

ESTUDO DA DISPERSÃO DE PARTICULADO NA ATMOSFERA  
CONSIDERANDO-SE MEIO FLORESTAL E SUA TOPOGRAFIA

José Luiz Lima Vaz

TESE SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DA COORDENAÇÃO DOS  
PROGRAMAS DE PÓS-GRADUAÇÃO DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE  
FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS  
NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE DOUTOR EM CIÊNCIAS  
EM ENGENHARIA NUCLEAR

Aprovada por:

---

Prof. Edgar Francisco Oliveira de Jesus, D.Sc.

---

Prof. Paulo Fernando Ferreira Frutuoso e Melo, D.Sc.

---

Prof. Carlos Vieira de Barros Leite Filho, D.Sc.

---

Prof. Delson Braz, D.Sc.

---

Prof<sup>ª</sup>. Elaine Rua Rodriguez Rochedo, D.Sc.

---

Prof<sup>ª</sup>. Kenya Moore de Almeida Dias da Cunha, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL

MARÇO DE 2008

VAZ, JOSÉ LUIZ LIMA

Estudo da Dispersão de Particulado na Atmosfera Considerando-se Meio Florestal e sua Topografia [Rio de Janeiro] 2008

XXII, 166 p. 29,7 cm (COPPE/UFRJ, D.Sc., Engenharia Nuclear, 2008)

Tese – Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE

1. Física Nuclear Aplicada
2. Dispersão de Particulado
3. Meio Florestal
4. Técnica de PIXE

I. COPPE/UFRJ II. Título (série)

À minha família, apoio sólido  
de sustentação e estímulo para trilhar em busca  
de soluções.

## AGRADECIMENTOS

Ao Criador do Universo pela oportunidade de completar mais este estágio de aprendizado em minha existência.

Aos meus pais José e Elza pela sólida formação que me proporcionaram, a qual me fortaleceu para trilhar a presente existência.

À minha esposa Lucia pelo apoio prestado durante a elaboração deste trabalho e na jornada que compartilhamos no planeta Terra.

Ao Meu Filho Daniel que teve sacrificado muitos momentos de lazer neste período de ausência do Pai.

À minha irmã Deise pelo apoio prestado e palavras de incentivo.

A toda a minha família pelo apoio, carinho, principalmente pela compreensão, devido às horas subtraídas de nosso convívio.

Ao Exército Brasileiro por ter concedido a minha liberação para a realização deste trabalho.

Aos professores Rex Nazaré Alves, Ronaldo Glicério Cabral e Rudnei Karam Morales pelo empenho durante a fase de liberação para a realização do Curso, pelo apoio e amizade durante todo este período.

Aos Integrantes da Seção de Engenharia Nuclear do Instituto Militar de Engenharia, pelo apoio e colaboração prestados durante a elaboração deste trabalho.

Aos meus orientadores Edgar Francisco Oliveira de Jesus e Paulo Fernando Ferreira Frutuoso e Melo pelo suporte técnico e teórico na realização do trabalho proposto, pela paciência e camaradagem durante todo este período de convívio.

À Dra Kenya Moore de Almeida Dias Cruz por ter possibilitado utilização do acelerador Van de Graff na PUC-RJ e das instalações do Laboratório de Caracterização de Aerossóis, no Instituto de Radioproteção e Dosimetria (IRD). Agradeço, ainda, pela

prestimosa e incansável colaboração prestada durante a fase experimental deste trabalho.

À Dra Elaine Rua Rodriguez Rochedo pela colaboração na análise dos dados, bem como na revisão final deste trabalho.

À M.Sc. Cíntia Lima, pela amizade, apoio e colaboração na irradiação de amostras no acelerador da PUC, e pelas discussões sobre assuntos técnicos.

Ao Sgt Dayner Sebastião Tavares David, do Instituto Militar de Engenharia, pela ajuda prestada na coleta de dados em Angra dos Reis, durante seus momentos de folga.

Aos funcionários e pesquisadores do Van de Graff, em especial ao funcionário Edson pela prestimosa e espontânea colaboração na construção dos suportes para colocação das bombas de lapela. Agradeço também ao Eng Sérgio e funcionários Edson e Nélio pela prestimosa colaboração no auxílio à operação do acelerador, bem como na sua manutenção.

À Técnica Geiza Celeste pela valiosa colaboração no Laboratório de Caracterização de Aerossóis do IRD.

Ao Programa de engenharia Nuclear (PEN) da COPPE, em particular aos pesquisadores, alunos e funcionários do PEN que participaram deste meu período de aprendizado na COPPE.

A todos que direta ou indiretamente colaboraram para a realização deste trabalho.

“Deus nos concede a cada dia uma página nova no livro do tempo; o que colocamos nela corre por nossa conta”.

Emmanuel

Resumo da Tese apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Doutor em Ciências (D.Sc.).

ESTUDO DA DISPERSÃO DE PARTICULADO NA ATMOSFERA  
CONSIDERANDO-SE MEIO FLORETAL E SUA TOPOGRAFIA

José Luiz Lima Vaz

Março / 2008

Orientadores: Edgar Francisco Oliveira de Jesus.

Paulo Fernando Ferreira Frutuoso e Melo.

Programa: Engenharia Nuclear

Neste trabalho, buscou-se avaliar a influência da vegetação na dispersão de uma pluma. Para isto, foi proposta uma metodologia para estimar o valor da concentração de um determinado agente, num ponto localizado no interior de uma região com vegetação.

Os dados obtidos nos experimentos realizados no túnel serviram de suporte para a apresentação de dois modelos que permitissem estimar a concentração existente num ponto específico do túnel, após uma pluma se deslocar no seu interior, passando por obstáculos de vegetação. Nos dois modelos, um dos parâmetros apresentados foi relacionado com a densidade de vegetação através de dados levantados em fotografias retiradas no sentido do ponto de avaliação da concentração para a fonte.

Estes experimentos foram realizados em laboratório, tomando-se pequenas distâncias e uma densidade de vegetação definida. O primeiro modelo considerou a existência de um fator de correção aplicado ao modelo gaussiano, enquanto que no segundo modelo ajustaram-se os dados utilizando-se a equação de Boltzmann. Os dados obtidos em Angra dos Reis foram utilizados para confirmar a tendência encontrada em laboratório, no caso de distâncias maiores e vegetação mais densa.

O primeiro modelo foi validado utilizando-se os dados obtidos das amostras coletadas no interior do Jardim Botânico, obtendo-se erros inferiores a 48%, enquanto que para a validação do segundo modelo necessita-se do levantamento de dados para distâncias maiores, com vegetação mais densa.

Abstract of Thesis presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Science (D.Sc.)

STUDY OF PARTICULATE DISPERSION IN ATMOSPHERE  
CONSIDERING THE ENVIRONMENT AND TOPOGRAPHY

José Luiz Lima Vaz

March / 2008

Advisors: Edgar Francisco Oliveira de Jesus.

Paulo Fernando Ferreira Frutuoso e Melo

Department: Nuclear Engineering

The influence of vegetation in plume dispersion was evaluated. It is showed a methodology to determined the elemental concentration at any point inside a region with different density of vegetation

Two theoretical models were developed based on data obtained from a plume dispersed generated and dispersed inside a tunnel. The parameters were related to the density of vegetation in both models. This density is related to the area of leaves in photography of vegetation in direction of plume dispersion. This simulation was done in a laboratory using a aerosol generator. The experimental data show that the plume dispersion can be simulated by Gaussian model of dispersion modified by a correction factor while a Boltzmann equation was chose to represent the plume dispersion in second experiment.

Aerosol samples were collected in small forest at Angra dos Reis and in Jardim Botânico at Rio de Janeiro. The theoretical models developed in this study were applied to represent the plume dispersion. The first model was used to simulate the plume dispersion in Jardim Botânico and with an error of 48%. The second model was applied to represent the plume behavior in large distance and in a region with more vegetation (more dense).

## Índice

<b>Capítulo 1 – Introdução</b> .....	1
1.1 Objetivo da Tese .....	2
1.2 Organização da Tese .....	2
<b>Capítulo 2 – Fundamentos Teóricos</b> .....	4
2.1 Introdução .....	4
2.2 Estudos Sobre Contaminação Devido a Dispersão.....	8
2.2.1 Em Áreas sem Floresta.....	8
2.2.2 Em Áreas com Floresta.....	9
2.3 Modelos de Dispersão .....	12
2.3.1 Modelo de Pluma Gaussiana .....	14
2.3.1.1 Dispersão sem Obstáculos no Caminho da Pluma .....	14
2.3.1.2 Modelo de Pasquill-Giffort.....	22
2.3.1.3 Dispersão com Obstáculos no Caminho da Pluma .....	27
2.3.2 Modelos Analíticos não Guassianos.....	29
2.3.3 Modelos Numéricos.....	31
2.3.4 Parâmetros Meteorológicos .....	34
2.3.4.1 Vento .....	35
2.3.4.2 Turbulência.....	35
2.3.4.3 Estabilidade Atmosférica.....	36
2.3.4.4 Inversão Térmica .....	37
2.3.4.5 Índices Pluviométricos .....	37
2.4 Método Analítico: A Técnica de PIXE.....	37
2.4.1 Incertezas do Método de PIXE.....	42
2.5 Gerador de Aerossol .....	43

<b>Capítulo 3 – Materiais e Métodos</b> .....	46
3.1 Coleta de Amostras de Aerossóis .....	46
3.1.1 Montagem Experimental para Simulação em Laboratório.....	46
3.1.1.1 Caracterização do Túnel.....	47
3.1.1.2 Calibração do Sistema .....	51
3.1.1.3 Amostragem com Plantas no Túnel.....	53
3.2 Proposta de Modelo .....	63
3.2.1 Modelo Proposto I: Ajuste do Modelo de Dispersão Gaussiana.....	63
3.3 Validação do Modelo Proposto.....	65
3.3.1 Amostragem Realizada no Jardim Botânico .....	66
3.3.2 Amostragem Realizada em Angra dos Reis .....	70
3.4 Análise das Amostras por PIXE.....	71
3.4.1 Calibração do Arranjo de Irradiação .....	73
3.4.2 Limite de Detecção .....	74
3.4.3 Análise de Espectros.....	76
<b>Capítulo 4 – Resultados e discussões</b> .....	77
4.1 Experimentos com Plantas no Túnel .....	77
4.1.1 Arranjo I .....	77
4.1.2 Arranjos II e III.....	77
4.1.3 Modelo Proposto II.....	81
4.2 Validação do Modelo Proposto .....	91
4.2.1 Experimentos Realizados no Jardim Botânico .....	91
4.2.2 Experimentos Realizados em Angra dos Reis.....	94
4.2.3 Validação do Modelo I.....	97
4.3.4 Validação do Modelo II.....	103

<b>Capítulo 5 – Conclusões e Sugestões .....</b>	<b>106</b>
<b>Referências Bibliográficas .....</b>	<b>110</b>
<b>Apêndice A - Calibração das bombas de lapela.....</b>	<b>132</b>
<b>Apêndice B - Tempos de amostragem .....</b>	<b>144</b>
<b>Apêndice C - Resultados dos experimentos realizados no túnel .....</b>	<b>148</b>
<b>Apêndice D - Resultados dos testes estatísticos.....</b>	<b>156</b>
D.1 Testes estatísticos aplicados aos dados do Jardim Botânico.....	156
D.2 Testes estatísticos aplicados aos dados do túnel .....	161

## Índice de Figuras

Figura 2.1. Processos envolvidos na dispersão de efluentes atmosféricos.....	14
Figura 2.2. Liberação contínua de material .....	16
Figura 2.3. Bufada formada pela liberação quase instantânea de material.....	16
Figura 2.4. Sistema de coordenadas .....	20
Figura 2.5. Esquema de coordenadas utilizadas nas equações de pluma gaussiana.....	22
Figura 2.6. Coeficientes de dispersão para o modelo de pluma em área rural .....	26
Figura 2.7. Coeficiente de dispersão para o modelo de pluma em área urbana .....	26
Figura 2.8. Zonas principais do fluxo de ar ao redor de um edifício.....	28
Figura 2.9. Esquema simplificado do processo de emissão de raios x devido à colisão de íons carregados com o átomo.....	38
Figura 2.10. Atomizador com saída constante .....	44
Figura 2.11. Corte lateral do Atomizador.....	45
Figura 3.1. Gráfico mostrando a concentração de Cu nas amostras coletadas no primeiro experimento sem plantas, com as extremidades do túnel fechadas .....	48
Figura 3.2. Gráfico mostrando a concentração de Cu nas amostras coletadas no segundo experimento sem plantas, com uma das extremidades do túnel fechada.....	50
Figura 3.3. Curva da concentração de Cu nas amostras coletadas no terceiro experimento sem plantas, com uma extremidade do túnel aberta .....	51
Figura 3.4. Comparação de resultados teóricos e experimentais do segundo teste sem plantas.....	53
Figura 3.5. Disposição dos vasos de plantas no arranjo I.....	55
Figura 3.6. Plantas posicionadas entre $PT_1$ e $PT_2$ , no arranjo I.....	56

Figura 3.7. Plantas posicionadas entre $PT_2$ e $PT_3$ , no arranjo I.....	56
Figura 3.8. Plantas posicionadas entre $PT_3$ e $PT_4$ , no arranjo I.....	57
Figura 3.9. Disposição dos vasos de plantas no arranjo II .....	58
Figura 3.10. Disposição dos vasos de plantas no arranjo III.....	59
Figura 3.11. Plantas posicionadas entre $PT_1$ e $PT_2$ , no arranjo II.....	60
Figura 3.12. Plantas posicionadas entre $PT_2$ e $PT_3$ , no arranjo II .....	60
Figura 3.13. Plantas posicionadas entre $PT_3$ e $PT_4$ , no arranjo II .....	61
Figura 3.14. Plantas posicionadas entre $PT_1$ e $PT_2$ , no arranjo III .....	61
Figura 3.15. Plantas posicionadas entre $PT_2$ e $PT_3$ , no arranjo III.....	62
Figura 3.16. Plantas posicionadas entre $PT_3$ e $PT_4$ , no arranjo III.....	62
Figura 3.17. Fotografia tirada no Jardim Botânico.....	66
Figura 3.18. Mapa Detalhado do Jardim Botânico.....	67
Figura 3.19. Suporte para os APC utilizados na amostragem no JB.....	69
Figura 3.20. Esquema contendo os pontos de amostragem na Aléia Barbosa Rodrigues.....	70
Figura 3.21. (a) Arranjo experimental da linha de PIXE no acelerador Van de Graaff da PUC-RJ (b) Detalhe da torre suporte de amostras.....	71
Figura 3.22. Esquema simplificado do arranjo experimental utilizado na técnica de PIXE .....	72
Figura 3.23. Curva de eficiência absoluta do detector de Raios X.....	73
Figura 3.24. Curva do limite de detecção do método de PIXE, para elementos leves ( $Z \leq 42$ ), identificados pelas linhas de energia $K_\alpha$ .....	75
Figura 3.25. Curva do limite de detecção do método de PIXE, para elementos pesados ( $Z \geq 43$ ), identificados pelas linhas de energia $L_\alpha$ .....	75

