



Ministério da  
Ciência e Tecnologia



INPE-15687-TDI/1461

## PARAMETRIZAÇÃO MULTIFRACTAL EM MODELOS DE DISPERSÃO ATMOSFÉRICA E ESTUDO DE CASO PARA SÃO JOSÉ DOS CAMPOS

Francisco Alves dos Santos

Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto,  
orientada pelos Drs. Nelson de Jesus Ferreira e Haroldo Fraga Campos Velho,  
aprovada em 1º de abril de 2003.

Registro do documento original:

<<http://urlib.net/sid.inpe.br/mtc-m18@80/2009/03.18.15.35>>

INPE  
São José dos Campos  
2009

**PUBLICADO POR:**

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE

Gabinete do Diretor (GB)

Serviço de Informação e Documentação (SID)

Caixa Postal 515 - CEP 12.245-970

São José dos Campos - SP - Brasil

Tel.:(012) 3945-6911/6923

Fax: (012) 3945-6919

E-mail: [pubtc@sid.inpe.br](mailto:pubtc@sid.inpe.br)

**CONSELHO DE EDITORAÇÃO:****Presidente:**

Dr. Gerald Jean Francis Banon - Coordenação Observação da Terra (OBT)

**Membros:**

Dr<sup>a</sup> Maria do Carmo de Andrade Nono - Conselho de Pós-Graduação

Dr. Haroldo Fraga de Campos Velho - Centro de Tecnologias Especiais (CTE)

Dr<sup>a</sup> Inez Staciarini Batista - Coordenação Ciências Espaciais e Atmosféricas (CEA)

Marciana Leite Ribeiro - Serviço de Informação e Documentação (SID)

Dr. Ralf Gielow - Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPT)

Dr. Wilson Yamaguti - Coordenação Engenharia e Tecnologia Espacial (ETE)

**BIBLIOTECA DIGITAL:**

Dr. Gerald Jean Francis Banon - Coordenação de Observação da Terra (OBT)

Marciana Leite Ribeiro - Serviço de Informação e Documentação (SID)

Jefferson Andrade Ancelmo - Serviço de Informação e Documentação (SID)

Simone A. Del-Ducca Barbedo - Serviço de Informação e Documentação (SID)

**REVISÃO E NORMALIZAÇÃO DOCUMENTÁRIA:**

Marciana Leite Ribeiro - Serviço de Informação e Documentação (SID)

Marilúcia Santos Melo Cid - Serviço de Informação e Documentação (SID)

Yolanda Ribeiro da Silva Souza - Serviço de Informação e Documentação (SID)

**EDITORAÇÃO ELETRÔNICA:**

Viveca Sant´Ana Lemos - Serviço de Informação e Documentação (SID)



Ministério da  
Ciência e Tecnologia



INPE-15687-TDI/1461

**PARAMETRIZAÇÃO MULTIFRACTAL EM MODELOS  
DE DISPERSÃO ATMOSFÉRICA E ESTUDO DE CASO  
PARA SÃO JOSÉ DOS CAMPOS**

Francisco Alves dos Santos

Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto,  
orientada pelos Drs. Nelson de Jesus Ferreira e Haroldo Fraga Campos Velho,  
aprovada em 1º de abril de 2003.

Registro do documento original:

<<http://urlib.net/sid.inpe.br/mtc-m18@80/2009/03.18.15.35>>

INPE  
São José dos Campos  
2009

- S59p Santos, Francisco Alves.  
Parametrização multifractal em modelos de dispersão atmosférica e estudo de caso para São José dos Campos / Francisco Alves dos Santos. – São José dos Campos: INPE, 2009.  
66p. ; (INPE-15687-TDI/1461)
- Dissertação (Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2003.
1. Dispersão Atmosférica. 2. Modelagem. 3. Turbulência.  
4. São José dos Campos. I. Título.

CDU 528.7 (815.6)

---

Copyright © 2009 do MCT/INPE. Nenhuma parte desta publicação pode ser reproduzida, armazenada em um sistema de recuperação, ou transmitida sob qualquer forma ou por qualquer meio, eletrônico, mecânico, fotográfico, microfílmico, reprográfico ou outros, sem a permissão escrita da Editora, com exceção de qualquer material fornecido especificamente no propósito de ser entrado e executado num sistema computacional, para o uso exclusivo do leitor da obra.

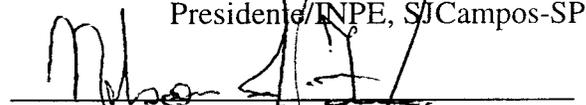
Copyright © 2009 by MCT/INPE. No part of this publication may be reproduced, stored in a retrieval system, or transmitted in any form or by any means, electronic, mechanical, photocopying, microfilming, recording or otherwise, without written permission from the Publisher, with the exception of any material supplied specifically for the purpose of being entered and executed on a computer system, for exclusive use of the reader of the work.

Aprovado pela Banca Examinadora em  
cumprimento a requisito exigido para a  
obtenção do Título de **Mestre em**  
**Sensoriamento Remoto.**

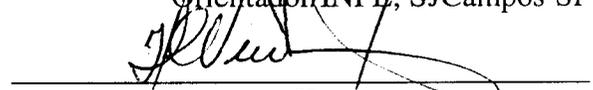
Dr. Dalton de Morisson Valeriano

  
Presidente/INPE, SJCampos-SP

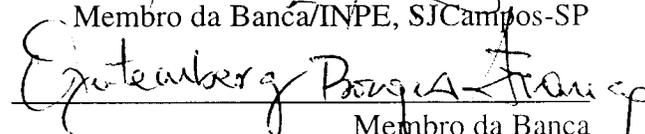
Dr. Nelson de Jesus Ferreira

  
Orientador/INPE, SJCampos-SP

Dr. Haroldo Fraga de Campos Velho

  
Membro da Banca/INPE, SJCampos-SP

Dr. Gutemberg Borges França

  
Membro da Banca  
Convidado UFRJ, Rio de Janeiro-RJ

Candidato: Francisco Alves dos Santos

São José dos Campos, 1º de abril de 2003.



A meus pais, Dedeco e Aurora



## AGRADECIMENTOS

Ao professor Nelson, por ter me escolhido para o mestrado aqui no INPE.

Ao professor Haroldo, pela orientação e por todo o apoio dado ao longo do mestrado.

Al Dottore Umberto Rizza, Ilenia, Annalisa ed ognuno all'ISIAtA, grazie per tutti!  
Siete stati bravi!

Ao professor Audálio e a toda equipe LAMMA, tenho mais de 65 razões para agradecer!

A todas as pessoas que me ajudaram de alguma forma a concluir este trabalho.

A todos os amigos que fiz durante o curso no INPE, dentro e fora do instituto.

À Rafa, por ter me aturado durante os período críticos e por continuar me aturando até hoje.



## RESUMO

Na busca por um método eficiente para um sistema operacional de monitoramento da qualidade do ar, uma nova parametrização para a turbulência foi aplicada em um modelo de dispersão atmosférica de poluentes. Diferentemente da parametrização clássica, baseada na teoria  $K41$ , de Kolmogorov, a parametrização multifractal baseia-se na termodinâmica não extensiva e inclui em seus cálculos o fenômeno da intermitência. Os dados obtidos com as duas parametrizações (clássica e multifractal) foram comparados com os gerados por um experimento de Simulação de Grandes Vórtices. Apesar de basear-se em uma descrição física menos detalhada, a parametrização clássica mostrou-se mais eficiente. Esta parametrização foi então utilizada em um estudo de caso sobre o impacto da dispersão da pluma da refinaria Henrique Lage, sobre a população do município de São José dos Campos.



# MULTIFRACTAL PARAMETERIZATION IN ATMOSPHERIC DISPERSION MODELS AND A CASE STUDY FOR SÃO JOSÉ DOS CAMPOS

## ABSTRACT

In a quest for an efficient method of air quality monitoring, herein a new turbulent parameterization is applied to an atmospheric pollutant dispersion model. Differently of the classical parameterization, based on the  $K41$  Kolmogorov's theory, the multifractal parameterization is based on non-extensive thermodynamics and includes intermittency in its equations. The results obtained from both parameterizations were compared to Large Eddy Simulation data. Despite its simpler physical description, the classical parametrization appeared to be the best fitted. This one was then used to estimate the impact of Henrique Lage oil refinery plume over *São José dos Campos* population.



## SUMÁRIO

Pág.

### LISTA DE FIGURAS

### LISTA DE TABELAS

### LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

### LISTA DE SÍMBOLOS

<b>1</b>	<b>Introdução</b>	<b>23</b>
<b>2</b>	<b>Modelagem da Difusão Turbulenta</b>	<b>27</b>
2.1	Equação de Difusão Molecular	27
2.2	Teoria de Taylor	30
2.3	O Modelo STATPUFF	32
<b>3</b>	<b>Teoria do Subdomínio Inercial</b>	<b>35</b>
3.1	Lei de Kolmogorov	37
3.2	Teoria Multi-Fractal	41
<b>4</b>	<b>Validação das Parametrizações</b>	<b>43</b>
4.1	SPELL X LES	43
<b>5</b>	<b>Estudo de Caso</b>	<b>51</b>
5.1	A fonte	51
5.2	Condição Inicial	51
5.3	Dados Censitários	52
5.4	Metodologia	54
5.5	Resultados	57

<b>6 Conclusão</b> . . . . .	<b>61</b>
6.1 Comparação das Parametrizações . . . . .	61
6.2 Estudo de Caso . . . . .	61
6.3 Trabalhos Futuros . . . . .	62
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> . . . . .	<b>63</b>

## LISTA DE FIGURAS

	<u>Pág.</u>
2.1 Exemplo de distribuição gaussiana de concentração . . . . .	28
4.1 Variação da massa total ao longo do tempo. . . . .	45
4.2 Concentração normalizada ao nível do solo. . . . .	46
4.3 Concentração normalizada na altura da fonte. . . . .	46
4.4 Concentração normalizada e integrada verticalmente. . . . .	47
5.1 Condição de mesoescala de vento para o cenário 1. . . . .	52
5.2 Condição de mesoescala de vento para o cenário 2. . . . .	53
5.3 Condição de mesoescala de vento para o cenário 3. . . . .	53
5.4 Distribuição de densidade demográfica do município de São José dos Campos. . . . .	55
5.5 Rotação da Pluma para o Georreferenciamento. . . . .	56
5.6 Resultado do modelo de dispersão para o cenário 1. . . . .	57
5.7 Resultado do modelo de dispersão para o cenário 2. . . . .	58
5.8 Resultado do modelo de dispersão para o cenário 3. . . . .	59
5.9 Direção e intensidade dos ventos utilizados nas simulações. . . . .	59



## LISTA DE TABELAS

	<u>Pág.</u>
2.1 Condições iniciais necessárias ao STATPUFF. . . . .	34
4.1 Condição inicial e parâmetros computacionais utilizados no experimento.	44
4.2 Comparação estatística da concentração ao nível do solo. (Por apresentarem valores de concentração muito pequenos no início (que levariam a valores tendendo ao infinito em $\overline{\ln[C_o/C_p]}$ ) os parâmetros $MG$ e $VG$ para o nível do solo foram calculados a partir do ponto de grade $ix = 45$ .) . . . . .	49
4.3 Comparação estatística da concentração na altura da fonte. . . . .	49
4.4 Comparação estatística da concentração integrada. . . . .	49
4.5 Tabela de Correlação da concentração ao nível do solo. . . . .	49
4.6 Tabela de Correlação da concentração integrada verticalmente. . . . .	49
4.7 Tabela de Correlação da concentração na altura da fonte. . . . .	49
5.1 Condições iniciais utilizadas nos três cenários. . . . .	54
5.2 Número de habitantes atingidos pela pluma em cada cenário. . . . .	58



## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CLP	–	Camada Limite Planetária
LES	–	<i>Large Eddy Simulation</i> ou Simulação de Grandes Vórtices
REVAP	–	Refinaria Henrique Lage ou Refinaria do Vale do Paraíba
IBGE	–	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
STATPUFF	–	Modelo de <i>puffs gaussianos</i> utilizado
SIG	–	Sistema de Informação Geográfica
DNS	–	<i>Direct Numerical Simulation</i> ou Simulação Numérica Direta
FB	–	Fractional Bias
NMSE	–	Erro quadrático normalizado
MG	–	Média Geométrica
VG	–	Variância Geométrica
MM5	–	Modelo Meteorológico de Mesoescala de quinta geração
NCAR	–	National Center for Atmospheric Research
NCEP	–	National Center for Environmental Prediction



