes atmosféricos. Portanto, estes resultados viabilizarão análises e melhorias futuras, afim de explorar ao máximo o potencial deste algoritmo como ferramenta de amparo acadêmico, que ainda serão realizadas.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BOÇON, F. T. **Modelagem matemática do escoamento e da dispersão de poluentes na microescala atmosférica**. Dissertação (Doutorado) - UFSC, Florianópolis, 1998. 291 f.

BOLOGNESI, B; MONTELATO, F. **Estudo de dispersão de poluentes atmosféricos usando CFD**. Monografia (Bacharel em Engenharia Química) - Departamento de Engenharia Química da Universidade de São Paulo. 2011. 64f.

BRAGA, A.L.F.; PEREIRA, L.A.A.; SALDIVA, P.H.N. Poluição atmosférica e seus efeitos na saúde humana. In: **Evento de sustentabilidade na geração e uso de energia**, UNICAMP, v. 18, 2002.

Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio Brito Disponível em <<http://www.cresesb.cepel.br>>. Acesso em 25 de março de 2019;

Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). Resolução nº 3 de 28/062/1990. Dispõe sobre padrões de qualidade do ar, previstos no PRONAR. Disponível em <<http://www.confortoengenharia.com.br/legislacao/conama03.pdf>>. Acesso em 25 de fevereiro de 2019;

DRUMM, F.C, et al. Poluição atmosférica proveniente da queima de combustíveis derivados do petróleo em veículos automotores. **Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental – REGET**, Vol. 18, nº 1, p. 66-78, Abr 2014.

KAWANO, M. **Desenvolvimento, validação e aplicação de um modelo matemático para dispersão de poluentes atmosféricos**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) - Universidade Federal de Santa Catarina, 2003. 109 f.

LEAL, A. P. P. R. et al. Programa Nacional de Vigilância em Saúde Ambiental Relacionada à Qualidade do Ar: Resultados e Desafios Metodológicos. In: **XI Congresso Mundial de Saúde Pública, XIII Congresso Nacional de Saúde Coletiva**. Rio de Janeiro, 2007.



MARTINS, E. M.; FORTES, J. D. N.; ARAÚJO LESSA, R. Modelagem de dispersão de poluentes atmosféricos: avaliação de modelos de dispersão de poluentes emitidos por veículos. **Revista Internacional de Ciências**, v. 5, n. 1, p. 2-19, 2015.

MOREIRA et al. METEOROLOGIA E POLUIÇÃO ATMOSFÉRICA. **Ambiente & Sociedade**. v. XI, n. 1, p. 1-13. Campinas, jan/jun. 2008.

MOREIRA, Davidson; TIRABASSI, Tiziano. Modelo matemático de dispersão de poluentes na atmosfera: um instrumento técnico para a gestão ambiental. **Revista Ambiente e sociedade**, v. 7, n. 2, 2004.

PAES, J. L.; SILVA, J. N.; SORIA, S. F. Considerações sobre a poluição do ar em grandes metrópoles. **Revista Ponto de Vista–Vol**, v. 5, p. 67.

RUSSO, P. R. A qualidade do ar no município do Rio de Janeiro: análise espaço--temporal de partículas em suspensão na atmosfera. **Revista de Ciências Humanas**, v.10, n.1, p.78-93, jan./jun. 2010.

SCHNELLE, Karl B.; DEY, Partha R. **Atmospheric dispersion modeling compliance guide**. McGraw-Hill Professional Publishing, 2000.

SEINFELD, J. H. **Atmospheric Chemistry and Physics of Air Pollution**. New York. John Wiley e Sons. 1986.

TAVARES, F. V. F. **Estudo do processo de dispersão de emissões veiculares em uma microrregião de Belo Horizonte utilizando simulação numérica**. Dissertação (Mestrado) - Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear - UFMG, 2009. 131 f.

TURNER, D. Bruce. **Workbook of atmospheric dispersion estimates**. New York: Lewis Publishers, 2nd ed. 1994.

VORMITTAG, et al. Monitoramento da qualidade do ar no Brasil. **Instituto Saúde e Sustentabilidade**, 2014.

ZANNETTI, Paolo. **Air Pollution Modelling: theories, computational methods and available software**. New York. Van Nostrand Reinhold. 1990.