Figura 4.1. Ajuste linear dos valores do parâmetro $k$ em função do percentual de vegetação .....	81
Figura 4.2. Concentrações normalizadas de Cu coletadas nos diversos experimentos	83
Figura 4.3. Cvas das Sigmóides obtidas para os arranjos estudados .....	84
Figura 4.4. Ajuste de sigmóide do arranjo livre para o arranjo I .....	87
Figura 4.5. Ajuste de sigmóide do arranjo livre para o arranjo II .....	87
Figura 4.6. Ajuste de sigmóide do arranjo livre para o arranjo III .....	88
Figura 4.7. Relação entre o percentual de preenchimento da fotografia e o parâmetro $A_2$ da Sigmóide .....	89
Figura 4.8. Concentração de Vanádio amostrado nas posições $P_1$ a $P_{11}$ no Jardim Botânico .....	93
Figura 4.9. Gráfico das concentrações normalizadas de Vanádio coletadas em Angra dos Reis .....	97
Figura 4.10. Relação entre o parâmetro $k$ e o percentual de preenchimento das fotografias de Angra dos Reis .....	100
Figura 4.11. Sigmóides obtidas dos experimentos realizados em Angra dos Reis .....	103
Figura 4.12. Ajuste da Sigmóide de Boltzman aos dados de Angra dos Reis .....	104
Figura A.1. Curva de calibração da bomba de lapela 1 .....	132
Figura A.2. Curva de calibração da bomba de lapela 2 .....	133
Figura A.3. Curva de calibração da bomba de lapela 3 .....	134
Figura A.4. Curva de calibração da bomba de lapela 4 .....	135
Figura A.5. Curva de calibração da bomba de lapela 5 .....	136
Figura A.6. Curva de calibração da bomba de lapela 6 .....	137
Figura A.7. Curva de calibração da bomba de lapela 7 .....	138
Figura A.8. Curva de calibração da bomba de lapela 8 .....	139

Figura A.9. Curva de calibração da bomba de lapela 9.....	140
Figura A.10. Curva de calibração da bomba de lapela 10.....	141
Figura A.11. Curva de calibração da bomba de lapela 11.....	142

## Índice de Tabelas

Tabela 2.1. Classes de estabilidade atmosférica de Pasquill-Gifford.....	24
Tabela 2.2. Classificação da estabilidade atmosférica pela diferença vertical de temperatura .....	25
Tabela 2.3. Equações dos coeficientes de dispersão de Pasquill-Gifford para pluma, com distância à fonte em metros .....	27
Tabela 3.1. Coeficiente de dispersão nas posições de amostragem no túnel .....	52
Tabela 4.1. Concentrações de Cu nas amostras coletadas no arranjo I .....	77
Tabela 4.2. Concentrações de Cu nas amostras coletadas no arranjo II.....	78
Tabela 4.3. Concentrações de Cu nas amostras coletadas no arranjo III.....	78
Tabela 4.4. Concentrações normalizadas de Cu obtidas nas amostras coletadas no túnel .....	79
Tabela 4.5. Taxas mássicas de material liberado nos experimentos estudados.....	79
Tabela 4.6. Valores do parâmetro $k$ e dos percentuais de preenchimento com vegetação .....	80
Tabela 4.7. Concentrações normalizadas de Cu nas amostras coletadas nos diversos arranjos .....	82
Tabela 4.8. Estimativas dos parâmetros das Sigmóides ajustadas a cada conjunto de dados .....	84
Tabela 4.9. Valores de $A_2$ e do menor erro para realizar o ajuste proposto .....	86
Tabela 4.10. Valores correspondentes entre $A_2$ e o percentual de preenchimento da fotografia, em cada arranjo .....	88
Tabela 4.11. Concentrações normalizadas de Cu no arranjo I .....	90
Tabela 4.12. Concentrações normalizadas de Cu no arranjo II.....	90
Tabela 4.13. Concentrações normalizadas de Cu no arranjo III.....	90

Tabela 4.14. Localização dos pontos de amostragem em Angra dos Reis.....	95
Tabela 4.15. Massas e concentrações de Vanádio existentes no material colhido em Angra dos Reis .....	95
Tabela 4.16. Concentrações normalizadas de Vanádio existentes no material colhido em Angra dos Reis.....	96
Tabela 4.17. Coeficientes de dispersão calculados para os locais de amostragem em Angra dos Reis .....	98
Tabela 4.18. Parâmetro de ajuste e percentual de Preenchimento das fotografias de Angra dos Reis .....	99
Tabela 4.19. Dados obtidos no interior do Jardim Botânico .....	101
Tabela 4.20. Parâmetro de Ajuste k e coeficiente de dispersão para as distâncias do Jardim Botânico.....	101
Tabela 4.21. Taxa de liberação mássica $Q_1$ e $Q_2$ , e concentrações de Vanádio obtidas pelo modelo proposto I .....	102
Tabela A.1. Dados da calibração da bomba de lapela 1 .....	132
Tabela A.2. Dados da calibração da bomba de lapela 2.....	133
Tabela A.3. Dados da calibração da bomba de lapela 3 .....	134
Tabela A.4. Dados da calibração da bomba de lapela 4.....	135
Tabela A.5. Dados da calibração da bomba de lapela 5 .....	136
Tabela A.6. Dados da calibração da bomba de lapela 6.....	137
Tabela A.7. Dados da calibração da bomba de lapela 7 .....	138
Tabela A.8. Dados da calibração da bomba de lapela 8 .....	139
Tabela A.9. Dados da calibração da bomba de lapela 9.....	140
Tabela A.10. Dados da calibração da bomba de lapela 10.....	141
Tabela A.11. Dados da calibração da bomba de lapela 11 .....	142



Tabela D.2. Concentrações de V coletadas nas posições dos grupos A e B, ordenadas	158
Tabela D.3. Concentrações de V coletadas nas posições dos grupos A e E.....	158
Tabela D.4. Concentrações de V coletadas nas posições dos grupos A e E, ordenadas .....	159
Tabela D.5. Concentrações de V coletadas nas posições dos grupos C e D .....	160
Tabela D.6. Concentrações de V coletadas nas posições dos grupos C e D, ordenadas .....	161
Tabela D.7. Dados para o teste de Wilcoxon para as amostras coletadas nas posições dos grupos 1 e 3 .....	162
Tabela D.8. Dados para o teste de Wilcoxon para as amostras coletadas nas posições dos grupos 1 e 2 .....	163
Tabela D.9. Dados para o teste de Wilcoxon para as amostras coletadas nas posições dos grupos 1 e 4 .....	163
Tabela D.10. Dados para o teste de Wilcoxon para as amostras coletadas nas posições dos grupos 2 e 3 .....	164
Tabela D.11. Dados para o teste de Wilcoxon para as amostras coletadas nas posições dos grupos 2 e 4 .....	165
Tabela D.12. Dados para o teste de Wilcoxon para as amostras coletadas nas posições dos grupos 3 e 4 .....	165

## **Lista de Siglas**

APC – Amostradores Portáteis com Ciclone

CFC – Clorofluorcarbonos

DFC – Dinâmica dos Fluidos Computacional

EPA – Environmental Protection Agency

IAEA – International Agency of Energy Atomic

IPJBRJ – Instituto de Pesquisas Jardim Botânico do Rio de Janeiro

JB – Jardim Botânico

JBRJ – Jardim Botânico do Rio de Janeiro

LOD – Locally One Dimensional

PARR-1 – Reator de Pesquisa I do Paquistão

PHOENICS – Parabolic, Hiperbolic Or Eliptic Numerical Integration Code Series

PIXE – Particle Induced X Ray Emission

PUC – Pontifícia Universidade Católica – RJ

PVC – Policloreto de Vinila

TSP – Total de Partículas Suspensas

## Lista de Símbolos

$A$	massa atômica em $g$
$A_2$	parâmetro de ajuste na equação de Boltmann
$C$	concentração de material disperso
$\langle C \rangle$	concentração média de material disperso
$\langle C' \rangle$	flutuação da concentração de material disperso
$\langle C_{cv} \rangle_{PT_i}$	concentração de Cu na amostras coletadas no interior do túnel com vegetação
$\langle C_{sv} \rangle_{PT_i}$	concentração de Cu na amostras coletadas no interior do túnel sem vegetação
$d_{aer}$	diâmetro aerodinâmico
$H$	distância da fonte ao solo
$H_B$	altura do prédio
$K_j$	difusividade turbulenta
$K_x$	difusividade turbulenta na direção do eixo $x$
$K_y$	difusividade turbulenta na direção do eixo $y$
$K_z$	difusividade turbulenta na direção do eixo $z$
$K_{PT_i}$	parâmetro do ajuste exponencial na posição $PT_i$
$l$	distância percorrida na amostra pelos raios X
$N_x$	número de raios X
$N_{XB_s}$	número de contagens da radiação de fundo na região de interesse
$P(x, y)$	distribuição espacial da intensidade do feixe normalizada
$P_i$	posições de amostragem no Jardim Botânico

$PL_i$	posição $i$ no interior do túnel no experimento livre inicial
$PT_i$	posição $i$ no interior do túnel após o ajuste de suas dimensões
$Q$	função probabilidade de transição
$Q^*$	massa fixa de material liberado
$Q_m$	taxa constante de liberação mássica de material
$Q_p$	corrente integrada do feixe no método de PIXE (em $\mu C$ )
$\vec{r}'$	posição no instante $t'$
$S$	termo fonte
$S_p$	área do colimador em $mm^2$
$u$	velocidade do vento na direção do eixo $x$
$u_j$	velocidade do vento
$u'_j$	flutuação estocástica resultante da turbulência
$\langle u_j \rangle$	velocidade média do vento
$v_i$	vazão calibrada
$X_B$	largura do prédio
$x_{PT_i}$	distância da posição $PT_i$ ao gerador de aerossóis
$\Omega$	ângulo sólido submetido pelo detector
$\mu$	coeficiente de absorção linear
$\sigma_x \in$	coeficiente de dispersão na direção do eixo $x$
$\delta_x(E_0)$	seção de choque por produção de raios X por prótons de energia $E_0$
$\varepsilon$	eficiência do detector

## CAPÍTULO 1

### - Introdução -

A crescente preocupação com os efeitos globais devido à liberação de poluentes, principalmente nos grandes centros urbanos e industriais, fez aumentar a preocupação com o transporte de aerossóis.

Uma das representações matemáticas deste transporte é feita considerando plumas que se dispersam segundo uma distribuição gaussiana. Entretanto, até o acidente de Chernobyl, apesar dos obstáculos existentes na trajetória da dispersão da pluma já serem levados em consideração nos modelos, pouca ênfase era dada à presença de florestas e seu efeito na concentração do material disperso. As perturbações causadas por florestas, em especial florestas tropicais, ainda não foram avaliadas.

Neste trabalho não se utilizou Dinâmica dos Fluidos Computacional (DFC), no qual as equações que descrevem o escoamento de fluidos, equações de Navier-Stokes, são resolvidas numericamente com o auxílio de computadores, apesar de existirem alguns pacotes que tratam deste problema disponíveis no mercado, como é o caso do Parabolic, Hiperbolic Or Eliptic Numerical Integration Code Series (PHOENICS). O uso do PHOENICS possibilita uma representação quantitativa do escoamento de fluidos em condições definidas, como geometria, propriedades dos fluidos e condições de contorno. Entretanto, os custos para sua aquisição tornaram inviável a sua utilização. Por este motivo buscou-se desenvolver uma metodologia apoiada em levantamentos experimentais, realizados em laboratório e validados através de medidas de campo.

Nos incidentes e/ou acidentes com dispersão de pluma é necessário estimar o alcance da pluma, os níveis de um determinado poluente tóxico ou radioativo que atingem uma determinada região após um acidente químico ou nuclear, os riscos para a

população exposta e as tomadas de decisões necessárias, como evacuação dessas áreas. Em regiões com vegetação, esta causa uma perturbação no deslocamento da pluma, embora os modelos atuais de dispersão não considerem este efeito.

Neste estudo foi desenvolvida uma metodologia baseada em simulações em laboratório e aplicada para avaliar a dispersão da pluma em uma floresta tropical.

### ***1.1 Objetivo da Tese***

O objetivo deste estudo é desenvolver um modelo de análise de dispersão que possibilite simular a dispersão de uma pluma considerando a perturbação causada por uma vegetação densa.

Para isso, foi necessário atingir os seguintes objetivos específicos:

- a) simular em laboratório a perturbação da vegetação na dispersão da pluma;
- b) determinar um parâmetro de ajuste que represente a perturbação da vegetação na dispersão da pluma;
- c) ajustar os modelos existentes de dispersão gaussiana; e
- d) propor um novo modelo para considerar o efeito de florestas na dispersão.

### ***1.2 Organização da Tese***

A revisão bibliográfica está apresentada no capítulo dois, onde são abordados os seguintes aspectos: estudos existentes sobre modelos de dispersão já adotados, parâmetros meteorológicos que influenciam na dispersão de particulados, Técnica Particle Induced X Ray Emission (PIXE) utilizada na análise das amostras e apresentação do funcionamento de um gerador de aerossóis empregado nos experimentos realizados em laboratório.

No capítulo três, é apresentada a metodologia adotada no levantamento das amostras que serviram de base para a proposta de um modelo que resolvesse o problema proposto. Também, são apresentados os teste realizados num túnel montado em laboratório para garantir a existência de uma distribuição gaussiana da pluma gerada, a metodologia empregada para amostragem no Jardim Botânico para validar o modelo a ser proposto, e a empregada na análise das amostras adotando o método de PIXE.

No capítulo quatro, são apresentados os resultados obtidos nos experimentos realizados no túnel, com e sem vegetação, a discussão dos mesmos e duas propostas de modelo para a solução do problema apresentado. Também é apresentada a validação do modelo proposto utilizando-se os dados levantados no Jardim Botânico (JB) e na região próxima a Angra dos Reis.

No capítulo cinco, são apresentadas as conclusões do presente trabalho, bem como as sugestões para a implementação de pesquisas futuras.