## LISTA DE SÍMBOLOS

$x$	–	Posição no eixo paralelo à direção do vento
$y$	–	Posição no eixo perpendicular à direção do vento
$z$	–	Altura
$c$	–	Concentração
$t$	–	Tempo
$D$	–	Coefficiente de difusão molecular
$A$	–	Constante gerada na integração da equação de difusão molecular
$Q$	–	Massa total de poluente em dispersão
$q$	–	Taxa de emissão da fonte
$\Delta t$	–	Passo de tempo do modelo
$\sigma$	–	Parâmetro de dispersão (equivale ao desvio padrão da distribuição gaussiana)
$i$	–	Índice para qualquer um dos eixos $x$ , $y$ ou $z$
$v_i$	–	Velocidade da partícula em um dos eixos
$R_{L_i}$	–	Função de correlação Lagrangeana
$\rho_{L_i}$	–	Função adimensional de correlação Lagrangeana
$\overline{v_i^2}$	–	Variância das velocidades
$T_L$	–	Escala integral de tempo Lagrangeana
$p$	–	Posição do centro de massa do <i>puff</i>
$u$	–	Velocidade do vento
$u_*$	–	Velocidade de Atrito
$L$	–	Parâmetro de Monin-Obukohv
$H_{mx}$	–	Altura da Camada Limite Planetária
$w_*$	–	Escala de velocidade convectiva
$U_s$	–	Intensidade do vento na altura da fonte
$z_0$	–	Rugosidade da Superfície
$H_s$	–	Altura da Fonte
$S_{L_i}$	–	Espectro de correlação Lagrangeana
$\omega$	–	Frequência
$D_L$	–	Função de estrutura Lagrangeana
$\varepsilon$	–	Taxa de dissipação de energia por unidade de massa
$\nu$	–	Coefficiente de viscosidade
$\eta$	–	Microescala de Kolmogorov
$v$	–	Velocidade típica da microescala de Kolmogorov
$\kappa$	–	Número de onda
$n$	–	Frequência reduzida
$A$	–	Constante utilizada na descrição matemática do espectro
$B$	–	Constante utilizada na descrição matemática do espectro
$\alpha$	–	Constante utilizada na descrição matemática do espectro
$\beta$	–	Constante utilizada na descrição matemática do espectro

$F_i$	–	Espectro adimensionalizado
$\zeta$	–	Expoente da função de estrutura
$\Delta x$	–	Espaçamento da grade no eixo $x$
$\Delta y$	–	Espaçamento da grade no eixo $y$
$\Delta z$	–	Espaçamento da grade no eixo $z$
$m$	–	Massa total presente na grade
$c_o$	–	Concentração do experimento LES
$c_p$	–	Concentração estimada pelo modelo
$c^*$	–	Concentração normalizada
$\theta$	–	Direção do vento
$H_{ab}$	–	Número de habitantes atingidos pela pluma

## 1 Introdução

Até hoje, nenhum outro ser vivo foi capaz de alterar o planeta na magnitude como o ser humano o faz. Entretanto, a preocupação com os efeitos destas modificações é recente. Por estar ligada diretamente à sobrevivência das espécies e por ser sentida em uma curta escala de tempo, a qualidade do ar é um dos pontos mais preocupantes.

O crescimento dos centros urbanos e o conseqüente aumento na emissão de contaminantes na atmosfera fazem do monitoramento da qualidade do ar um tema de pesquisa de grande interesse econômico e social.

Como contaminante, define-se qualquer substância despejada no meio-ambiente capaz de alterar a composição geoquímica natural. Quando tal substância possui origem antrópica e sua presença é responsável por algum efeito adverso aos seres vivos ou mesmo aos bens materiais, a substância é considerada poluente ([WILLIANSOON, 1973](#); [STRAUSS, 1971](#)).

Impurezas dissolvidas em um meio em repouso irão se misturar por meio da agitação das moléculas. A este processo dá-se o nome de *difusão molecular* e sua eficiência está diretamente ligada às características físico-químicas do poluente e do ambiente à sua volta ([CSANADY, 1973](#)).

A parte da atmosfera onde encontra-se a maior parte do efluente emitido é conhecida como *Camada Limite Planetária* (CLP). Esta camada tem influência direta da superfície terrestre e sente as variações ocorridas nesta numa escala de tempo inferior a uma hora ([STULL, 1988](#); [PANCHEV, 1985](#)). Longe de poder ser considerada um meio em repouso, a CLP caracteriza-se pela presença de complexos fluxos de massa, significativamente mais eficientes no processo de dispersão dos poluentes que a difusão molecular.

Seguindo a hipótese de Reynolds ([STULL, 1988](#)), tais fluxos atmosféricos podem ser decompostos em duas partes: uma média, denominada *vento médio*, e a *turbulência*, representada pelas flutuações em torno desta média. Enquanto o vento médio apresenta fácil aferição, os fluxos turbulentos — diretamente ligados à estabilidade estática da CLP e às variações locais de temperatura — possuem caráter estocástico e é impossível medi-la precisamente.

A turbulência é normalmente relacionada aos fluxos convectivos. O ar quente tende

a ascender, formando turbilhões conhecidos como vórtices. Os vórtices maiores são os grandes contenedores de energia e, segundo a teoria da cascata, dissipam-na em forma de calor, dividindo-se em vórtices menores.

A completa descrição destes fluxos em ambientes computacionais requer uma tecnologia ainda inviável nos dias de hoje. Em substituição às variáveis desconhecidas, surgem então as parametrizações. Estas, por tratarem-se de aproximações, possuem sempre alguma incerteza relacionada.

Uma grande parte dos modelos atuais (DEGRAZIA, 1998; MOREIRA et al., 2000; RIZZA et al., 2000a; RIZZA et al., 2000b) parametriza a turbulência baseando-se na teoria estatística de Taylor (CSANADY, 1973) e na teoria de Kolmogorov (MONIN; YAGLOM, 1975).

Pela parametrização de Kolmogorov, a turbulência é considerada homogênea. Assume-se que os vórtices menores, gerados da divisão dos maiores, ocupam todo o volume deixado por estes e não há, portanto, uma descontinuidade ou intermitência. Por outro lado, recentes trabalhos apresentam uma modificação à lei de Kolmogorov (FRISCH, 1995), em que a intermitência é considerada. Este fenômeno pode ser modelado pela teoria multifractal, expressa pela termoestatística não extensiva (ARIMITSU, 2000; BECK, 2000; RAMOS et al., 1999).

Seguindo este princípio, uma parametrização multifractal para modelos de dispersão é apresentada (VELHO et al., 2001). É importante ressaltar que, diferentemente das parametrizações até hoje formuladas, esta parametrização desenvolve-se com base em teorias e princípios físicos e não em um ajuste de curva.

No presente trabalho, serão aplicadas a parametrização clássica e a multifractal em um modelo simples de dispersão de poluentes atmosféricos. Os resultados obtidos serão comparados utilizando-se como experimento controle os dados gerados por Simulação de Grandes Vórtices (*Large Eddy Simulation* - LES) (MOENG; SULLIVAN, 2001; RIZZA et al., 2002). Em seguida, é proposto um estudo de caso simulado sobre os efeitos do efluente emitido pela chaminé da Refinaria do Vale do Paraíba (REVAP) sobre a população ao seu redor. Para tanto, os dados gerados pelo modelo dispersão serão relacionados por meio da álgebra de mapas, com dados espacializados de densidade populacional da região (IBGE, 1991). Pretende-se com isto, estimar o número de habitantes atingidos pela pluma em diferentes cenários meteorológicos.

Dentre outras aplicações, o acoplamento deste modelo a um Sistema de Informação Geográfica (SIG) pode auxiliar tomadores de decisão a planejar a localização de futuras instalações industriais ou a identificar cenários críticos de poluição das instalações já existentes com base em um diagnóstico rápido e confiável.

Exemplifica-se de forma simples com esta metodologia, a aplicação da modelagem numérica em um sistema operacional de monitoramento da qualidade do ar para a cidade de São José dos Campos - SP.



## 2 Modelagem da Difusão Turbulenta

A dispersão de poluentes em um fluido é matematicamente modelada pela equação de difusão/advecção em um regime turbulento. Pela quantidade de escalas e variáveis envolvidas, a completa descrição matemática do problema não é ainda realizável. Todavia, alguns modelos simplificados já se mostraram bastante eficientes. A seguir será demonstrado um método baseado na teoria estatística de Taylor para estimar os parâmetros de dispersão.

### 2.1 Equação de Difusão Molecular

Em uma situação ideal, com o meio em repouso e considerando-se apenas uma dimensão ( $x$ , no caso), a difusão molecular em um meio seguirá a seguinte equação (CRANCK, 1956):

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D \frac{\partial^2 c}{\partial x^2}, \quad (2.1)$$

em que  $c$  é a concentração,  $t$  é o tempo e  $D$  é chamado de *coeficiente de difusão* ou *difusividade*.

Diversas soluções podem ser obtidas para a Equação (2.1). O modelo utilizado, conforme será descrito na Seção 2.3, baseia-se na solução gaussiana, descrita pela seguinte expressão:

$$c(x, t) = \frac{A}{\sqrt{t}} \exp\left(-\frac{x^2}{4Dt}\right). \quad (2.2)$$

A Equação (2.2) descreve a difusão em uma dimensão (como por exemplo a difusão ao longo de um tubo cuja secção transversal possui condição uniforme). Na resolução da equação diferencial é acrescentada a constante  $A$ . No entanto, ao assumir um comprimento infinito no eixo  $x$ , a quantidade total  $Q$  de poluente será dada por:

$$Q = \int_{-\infty}^{\infty} c(x, t) dx = 2A\sqrt{\pi D}. \quad (2.3)$$

Torna-se possível então substituir a constante  $A$  da Equação (2.2) pela constante  $Q$

(fisicamente mais significativa) da Equação (2.3):

$$c(x, t) = \frac{Q}{2\sqrt{\pi Dt}} \exp\left(-\frac{x^2}{4Dt}\right). \quad (2.4)$$

A Equação (2.3) indica que a quantidade de poluente permanece constante e igual à quantidade originalmente depositada no plano  $x = 0$ . Esta função tem um comportamento proporcional à função *delta* de Dirac, agindo como uma *fonte concentrada* (LIGHTHILL, 1962) de comportamento assintótico quando  $t \rightarrow 0$ , ou seja:

$$\begin{aligned} c &\rightarrow 0 && \text{quando } |x| > 0 \\ c &\rightarrow \infty && \text{quando } x = 0. \end{aligned}$$

No gráfico da Figura 2.1, verifica-se a distribuição típica em três instantes sucessivos.

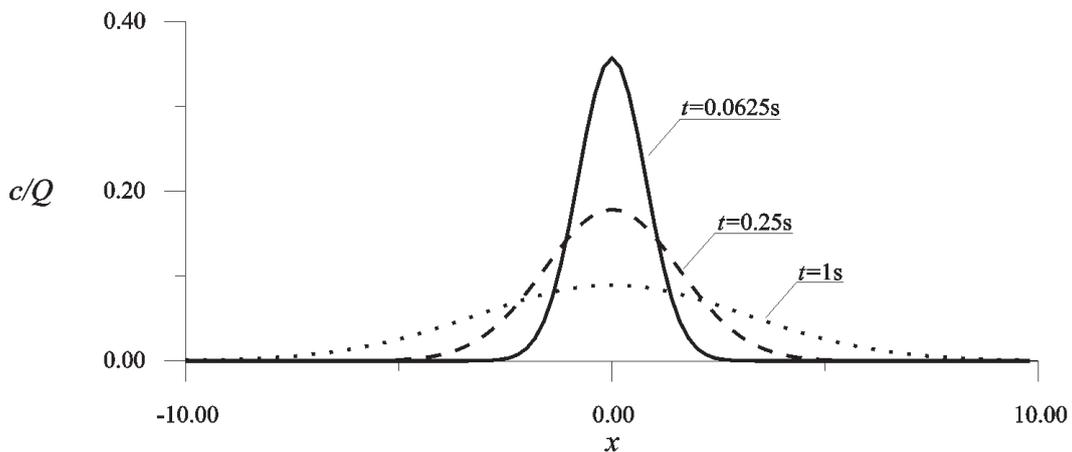


Figura 2.1 - Exemplo de distribuição gaussiana da concentração com a distância da fonte.

Esta distribuição é conhecida como *normal* ou *gaussiana*. Observa-se que a média da distribuição ocorre em  $x = 0$ , e  $c$  funciona como uma função de probabilidade de  $x$ :  $c(x, t) = P(x)$ .

O segundo momento de  $x$  caracteriza o espalhamento do poluente.

$$\int_{-\infty}^{\infty} x^2 c(x, t) dx = 2QDt. \quad (2.5)$$

Dividindo a Equação (2.5) pela quantidade total de poluente, obtêm-se a média quadrática (variância) da distância alcançada pelas partículas em dispersão:

$$\sigma^2 = 2Dt \quad (2.6)$$

O desvio padrão ( $\sigma$ ) funcionará como uma escala de comprimento da distribuição. Expressa em termos dessa escala, a Equação (2.4) se transformará em:

$$c(x, t) = \frac{Q}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{x^2}{2\sigma^2}\right). \quad (2.7)$$

A Equação (2.7) retrata a difusão gaussiana unidimensional.