## CAPÍTULO 2

### - Fundamentos Teóricos -

#### 2.1 *Introdução*

O desenvolvimento industrial e o desordenado crescimento urbano foram acompanhados de um aumento da poluição ambiental fazendo com que, nas últimas décadas, a sociedade viesse a se preocupar de forma mais efetiva em avaliar e controlar os riscos para seres humanos e para o meio ambiente devido à exposição a substâncias tóxicas, tais como, metais pesados, compostos orgânicos e os íons  $\text{NO}_x^-$  e  $\text{SO}_x^-$  (ORSINI et al., 1977; LAWSON et al., 1978; TRINDADE et al., 1981; WHITBY 1978; CARVALHO et al., 1988; DIAS DA CUNHA et al, 1994; DIAS DA CUNHA, 1997; DIAS DA CUNHA et al., 1998a, 1998b; SPENKTOR et at., 1991; ADALPE, et al., 1991, 1993 e 1996; SALDIVA et al., 1992; FAIZ et al., 1995; URIBE-HÉNANDEZ et al., 1996; NEJEDLÝ et al, 1998; DIAS DA CUNHA et al., 2000, DIAS DA CUNHA et al., 2002). A presença de poluentes já foi identificada em regiões remotas do planeta, como a Antártida, onde foram observadas partículas contendo Cr, Ni, Cu, Zn e Pb na fração fina do aerossol (ARTAXO et al., 1992; DALIA, 2002) e depositadas em amostras de gelo (PLANCHON et al., 2002; DIAS DA CUNHA et al., 2004). Estudos da qualidade do ar na cidade do Rio de Janeiro mostram altas concentrações de  $\text{NO}_x$  e de particulados no ar. Em 1995, foram estimadas as deposições em ambientes internos de S, Al, Fe e Mn (ALLAN E MIGUEL, 1995). O estudo realizado nos bairros da Gávea e da Ilha do Fundão mostra que existe uma diferença na fonte de aerossóis nestas duas regiões. Na Gávea, a principal fonte de aerossol é a queima de combustível fóssil; enquanto que no Fundão, o aerossol marinho gerado pela ação do intemperismo sobre a Baía de Guanabara é uma importante fonte de poluição para a região (DIAS DA

CUNHA E BARROS LEITE, 2002). Os estudos realizados por TRINDADE et al. (1881) mostram que desde a década de 80 a população do Rio de Janeiro já estava exposta a metais presentes no ar. Nestes trabalhos, foi observada a contribuição do chumbo usado, na época, como aditivo da gasolina.

No meio ambiente, o intemperismo e processos naturais, tais como o transporte de aerossóis, são responsáveis pela dispersão dos elementos do seu termo fonte para outras regiões podendo ocasionar o aumento da concentração destes elementos de origem antropogênica ou natural em regiões distantes de sua origem. Este incremento pode causar danos à fauna, à flora, e aos seres humanos (APOSTOLLI, 1998). A contaminação do ar é provocada principalmente por três tipos de emissões:

- a) Gases resultantes da combustão nos motores de veículos automotores;
- b) Material particulado e gases lançados pelas chaminés de indústrias químicas, siderúrgicas, fábricas, termelétricas e refinarias de petróleo;
- c) Queimadas e incinerações de lixo doméstico e industrial.

Além disso, os aerossóis possuem papel importante no balanço radioativo da atmosfera. Dependendo de suas características, como tamanho e composição química, os aerossóis apresentam propriedades ópticas diferentes, provocando o espalhamento ou a absorção da radiação solar, e conseqüentemente o resfriamento ou aquecimento da atmosfera, (SEINFELD E PARDIS, 1998). Os gases lançados na atmosfera devido à industrialização e a emissões de queimadas absorvem a radiação no infravermelho que é emitida pela superfície terrestre, promovendo o aquecimento da atmosfera, e gerando o fenômeno conhecido como efeito estufa. Os gases  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{O}_3$  troposférico,  $\text{NO}_2$  e compostos halogênicos, provenientes do efeito estufa, possuem papel importante nas alterações climáticas globais. Gases como os clorofluorcarbonos (CFC) e  $\text{NO}_x$ , emitidos na troposfera e que atingem a estratosfera, são responsáveis pela destruição do ozônio

estratosférico, que é responsável pela absorção da radiação ultravioleta emitida pela superfície terrestre e prejudica o desenvolvimento dos seres vivos, (ANDREA, 1999).

Os efeitos causados ao meio ambiente e ao homem são variados, dependendo da toxicidade do metal e do composto químico em que ele aparece. A probabilidade de uma substância produzir efeito adverso está relacionada, primeiramente, com a sua potencialidade intrínseca de produzir efeitos tóxicos e, depois, com a susceptibilidade da população exposta. Os efeitos podem ser de dois tipos: sistêmicos e carcinogênicos. Os poluentes sistêmicos são aqueles que produzem efeitos tóxicos outros, que não seja câncer ou mutação genética. Os poluentes carcinogênicos são aqueles capazes de induzir uma modificação celular e iniciar um processo carcinogênico. Efeitos genéticos são aqueles capazes de induzir uma mutação que seja transmitida aos descendentes da pessoa exposta. Portanto, é necessário conhecer a contaminação potencial de seres humanos decorrentes da exposição ambiental a metais presentes no meio ambiente.

O comportamento de metais como chumbo, cádmio, mercúrio, cromo e vanádio no meio ambiente e em seres humanos vem sendo intensamente estudado (PFEIFFER, 1989; LACERDA et al, 1997; PETERS et al, 1997; GUIMARÃES et al, 1999; MACHADO et al, 2002; MOORE et al, 2003; AGRAWL et al, 2004). Embora as concentrações de  $SO_x$  e  $NO_x$  sejam monitoradas e controladas em todo o mundo, os efeitos destes radicais sobre o meio ambiente e seres humanos dependem das propriedades físico-químicas do ambiente, das vias de incorporação e das características fisiológicas de cada indivíduo. A crescente demanda por bens de consumo e de energia intensifica o ritmo da produção industrial e em particular do refino de óleo. Por outro lado, também é crescente a pressão da sociedade sobre o controle ambiental. Deste modo, é necessário um estudo sistemático para avaliar o impacto no meio ambiente, os

riscos à saúde dos trabalhadores e da população em geral, de modo a criar um programa de controle ambiental que conduza a uma redução dos efeitos poluidores.

Os problemas causados pela poluição do ar são complexos e afetam os processos naturais, influenciando significativamente o balanço ecológico. Por esta razão, é importante estudar e entender os processos de dispersão de poluentes na atmosfera, para que seja possível prever os impactos causados devido à poluição nos diversos ecossistemas envolvidos. A modelagem de fenômenos como o da dispersão torna-se importante para avaliar os riscos ao meio ambiente e a populações que habitam a circunvizinhança de fontes de aerossóis.

A contaminação da vegetação pode ocorrer através da adsorção de metais e / ou substâncias tóxicas contidos em partículas transportadas pelo ar que se depositam nas superfícies das partes aéreas das plantas.

Quando a topografia da região é suficientemente plana, modelos matemáticos simples, que carregam inúmeras correlações empíricas, podem ser empregados, pois a precisão dos resultados é satisfatória. Muitos modelos matemáticos analíticos são aceitos, para fins de regulamentação, por instituições oficiais como *Environmental Protection Agency* (EPA), dos EUA, responsável pelo meio ambiente. Em regiões com topografia complexa (montanhas, edifícios e florestas) estes modelos matemáticos simples já não produzem resultados satisfatórios. Neste caso, os experimentos feitos em laboratório, utilizando um túnel de vento ou um modelo físico em escala reduzida podem ser usados para desenvolver modelos mais complexos para fins da regulamentação ambiental.

Os estudos experimentais em laboratório utilizam um modelo físico da região de interesse, construído em escala reduzida, que é colocado em um túnel de vento ou em um canal para simulação. Um particulado é gerado, passado pela região de interesse e

amostrado em diversos pontos do protótipo para análise futura das concentrações obtidas.

## ***2.2 Estudos Sobre Contaminação Devido a Dispersão***

### ***2.2.1 Em Áreas sem Floresta***

TRINDADE et al. (1981) estudou a concentração de metais e particulados suspensos no ar em dois bairros do estado do Rio de Janeiro devido a diferentes fontes de material particulado aerotransportado. Valores de concentrações acima do padrão, de V, Ni, Fe, Mn, Cr e Zn, foram encontrados no bairro de São Cristóvão, e valores de NaCl acima de 21% do Total de Partículas Suspensas (TSP) foram avaliados ao longo da orla da praia de Copacabana. Foi observada uma variação sazonal nas concentrações de TSP e de muitos metais, principalmente nos meses de abril a agosto, no bairro de São Cristóvão. Os resultados mostraram uma correlação significativa entre o TSP e as concentrações de metais, indicando que esta variação sazonal foi causada pelas condições meteorológicas existentes.

Peter estudou a contaminação de mercúrio devido a minas de ouro na Tanzânia e Zimbábue, na África, onde de 200.000 pessoas estão envolvidas nas atividades das minas em cada uma destas localidades. Verificou-se que entre 70 e 80% de Hg é perdido durante o processamento para a atmosfera, e que de 20 a 30% é perdido para o solo e água, (PETER, 2000).

SHOAIB RAZA E AQBAL (2005) estudaram a dispersão atmosférica devido a um possível acidente causado pela liberação acidental de radionuclídeos do Reator de Pesquisa I do Paquistão (PARR-1). As doses foram calculadas para várias classes de estabilidade, de acordo com as categorias A-F de Pasquill para as condições meteorológicas. Foram levados em consideração os dados meteorológicos das condições

de estabilidade existentes, a velocidade média do vento e a distribuição de frequência da direção do vento nos dados coletados próximo ao reator. As doses efetivas foram calculadas a diferentes distâncias, através do código computacional *HotSpot* desenvolvido pela Universidade da Califórnia, EUA, no Laboratório Nacional de Lawrence Livermore. Os resultados mostraram que uma pessoa localizada nas vizinhanças, a até 500m do reator, poderia receber uma dose superior à permitida em caso de acidentes severos.

### 2.2.2 Em áreas com Floresta

O transporte de aerossóis para longas distâncias é fortemente influenciado pelos obstáculos encontrados por uma pluma em sua trajetória. Os estudos realizados para avaliar o transporte e deposição de radionuclídeos liberados durante o acidente de Chernobyl, em 1986, mostram uma forte influência das florestas na forma de dispersão da pluma.

Ould-Dada et al. (2002a) mostraram a forte influência da borda da floresta na deposição de partículas de aerossóis, uma vez que a deposição de radionuclídeos nas bordas das florestas foi três vezes maior que a deposição sobre pastos abertos. TIKHOMIROV E SHCHEGLOV (1994) já haviam observado que a deposição de aerossol era maior em floresta do que em áreas de pasto.

Após o acidente no reator nuclear em Chernobyl, o  $^{137}\text{Cs}$  (Césio-137) tornou-se o radionuclídeo mais relevante para exposição do público, e o ecossistema das florestas européias foi um dos locais mais contaminados no meio ambiente. MYTTENAERE et al. (1993) estudaram o ciclo global do K (Potássio), na floresta, relacionado com a contaminação de  $^{137}\text{Cs}$ . Como o césio se comporta de forma semelhante ao K, devido a sua incorporação ao ciclo hidrológico e a sua conseqüente mobilidade no

comportamento do vegetal da floresta, ocorre uma competição na utilização do  $\text{Cs}^+$  e o  $\text{K}^+$  pela planta. Neste estudo, foi realizada uma série de medidas experimentais, em diversos setores da floresta, com o intuito de se avaliar a deposição de  $^{137}\text{Cs}$ . Os resultados descreveram a transferência de  $^{137}\text{Cs}$  após uma contaminação atmosférica do ecossistema da floresta.

Os vapores gerados pela queima de combustíveis fósil ao reagirem com o nitrogênio presente na atmosfera formam os íons  $\text{NO}_x^-$  e  $\text{SO}_x^-$  que são um dos principais causadores da chuva ácida. Devido ao baixo pH desta chuva (menor que 4,5) o contato com esta chuva causa, dentre outros danos, a queima e queda das folhas, reduzindo a vida de uma determinada floresta. Alguns tipos de solos possuem a capacidade de neutralizar a acidez da chuva depositada. Quando isto não ocorre, o aumento da acidez do solo soma-se ao efeito sobre as folhas das árvores acelerando o processo de desmatamento da região. Nos estados de Nebraska e Indiana os solos possuem a propriedade de neutralizar a acidez da chuva, enquanto que o solo das Montanhas de Adirondack e Catskill, no estado de Nova Iorque, apresenta pouca capacidade de neutralizar os efeitos da chuva ácida. O aumento da acidez do solo causa ainda um aumento na sua lixiviação natural, fazendo com que estes percam elementos importantes para a manutenção da flora local. As chuvas ácidas também podem prejudicar a fauna e flora de rios, lagos e lagoas, pois podem modificar o pH das águas (EPA, 2006).

Vários outros estudos foram realizados em florestas levando-se em consideração o resultado do *Fallout* global devido a testes com armas nucleares e a acidentes em planta nucleares, como o ocorrido na planta nuclear de Chernobyl (ADRIANO et al., 1981, BUNZL e KRACKE, 1988; ERTEL e ZIEGLER, 1991; SCHIMMACK e BUNZL, 1992; BUNZL et al, 1992; BUNZL et al, 1998; NIKOLOVA et al., 2000; BOSSEW, 2001; GUO et al., 2003). Após este acidente, vários

pesquisadores passaram a estudar o efeito do césio nas copas das árvores e na absorção deste pela vegetação (BENGTSSON, 1992; SCHIMMACK et al., 1993; BONNETT, 1993; HUS et al., 2001; YOSHIDA et al., 2004). Ou seja, estudou-se como ocorreu a deposição seca e úmida deste radionuclídeo até chegar ao solo, quer seja pela deposição ou pela absorção do íon  $Cs^+$  pelo vegetal até chegar a sua raiz. Entretanto, em nenhum destes trabalhos foi avaliada a dispersão horizontal de particulados tendo uma vegetação densa como obstáculo.

No Brasil, os estudos sobre particulados mostram que na bacia amazônica, a composição dos aerossóis liberados das plantas durante as estações chuvosas na floresta varia em relação à composição observada durante o período de seca. Estudos, também realizados nesta floresta mostram a existência de uma correlação entre a composição das partículas presente no aerossol e a composição do solo da floresta, e, mostram também, a presença de partículas de solo e de material biogénético no ar amostrado (ARTAXO E HANS, 1992). Foram identificadas partículas de biomassa que poderiam ter sido geradas durante os processos de queimadas nos períodos de seca (ARTAXO et al., 1993a).