Exceto pela constante  $Q$  (que antes possuía unidade  $gcm^{-2}$  e passa agora  $g$ ) a expansão da Equação (2.7) para três dimensões pode ser vista como o produto de três fontes planas, tal que:

$$c(x, y, z, t) = \frac{Q}{(\sigma\sqrt{2\pi})^3} \exp\left(-\frac{x^2 + y^2 + z^2}{2\sigma^2}\right). \quad (2.8)$$

Esta é a equação para lançamentos instantâneos de fontes pontuais. Para fontes contínuas, o termo  $Q$  deve ser substituído por uma taxa temporal de emissão  $q$ , equivalente à  $Q\Delta t$ .

$$c(x, y, z, t) = \frac{q}{2(\sigma\sqrt{\pi})^3} \exp\left(-\frac{x^2 + y^2 + z^2}{2\sigma^2}\right). \quad (2.9)$$

Da Equação (2.9) observa-se que o conhecimento do campo de concentração dependerá do valor assumido por  $\sigma$ .

## 2.2 Teoria de Taylor

A *Teoria de Taylor* é um dos trabalhos pioneiros na abordagem estatística da turbulência atmosférica. Desenvolvida em 1921, esta teoria é aceita até os dias de hoje e baseia-se no caráter estocástico do fenômeno para estimar os parâmetros de dispersão.

Considerando um caso simples, onde as partículas deixam a origem no instante  $t = 0$  e dispersam-se apenas em uma direção, a posição  $x$  (para  $i = x, y, z$ ) em um tempo  $t'$  será:

$$x(t) = \int_0^t v(t') dt' \quad (2.10)$$

Ao multiplicar a Equação (2.10) por  $v(t)$ , que representa a velocidade em um instante  $t$ , tem-se que:

$$x(t)v(t) = \frac{d}{dt} \left( \frac{x^2}{2} \right) = \int_0^t v(t)v(t') dt'. \quad (2.11)$$

Tomando a média da Equação (2.11), obtém-se um termo com dimensão de difusividade ( $m^2 s^{-1}$ ), porém somente para grandes valores de  $t$  este será considerado como *difusividade turbulenta* (NIEUWSTADT; DOP, 1981):

$$\overline{x(t)v(t)} = \frac{d}{dt} \left( \frac{\overline{x^2}}{2} \right) = \int_0^t \overline{v(t)v(t')} dt'. \quad (2.12)$$

O produto contido na integral acima representa uma correlação e é necessário um maior conhecimento sobre este termo para que se resolva a Equação (2.12).

A teoria de Taylor assume que a turbulência é homogênea e estacionária, ou seja, suas propriedades estatísticas têm a mesma estrutura em todas as partes do fluxo e as propriedades das variáveis não são afetadas por mudanças no tempo. Logo, considerando-se um intervalo de tempo  $\tau = t - t'$ , a função de correlação  $R_L(\tau)$  será dada por:

$$R_L(\tau) = \overline{v(t')v(t' + \tau)} = \overline{v^2}\rho_L(\tau), \quad (2.13)$$

em que  $\rho_L(\tau)$  é a função de correlação adimensional e  $v^2$  é a variância da velocidade. O índice  $L$  denota que estas são correlações Lagrangeanas. A substituição da Equação (2.13) na Equação (2.12) resulta em:

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\overline{x^2}}{2} \right) = \int_0^t R_L(\tau) d\tau = \overline{v^2} \int_0^t \rho_L(\tau) d\tau. \quad (2.14)$$

Integrando o termo  $\frac{d}{dt} \left( \frac{\overline{x^2}}{2} \right)$ :

$$\overline{x^2} = 2\overline{v^2} \int_0^t (t - \tau) \rho_L(\tau) d\tau. \quad (2.15)$$

O termo  $\overline{x^2}$  é a média quadrática do deslocamento de uma partícula em dispersão e sua raiz quadrada corresponde ao  $\sigma$  da distribuição gaussiana da Equação 2.7.

$$\sigma = \sqrt{\overline{x^2}}. \quad (2.16)$$

As Equações (2.14) e (2.15) definem a dispersão turbulenta de acordo com das funções de correlação. Conforme discutido anteriormente, de particular interesse é o comportamento destas equações para grandes valores de  $t$ .

Como  $\rho_L$  tende a zero na medida que  $\tau \rightarrow \infty$ , a integral da Equação (2.14) torna-se constante se  $t$  é grande o suficiente. Este valor é conhecido como *Escala Integral de Tempo Lagrangeana*:

$$T_L = \int_0^\infty \rho_L(\tau) d\tau. \quad (2.17)$$

Esta escala funciona como uma medida do tempo máximo (em média) em que uma partícula se mantém em movimento numa dada direção.

O tempo terá então significado apenas quando comparado à esta escala:

$$\begin{aligned} \rho_L(\tau) = 0 & \quad \text{para} \quad t \gg T_L \\ \rho_L(\tau) = 1 & \quad \text{para} \quad t \ll T_L. \end{aligned}$$

Para observar o comportamento de  $\overline{x^2}$  em tempos avançados, reescreve-se a Equação (2.15):

$$\overline{x^2} = 2\overline{v^2} \int_0^t \left(t - \frac{\tau}{t}\right) \rho_L(\tau) d\tau. \quad (2.18)$$

Quando  $t \gg \tau$ , o termo  $\tau/t$  aproxima-se de zero, logo:

$$\overline{x^2} = 2\overline{v^2}tT_L, \quad (2.19)$$

ou seja,  $\overline{x^2}$  é proporcional ao tempo.

Para  $t \ll \tau$ ,  $\rho_L(\tau) = 1$  e obtém-se:

$$\overline{x^2} = 2\overline{v^2}t^2 \quad (2.20)$$

e  $\overline{x^2}$  passa a ser proporcional ao quadrado do tempo.

### 2.3 O Modelo STATPUFF

A observação dos efeitos devidos somente à troca da parametrização da turbulência em um modelo numérico requer deste, sobretudo, simplicidade. Não obstante, operacionalidade e capacidade de integração em Sistemas de Informação Geográfica (SIG's) requisitam esta mesma qualidade (BURROUGH; MCDONNELL, 1998).

O modelo STATPUFF (RIZZA et al., 2000b) baseia-se no conceito de *puffs gaussianos* (ZANNETTI, 1990; MIKKELSEN et al., 1987). Modelos assim concebidos são bastante utilizados atualmente por sua capacidade de simular a emissão e dispersão em condições não homogêneas ao longo da simulação e de, ao menos teoricamente, adaptarem-se a condições de baixa intensidade de vento.

Nos modelos baseados em solução gaussiana, toda a física do problema encontra-se

imbutida no desvio padrão da distribuição  $\sigma$ . Como será mostrado no Capítulo 3, este é o parâmetro que irá variar de acordo com as condições atmosféricas.

A dinâmica de cada elemento (*puff*) passivo liberado pela fonte consiste em:

- Geração na fonte;
- Ascensão Termodinâmica (*plume rise*);
- Transporte pelo vento (advecção);
- Difusão turbulenta;
- Transformação química.

Conforme dito anteriormente, para melhor verificar os efeitos decorrentes da troca de parametrização, optou-se por realizar a modelagem de um elemento passivo ao escoamento e não reagente, eliminando assim os efeitos de *plume rise* e a transformação química.

A geração de elementos consiste na emissão de poluentes a uma taxa  $q$  em um determinado tempo  $\Delta t$ . Com isso, a massa total emitida a cada passo de tempo será:

$$Q = q\Delta t. \quad (2.21)$$

Os *puffs* gerados são identificados pelas coordenadas de seu centro de massa  $p = (x_p, y_p, z_p)$ . Estas coordenadas são atualizadas a cada passo de tempo juntamente com os parâmetros de dispersão  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$  e  $\sigma_z$ . Na presença de um vento  $u$ , temos que:

$$p = p_{i-1} + u\Delta t. \quad (2.22)$$

A cada passo de tempo, os  $\sigma$ 's são recalculados e a concentração em cada ponto de grade devido a um único *puff* será:

$$c(x, y, z, t) = \frac{q}{2(\sqrt{\pi})^3 \sigma_x \sigma_y \sigma_z} \times \exp \left\{ -\frac{1}{2} \left[ \left( \frac{x - x_p}{\sigma_x} \right)^2 + \left( \frac{y - y_p}{\sigma_y} \right)^2 + \left( \frac{z - z_p}{\sigma_z} \right)^2 \right] \right\}. \quad (2.23)$$

A concentração total durante um intervalo de tempo será a soma das contribuições de todos os *puffs* gerados neste intervalo. Esta abordagem permite, em teoria, que se utilizem informações meteorológicas tridimensionais e variáveis no tempo, capacitando o modelo a lidar com condições não estacionárias e heterogêneas.

Na Tabela 2.1 encontram-se listadas as variáveis requeridas pelo modelo como condição inicial para a simulação.

Tabela 2.1 - Condições iniciais necessárias ao STATPUFF.

<i>Informações meteorológicas</i>	
$u_*$	Velocidade de atrito (m/s)
$L$	Comprimento de Monin-Obukohv
$H_{mx}$	Altura da CLP (m)
$w_*$	Escala de velocidade convectiva (m/s)
$U_s$	Intensidade do vento na altura da fonte (m/s)
<i>Informações sobre a fonte e o terreno</i>	
$z_0$	Rugosidade da superfície (m)
$H_s$	Altura da fonte (m)
$q$	Taxa de emissão (g/s)

### 3 Teoria do Subdomínio Inercial

Fluxos turbulentos podem ser descritos como uma superposição de vórtices de diversos tamanhos. Todos estes vórtices possuem uma certa quantidade de energia cinética, quantificada por sua vorticidade ou pela magnitude das flutuações de velocidade associadas à sua frequência.

É importante que se conheça a distribuição de energia das diversas escalas (frequências), mas principalmente dos grandes vórtices (baixas frequências), pois são eles os maiores contentores de energia e respondem pela maior parte do transporte turbulento na CLP.

O espectro de uma variável mede a distribuição de sua variância ao longo das frequências ou comprimentos de onda. Quando a variável em questão é a componente turbulenta da velocidade de uma partícula, o espectro descreve também a distribuição da energia cinética turbulenta (SORBJAN, 1989).

Seguindo a relação entre correlação e espectro (MONIN; YAGLOM, 1975), temos que:

$$S_L(\omega) = \frac{2}{\pi} \int_0^{\infty} R_L(\tau) \cos(\omega\tau) d\tau, \quad (3.1)$$

$$R_L(\tau) = \int_0^{\infty} S_L(\omega) \cos(\omega\tau) d\omega, \quad (3.2)$$

em que  $\omega$  representa a frequência. Para um intervalo de tempo  $\tau = 0$ , as curvas das funções  $v(t')$  e  $v(t' + \tau)$  serão idênticas e a correlação  $R_L$  atingirá seu máximo, sendo descrita como:

$$R_L(0) = \int_0^{\infty} S_L(\omega) d\omega \equiv \overline{v^2}. \quad (3.3)$$

Isto mostra que, integrando-se o espectro para todas as frequências, obtém-se o total de energia cinética turbulenta.

Para  $\omega = 0$  a Equação (3.2) torna-se:

$$S_L(0) = \frac{2}{\pi} \int_0^\infty R_L(\tau) d\tau \equiv \frac{2}{\pi} \overline{v^2} T_L. \quad (3.4)$$

O produto  $\overline{v^2} T_L$  já foi obtido anteriormente, e representa a difusividade turbulenta.

É necessário agora identificar quantas diferentes frequências contribuem para a dispersão de poluentes na CBL. Segundo o teorema de Parseval (TENNEKES; LUMLEY, 1972), a convolução de  $R_L(\tau)$  pelo filtro  $(1 - t/\tau)$  é igual á convolução de seu espectro  $S_L(\tau)$  pela transformada de Fourier do filtro, tal que:

$$\overline{x^2} = t^2 \int_0^\infty S_L(\omega) \left[ \frac{\text{sen}(\omega t/2)}{\omega t/2} \right]^2 d\omega. \quad (3.5)$$

A função  $\left[ \text{sen}(\omega t/2)/(\omega t/2) \right]^2$  é um filtro “passa-baixa” cuja frequência de corte encontra-se em  $\omega_c = \pi/t$ . Apenas as frequências do intervalo  $[0, \omega_c]$  são selecionadas.

O filtro é bastante estreito para tempos avançados, pois o primeiro zero ocorre em  $\omega t/2 = \pi/2$  (por exemplo, quando  $\omega = \pi/t$ ). Neste caso, o filtro seleciona  $S_L(0)$  enquanto descarta a contribuição feita por altas frequências. A Equação (3.5) pode ser aproximada para:

$$\overline{x^2} = t^2 S_L(0) \int_0^\infty \left[ \frac{\text{sen}(\omega t/2)}{\omega t/2} \right]^2 d\omega. \quad (3.6)$$

Resolvendo a integral e substituindo o valor de  $S_{L_i}(0)$  pelo encontrado na Equação (3.4), tem-se que:

$$\overline{x^2} = t^2 S_L(0) \frac{2\pi}{t} = 2\overline{v^2} T_L t. \quad (3.7)$$

Observa-se que o resultado obtido na Equação (3.7) concorda com o resultado obtido na Seção 2.2. Portanto, conclui-se que a difusão para tempos avançados depende principalmente do comportamento do espectro próximo à origem.

Para os primeiros instantes da dispersão (quando  $t \rightarrow 0$ ), todas as frequências são selecionadas, pois

$$\lim_{t \rightarrow 0} \left[ \frac{\text{sen}(\omega t/2)}{\omega t/2} \right]^2 = 1 \quad (3.8)$$

e a Equação (3.5) torna-se

$$\overline{x^2} = t^2 \int_0^\infty S_L(\omega) d\omega = \overline{v^2} t^2. \quad (3.9)$$

O diferente comportamento para o início da dispersão e para tempos avançados está relacionado a presença do filtro. Logo após o lançamento, todas as componentes de frequência contribuem sem atenuação para a dispersão. Com o passar do tempo, as maiores frequências (vórtices menores) são cortadas e a energia disponível para a dispersão diminui.

Um outro importante conceito é conhecido por *Função de Estrutura Lagrangeana*  $D_L(\tau)$ , definida por:

$$D_L(\tau) = \overline{[v(t) - v(t + \tau)]^2}. \quad (3.10)$$

Esta função relaciona-se com o espectro  $S_{L_i}(\omega)$  por

$$D_L(\tau) = 2 \int_0^\infty (1 - \cos\omega\tau) S_L(\omega) d\omega. \quad (3.11)$$

### 3.1 Lei de Kolmogorov

Em 1922, o cientista britânico Lewis Richardson publicou, pela primeira vez, a *Teoria da Cascata de Energia*. Esta teoria sugere que a energia gerada nos maiores vórtices é repassada, através da quebra destes, a vórtices cada vez menores, até que seja convertida em calor. Segundo Richardson, a cascata de energia continua até a menor escala possível, que deverá ser estável (MONIN; YAGLOM, 1975). Para serem estáveis, estes diminutos vórtices devem ser caracterizados por um número de *Reynolds* bastante pequeno. Portanto, a viscosidade tem um peso acentuado no processo, o que resulta em uma considerável dissipação de energia cinética turbulenta em calor (TENNEKES, 1977).

Conforme descrito na Seção 2.2, um dos grandes méritos da teoria de Taylor foi a introdução do conceito de “homogeneidade e isotropia” no estudo da turbulência. Esta suposição torna mais amena a análise matemática do fenômeno e permite, após algumas generalizações, uma boa descrição das menores escalas da turbulência (LUMLEY; PANOFSKY, 1964).

Seguindo este princípio, uma importante contribuição à teoria da cascata foi feita pelo matemático russo A. N. Kolmogorov em 1941 (MONIN; YAGLOM, 1975). Foi por ele sugerido que, devido à natureza caótica da transferência de energia dos vórtices maiores para os menores, a cada diminuição de escala a influência da direção do fluxo médio torna-se mais fraca. Em conseqüência, para escalas suficientemente pequenas, esta influência é nula. Logo, a suposição de homogeneidade e isotropia feita por Taylor é plenamente válida para as escalas que satisfaçam a proposição de Kolmogorov.

Seguindo a cascata de energia em direção às maiores frequências, as escalas de tempo dos vórtices envolvidos diminuem em conjunto com as escalas espaciais. Nos vórtices de números de onda muito menores que os dos vórtices contenedores de energia, o tempo de transferência de energia é bastante pequeno se comparado ao dos grandes vórtices. Kolmogorov assumiu, então, que as propriedades estatísticas dos vórtices com um número de Reynolds suficientemente grande serão universais e dependerão exclusivamente de dois parâmetros dimensionais: a taxa de dissipação de energia (por unidade de massa)  $\varepsilon$  e o coeficiente de viscosidade  $\nu$ .

Desses dois parâmetros, um comprimento e uma velocidade podem ser formados (TENNEKES; LUMLEY, 1972):

$$\eta = \left( \frac{\nu^3}{\varepsilon} \right)^{\frac{1}{4}}, \quad (3.12)$$

$$v = (\nu\varepsilon)^{1/4}. \quad (3.13)$$

Trabalhos experimentais determinaram que  $\eta \sim 1$  mm e o número de Reynolds correspondente tem valor unitário. Esta escala de comprimento foi denominada *microescala de Kolmogorov* e corresponde a escala abaixo da qual o fluxo turbulento

é dominado pela viscosidade. Em conseqüência,  $\eta^{-1}$  é o número de onda no qual espera-se que o espectro decresça rapidamente pela eliminação dos pequenos vórtices pela ação dominante da viscosidade. Com isso, considerando um número de onda  $\kappa$ , o espectro  $S_{L_i}(\kappa)$  nesta região será proporcional aos dois parâmetros:

$$S_L(\kappa) \propto \varepsilon \nu. \quad (3.14)$$

Quando o número de Reynolds é significativamente grande para que não ocorra dissipação de energia e suficientemente pequeno para que não se localize na região de produção da mesma, o que ocorre é apenas uma transferência inerte dos maiores para os menores vórtices. Seguindo este raciocínio, Kolmogorov sugere que a região do espectro correspondente a este número de Reynolds é também independente da viscosidade  $\nu$  e batizou-a de *Subdomínio Inercial*.

Para este subdomínio, Kolmogorov trasporta a relação apresentada em (3.14) em uma equação, onde:

$$S_L(\kappa) = \alpha_1 \varepsilon^{2/3} \kappa^{-(1+\zeta)}, \quad (3.15)$$

em que  $\alpha_1$  é uma constante universal com valor estimado entre 0,5 e 0,6 e  $\zeta$  equivale a 2/3. Esta equação ficou conhecida como a *Lei dos dois terços* ou *Teoria K41*.

É válido lembrar que, apesar de a maior parte das teorias serem realizadas com base em número de onda, os experimentos que realizam medições relacionadas à turbulência baseiam-se quase todos em frequência. Entretanto, a conversão entre estas escalas é bastante simples (KAIMAL; FINNIGAN, 1994), ou seja:

$$\kappa S_L(\kappa) = \omega S_L(\omega). \quad (3.16)$$

Em micrometeorologia, tornou-se praxe utilizar a seguinte expressão:

$$\frac{\omega S(\omega)}{w_*^2} = \frac{An^\zeta}{(1 + Bn^\alpha)^\beta} \quad (3.17)$$

que descreve o espectro de velocidade  $S(\omega)$ . Aqui,  $n$  é a frequência reduzida ( $n = \omega z/u$ ) e  $A, B, \alpha$  e  $\beta$  são constantes, determinadas pelas condições atmosféricas (OLESEN et al., 1984).

Com base nestas informações, é apresentada uma solução para o espectro (NIEUWSTADT; DOP, 1981; DEGRAZIA; MORAES, 1992; MANGIA et al., 1987; DEGRAZIA et al., 1997):

$$F_i(n) = \frac{nS_i(n)}{v_i^2} = \frac{z}{U(f_m^*)_i} \frac{1}{\left(1 + \frac{1}{2/3} \frac{nz}{U(f_m^*)_i}\right)^{1+2/3}}, \quad (3.18)$$

em que  $F_i(n)$  é o espectro adimensionalizado pela variância das velocidades  $v_i^2$  (mencionada anteriormente na seção 2.2). Neste caso, o índice  $i$  representa os três eixos  $x, y$  e  $z$ .

### 3.2 Teoria Multi-Fractal

Uma das suposições centrais da teoria de Kolmogorov é baseada na auto-similaridade da turbulência. As propriedades estatísticas de um determinado intervalo (de tempo ou espaço) são independentes de sua localização no eixo. Esta homogeneidade considera que os vórtices menores ocupam todo o volume deixado pela quebra de seus antecessores e assim sendo, não há regiões de intermitência.

No entanto, algumas objeções são feitas a esta teoria, tanto do ponto de vista teórico (DEGRAZIA et al., 1999) quanto experimental (FRISCH, 1995). É sugerida a presença de intermitências na cascata, tal que o volume deixado na quebra dos vórtices não é totalmente preenchido pelos posteriores, abrindo espaço para regiões sem turbulência entre os vórtices e portanto, alterando as propriedades estatísticas da turbulência.

Diversos autores (incluindo o próprio Kolmogorov) apresentam modelos onde incluem a intermitência em suas fórmulas e, dentre eles, encontra-se a parametrização baseada na teoria multifractal. Baseado na termoestatística não-extensiva, o modelo escolhido propõe uma alteração para o expoente  $\zeta$  da Equação (3.15), conferindo-lhe o valor (RAMOS et al., 1999):

$$\zeta = \frac{2}{3} + \frac{1}{20} \sim 0.72. \quad (3.19)$$

Aplicando esta correção, uma nova forma para a Equação (3.18) é deduzida (VELHO et al., 2001):

$$F_i(n) = \frac{nS_i(n)}{v_i^2} = \frac{z}{U(f_m^*)_i} \frac{1}{\left(1 + \frac{1}{0,72} \frac{nz}{U(f_m^*)_i}\right)^{1+0,72}}. \quad (3.20)$$

Este coeficiente será implementado em substituição à parametrização já existente nos modelos, sendo os resultados comparados entre si e aos dados experimentais.



## 4 Validação das Parametrizações

Seguindo a notação sugerida por Wingard ([NIEUWSTADT; DOP, 1981](#)), a palavra *modelagem* refere-se normalmente à utilização de equações cujas soluções têm comportamento similar ao do fenômeno de interesse. Aplica-se o termo *simulação* para descrever métodos baseados em equações que podem ser deduzidas diretamente dos princípios físicos do problema e mantém-se, portanto, fiéis a estes.

A completa integração da equação governante do campo de velocidade turbulenta (equação de Navier-Stokes) é chamada *Simulação Numérica Direta* (DNS). No entanto, pelas restrições computacionais hoje existentes, o maior número de pontos de grade utilizado nesta técnica é da ordem de  $10^9$  ( $10^3$  em cada direção).

Considerando a escala espacial da CLP, onde os maiores vórtices alcançam quilômetros de extensão e os menores não ultrapassam alguns milímetros, o conjunto do espectro turbulento se expande por mais de seis ordens de magnitude. A completa integração numérica da equação de Navier-Stokes para este tipo de fluxo requereria  $10^{18}$  pontos de grade, o que extrapola em muito a capacidade computacional atual ou mesmo de um futuro próximo.

Quando o número de escalas excede o permitido pela capacidade computacional, apenas uma parte pode ser resolvida explicitamente, o restante deve ser parametrizado. Esta filosofia é a base do método de LES, como será tratado daqui em diante.

Na CLP os maiores vórtices, contenedores de energia, são os responsáveis pela maior parte do transporte turbulento. Portanto, uma simulação que resolva explicitamente a turbulência nessa escala e faça uma aproximação para os menores vórtices pode ser considerada uma boa representação da natureza ([MOENG; SULLIVAN, 2001](#)).

Por este motivo e por permitir um total domínio das condições iniciais e de contorno, optou-se pelo LES como experimento controle.

### 4.1 SPELL X LES

O campo de concentração gerado pelo LES foi obtido com a simulação do despejo (por uma fonte pontual) de uma quantidade finita de material passivo ao escoamento. O tempo total de simulação foi de 8000 segundos, com um passo de tempo de 2 s.

A liberação do material deu-se a uma taxa de 1 g/s, o que significa a entrada de 2 gramas de poluente a cada passo de tempo.

Na Tabela 4.1 listam-se as condições iniciais e as características computacionais da simulação.

Tabela 4.1 - Condição inicial e parâmetros computacionais utilizados no experimento.

<i>Condição inicial</i>	
$u_*$	0,3 m/s
$L$	-10
$H_{mix}$	1104 m
$w_*$	2 m/s
$U_s$	3.1 m/s
$z_0$	0,6 m
$H_s$	552 m
$q$	1 g/s
<i>Parâmetros computacionais</i>	
Pontos de Grade	96 x 96 x 96
Tempo Simulado	8000 s
$\Delta t$	2 s
$\Delta x$	51,8802 m
$\Delta y$	51,8802 m
$\Delta z$	20,8302 m
Posição da fonte	$i_x = 3, i_y = 48, i_z = 27$

Fonte: (RIZZA et al., 2002).

Apesar da capacidade do modelo em utilizar condições meteorológicas variáveis tanto no tempo quanto no espaço, pelas escalas envolvidas no trabalho (aproximadamente 2 horas e 5 quilômetros) e pela pouca variação apresentada pelos dados de LES (RIZZA et al., 2002), optou-se por manter tais condições constantes.