As partículas finas de aerossol encontradas na Amazônia podem ser classificadas principalmente em 4 grupos: partículas de poeira do solo, partículas biogénicas liberadas naturalmente, partículas emitidas da queima de biomassa e partículas de aerossol marinho, sendo que a concentração de material resultante do processo de queima de biomassa é bem elevada, (ARTAXO et al., 1993b). Em 1995, foi constatada a presença de mercúrio na região amazônica proveniente da extração de ouro, das queimadas existentes na floresta tropical e das savanas (HACON et al., 1995).

Os estudos realizados na floresta amazônica levam em consideração a análise de particulados na região amazônica, através da caracterização da sua composição

orgânica (DECESARI et al., 2006), da avaliação da deposição seca e úmida de nitrogênio inorgânico (TREBS et al., 2006), da observação de interações entre aerossóis e nuvens (COSTA et al., 2005), da monitoração do ar na região Amazônica (ARTAXO et al., 1993b; WOUNTERS et al., 1993; ARTAXO et al., 1994; HACON et al., 1995; ECHALAR et al., 1995; ARTAXO et al., 1997; ARTAXO et al., 1998; GERAB et al., 1998a e 1998b; KUBATOVÁ et al., 2000; YAMASOE et al., 2000; ARTAXO et al., 2002; MAENHAUT et al., 2002; GRAHAM et al., 2003; PROCÓPIO et al., 2003; FREITAS et al., 2004; GRAHAN et al., 2004; PROCÓPIO et al., 2004; GUYON et al., 2005, TREBS et al., 2005 e 2006; DECESARI et al., 2006). Uma grande parcela dos trabalhos acima obteve o levantamento de dados através de uma monitoração aérea do ar atmosférico da região Amazônica, ou seja, acima das copas das árvores.

Entretanto, no Brasil, ainda existem poucos trabalhos experimentais que levem em consideração o comportamento de um poluente quando este percorre, através de uma dispersão horizontal, uma área de vegetação densa. Ou seja, trabalhos que permitam estimar a concentração de um determinado particulado, em um certo ponto, em função da densidade da vegetação que ele esteja atravessando e da distância deste ponto ao local de sua liberação para a atmosfera.

### **2.3 Modelos de Dispersão**

Desde o início do século passado vêm sendo propostos modelos que descrevam a dispersão de substâncias na atmosfera. Os primeiros estudos sobre a dispersão foram realizados no período de 1925 a 1936 (RICHARDSON, 1925 e 1926; TAYLOR, 1921 e 1960; ROSSBY, 1932; BOSANQUET E PEARSON, 1936). SUTTON (1932) apresentou uma teoria para a difusão atmosférica. SUTTON (1947) também estudou o problema da difusão na baixa atmosfera a partir de fontes contínuas pontuais, levando

em consideração gases quentes, e supondo uma distribuição gaussiana da concentração a partir da linha central da pluma. FRENKIEL (1952) propôs um modelo que descreve a dispersão da pluma liberada por uma fonte pontual instantânea (*puff*) considerando o gradiente da concentração e assumindo distribuição gaussiana nas direções transversais do vento.

Existem duas maneiras de abordar-se a dispersão de poluentes: o teórico, através da abordagem de modelos matemáticos, e o experimental, através de modelos físicos ou estudos de campo.

A abordagem teórica utiliza modelos matemáticos para descrever o campo de concentração a partir de dados da fonte emissora e das condições meteorológicas. Muitos destes modelos baseiam-se em distribuições estatísticas e necessitam de dados experimentais para que os seus parâmetros sejam estimados.

Os estudos experimentais em laboratório utilizam um modelo físico da região de interesse, construído em escala reduzida, que é colocado em um túnel de vento para simulação. Uma solução contendo um material traçador representa o poluente e as amostras são coletadas em diversos pontos do modelo para posterior análise da concentração.

Dentre os trabalhos que utilizam modelos físicos encontram-se aqueles que utilizam dados experimentais obtidos em um túnel de vento (MELBOURNE, 1968; TEUNISSEN, 1983; SCHATZMAN et al., 1987; PETERSEN E RATCLIFF, 1989; KITABAYASHI, 1991; TURNER, 1994; CARPENTIERE et al., 2004; SHI et al., 2007; WANG et al., 2007; MICHIOKA et al., 2007).

OHBA et al. (1990) realizaram experimentos em túnel de vento para investigar o escoamento de ar e a dispersão de gás em ambiente neutro e estavelmente estratificado sobre terreno complexo, onde foram considerados o relevo e os obstáculos existentes.

Neste estudo, foi usado como modelo, no túnel, um protótipo do terreno de Steptone Butte, uma colina isolada de aproximadamente 300m de altura no estado de Washington, EUA, na qual foram realizados os experimentos de dispersão por LAMB (1985).

### 2.3.1 Modelos de Pluma Gaussiana

#### 2.3.1.1 *Dispersão sem Obstáculos no Caminho da Pluma*

As partículas de aerossóis, em especial a poeira, após a liberação para a atmosfera, são transportadas por correntes aéreas (advecção) e dispersas por processos naturais de difusão atmosférica turbulenta. Estas partículas são removidas da atmosfera pela deposição seca e úmida no solo. Na Figura 2.1 são representados os principais mecanismos envolvidos no processo de deposição e dispersão.

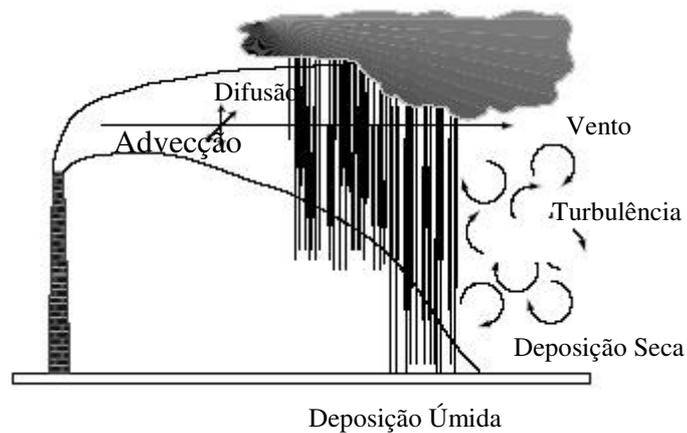


Figura 2.1. Processos envolvidos na dispersão de efluentes atmosféricos (IAEA, 2001).

A deposição seca é o processo que representa a entrada do elemento químico na superfície terrestre na ausência de chuvas. Na deposição úmida, a remoção dos elementos ou substâncias químicas da atmosfera ocorre pela ação de chuvas, geadas ou

neve. No caso de partículas, este processo se resume na colisão e posterior adesão destas com as gotas de precipitação pluviométrica, geadas ou neve. A deposição através da ação da gravidade não costuma ser relevante no caso de liberações rotineiras, normalmente efetuadas através de filtros, porém pode ser relevante em liberações acidentais em que partículas mais pesadas sejam liberadas para a atmosfera.

Os modelos matemáticos para simular a dispersão levam em consideração as características dos aerossóis transportados e as condições climáticas. Estes modelos buscam representar o comportamento do aerossol, fazendo uma estimativa do alcance da pluma, do gradiente de concentração, e dos principais mecanismos de deposição. Após a liberação, a partícula transportada pelo ar é conduzida pelas correntes aéreas na forma de uma pluma ou na forma de uma bufada. A formação de pluma ou bufada está relacionada com as características da liberação do efluente disperso. Na formação de bufada ocorre uma liberação única de uma quantidade fixa de material, enquanto que na formação de pluma, a liberação ocorre de forma contínua.

Os modelos de pluma e os de bufada são comumente adotados para descrever a dispersão de nuvens de vapor. O modelo de pluma descreve a concentração estacionária do material liberado continuamente de uma fonte, enquanto que o modelo de bufada descreve a concentração temporal de uma quantidade fixa de material liberado de uma só vez. As diferenças na forma de dispersão entre os dois modelos são apresentadas nas Figuras 2.2 e 2.3. Um exemplo típico da liberação analisada pelo modelo de pluma é o da liberação contínua de gases de uma chaminé, e um exemplo onde se adota o modelo de bufada é o da liberação súbita de material devido à ruptura de um vaso de pressão.

O modelo de bufadas pode ser empregado para descrever uma pluma, uma vez que esta é simplesmente a liberação de bufadas contínuas. Entretanto, se a informação que se deseja diz respeito ao estado estacionário, recomenda-se utilizar o modelo de

pluma, por ser mais simples (CROWL E LOUVAR, 2002). Para estudos envolvendo plumas dinâmicas, como por exemplo, o estudo do efeito em uma pluma devido à variação da direção do vento, deve-se empregar o modelo de bufadas.

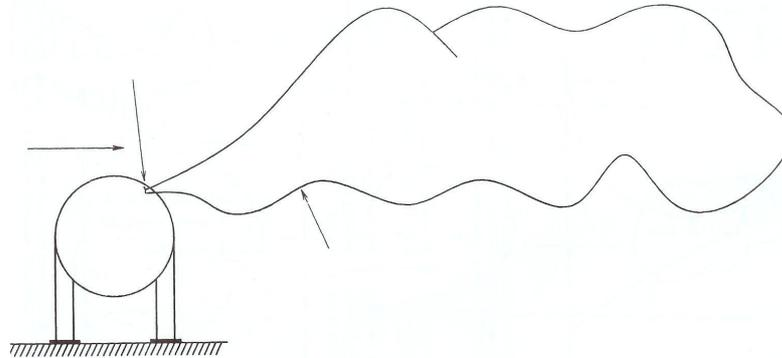


Figura 2.2. Liberação contínua de material (CROWL E LOUVAR, 2002).

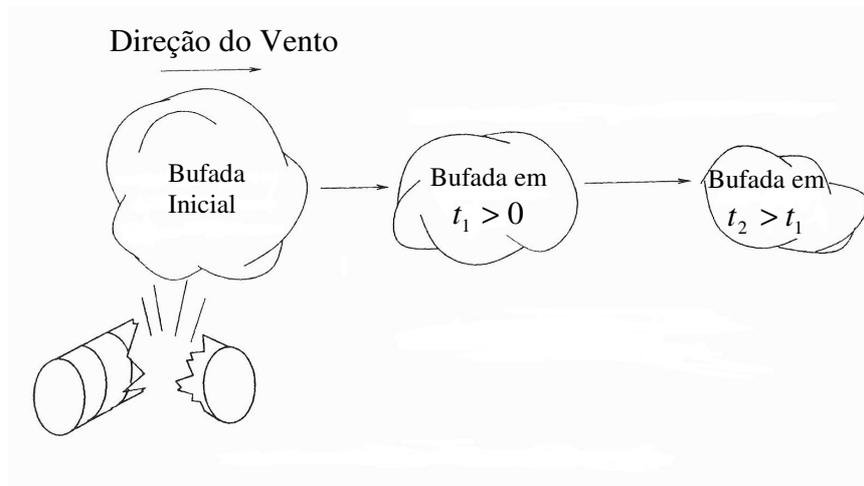


Figura 2.3. Bufada formada pela liberação quase instantânea de material, (CROWL E LOUVAR, 2002).

Considerando-se a liberação instantânea de uma massa fixa de material,  $Q_m^*$ , em uma expansão infinita de ar, que o sistema de coordenadas é fixado na fonte e assumindo-se que não ocorram reações ou difusão molecular, a concentração  $C$  de material devido a esta liberação será dada pela Eq.2.1, de advecção.

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (u_j C) = 0, \quad (2.1)$$

onde  $u_j$  é a velocidade do ar e o índice  $j$  representa a soma sobre todas as direções dos eixos coordenados,  $x$ ,  $y$  e  $z$ . Caso a velocidade  $u_j$ , na Eq.2.1, seja igualada à velocidade média do vento e a Equação for resolvida, encontrar-se-á que o material se dispersa mais rapidamente do que o predito. Isto é devido à turbulência no campo de velocidades. Caso se pudesse especificar a velocidade do vento de forma exata, em função da posição e do tempo, incluindo-se os efeitos devido à turbulência, a concentração predita pela Eq.2.1 seria a correta. No entanto, não existem modelos apropriados para descrever a turbulência. Assim, adota-se uma aproximação, (CROWL E LOUVAR, 2002).

Considerando-se a velocidade do vento representada por uma velocidade média,  $\langle u_j \rangle$ , e por uma flutuação estocástica resultante da turbulência,  $u'_j$ , tem-se a Eq.2.2.

$$u_j = \langle u_j \rangle + u'_j, \quad (2.2)$$

Desse modo, também ocorre a flutuação da concentração de material disperso,  $C'$ , devido ao campo de velocidade assumido, representado pela Eq.2.3.

$$C = \langle C \rangle + C', \quad (2.3)$$

Como as flutuações, tanto em  $C$  como em  $u_j$ , ocorrem em torno dos valores médios, segue-se que as médias destas flutuações são nulas, representadas pela Eq.2.4. Este fato ocorre devido ao modelo ser gaussiano.

$$\langle u'_j \rangle = 0 \text{ e } \langle C' \rangle = 0, \quad (2.4)$$

Substituindo-se as Eqs.2.2 e 2.3 na Eq.2.1 e tomando-se a média da concentração em relação ao tempo, ter-se-á a Eq.2.5.

$$\frac{\partial \langle C \rangle}{\partial t} + \frac{\partial (\langle u_j \rangle \langle C \rangle)}{\partial x_j} + \frac{\partial \langle u'_j C' \rangle}{\partial x_j} = 0, \quad (2.5)$$

Os termos  $\langle u_j \rangle C'$  e  $u'_j \langle C \rangle$  são nulos quando se tomam as suas médias, pois, no caso do primeiro termo tem-se  $\langle \langle u_j \rangle C' \rangle = \langle u_j \rangle \langle C' \rangle$  e  $\langle C' \rangle = 0$ , enquanto que no segundo termo tem-se  $\langle u'_j \langle C \rangle \rangle = \langle u'_j \rangle \langle C \rangle$  e  $\langle u'_j \rangle = 0$ . Entretanto, o termo relacionado com o fluxo turbulento não é necessariamente nulo, permanecendo na Equação.

Para se descrever o fluxo turbulento, necessita-se de uma Equação adicional. A abordagem mais usual é definir uma difusividade turbulenta,  $K_j$  (com unidades de área/tempo), conforme a Eq.2.6, que substituída na Eq.2.5, tem-se a Eq.2.7.

$$\langle u'_j C' \rangle = -K_j \frac{\partial \langle C \rangle}{\partial x_j}, \quad (2.6)$$

$$\frac{\partial \langle C \rangle}{\partial t} + \frac{\partial (\langle u_j \rangle \langle C \rangle)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( K_j \frac{\partial \langle C \rangle}{\partial x_j} \right), \quad (2.7)$$

Admitindo-se que a atmosfera seja incompressível, ou seja, que a densidade se mantenha constante apesar de variações de pressão e temperatura, tem-se a Eq.2.8, que substituída na Eq. 2.7, após aplicar a derivada no seu segundo termo, resulta na Eq.2.9.

$$\frac{\partial \langle u_j \rangle}{\partial x_j} = 0, \quad (2.8)$$

$$\frac{\partial \langle C \rangle}{\partial t} + \langle u_j \rangle \frac{\partial \langle C \rangle}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( K_j \frac{\partial \langle C \rangle}{\partial x_j} \right), \quad (2.9)$$

A Eq.2.9 juntamente com as hipóteses iniciais e as condições de contorno formam a base fundamental para a modelagem da dispersão. Ou seja, as condições que levem em consideração, por exemplo, a existência de vento ou não, direção do vento, estado estacionário ou não, liberação contínua ou não, entre outras.

O sistema de coordenadas adotado nos modelos de dispersão é mostrado Figura 2.4, onde o eixo  $x$  é a linha central na direção a jusante do vento a partir do ponto de liberação e é girado para diferentes direções do vento, o eixo dos  $y$  é a distância a partir da linha central, perpendicular à direção preferencial do vento e o eixo dos  $z$  é a elevação acima do ponto de liberação. O ponto  $(x, y, z) = (0,0,0)$  está situado no ponto de liberação, as coordenadas  $(x, y, 0)$  definem o plano onde ocorre a liberação de material e as coordenadas  $(x, 0, 0)$  definem a reta ao longo da linha central da liberação.

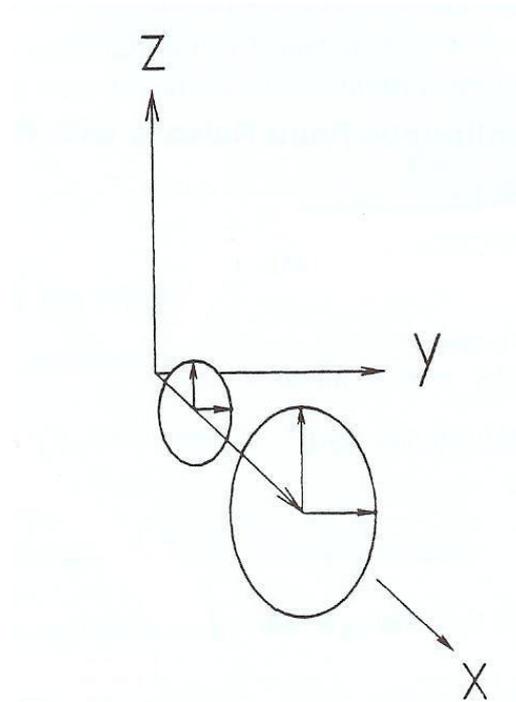


Figura 2.4. Sistema de coordenadas (CROWL E LOUVAR, 2002).

Seja um cenário no qual são assumidas as seguintes hipóteses iniciais:

a) a taxa de liberação mássica de material é constante e igual a  $Q_m$  ;

b) estado estacionário,  $\frac{\partial \langle C \rangle}{\partial t} = 0$  ;

c) vento soprando somente na direção dos  $x$ ,  $\langle u_j \rangle = \langle u_x \rangle = u$ , onde  $u$  é constante;

d) a difusividade turbulenta depende da direção e, portanto, são consideradas três difusividades,  $K_x$ ,  $K_y$  e  $K_z$  ;

e) a pluma é delgada, ou seja, a pluma é comprida e não se afasta muito do eixo dos  $x$ ; e

f) fonte localizada no solo.

Neste caso, a Eq.2.9 acima se reduz à Eq.2.10.

$$u \frac{\partial \langle C \rangle}{\partial x} = K_x \frac{\partial^2 \langle C \rangle}{\partial x^2} + K_y \frac{\partial^2 \langle C \rangle}{\partial y^2} + K_z \frac{\partial^2 \langle C \rangle}{\partial z^2}, \quad (2.10)$$

A Eq.2.11 representa a solução da Eq.2.10, resolvida considerando-se que  $\langle C(x, y, z) \rangle = 0$  quando  $y, z \rightarrow \pm\infty$ , (SEINFELD, 2006). Assim, pode-se calcular a concentração média de material existente numa determinada posição em função da taxa de liberação, da velocidade do vento e dos coeficientes de difusividade turbulenta, após a liberação contínua de material proveniente de uma fonte localizada no solo.

$$\langle C \rangle(x, y, z) = \frac{Q_m}{2\pi x \sqrt{K_y K_z}} \exp\left[-\frac{u}{4x} \left(\frac{y^2}{K_y} + \frac{z^2}{K_z}\right)\right], \quad (2.11)$$

Quando a fonte estiver situada a uma altura  $H$  do solo, conforme mostrado na Figura 2.5, a solução do problema pode ser obtida pela Eq.2.12 (SEINFELD, 2006). Neste caso, a altura efetiva de liberação de material para a atmosfera aumenta. Nesta equação, a primeira exponencial representa a dispersão em relação à linha central de dispersão, enquanto que a soma das exponenciais restantes representa a dispersão em relação à cota  $Z = H$ . No caso particular onde  $H = 0$ , a Eq.2.12 se reduz à Eq.2.11.

$$\langle C \rangle(x, y, z) = \frac{Q_m}{4\pi x \sqrt{K_y K_z}} \exp\left(-\frac{u}{4x} \frac{y^2}{K_y}\right) \left\{ \exp\left(-\frac{u}{4x K_z} (z-H)^2\right) + \exp\left(-\frac{u}{4x K_z} (z+H)^2\right) \right\}, \quad (2.12)$$

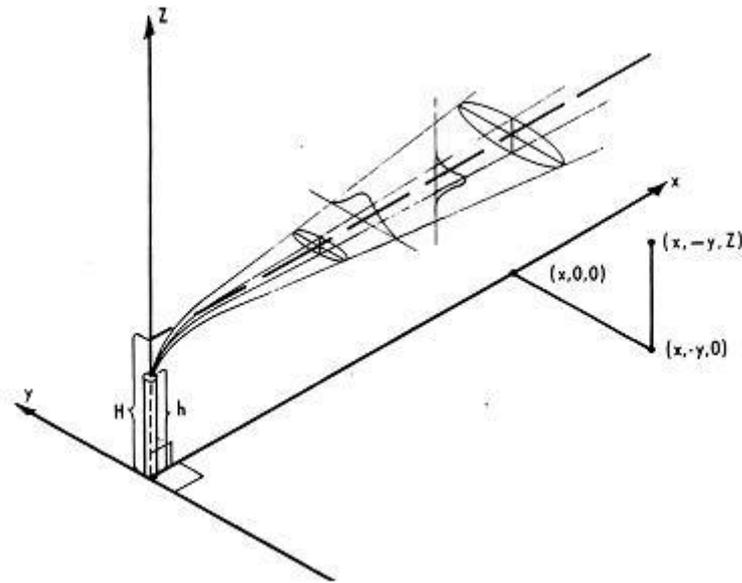


Figura 2.5. Esquema de coordenadas utilizadas nas equações de pluma gaussiana (EPA, 1970).

### 2.3.1.2 Modelo de Pasquill-Gifford

O caso analisado anteriormente depende da especificação de um valor para a difusividade turbulenta,  $K_j$ . Na maioria das vezes, o  $K_j$  muda com a posição, com o tempo, com a velocidade do vento e com as condições climáticas. Do ponto de vista teórico, a abordagem da difusividade turbulenta é útil, mas não é conveniente do ponto de vista experimental.

SUTTON (1953) resolveu esta dificuldade propondo a definição de um coeficiente de dispersão  $\sigma_x$ , descrito na Eq.2.13, com relações similares para  $\sigma_y$  e  $\sigma_z$ . Os coeficientes de dispersão representam os desvios padrão da concentração nas direções do vento ( $x$ ), perpendicular horizontal do vento ( $y$ ) e vertical ( $z$ ).

$$\sigma_x^2 = \frac{1}{2} \langle C \rangle^2 (ut)^{2-n}, \quad (2.13)$$

onde  $u$  representa a velocidade do vento na direção do eixo dos  $x$ ,  $t$  o tempo,  $\langle C \rangle$  a concentração média de material liberado e  $n$  um parâmetro,  $0 < n < 1$ , que depende das condições atmosféricas.

É mais fácil obter-se experimentalmente os valores dos coeficientes de dispersão do que das difusividades turbulentas. Os coeficientes de dispersão atmosférica dependem das condições atmosféricas e da distância a montante, a partir do ponto de liberação.

As condições atmosféricas são classificadas de acordo com seis classes diferentes de estabilidade, conforme mostrado na Tabela 2.1. As classes de estabilidade dependem da velocidade do vento e da intensidade da radiação solar.

Os coeficientes de dispersão  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$  e  $\sigma_z$  para uma fonte contínua foram desenvolvidos por Gifford e são apresentados nas Figuras 2.6 e 2.7, e as correlações correspondentes são apresentadas na Tabela 2.3. Não são fornecidos valores de  $\sigma_x$ , uma vez que é razoável admitir-se que  $\sigma_x = \sigma_y$ .

As equações referentes ao cenário descrito anteriormente foram novamente deduzidas por Pasquill utilizando as relações da forma da Eq.2.13. Estas equações juntamente com as correlações para os coeficientes de dispersão são denominadas de modelo de Pasquill-Gifford, (CROWL E LOUVAR, 2002).

Para as mesmas condições descritas no cenário em estudo, a expressão da concentração média foi novamente deduzida, levando-se em consideração o coeficiente de dispersão, e expressa através da Eq.2.14, onde  $H$  representa a altura efetiva de liberação de material para atmosfera, (SEINFELD, 2006).

$$\langle C \rangle(x, y, z, H) = \frac{Q}{2\pi\sigma_y\sigma_z u} \exp\left[-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right] \left\{ \exp\left[-\frac{(z-H)^2}{2\sigma_z^2}\right] + \exp\left[-\frac{(z+H)^2}{2\sigma_z^2}\right] \right\}, \quad (2.14)$$

No caso particular da fonte estar situada ao nível do solo ( $H = 0$ ), as concentrações ao longo da linha central no solo são determinadas fazendo-se  $y = z = 0$  na Eq.2.14, ou seja, esta equação se reduz à Eq.2.15.

$$\langle C \rangle(x,0,0,0) = \frac{Q}{\pi\sigma_y\sigma_z u}, \quad (2.15)$$

Tabela 2.1. Classes de estabilidade<sup>1</sup> atmosférica de Pasquill-Gifford, (CROWL E LOUVAR, 2002).

Velocidade do Vento superficial a 10m (m/s)	Dia			Noite <sup>3</sup>	
	Entrada de Radiação Solar <sup>2</sup>			Encoberto ou > 4/8 de nuvens baixas	≤ 3/8 de nuvens baixas
	Forte	Moderada	Fraca		
< 2	A	A – B	B	–	–
2 – 3	A – B	B	C	E	F
3 – 5	B	B – C	C	D	E
5 – 6	C	C – D	D	D	D
> 6	C	D	D	D	D

1. As classes de estabilidade são: A (extremamente instável), B (Moderadamente Instável), C (levemente instável), D (neutra), E (Levemente Estável) e F (Moderadamente Estável).

2. Radiação solar forte corresponde ao meio dia de um dia ensolarado no meio do verão na Inglaterra. Radiação solar fraca corresponde a condições similares, mas no meio do inverno.

3. Noite corresponde o período entre uma hora antes do nascer do sol e uma hora após o por do sol.

Uma solução mais adequada, no entanto, pode ser efetuada através da avaliação dos coeficientes verticais de temperatura, isto é, através da medida do gradiente de temperatura  $T$  em função da altura  $z$ ,  $\Delta T/\Delta z$ , conforme apresentado na Tabela 2.2.

Tabela 2.2. Classificação da estabilidade atmosférica pela diferença vertical de temperatura.

Classificação	Categoria de Pasquill	Variação de temperatura com a altura ( $^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ )
Extremamente instável	A	$\Delta T/\Delta z \leq -1,9$
Moderadamente instável	B	$-1,9 < \Delta T/\Delta z \leq -1,7$
Ligeiramente instável	C	$-1,7 < \Delta T/\Delta z \leq -1,5$
Neutra	D	$-1,5 < \Delta T/\Delta z \leq -0,5$
Ligeiramente estável	F	$-0,5 < \Delta T/\Delta z \leq 1,5$
Moderadamente estável	G	$1,5 < \Delta T/\Delta z \leq 4,0$
Extremamente estável	H	$4,0 < \Delta T/\Delta z$

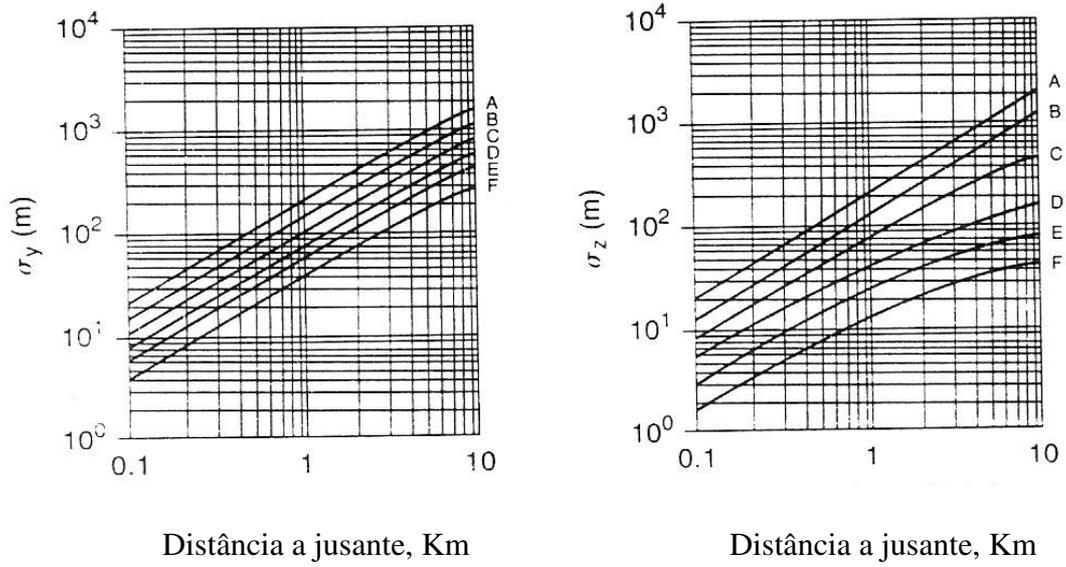


Figura 2.6. Coeficientes de dispersão para o modelo de pluma em área rural, (CROWL E LOUVAR, 2002).