Por possuir uma taxa de emissão constante, a quantidade de massa de poluente presente na grade ( $m = \sum c_i \Delta_i Q^{-1}$ ) não deveria variar. No entanto, conforme observa-se na Figura 4.1, apenas a partir de  $t \cong 100s$  isto torna-se verdade.

Credita-se esta imprecisão à relação entre o parâmetro de dispersão  $\sigma_i$  e os espaçamentos de grade  $\Delta_i$ . Como 98% de uma distribuição gaussiana encontra-se no intervalo  $[-2\sigma, 2\sigma]$  os resultados do modelo só terão significado físico quando  $\sigma_i \geq 0.5\Delta_i$ .

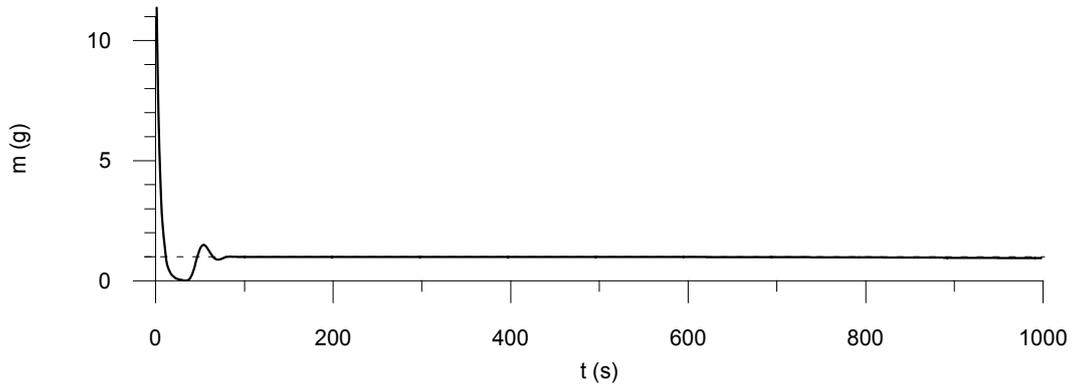


Figura 4.1 - Variação da massa total ao longo do tempo.

No experimento realizado, esta condição é alcançada no centésimo  $\Delta t$ , quando o centro de massa do *puff* localiza-se a 368 m da fonte. Esta é então a distância mínima na qual os resultados obtidos são válidos.

Para a validação dos resultados do modelo, foi utilizada a concentração integrada no eixo perpendicular à direção do vento (no caso, o eixo  $y$ ). Do plano formado pelos eixos  $x$  e  $z$ , foram extraídos 3 vetores: a concentração ao nível do solo, a concentração ao nível da fonte e a concentração integrada verticalmente.

Alguns procedimentos estatísticos foram realizados a fim de testar quantitativamente a performance do modelo e de suas parametrizações (HANNA et al., 1982):

- *Fractional Bias*:  $FB = (\overline{C_o} - \overline{C_p}) / 0.5(\overline{C_o} + \overline{C_p})$ ,
- *Normalized Mean Square Error*:  $NMSE = \overline{(C_o - C_p)^2} / (\overline{C_o C_p})$ ,
- Média Geométrica:  $MG = \exp(\overline{\ln C_o} - \overline{\ln C_p})$ ,
- Variância Geométrica:  $VG = \exp(\overline{\ln C_o - \ln C_p})^2$ .

Tanto FB quanto MG tratam do erro relativo. No entanto, enquanto FB trabalha a concentração aritmética, MG utiliza-se do logarítmo da concentração. A mesma diferença é encontrada entre NMSE e VG, porém estes últimos trabalham com a variância ou o “espalhamento” do dado.

Nas Figuras 4.2, 4.3 e 4.4, apresentam-se os gráficos da concentração normalizada ( $c^* = cUH_{mix}Q^{-1}$ ) ao longo do eixo  $x$  para o nível do solo, a altura da fonte e a soma em todos os níveis, respectivamente.

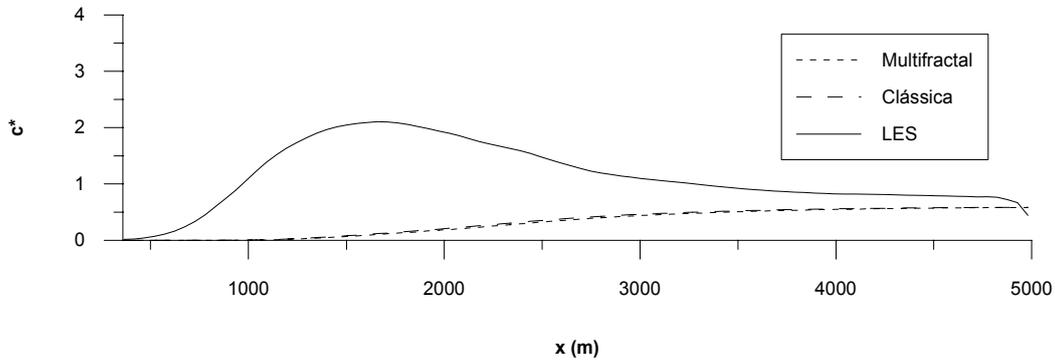


Figura 4.2 - Concentração normalizada ao nível do solo.

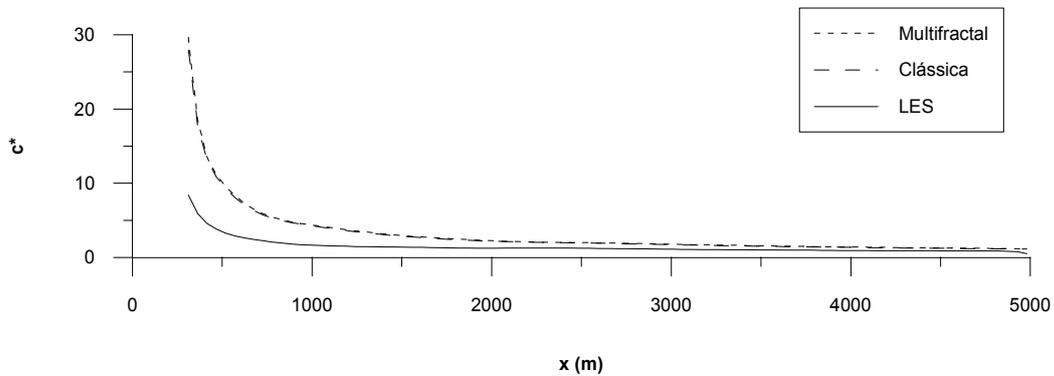


Figura 4.3 - Concentração normalizada na altura da fonte.

É evidente um melhor comportamento do modelo STATPUFF para a concentração integrada verticalmente e na altura da fonte em relação à concentração ao nível do solo. Conforme descrito na Seção 2.3, o STATPUFF assume o vento no eixo  $x$  como única forçante na advecção do centro de massa do *puff*, não permitindo ao modelo computar os movimentos ascendentes e descendentes presentes na CLP. Com isso, torna-se comprometida a estimativa da concentração ao solo nos tempos

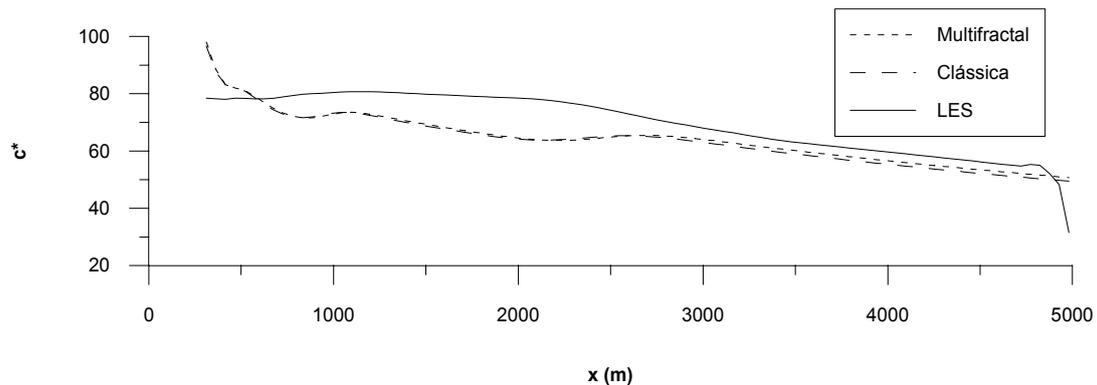


Figura 4.4 - Concentração normalizada e integrada verticalmente.

(ou distância da fonte) inferiores àqueles em que o parâmetro  $\sigma_z$  possui magnitude suficiente para gerar valores significativos a uma distância igual a altura da fonte.

Os gráficos da concentração integrada verticalmente e na altura da fonte mostraram também um melhor ajuste aos dados do LES para maiores tempos de viagem. Entretanto, diverso da concentração ao nível do solo, credita-se esta diferença à dificuldade de discretização dos dados de concentração do modelo, discutida anteriormente.

A comparação entre os resultados das parametrizações clássica e multifractal mostra uma grande semelhança entre estas, traçando linhas quase coincidentes nos gráficos.

Os resultados da análise de erros e ruído das duas parametrizações com os dados gerados por LES são apresentados nas Tabelas 4.2, 4.3 e 4.4.

Estes resultados confirmam as observações feitas sobre as Figuras 4.2, 4.3 e 4.4 ao apresentarem quase todos os erros calculados entre a parametrização clássica e a multifractal na segunda casa decimal.

Os resultados da análise de correlação dos dados encontram-se nas Tabelas 4.5, 4.6 e 4.7.

Exceto pela concentração ao nível do solo (onde, pelos motivos citados acima a correlação também apresenta valores negativos), uma boa correlação foi encontrada entre os resultados do STATPUFF e os dados gerados por LES.

Na altura da fonte, o coeficiente esteve bastante próximo a 1, comprovando um bom comportamento do modelo para este nível.

Com os resultados obtidos, é possível observar que o modelo STATPUFF apresenta uma boa adaptação ao experimento LES, tanto para a concentração integrada verticalmente quanto para seu valor na altura da fonte. A primeira comporta-se melhor na análise do erro normalizado e do ruído presente. Por outro lado, os coeficientes de correlação da segunda mostraram-se bastante superiores.

Apesar de considerar a presença de intermitência nos fluxos turbulentos, a utilização da parametrização multifractal não altera significativamente os resultados. Esta conclusão concorda com os experimentos realizados em (BORGAS, 1994) e (BORGAS; SAWFORD, 1994), e sugere uma continuidade da parametrização clássica, uma vez que esta já é amplamente utilizada em estudos de dispersão de poluentes atmosféricos.

Tabela 4.2 - Comparação estatística da concentração ao nível do solo. (Por apresentarem valores de concentração muito pequenos no início (que levariam a valores tendendo ao infinito em  $\ln[C_o/C_p]$ ) os parâmetros  $MG$  e  $VG$  para o nível do solo foram calculados a partir do ponto de grade  $ix = 45$ .)

Parâmetros Estatísticos	Clássica	Multifractal
$FB$	1,0979	1,1243
$NMSE$	2,8517	3,0317
$MG^*$	1,7234	1,7708
$VG^*$	1,4822	2,5062

Tabela 4.3 - Comparação estatística da concentração na altura da fonte.

Parâmetros Estatísticos	Clássica	Multifractal
$FB$	-0,6667	-0,6938
$NMSE$	1,3805	1,4840
$MG$	0,5744	0,5566
$VG$	1,4379	1,4721

Tabela 4.4 - Comparação estatística da concentração integrada.

Parâmetros Estatísticos	Clássica	Multifractal
$FB$	0,093	0,082
$NMSE$	0,147	0,134
$MG$	1,093	0,0812
$VG$	1,014	1,0942

Tabela 4.5 - Tabela de Correlação da concentração ao nível do solo.

	LES	Clássica	Multifractal
LES	1,0000	-0,2583	-0,2332
Clássica	-0,2583	1,0000	0,9993
Multifractal	-0,2332	0,9993	1,0000

Tabela 4.6 - Tabela de Correlação da concentração integrada verticalmente.

	LES	Clássica	Multifractal
LES	1,0000	0,8666	0,8529
Clássica	0,8666	1,0000	0,9987
Multifractal	0,8529	0,9987	1,0000

Tabela 4.7 - Tabela de Correlação da concentração na altura da fonte.

	LES	Clássica	Multifractal
LES	1,0000	0,9950	0,9949
Clássica	0,9950	1,0000	1,0000
Multifractal	0,9949	1,0000	1,0000



## 5 Estudo de Caso

A Refinaria Henrique Lage, pertencente à Petrobras, foi construída no final dos anos 70 em São José dos Campos, São Paulo. Também conhecida como Refinaria do Vale do Paraíba (REVAP), ela tem hoje a capacidade de processamento de 224 mil barris por dia (PETROBRAS, 2002).

Nesta etapa do trabalho serão realizados alguns estudos de caso sobre a dispersão da pluma gerada pela chaminé da REVAP sobre a população ao seu redor. Um mapa da densidade populacional do município servirá de base para a identificação dos cenários mais críticos (onde há um maior número de pessoas atingidas) e como condição inicial para o modelo de dispersão, serão fornecidos os dados gerados por um modelo de circulação atmosférica de mesoescala.