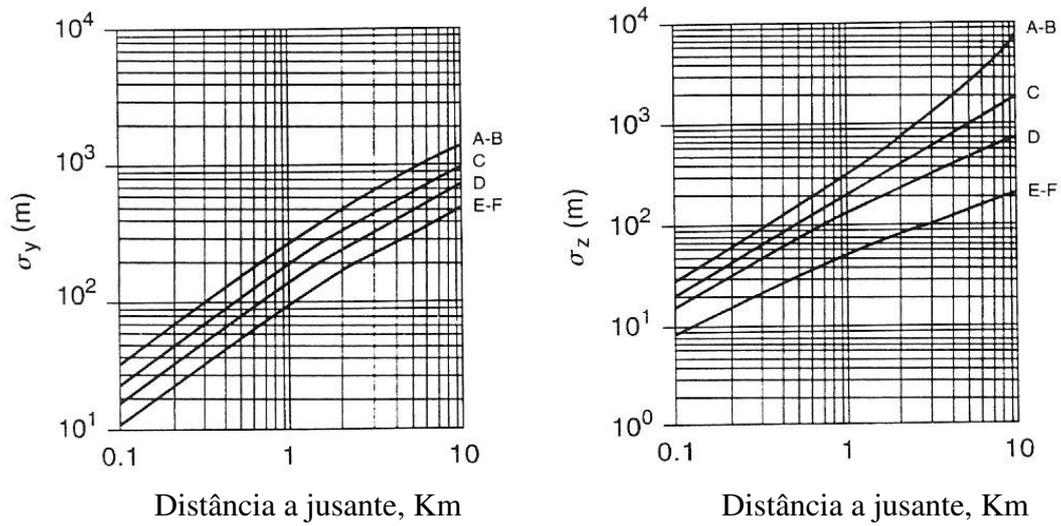


Figura 2.7. Coeficientes de dispersão para o modelo de pluma em área urbana, (CROWL E LOUVAR, 2002)

Tabela 2.3. Equações dos coeficientes de dispersão de Pasquill-Gifford para Pluma, com distância à fonte em metros, (CROWL E LOUVAR, 2002).

Classes de Estabilidade de Pasquill-Gifford	$\sigma_y$ (m)	$\sigma_z$ (m)
<b>Área Rural</b>		
A	$0.22x(1 - 0.0001x)^{-1/2}$	$0.20x$
B	$0.16x(1 - 0.0001x)^{-1/2}$	$0.12x$
C	$0.11x(1 - 0.0001x)^{-1/2}$	$0.08x(1 + 0.0002x)^{-1/2}$
D	$0.08x(1 - 0.0001x)^{-1/2}$	$0.06x(1 + 0.0015x)^{-1/2}$
E	$0.06x(1 - 0.0001x)^{-1/2}$	$0.03x(1 + 0.0003x)^{-1}$
F	$0.04x(1 - 0.0001x)^{-1/2}$	$0.016x(1 + 0.0003x)^{-1}$
<b>Área Urbana</b>		
A-B	$0.32x(1 - 0.0004x)^{-1/2}$	$0.24x(1 + 0.0001x)^{+1/2}$
D	$0.22x(1 - 0.0004x)^{-1/2}$	$0.20x$
D	$0.16x(1 - 0.0004x)^{-1/2}$	$0.14x(1 + 0.0003x)^{-1/2}$
E-F	$0.11x(1 - 0.0004x)^{-1/2}$	$0.08x(1 + 0.0015x)^{-1/2}$

Os valores de  $\sigma_y$  e  $\sigma_z$  variam com a estrutura turbulenta da atmosfera, altitude acima da superfície, rugosidade da superfície, velocidade do vento, e intervalo de tempo de amostragem para a qual a concentração está sendo estimada. Os modelos de Pasquill-Gifford ou de dispersão gaussiana aplicam-se apenas onde o efeito turbulento é dominante. Estes modelos são tipicamente válidos apenas para distâncias de 0,1 a 10 km do ponto de liberação (CROWL E LOUVAR, 2002).

### 2.3.1.3 Dispersão Com Obstáculos no Caminho da Pluma

Após o acidente de Chernobyl tornou-se evidente a necessidade de considerar na dispersão de pluma os efeitos causados pela presença de obstáculos, deste modo crescem o número de estudos que levam em consideração estas perturbações. Nesta abordagem, o modelo gaussiano de pluma leva em consideração a relação entre a altura onde o efluente está sendo liberado e a altura do edifício que altera o fluxo de ar próximo do ponto de liberação. O fluxo de ar idealizado ao redor de um único edifício é

mostrado na Figura 2.8, onde podem ser visualizadas três zonas principais, (IAEA, 2001).

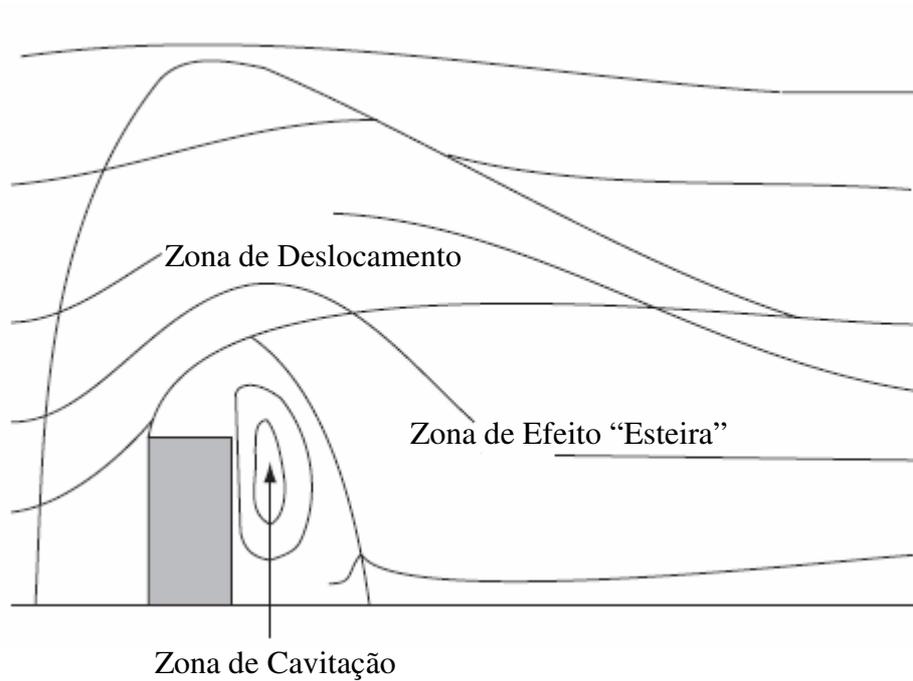


Figura 2.8. Zonas principais do fluxo de ar ao redor de um edifício, (IAEA, 2001).

A zona de deslocamento é considerada aquela em que o fluxo de ar não sofre efeito das estruturas próximas à fonte. A Zona de Cavitação normalmente ocorre muito próxima da fonte, sendo de relevância menor para se estimar a exposição do público. Fatores de correção para esta zona são encontrados na literatura, (IAEA, 2001).

Para região em que a distância entre a fonte e o receptor for superior a 2,5 vezes a raiz quadrada da seção transversal do prédio que mais afeta o escoamento de ar, chamada zona de efeito “esteira”, os parâmetros  $\sigma_y$  e  $\sigma_z$  devem ser substituídos por  $\Sigma_y$  e  $\Sigma_z$ , estimados pelas Eqs.2.16 e 2.17, (IAEA, 2001).

$$\Sigma_y = \left( \sigma_y^2 + \frac{A_B^2}{\pi} \right)^{1/2}, \quad (2.16)$$

$$\Sigma_z = \left( \sigma_z^2 + \frac{A_B^2}{\pi} \right)^{1/2}, \quad (2.17)$$

Onde  $A_B = H_B^2$ , quando  $X_B < H_B$ , ou  $A_B = H_B \cdot X_B$ , quando  $X_B > H_B$ , quando  $H_B$  e  $X_B$  representam a altura e a largura do prédio, respectivamente.

### 2.3.2 Modelos Analíticos não Gaussianos

O modelo de pluma gaussiana é amplamente empregado, embora seja inadequado para incluir variações da velocidade do vento com a altura e não homogeneidade nas condições de turbulência. Segundo PANOFSKY (1984, cap. 10), a distribuição lateral da concentração, bem como a distribuição vertical no caso de fontes elevadas, é geralmente gaussiana, embora a distribuição vertical para fontes ao nível do solo não o seja. A fim de considerar melhor o efeito da variação da velocidade do vento e da difusão turbulenta na atmosfera foram desenvolvidos modelos baseados na solução analítica da concentração, Eq.2.18.

$$\frac{\partial \langle C \rangle}{\partial t} + \underbrace{\vec{u} \cdot \vec{\nabla} \langle C \rangle}_{\text{Termo Convectivo}} = \underbrace{\vec{\nabla} \cdot \left( \overline{\vec{K}} \cdot \vec{\nabla} \langle C \rangle \right)}_{\text{Termo Difusivo}} + \underbrace{\sum}_{\text{Termo Fonte}}, \quad (2.18)$$

onde  $u$  representa a velocidade do vento,  $C$  a concentração média e  $S$  o termo fonte.

Como a Equação completa, na sua forma tridimensional, não possui soluções analíticas, são formuladas hipóteses a fim de simplificá-la, tornando possível a obtenção de tais soluções. É importante observar que as equações do modelo de pluma gaussiana

podem ser determinadas a partir da solução da Eq.2.18, simplificando-a de acordo com as hipóteses do modelo.

Nos modelos analíticos não-gaussianos, a velocidade do vento na direção  $x$  é considerada como função da altura,  $u = u(z)$ , enquanto que  $v$  e  $w$  (velocidades do vento nas direções  $y$  e  $z$ , respectivamente) continuam nulas, assim como assume uma variação do coeficiente de difusão vertical com a altura,  $k_z = k_z(z)$ . Este procedimento mantém a simplicidade dos modelos gaussianos enquanto que teoricamente, pode representar a não homogeneidade vertical da atmosfera. Para tal, no entanto, é necessário determinar a variação da velocidade e da difusividade vertical com a altura, de acordo com os parâmetros meteorológicos, tais como a estabilidade atmosférica, a altura da camada de inversão, entre outros. Vários trabalhos realizados tratam deste assunto fornecendo expressões para a variação da difusividade vertical (LAMB et al., 1975; LAMB E DURAN, 1977; MYRUP e RANZIERI, 1976; O`BRIEN, 1970; BUSSINGER E ARYA, 1974). Com relação à velocidade do vento, em condições de estabilidade neutra, o perfil de velocidade na camada limite atmosférica é aproximadamente logarítmico, como apresentado por SEINFELD (1986, cap.12; 2006). Para atmosferas não neutras, BENOIT (1977) apresenta perfis de velocidade para casos de estratificação estável e instável em função do comprimento de Monin-Obukhov (o grau de estabilidade ou instabilidade atmosférica), da velocidade de fricção e da rugosidade do terreno.

Embora todas as expressões para o cálculo da variação da difusividade vertical e da velocidade do vento tenham razoável concordância com os dados experimentais para terreno plano, geralmente apresentam grande complexidade. E, mesmo quando ocorre a sua inserção direta na Eq.2.18, não é possível obter-se a solução analítica.

Assim, para a obtenção de soluções exatas, devem ser utilizados aproximações e perfis com expressões mais simples.

Entre as soluções apresentadas para a Eq.2.18 está a solução bidimensional de DEMUTH (1978) que considera a altura de dispersão limitada por uma camada de inversão, e a de HUANG (1979), que é tridimensional, mas onde a altura para dispersão é ilimitada. Uma combinação destas duas soluções foi utilizada por TIRABASSI (1986) em seu modelo de dispersão KAPPAG. Uma breve revisão dos modelos analíticos não gaussianos foi feita por TIRABASSI et al. (1989).

Apesar de mais sofisticados que os modelos gaussianos, os modelos analíticos não-gaussianos possuem algumas das limitações encontradas nos modelos gaussianos, como por exemplo, os de serem aplicáveis para casos de terrenos planos, escoamento atmosférico unidimensional e difusividade lateral constante.

### 2.3.3 Modelos Numéricos

As limitações impostas pelas hipóteses simplificadas requeridas pelos modelos analíticos podem ser superadas, procurando-se modelos mais genéricos baseados na solução da Eq.2.18 em sua forma bi ou tridimensional completa, em que as difusividades turbulentas e as componentes de velocidade sejam funções do espaço e, possivelmente, do tempo. O campo de velocidade, presente nos termos convectivos da Eq.2.18, caso também deve ser resolvido de forma completa, através das soluções das equações de Navier-Stokes.

Duas abordagens podem ser empregadas para a descrição do transporte de uma propriedade escalar: a euleriana e a lagrangeana. A abordagem euleriana baseia-se no balanço da propriedade (massa no caso de dispersão de uma espécie química) sobre um volume infinitesimal fixo no espaço, enquanto que a abordagem lagrangeana baseia-se

em acompanhar o deslocamento de uma partícula de fluido e a variação em suas propriedades. Entendendo-se por partícula de fluido, um volume que é grande quando comparado com dimensões moleculares, mas pequeno o suficiente para se comportar como um ponto que segue o escoamento, ou seja, de dimensões muito menores que as dimensões características deste. Nas duas abordagens existem dificuldades matemáticas que não permitem uma solução exata, no escoamento turbulento, para a concentração média de material particulado ou gases, (SEINFELD, 2006).