Para melhor identificação dos resultados, a distribuição da concentração de poluente obtida em cada cenário será apresentada sobre uma imagem do satélite Ikonos (SPACEIMAGING, 2003) da região de interesse.

### 5.1 A fonte

A chaminé utilizada no estudo de caso situa-se em  $45^{\circ}49'18,55''W$  e  $23^{\circ}11'2,75''S$ , possui 110 metros de altura e emite compostos diversos a diferentes taxas. Como exemplo, optou-se pelo estudo da dispersão do dióxido de nitrogênio ( $\text{NO}_2$ ), cuja razão de emissão pela fonte é de 44 g/s (MINERAL, 2001).

### 5.2 Condição Inicial

O *Mesoscale Model* (MM5) pertence à quinta geração dos modelos meteorológicos de mesoescala e foi desenvolvido pela *Pennsylvania State University*, em conjunto com o *National Center for Atmospheric Research* (NCAR), para realizar simulações da dinâmica atmosférica de área limitada (DUDHIA et al., 2000). Este modelo utiliza como condição inicial e de contorno as análises geradas pelo modelo global do *National Center for Environmental Prediction* (NCEP).

As simulações foram realizadas para os dias 10, 21 e 22 de dezembro de 2002, cobrindo a região entre as longitudes  $48^{\circ}40'48''W$  e  $40^{\circ}53'24''W$  e as latitudes  $24^{\circ}21'36''S$  e  $19^{\circ}24'36''S$ . O passo de tempo utilizado foi de 180 minutos, entretanto, conforme descrito no Capítulo 4, as curtas escalas temporal e espacial envolvidas na

modelagem da dispersão de poluentes na atmosfera permitem que sejam utilizados os dados gerados em apenas um passo de tempo.

Três cenários distintos foram escolhidos para representar a condição média da região (cenário 1), uma situação pré-frontal (cenário 2) e uma após a passagem da frente fria (cenário 3) (MOLION, 1980). Nas Figuras 5.1, 5.2 e 5.3 é possível observar os ventos em mesoescala para os cenários escolhidos. Na Tabela 5.1 encontram-se descritas as condições iniciais utilizadas no modelo de dispersão.

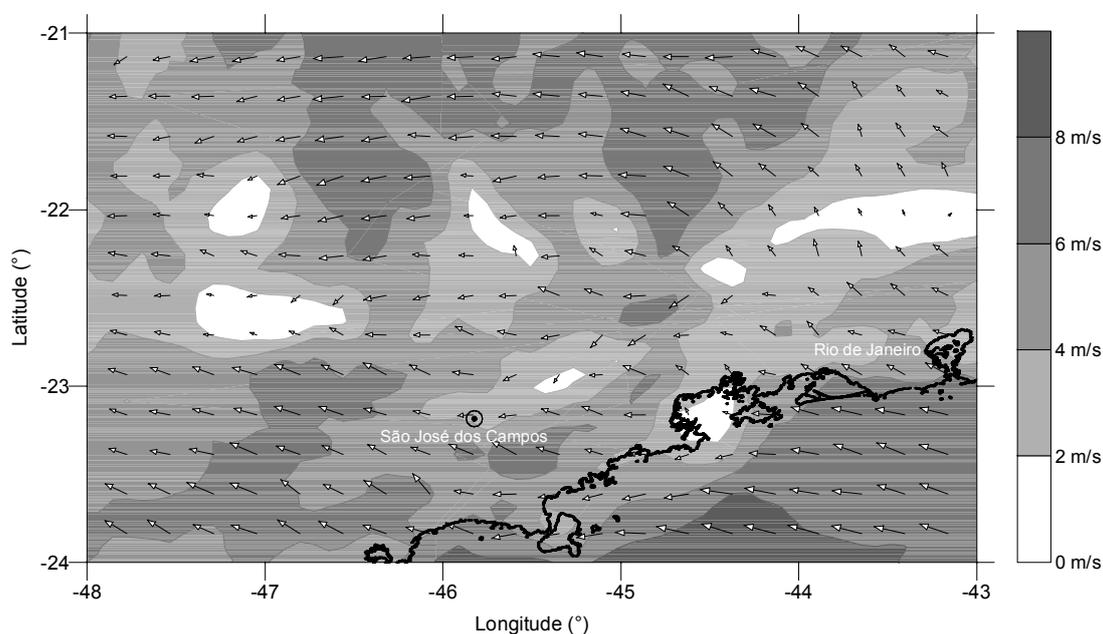


Figura 5.1 - Condição de mesoescala de vento para o cenário 1. A escala de cor refere-se a intensidade dos ventos em m/s.

É válido lembrar que para o modelo não importa a direção do vento, apenas a velocidade. A pluma seguirá uma reta coincidente ao eixo  $x$ . Apenas adiante, no georreferenciamento dos dados, o ângulo de incidência do vento entrará no cômputo.

### 5.3 Dados Censitários

Os dados de densidade populacional utilizados foram gerados pelo censo demográfico realizado em 1991 (IBGE, 1991). Estes dados encontram-se na forma de um banco de dados cadastral, estando relacionado a cada setor censitário um valor de densidade

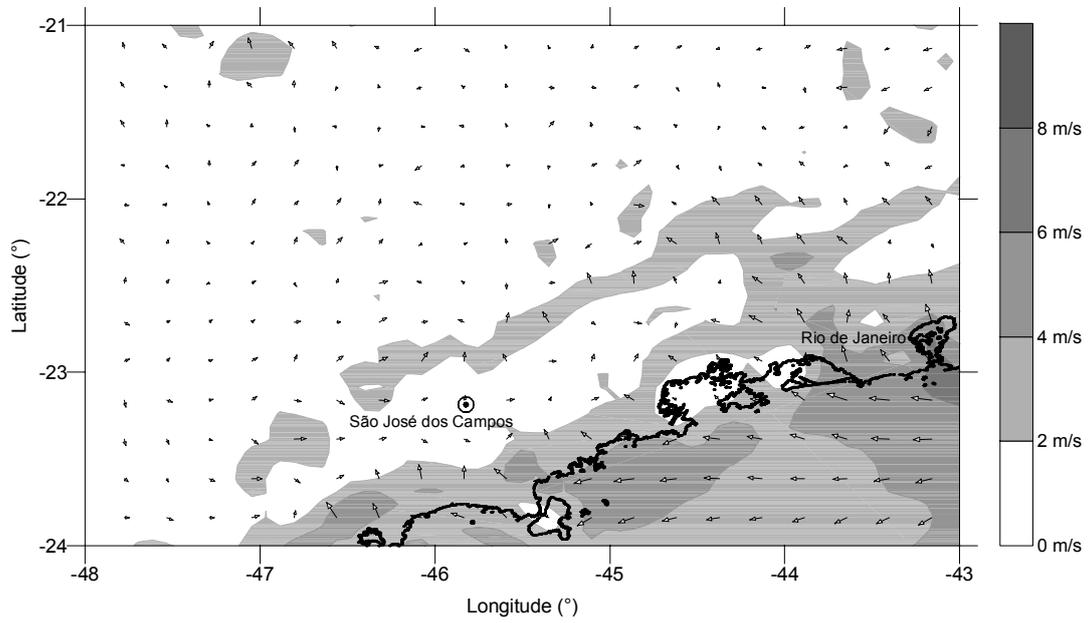


Figura 5.2 - Condição de mesoescala de vento para o cenário 2. A escala de cor refere-se a intensidade dos ventos em m/s.

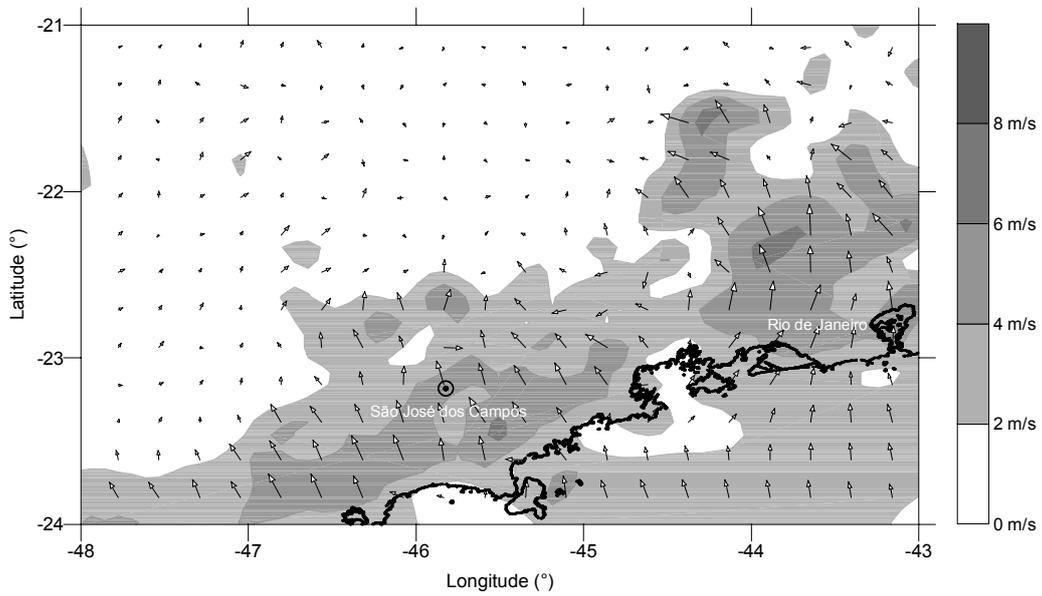


Figura 5.3 - Condição de mesoescala de vento para o cenário 3. A escala de cor refere-se a intensidade dos ventos em m/s.

Tabela 5.1 - Condições iniciais utilizadas nos três cenários.

Parâmetro	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3
Data	10/12/2002	20/12/2002	21/12/2002
Horário	15:00	18:00	18:00
$u_*$ (m/s)	0,48	0,35	0,59
$L$	-15	-28	-136
$H_{mx}$ (m)	1769	2772	2460
$w_*$ (m/s)	3,20	2,24	2,10
$U_s$ (m/s)	5,34	1,14	7,53
$z_0$ (m)	0,14	0,14	0,14

populacional em habitantes por quilômetro quadrado.

Para realizar a estimativa almejada, fez-se necessária a comparação dos dados censitários com os resultados do modelo. Para tanto, o banco de dados cadastral (onde polígonos estão associados à informações em uma tabela) foi transformado em uma matriz, realizando-se a operação conhecida como *especialização* (BURROUGH; MCDONNELL, 1998).

Os dados de densidade demográfica encontravam-se em uma escala de 1:1000, georreferenciados em um sistema de coordenadas geográficas baseado na projeção cônica de Lambert e no Datum SAD/69. Para uma melhor adaptação aos resultados do modelo, os dados foram transportados para uma projeção cilíndrica equidistante, também utilizando o Datum SAD/69.

Na Figura 5.4 encontra-se a distribuição espacial da densidade demográfica do município de São José dos Campos.

## 5.4 Metodologia

De posse dos resultados do modelo para os três cenários escolhidos, é necessário o georreferenciamento da pluma, para posicioná-la de acordo com a direção do vento, sobre o mapa de densidade populacional.

O vento é fornecido pelo modelo na forma das componentes zonal e meridional. Convertem-se os dados para coordenadas polares (ângulo e raio) a fim de obter a direção do vento.