A Eq.2.18 representa a equação fundamental para a concentração média no método euliano, onde o termo fonte engloba emissões, remoções e reações químicas. Enquanto que no método lagrangeano, a Eq.2.19 representa a Equação fundamental para a concentração média. (SEINFELD, 1986, cap.13; SEINFELD, 2006).

$$\left\langle c(\vec{r}, t) \right\rangle = \iiint_{-\infty}^{\infty} Q(\vec{r}, t | \vec{r}_0, t_0) c(\vec{r}_0, t_0) d\vec{r}_0 + \iiint_{-\infty}^{\infty} \int_{t_0}^t Q(\vec{r}, t | \vec{r}', t') S(\vec{r}', t') dt' d\vec{r}', \quad (2.19)$$

Na Eq. 2.19, o primeiro termo do segundo membro representa a influência das partículas presentes no tempo anterior ao tempo  $t_0$ , enquanto que o segundo termo representa a influência de novas partículas adicionadas a partir de  $t_0$ . O parâmetro  $Q$  representa a função probabilidade de transição que informa a probabilidade de que uma partícula na posição  $\vec{r}'$ , no instante  $t'$  se desloque para a posição  $\vec{r}$ , no instante  $t$  ( $t > t'$ ).

Dentre as duas formulações apresentadas, a euliana é a mais utilizada, pois propriedades eulerianas, como velocidade, temperatura e concentração, são prontamente mensuráveis por aparelhos instalados em pontos fixos do escoamento, e porque as expressões matemáticas são diretamente aplicáveis a situações com reações químicas

presentes. Contudo, esta abordagem conduz a um sério obstáculo matemático, no caso de escoamentos turbulentos, conhecidos como o problema do fechamento, para o qual nenhuma solução genérica válida foi ainda encontrada (SEINFELD, 1986, cap.12, SEINFELD, 2006).

Por outro lado, com a abordagem lagrangeana se procura descrever a concentração em termos das propriedades estatísticas dos deslocamentos de grupos de partículas no escoamento turbulento. O tratamento matemático é mais simples, não há o problema do fechamento, mas a aplicabilidade das equações resultantes é limitada devido à dificuldade de encontrar expressões que descrevam com alguma precisão as propriedades estatísticas das partículas. Além disso, equações não são aplicáveis diretamente a problemas envolvendo reações químicas não-lineares.

É importante ressaltar que as equações resultantes dos modelos de pluma gaussiana podem ser obtidas tanto pela formulação euliana como pela lagrangeana, levando à resultados idênticos. SEINFELD (1986, caps. 13 e 14; 2006) apresenta a obtenção das equações de concentração do modelo gaussiano pelos dois métodos.

BROCK HEWSON (1963) foram os primeiros a apresentarem trabalhos numéricos para calcular concentrações de poluentes na atmosfera. Foi utilizado um computador analógico para calcular a dispersão turbulenta desde fontes elevadas, entre a camada de inversão e o solo, com difusividades turbulentas constantes ou função da distância percorrida pela pluma. SHIR (1970) simulou numericamente a influência de parâmetros meteorológicos sobre a distribuição de poluentes emitidos por uma fonte em linha e concluiu que a velocidade do vento, a estabilidade atmosférica e a intensidade da fonte, quanto ao calor emitido, eram significativos na distribuição. LANTZ (1972) simulou numericamente o escoamento em uma região de topografia variável, com

ventos transientes e concentração de poluentes de múltiplas fontes com o objetivo de determinar a localização, o projeto e a operação de plantas industriais.

LEE (1978) utilizou a técnica de elementos finitos para prever o escoamento turbulento e a dispersão em terrenos não planos. CARMICHAEL (1980) utilizou a técnica numérica Locally One Dimensional (LOD) para aproximar a solução da Equação da concentração. Esta técnica consiste basicamente em dividir o problema bi ou tridimensional em uma série de problemas unidimensionais, com a finalidade de diminuir o esforço e a capacidade computacional necessários para a solução numérica.

A dispersão de poluentes vem sendo estudada nos últimos anos através da modelagem matemática envolvendo simulação numérica, para avaliar o problema da poluição urbana, da poluição costeira, da dispersão em montanhas e vales, e as que tratam de problemas genéricos da dispersão em micro e macroescala na camada limite atmosférica. Entretanto, existe uma lacuna a ser preenchida quanto à avaliação da dispersão de poluentes em um meio florestal.

#### 2.3.4 Parâmetros Meteorológicos

Os problemas causados pela poluição atmosférica tornaram-se uma preocupação mundial. Na era moderna, um grande número de contaminantes estão sendo lançados diariamente na atmosfera, provenientes de uma variedade de fontes. Sabendo-se que a concentração desses poluentes está fortemente relacionada às condições meteorológicas, torna-se de fundamental importância o estudo de tais condições (EAGLEMAN, 1985).

Antes de se tornarem efetivamente parte da atmosfera, os poluentes atmosféricos podem estar sujeitos a uma série de influências, tais como a diluição física, as transformações químicas e os processos de enriquecimento e remoção ocorridos

numa mina de urânio, por exemplo. As características dos poluentes como tempo de permanência na atmosfera, deposição e impacto provocado são consideravelmente determinados por esses fatores. Tais influências são dependentes de processos atmosféricos, os quais variam de acordo com as condições meteorológicas.

Apesar de não se tratar de um parâmetro meteorológico, vale ressaltar que a topografia da região exerce um papel importante no comportamento dos poluentes na atmosfera. Os vales são locais propícios para o aprisionamento de poluentes, principalmente quando ocorrem inversões térmicas, que impedem a subida dos poluentes, transformando esses locais em verdadeiras câmaras de concentração e de reação.

#### *2.3.4.1 Vento*

A dispersão de poluentes ocorre preferencialmente na direção dos ventos. O vento contribui na mistura dos poluentes com o ar limpo, causando a sua diluição. Quando o vento está calmo, a diluição se torna um processo mais lento. A atuação do vento depende das condições meteorológicas e dos obstáculos que irá encontrar na superfície do terreno, ou seja, as construções, os prédios, as florestas e outras barreiras. Desse modo, em áreas urbanas a dispersão de poluentes ocorre de forma diferente das áreas rurais.

#### *2.3.4.2 Turbulência*

Os fluxos de ar existentes na atmosfera são sujeitos a movimentos irregulares tridimensionais denominados como turbulências. A turbulência é constituída por dois processos específicos: turbulência térmica e turbulência mecânica. A turbulência da atmosfera exerce um papel importante no transporte e na difusão e conseqüentemente na dispersão da poluição atmosférica. De modo geral, a turbulência da atmosfera é

determinada pela velocidade dos ventos e pelo perfil vertical de temperatura. A movimentação na direção vertical pode ser atribuída à turbulência térmica resultante de parcelas de ar aquecido que ascende da superfície terrestre, sendo substituídas pelo ar mais frio em sentido descendente. A movimentação dos poluentes na direção horizontal é determinada pela turbulência mecânica provocada pelo vento na sua instabilidade direcional e de velocidade, associada às características topográficas da região.

#### *2.3.4.3 Estabilidade Atmosférica*

O movimento vertical do ar é alterado devido à estabilidade atmosférica. Os processos de convecção e de turbulência aumentam quando existe instabilidade atmosférica, enquanto que se tornam menores no caso de estabilidade. A instabilidade influencia diretamente a taxa de mistura dos poluentes com o ar limpo, pois à medida que a instabilidade aumenta, melhor é a mistura de uma determinada quantidade de poluente, ou seja, a estabilidade inibe o transporte dos poluentes no ar.

A profundidade de mistura é a distância vertical entre a superfície da Terra e a altitude das correntes de convecção. Quando a mistura em profundidade é grande (muitos quilômetros, por exemplo), observa-se uma grande quantidade de ar limpo misturado com pouca quantidade de poluentes. Pode-se, algumas vezes, estimar a estabilidade do ar observando-se uma pluma que surge de uma chaminé. Se o poluente liberado pela chaminé entra em uma camada de ar instável, a pluma fica ondulada. Em geral, esta pluma indica que os poluentes estão sendo misturados, ou seja, diluídos. Por outro lado, se a pluma de poluentes fica suspensa e sobe vagarosamente, significa que as condições são estáveis.

#### *2.3.4.4 Inversão Térmica*

Em condições normais, existe um gradiente de diminuição da temperatura do ar com o aumento de altitude, ou seja, o ar é mais frio em lugares mais altos. Ao longo do dia, o ar frio tende a descer, pois é mais denso, e o ar quente tende a subir, criando correntes de convecção que renovam o ar junto ao solo. Em algumas ocasiões e locais, especialmente junto a encostas de montanhas ou em vales, ocorre uma inversão: uma camada de ar frio se interpõe entre duas camadas de ar quente, evitando que as correntes de convecção se formem. Desta forma, o ar junto ao solo fica estagnado e não sofre renovação. Se houver uma cidade nesta região, haverá acúmulo de poluentes no ar, em concentrações que podem levar à ocorrência de efeitos danosos. Um exemplo de cidade que sofre com a inversão térmica é São Paulo.

#### *2.3.4.5 Índices Pluviométricos*

As chuvas influenciam na qualidade do ar de maneira acentuada, sendo um importante agente de autodepuração da atmosfera, principalmente em relação às partículas presentes na atmosfera, e aos gases solúveis ou reativos com a água.

### **2.4 Método Analítico: A Técnica de PIXE**

Em 1970, Johansson e colaboradores introduziram o método Particle Induced X Ray Emission (PIXE) como um método de análise multielementar de materiais. Desde então, este método vem sendo usado para a análise de amostras de aerossóis (JOHANSSON et al., 1976).

O método de PIXE é um método analítico baseado em espectrometria de raios X (CAMPBELL, 1995). Um feixe de íons, geralmente prótons ou partículas alfa, com alguns MeV de energia, excita elétrons de camadas internas dos átomos, e quando estes retornam

às camadas originais emitem um raio x, cujas energias são características de cada átomo, representadas pelas linhas de transição K e L. Quando uma partícula carregada incide sobre um átomo, interage com os elétrons das camadas mais internas, cria uma vacância e deixa o átomo excitado. A desexcitação do átomo ocorre pelo preenchimento das vacâncias por elétrons das camadas ou subcamadas superiores, e o tempo médio gasto neste processo é da ordem de  $10^{-9}$ s (DE PINHO et al., 1979). Se a vacância for produzida nas camadas mais internas K ou L, quando o elétron da camada mais externa preenche a vacância, libera energia, que pode ser cedida a outro elétron ou emitida em forma de raios X. O esquema simplificado do processo de emissão de raios X induzidos pela colisão de partículas carregadas é apresentado na Figura 2.9.

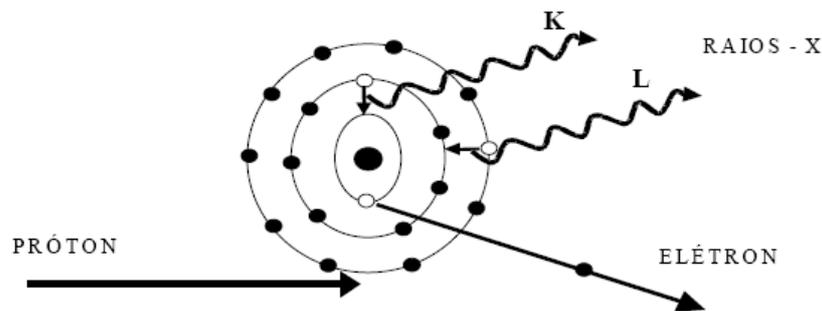


Figura 2.9. Esquema simplificado do processo de emissão de raios X devido à colisão de íons carregados com o átomo.

Os raios X característicos são detectados por um detector de Si-PIN e armazenados em um analisador multicanal. Com base nos espectros de raios X, pode-se identificar e quantificar a concentração dos elementos químicos presentes na amostra.

Este é um método não-destrutivo, que permite analisar elementos com número atômico maiores que 11 (Sódio, Na) e amostras com massa da ordem de  $10^{-9}$  a  $10^{-12}$  g, devido à absorção de raios X de energias mais baixas na janela do detector. Em 1975, este método foi introduzido no Laboratório do acelerador Van de Graaff da PUC-RJ e desde

então, vem sendo usado para a análise de amostras biológicas e de aerossóis (DE PINHO et al., 1979).

A quantificação de cada elemento identificado na amostra é feita através do número de raios X característico do elemento emitido pela amostra.

No cálculo do número de raios X emitidos por elemento presente na amostra deve ser considerado que o feixe de prótons incidente sobre a amostra é homogêneo e que sua área é maior que a amostra. O ângulo sólido do detector e a eficiência do detector de raios X também são parâmetros importantes. Considerando que a amostra é fina o bastante para que a perda de energia do feixe de prótons seja desprezível ao atravessá-lo, o número de raios X,  $N_x$ , emitidos por um elemento do alvo é obtido conforme descrito abaixo.

Sejam um elemento de volume  $dx \cdot dy \cdot dz$  e uma amostra com  $n(x, y, z)$  átomos por unidade de volume de um dado elemento. Considerando-se que a direção de incidência do feixe de prótons coincida com o eixo  $\vec{OZ}$  e que  $P(x, y)$  represente a distribuição espacial da intensidade de feixe normalizada em relação ao número total de prótons, tem-se que  $P(x, y) \cdot dx \cdot dy \cdot dz$  representa o número de partículas que atingem o elemento de volume. Seja  $\delta_x(E)$  a seção de choque por produção de raios X por prótons de energia  $E$ . Assim, o número de fótons emitidos pelos átomos contidos no elemento de volume é dado pela Eq.2.20.

$$dN_x = \delta_x(E) \cdot P(x, y) \cdot n(x, y, z) \cdot dx \cdot dy \cdot dz, \quad (2.20)$$

A fração destes fótons que é detectada é calculada levando-se em consideração a probabilidade destes fótons serem emitidos em uma direção compreendida pelo ângulo sólido do detector ( $\Omega/4\pi$ ) e de serem detectados pelo sistema de detecção com uma determinada eficiência ( $\epsilon$ ). A probabilidade do fóton emitido na direção do detector não

ser absorvido pela amostra é dado por  $e^{-\mu l}$ , onde  $l$  representa a distância percorrida na amostra pelos raios  $x$  e  $\mu$ , o coeficiente de absorção linear. Logo, o número de fótons detectados é dado pela Eq.2.21.

$$dN_x = \frac{\Omega}{4\pi} \cdot \varepsilon \cdot \delta_x(E) \cdot P(x, y) \cdot n(x, y, z) \cdot e^{-\mu l} \cdot dx \cdot dy \cdot dz, \quad (2.21)$$

Ao atravessarem a mostra, os fótons perdem energia fazendo com que estes atinjam o elemento de volume considerado com uma energia que não seja necessariamente igual a energia das partículas do feixe.