Deve notar-se que a direção obtida corresponde ao ângulo em coordenadas geomé-

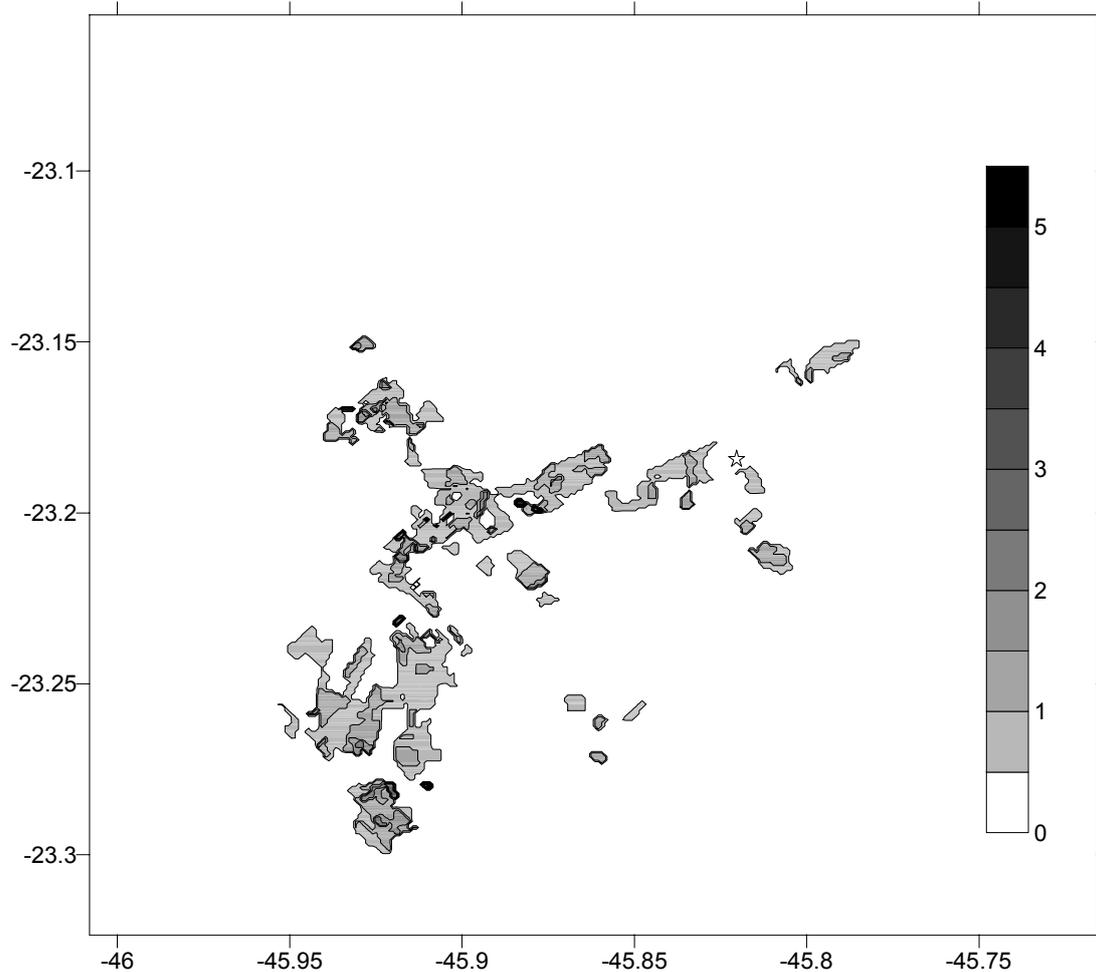


Figura 5.4 - Distribuição de densidade demográfica do município de São José dos Campos. A estrela indica a localização da REVAP, a escala de cor refere-se ao número de habitantes por quilômetro quadrado.

tricas (onde o zero encontra-se na extrema direita do círculo e os ângulos crescem em sentido anti-horário) e não geográficas (zero ao norte, com ângulos crescendo no sentido horário). Esta é uma conversão simples ( $\theta_{geog} = 270 - \theta_{geom}$ ), porém vital aos cálculos de rotação da pluma (Figura 5.5).

Depois de recalculadas as coordenadas de cada ponto de grade, os valores de concentração foram realocados na nova (e georreferenciada) matriz utilizando-se a triangulação por interpolação linear (LEE; SCHACHTER, 1980). Para permitir operações entre as matrizes de concentração de poluente e de densidade populacional, optou-se por utilizar um espaçamento de grade idêntico em ambas.

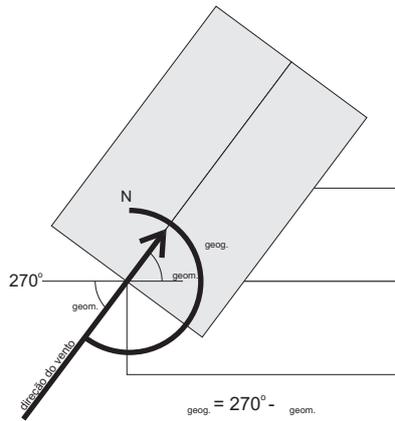


Figura 5.5 - Rotação da Pluma para o Georreferenciamento.

Como as coordenadas dos pontos de grade são coincidentes, inicialmente basta que se verifique na matriz de concentração de poluente os índices correspondentes aos pontos com algum valor ( $c_i \neq 0$ ). Na matriz de densidade populacional, estes índices correspondem aos pontos de grade atingidos pela pluma.

Para evitar a influência nos cálculos de pontos de grade com concentrações muito baixas e por objetivar-se exemplificar, simplesmente, um método operacional de monitoramento da qualidade do ar, optou-se empiricamente por um limiar de concentração de  $10 \mu g/m^3$ , abaixo do qual a concentração é considerada nula.

Com isso, o cálculo do número de habitantes atingidos torna-se:

$$Hab = \sum_{i=1}^n Dp_i \Delta x \Delta y \quad \forall \quad i \quad || \quad c_i \geq 10, \quad (5.1)$$

em que  $Dp_i$  é a densidade populacional.

Para permitir uma melhor identificação das áreas atingidas pela pluma nos cenários escolhidos, um mosaico de imagens do satélite Ikonos ([SPACEIMAGING, 2003](#)) foi utilizado como base dos gráficos de distribuição de concentração do poluente emitido pela REVAP.

A imagem encontrava-se georreferenciada em uma projeção UTM com o datum SAD/69, sendo então reprojeta para a mesma projeção dos dados censitários (ci-

líntrica equidistante).

## 5.5 Resultados

Nas Figuras 5.6, 5.7 e 5.8 encontram-se os resultados do modelo de dispersão para os cenários 1, 2 e 3, respectivamente. Estão representados nos gráficos os valores de concentração ao nível do solo, em microgramas por metro cúbico ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ).

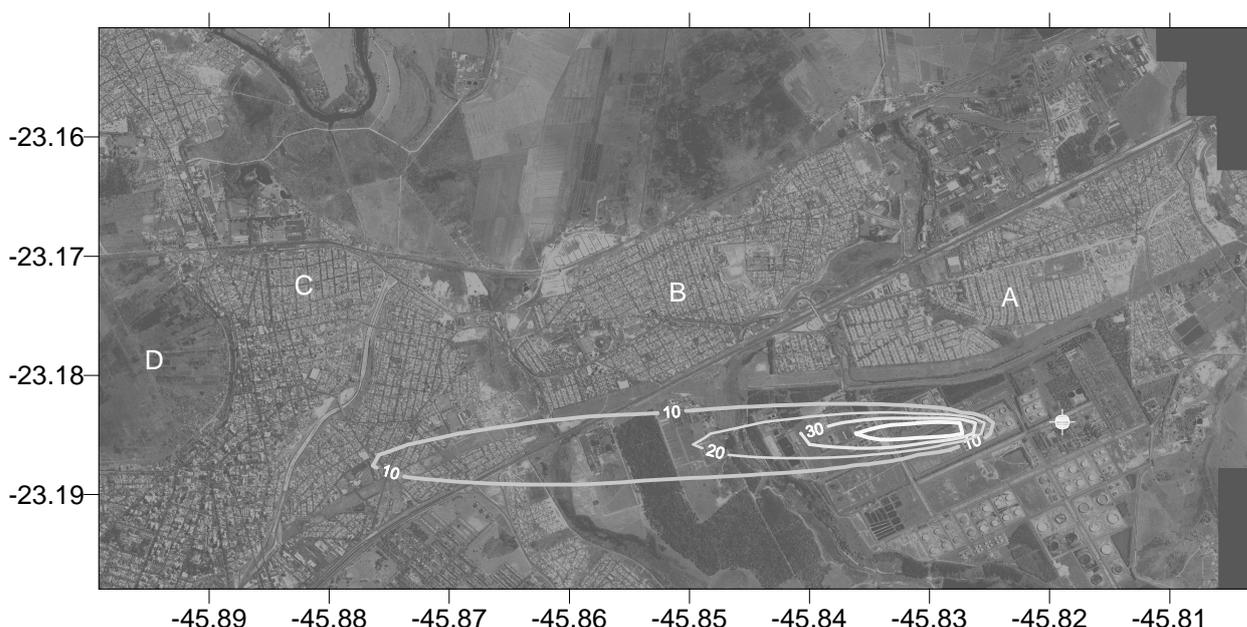


Figura 5.6 - Resultado do modelo de dispersão (em  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  para o cenário 1). Legenda: A. Vista Verde, B. Jardim Esplanada, C. Centro, D. Banhado.

O cenário 2 apresenta a maior área de concentração acima de  $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$  quando comparado aos cenários 1 e 3. Analisando o gráfico da Figura 5.9, nota-se que os ventos são mais intensos nestes cenários. Esta maior magnitude faz com que haja uma maior distância entre os centros de massa dos *puffs* nestes cenários, diminuindo a concentração.

De todos os cenários propostos, a menor concentração ao nível do solo foi encontrada no cenário 3. Isto pode ser explicado pela maior intensidade do vento se comparada à do cenário 1 e pela pequena escala de velocidade convectiva, se comparada à do cenário 2.

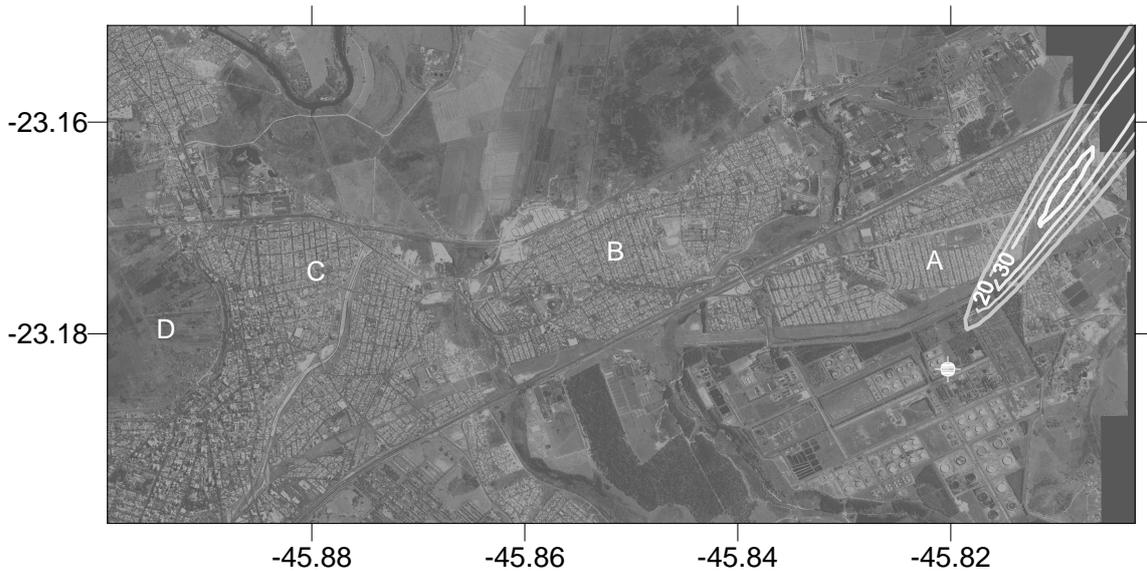


Figura 5.7 - Resultado do modelo de dispersão (em  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  para o cenário 2). Legenda: A. Vista Verde, B. Jardim Esplanada, C. Centro, D. Banhado.

Tabela 5.2 - Número de habitantes atingidos pela pluma em cada cenário.

Cenário	Nº de habitantes atingidos
1	1776
2	5015
3	715

O número de habitantes atingidos pela pluma em cada cenário é apresentado na Tabela 5.2. Observa-se que o número de habitantes atingido pela pluma no cenário 2 é bastante superior ao dos outros cenários, sendo o cenário 3 o de menor impacto sobre a população.



Figura 5.8 - Resultado do modelo de dispersão (em  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  para o cenário 3). Legenda: A. Vista Verde, B. Jardim Esplanada, C. Centro, D. Banhado.

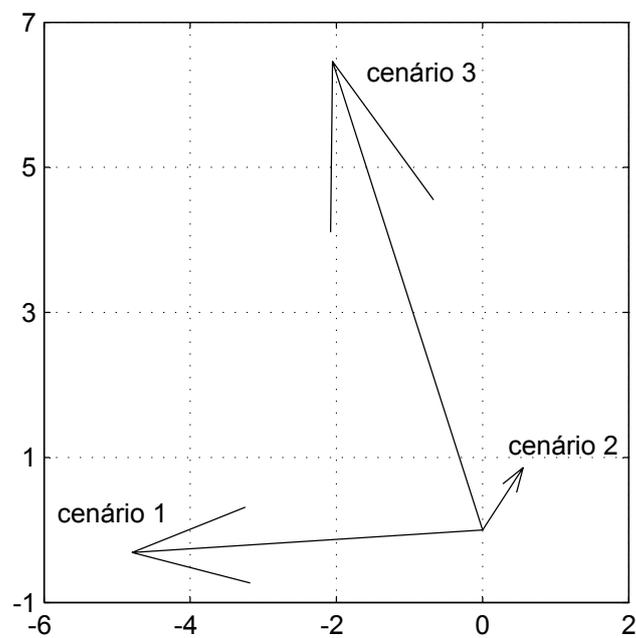


Figura 5.9 - Direção e intensidade dos ventos utilizados nas simulações.



## 6 Conclusão

### 6.1 Comparação das Parametrizações

Apesar de considerar o fenômeno da intermitência em seus cálculos, os resultados obtidos indicam que a utilização da parametrização multifractal não provê melhorias na modelagem numérica da turbulência para modelos de dispersão. Os medidores de desempenho utilizados (Tabelas 4.2, 4.3, 4.4) apontaram, exceto para a concentração integrada verticalmente, um melhor comportamento da parametrização clássica.

Por estarem presentes nas mais diversas escalas espaciais, os fluxos turbulentos possuem importante papel em variados processos atmosféricos e deve ser ressaltado, portanto, que com os testes feitos esta conclusão é restrita aos modelos de dispersão.

A comparação do modelo STATPUFF com os dados de LES (tomado aqui como experimento controle) sugere uma boa adequação do modelo para o transporte horizontal. Por considerar o vento no plano formado pelos eixos  $x$  e  $y$  como forçante única, nas regiões próximas à fonte ocorre uma subestimação da concentração no nível do solo.

A análise da correlação entre os dados das parametrizações e de LES para este nível (Tabela 4.5) e o gráfico da Figura 4.2 reforçam esta idéia. Nota-se no gráfico que a concentração ao solo estimada pelo modelo assume valores significativos a partir de 2000 metros da fonte e continua a crescer devido ao aumento do parâmetro de dispersão  $\sigma_z$ . Já a concentração obtida no experimento LES tem um máximo próximo a 1500 metros da fonte, e vai diminuindo com o aumento da distância.

Apesar de o fazerem seguindo tendências diversas (o que explica a correlação negativa em ambas as parametrizações), nos pontos de grade mais distantes da fonte, os dados de LES e do STATPUFF estabilizam-se em valores próximos um do outro, validando a utilização do modelo em estudos de impacto ambiental.

### 6.2 Estudo de Caso

Os cenários analisados no estudo de caso representam condições meteorológicas típicas do município de São José dos Campos. Pela disposição espacial da fonte poluidora analisada e da densidade populacional do município, observa-se um grande impacto

da pluma sobre a população do município. Tanto os ventos de E-NE quanto os ventos de SW transportam a pluma diretamente sobre uma região de alta densidade demográfica. Conforme o esperado, os bairros mais próximos à refinaria são os mais afetados pela sua emissão.

Das diferentes condições iniciais utilizadas nos cenários, conclui-se que, por serem menos efetivos no processo de dispersão, ventos de menor intensidade estarão associados a situações de maior concentração de poluentes.

Da maneira como foi feito, apresentou-se no estudo de caso um método de monitoramento ambiental cuja adaptação a Sistemas de Informação Geográfica e operacionalização proporcionará aos seus usuários uma útil ferramenta no planejamento urbano e no prognóstico de cenários críticos de poluição.

### **6.3 Trabalhos Futuros**

Sugere-se para o futuro, além da inclusão de uma forçante no eixo  $z$ , a utilização de rotinas que considerem a topografia local e os efeitos de *plume rise*. Estas alterações, apesar de aumentarem o esforço computacional, trarão provavelmente uma maior precisão às estimativas de concentração.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARIMITSU, T. A. N. Analysis of fully developed turbulence in terms of tsallis statistics. **Physics Review**, E, n. 61, p. 3237, 2000.

BECK, C. Application of generalized thermostatics to fully developed turbulence. **Physica A**, p. 115–277, 2000.

BORGAS, M. S. A comparison of intermittency models in turbulence. **Phys. Fluids**, v. 4, n. 9, p. 2055–2061, 1994.

BORGAS, M. S.; SAWFORD, B. L. Stochastic equations with multifractal random increments of modeling turbulent dispersion. **Phys. Fluids**, v. 6, n. 2, p. 618–633, 1994.

BURROUGH, P. A.; MCDONNELL, R. A. **Principles of Geographical Information Systems**. Oxford: Oxford University Press, 1998. (Spatial Information Systems).

CRANCK, J. **The Mathematics of Diffusion**. Oxford: Clarendon Press, 1956.

CSANADY, G. T. **Turbulent Diffusion in the Environment**. Dordrecht: D. Reidel Publishing Company, 1973. (Geophysics and Astrophysics Monographs).

DEGRAZIA, G. A. Modelling dispersion from elevated sources in a planetary boundary layer dominated by moderate convection. **Il Nuovo Cimento**, v. 21, n. C(3), p. 345–353, Maio-Junho 1998.

DEGRAZIA, G. A.; ANFOSSI, J. P. L. D.; VELHO, H. F. C. Universality of the lagrangian velocity structure function constant: The landau objection. **Annals of Brazilian Academy of Sciences**, v. 71, n. 3-I, p. 351–359, 1999.

DEGRAZIA, G. A.; MORAES, O. L. L. A model for eddy diffusivity in a stable boundary layer. **Boundary-Layer Meteorology**, n. 58, p. 205–214, 1992.

DEGRAZIA, G. A.; VELHO, H. F. C.; CARVALHO, J. C. Nonlocal exchange coefficients for the convective boundary layer derived from spectral properties. **Beitrag zur Physik der Atmosphäre**, v. 70, n. 1, p. 57–64, 1997.

DUDHIA, J.; GILL, D.; GUO, Y. R.; MANNING, K.; WANG, W.; CHISZAR, J. **Mesoscale Modeling System Tutorial — Class Notes and User's Guide: MM5 Modeling System version 3.** USA, 2000.

FRISCH, U. **Turbulence: The Legacy of A. N. Kolmogorov.** Cambridge: Cambridge University Press, 1995.

HANNA, S. R.; BRIGGS, G. A.; JR., R. P. H. **Handbook on Atmospheric Diffusion.** Springfield, VA22161: National Technical Information Center - U. S. Department of Commerce, 1982. 102 p.

IBGE. **Censo de 1991.** Brasil, 1991.

KAIMAL, J. C.; FINNIGAN, J. J. **Atmospheric boundary layer flows - Their Structure and measurements.** Oxford: Oxford University Press, 1994.

LEE, D. T.; SCHACHTER, B. J. Two algorithms for constructing a delaunay triangulation. **International Journal of Computer and Information Sciences**, v. 9, n. 3, p. 219–242, 1980.

LIGHTHILL, M. J. **Fourier Analysis and Generalized Functions.** Cambridge: Cambridge University Press, 1962.

LUMLEY, J. L.; PANOFSKY, H. A. **The Structure of Atmospheric Turbulence.** London: Interscience Publishers, 1964. (Monographs and Texts in Physics and Astronomy).

MANGIA, C.; DEGRAZIA, G.; RIZZA, U. An integral formulation for the dispersion parameters in a shear-buoyancy-driven planetary boundary layer for use in a gaussian model for tall stacks. **J. R. Meteorol. Soc.**, n. 113, p. 81–105, 1987.

MIKKELSEN, T.; LARSEN, S. E.; PÉCSELI, H. L. Diffusion of gaussian puffs. **J. R. Meteorol. Soc.**, n. 113, p. 81–105, 1987.

MINERAL. **Sistema de Separação de Propeno - REVAP.** São José dos Campos, SP, 2001.

MOENG, C. H.; SULLIVAN, P. **Large Eddy Simulation.** Cambridge: Academic Press, 2001. 3000pp p. (Encyclopedia of Atmospheric Sciences).

MOLION, L. C. B. **Considerações sobre a dispersão de poluentes atmosféricos no médio Vale do Paraíba, com ênfase a Caçapava**. São José dos Campos, 1980.

MONIN, A. S.; YAGLOM, A. M. **Statistical fluid mechanics: Mechanics of turbulence**. Cambridge: The MIT Press, 1975.

MOREIRA, D. M.; DEGRAZIA, G. A.; VILHENA, M. T.; RIZZA, U.; MANGIA, C. Modelo euleriano semi-analítico para a dispersão de contaminantes na camada limite planetária. In: DEGRAZIA, G. A.; CAMPOS, C. R. J.; BRAUER, C. R. N. (Ed.). **Tópicos Especiais em Física da Camada Limite Planetária e Modelagem de Processos de Dispersão**. Pelotas: Universidade Federal de Pelotas, RS, 2000. p. 83–93.

NIEUWSTADT, F. T. M.; DOP, H. V. **Atmospheric Turbulence and Air Pollution Modelling**. Dordrecht: D. Reidel Publishing Company, 1981.

OLESEN, H. R.; LARSEN, S. E.; HOSTRUP, J. Modelling velocity spectra in the lower part of the planetary boundary layer. **Boundary-Layer Meteorology**, n. 29, p. 285–312, 1984.

PANCHEV, S. **Dynamic Meteorology**. Dordrecht: D. Reidel Publishing Company, 1985.

PETROBRAS. 2002. Disponível em: <http://www.petrobras.com.br>. Acesso em: 15 março 2002.

RAMOS, F. M.; RODRIGUES, R. N.; ROSA, R. R. Generalized thermostistical description of intermittency and non-extensivity in turbulence and financial markets. **Cond-Mat**, n. 348, p. 9907, 1999.

RIZZA, U.; CASSIANI, M.; GIOSTRA, U.; MANGIA, C. An advanced puff model based on a mixed eulerian/lagrangian approach for turbulent dispersion in the convective boundary layer. **Boundary-Layer Meteorology**, n. 95, p. 319–339, 2000.

RIZZA, U.; MANGIA, C.; DEGRAZIA, G.; TIRABASSI, T. A model for the puff dispersion into the planetary boundary layer. **Int. J. of Environment and Pollution**, v. 14, n. 1–6, 2000.

RIZZA, U.; MANGIA, C.; GIOIA, G. **Large Eddy Simulation**. Lecce, 2002.

SORBJAN, Z. **Structure of the Atmospheric Boundary layer**. New Jersey: Prentice Hall, 1989.

SPACEIMAGING. 2003. Disponível em: <http://www.spaceimaging.com>. Acesso em: 1 janeiro 2003.

STRAUSS, W. **Air Pollution Control**. Sydney: Kluwer Academic Publishers, 1971. (Environmental Science and Thecnology, I).

STULL, R. B. **An Introduciton to Boundary Layer Meteorology**. Dordretch: Wiley-Interscience, 1988. (Atmospheric Sciences Library).

TENNEKES, H. Turbulence: Diffusion, statistics, spectral dynamics. In: FROST, W.; MOULDEN, T. H. (Ed.). **Handbook of Turbulence - Fundamentals and Applications**. London: Plenum Press, 1977. v. 1, p. 127–146.

TENNEKES, H.; LUMLEY, J. L. **First Course in Turbulence**. Massachusetts: Wiley-Interscience, 1972.

VELHO, H. F. C.; ROSA, R. R.; RAMOS, F. M.; PIELK, R. A.; DEGRAZIA, G. A.; NETO, C. R.; ZANANDREA, A. Multifractal model for eddy diffusivity and counter-gradient term in atmospheric turbulence. **Physica A**, v. 295, n. 1/2, p. 219–223, 2001.

WILLIANSON, S. J. **Fundamentals of Air Pollution**. New York: Addison-Wesley Publishing Co., 1973.

ZANNETTI, P. **Air pollution modeling: therories, computational methods, and available software**. New York: Van Nostrand Reinhold, 1990. (Computational Mechanics Publications).

## **PUBLICAÇÕES TÉCNICO-CIENTÍFICAS EDITADAS PELO INPE**

### **Teses e Dissertações (TDI)**

Teses e Dissertações apresentadas nos Cursos de Pós-Graduação do INPE.

### **Manuais Técnicos (MAN)**

São publicações de caráter técnico que incluem normas, procedimentos, instruções e orientações.

### **Notas Técnico-Científicas (NTC)**

Incluem resultados preliminares de pesquisa, descrição de equipamentos, descrição e ou documentação de programa de computador, descrição de sistemas e experimentos, apresentação de testes, dados, atlas, e documentação de projetos de engenharia.

### **Relatórios de Pesquisa (RPQ)**

Reportam resultados ou progressos de pesquisas tanto de natureza técnica quanto científica, cujo nível seja compatível com o de uma publicação em periódico nacional ou internacional.

### **Propostas e Relatórios de Projetos (PRP)**

São propostas de projetos técnico-científicos e relatórios de acompanhamento de projetos, atividades e convênios.

### **Publicações Didáticas (PUD)**

Incluem apostilas, notas de aula e manuais didáticos.

### **Publicações Seriadas**

São os seriados técnico-científicos: boletins, periódicos, anuários e anais de eventos (simpósios e congressos). Constam destas publicações o Internacional Standard Serial Number (ISSN), que é um código único e definitivo para identificação de títulos de seriados.

### **Programas de Computador (PDC)**

São a seqüência de instruções ou códigos, expressos em uma linguagem de programação compilada ou interpretada, a ser executada por um computador para alcançar um determinado objetivo. São aceitos tanto programas fonte quanto executáveis.

### **Pré-publicações (PRE)**

Todos os artigos publicados em periódicos, anais e como capítulos de livros.