O número total de raios X detectados associados à transição, quando se irradia uma amostra com uma distribuição  $n(x, y, z)$  de átomos estudados é dado pela Eq.2.22, onde  $\delta_x(E)$  depende da posição do elemento de volume considerado:

$$N_x = \frac{\Omega}{4\pi} \cdot \varepsilon \cdot \int \delta_x(E) \cdot P(x, y) \cdot n(x, y, z) \cdot e^{-\mu l} \cdot dx \cdot dy \cdot dz, \quad (2.22)$$

Entretanto, quando se considera uma amostra fina pode-se desprezar o efeito de auto-absorção e de perda de energia dos fótons ao penetrarem na amostra. E a Eq.2.22 pode ser substituída pela Eq.2.23.

$$N_x = \frac{\Omega}{4\pi} \cdot \varepsilon \cdot \delta_x(E) \cdot e^{-\mu l} \int P(x, y) \cdot n(x, y, z) \cdot dx \cdot dy \cdot dz, \quad (2.23)$$

A espessura da amostra deve ser fina o suficiente de modo que o efeito da auto-absorção possa ser desprezado e o termo exponencial tenda a 1, tendo-se a Eq.2.24.

$$N_x = \frac{\Omega}{4\pi} \cdot \varepsilon \cdot \delta_x(E) \cdot \int P(x, y) \cdot n(x, y, z) \cdot dx \cdot dy \cdot dz, \quad (2.24)$$

A existência de uma relação unívoca entre o número de raios X detectados,  $N_x$ , e o número total de átomos do elemento presente na amostra permite a determinação do número de átomos em função do número de raios x característicos, dado pela Eq.2.25.

$$N = \int n(x, y, z) \cdot dx \cdot dy \cdot dz, \quad (2.25)$$

Considerando-se um feixe uniforme, pode-se supor válida a Eq.2.26, onde  $P$  representa o número total de prótons incidentes sobre o alvo e  $S$ , a área do feixe definida pelo colimador. Assim, operando-se as Eqs.2.24, 2.25 e 2.26, a Eq.2.27 é obtida, e  $N_x$  representa a quantidade de um elemento existente em uma amostra suficientemente fina, considerando-se um feixe uniforme.

$$P(x, y) = \frac{P}{S}, \quad (2.26)$$

$$N_x = \frac{\Omega}{4\pi} \cdot \varepsilon \cdot \delta_x(E_0) \cdot \frac{P}{S} \cdot N, \quad (2.27)$$

Considerando-se  $A$  a massa atômica (em  $g$ ) do elemento que está emitindo os raios x,  $M$  a massa do elemento contida na amostra em  $\mu g$ ,  $Q_p$  a corrente integrada do feixe em  $\mu C$ ,  $S_p$  a área do colimador em  $mm^2$ ,  $\delta_x(E_0)$  a seção de choque para a produção de raios X induzida por prótons com energia  $E_0$  em barn,  $\Omega$  o ângulo sólido subtendido pelo detector em esferorradiano (sr) e  $\varepsilon$  a eficiência do detector, tem-se que o número de contagens de raios X característico do elemento no pico do espectro é dado

pela Eq.2.28. Nesta equação, o valor  $2,66 \cdot 10^{-9}$  representa o fator de transformações de unidades para o mesmo sistema de unidades.

$$N_x = \frac{\Omega}{4\pi} \cdot \varepsilon \cdot \delta_x(E_0) \cdot \frac{Q_p \cdot M}{2,66 \cdot 10^{-9} \cdot S_p \cdot A}, \quad (2.28)$$

#### 2.4.1 Incertezas do Método de PIXE

As principais fontes de erro no método PIXE ocorrem devido à espessura do alvo, à não homogeneidade do feixe, ao aquecimento da amostra e à sobreposição no espectro de picos de diferentes elementos. O feixe de partículas ao atravessar a amostra pode ser atenuado devido à espessura das amostras, causando uma variação na seção de choque de ionização e conseqüentemente no número de raios X emitidos. Outra causa de incerteza, também devido à espessura da amostra, é a auto-absorção dos raios X emitidos pela amostra. Assim, as amostras devem ser finas o suficiente de modo que possam ser desconsideradas as perdas de energia e a auto-absorção (JOHANSSON et al., 1976).

A concentração dos elementos presentes na amostra é, geralmente, não homogênea. Esta fonte de incerteza pode ser eliminada utilizando-se um feixe homogêneo de partículas. A utilização de um difusor produz um feixe com distribuição aproximadamente gaussiana, que ao atravessar o colimador de diâmetro menor que a largura da gaussiana permite que somente a parte central do feixe atinja a amostra. Desta forma, é possível conseguir-se um feixe uniforme, de maneira que a taxa de raios X emitidos por cada elemento corresponda apenas ao número de átomos do mesmo presente na amostra, (DE PINHO et al., 1979).

Uma outra fonte de incerteza ocorre quando um feixe muito intenso incide sobre uma amostra. Este fato pode provocar o aquecimento e a perda de massa de elementos voláteis. Para eliminar este problema, um feixe de baixa intensidade deve ser utilizado, (PASCHOA et al., 1977).

A sobreposição de linhas de raios X dos elementos presentes na amostra ocorre geralmente quando se analisam espectros gerados de amostras multielementares. Esta sobreposição ocorre entre a linha  $K_{\alpha}$  de um elemento de número atômico  $Z$  e a linha  $K_{\alpha}$  do elemento de número atômico igual a  $Z+1$ , para elementos com número atômico ( $Z$ ) entre 20 e 50. Para elementos com  $Z$  maior que 50, a sobreposição ocorre entre as linhas  $L_{\alpha}$  e  $L_{\beta}$ , (DE PINHO et al., 1979).

## **2.5 Gerador de Aerossol**

Em estudos realizados em laboratório, algumas vezes é necessária a simulação de fontes que representem um caso real em escalas reduzidas. E desta forma, se possam realizar experimentos específicos que permitam modelar um cenário para estudo, e, conseqüentemente, permitam avaliar a influência dos parâmetros utilizados na modelagem adotada. Os geradores de aerossóis permitem a obtenção de uma pequena pluma que pode ser dispersa num local específico a ser estudado.

Atomização é o nome do processo de desintegrar um líquido em gotículas aerotransportadas. Os atomizadores são classificados de acordo com o tipo de energia utilizada para fragmentar o líquido. O atomizador com saída constante modelo 3075/3076, mostrado na Figura 2.10, gera aerossol submicron.

O atomizador funciona através da expansão de ar comprimido por um orifício para formar um jato com alta velocidade. O líquido é transportado para a seção de

atomização através de uma passagem vertical, e é então atomizada pelo jato. Várias gotículas são removidas pelo impacto com a parede oposta ao jato, e o excesso de líquido é drenado para a parte inferior da seção de atomização, e é depositado no mesmo recipiente onde se encontra a solução. O líquido pulverizado fino deixa o equipamento através de uma conexão na parte superior da seção. Na Figura 2.11 está apresentado um corte do atomizador, onde se pode visualizar por onde entra a solução, o ar comprimido, o local onde ocorre a atomização e o local por onde o excesso de líquido retorna para o reservatório onde a solução encontra-se depositada.

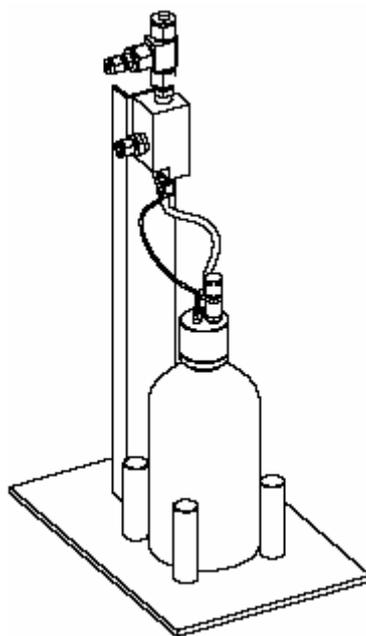


Figura 2.10. Atomizador com saída constante.

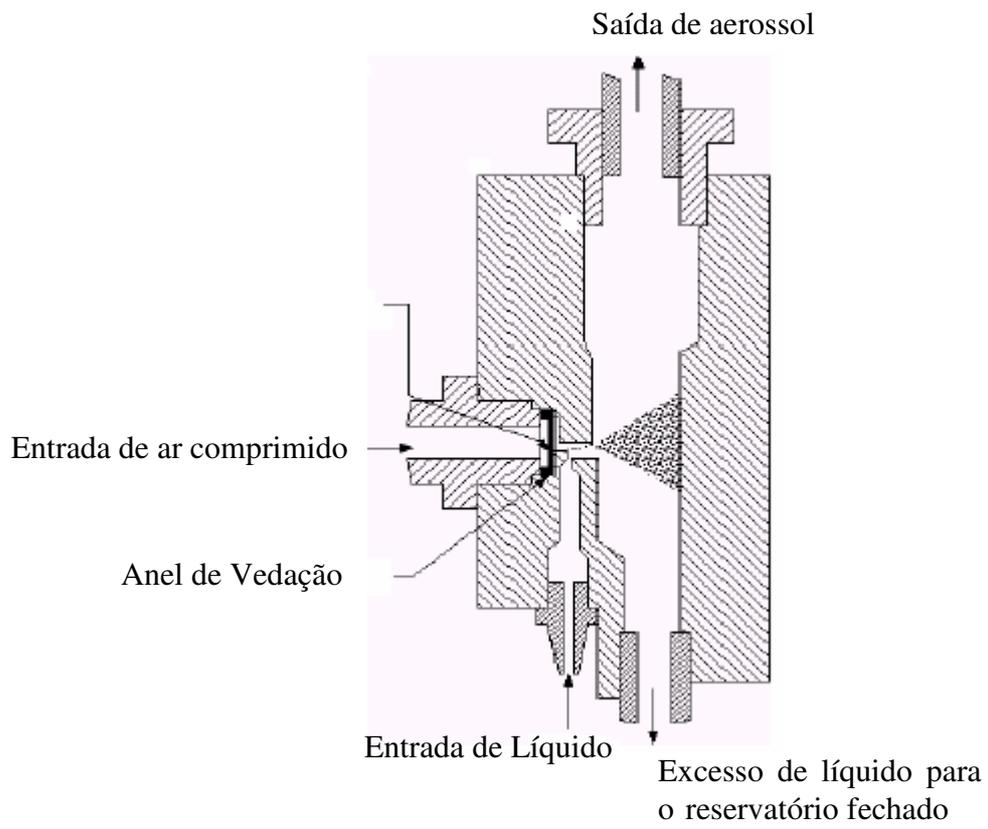


Figura 2.11. Corte Lateral do Atomizador.

## CAPÍTULO 3

### - Materiais e Métodos -

Para determinar um parâmetro que representasse a influência da densidade de vegetação na dispersão da pluma foi realizada uma simulação em laboratório utilizando um túnel com densidade de vegetação variável, no qual era gerado um aerossol conhecido. Os parâmetros obtidos foram utilizados na simulação de dados que serão comparados com os dados experimentais obtidos nas amostragens realizadas no Jardim Botânico (JB) e em Angra dos Reis.

#### *3.1 Coleta de Amostras de Aerossóis*

As amostras de aerossóis no JB, em Angra dos Reis e no túnel foram coletadas utilizando-se Amostradores Portáteis com Ciclone (APC) com vazão de operação de 2ℓ/min e diâmetro de corte de 2,0 μm. O uso do ciclone possibilitou coletar amostras de partículas transportadas pelo ar na fração fina do aerossol,  $d_{\text{aer}} < 2,5 \mu\text{m}$  (HINDS, 1982).

Os amostradores empregados foram calibrados, pelo método da bolha, usando-se um calibrador primário da Gillian. Os dados da calibração e os tempos de amostragem de todas as amostras de aerossóis são apresentados nas Tabelas dos Apêndices A e B.

##### 3.1.1 Montagem do Arranjo Experimental para Simulação em Laboratório

O túnel foi construído com armação de Policloreto de Vinila (PVC), paredes de plástico transparente e fechado nas extremidades. As dimensões iniciais do túnel - 1,50 m de comprimento, 0,65 m de largura e 0,95 m de altura - foram tomadas com a

finalidade de se verificar o alcance da pluma obtida no gerador, uma vez que não se possuíam dados a respeito. A cobertura de plástico foi utilizada para conter a liberação de partículas para o meio ambiente. A parte inferior do túnel também foi revestida com plástico para que se pudesse avaliar a deposição do particulado ao longo do túnel e com isso, o alcance da pluma.

### *3.1.1.1 Caracterização do Túnel*

No túnel, com as dimensões descritas anteriormente, foi avaliado o alcance da pluma gerando-se aerossóis a partir de uma solução de ácido nítrico ( $\text{HNO}_3$ ) 1M e cobrindo-se a superfície interna do túnel com papel de tornassol azul. O aerossol foi gerado usando-se um gerador TSI modelo 3075-3076 nas mesmas condições operacionais usadas nos demais experimentos.

Após 3h de geração de aerossol, todas as folhas de papel de tornassol reagiram com as partículas de ácido nítrico, tornando-se rosa. Este resultado indicou que o túnel fechado poderia estar causando uma perturbação na pluma, ocasionando movimento turbulento no interior do túnel.

Para verificar o efeito da turbulência foi realizado um teste com ambas as extremidades do túnel fechadas. Neste teste, foi utilizada uma mistura de 5g de monóxido de cobre ( $\text{CuO}$ ) com 1ℓ de água para gerar as partículas que seriam dispersas ao longo do túnel, e amostrou-se nas posições definidas como  $PL_1$  a  $PL_4$ , distantes do gerador 0,20 m, 0,65 m, 1,05 m e 1,50 m, respectivamente. Esta amostragem foi realizada por um período total de 57 horas e 30 minutos, ao longo de 10 dias não consecutivos, entre os dias 31 de março e 13 de abril de 2006, inclusive.

Na Figura 3.1 é apresentado o gráfico da variação da concentração de Cu em função da distância ao gerador de aerossol para o experimento inicial, sem plantas.

A concentração de Cu na amostra localizada a 1,5 m do gerador, em  $PL_4$ , foi maior do que aquela encontrada nas amostras localizadas nas posições anteriores, contrariando expectativa de decaimento da concentração. As concentrações de Cu nas quatro amostras coletadas neste experimento mostram que o fato de estar fechada a extremidade do túnel oposta ao gerador causou uma perturbação na dispersão da pluma, confirmando a hipótese de perturbação observada no experimento com ácido nítrico.

Neste teste, também, observou-se a interferência da posição do amostrador em relação à dispersão da pluma. O amostrador localizado a 0,2 m do gerador, em  $PL_1$ , causava uma perturbação na dispersão da pluma, pois impedia que esta atingisse diretamente o amostrador localizado a 0,65 m do gerador, em  $PL_2$ , funcionando como um anteparo.

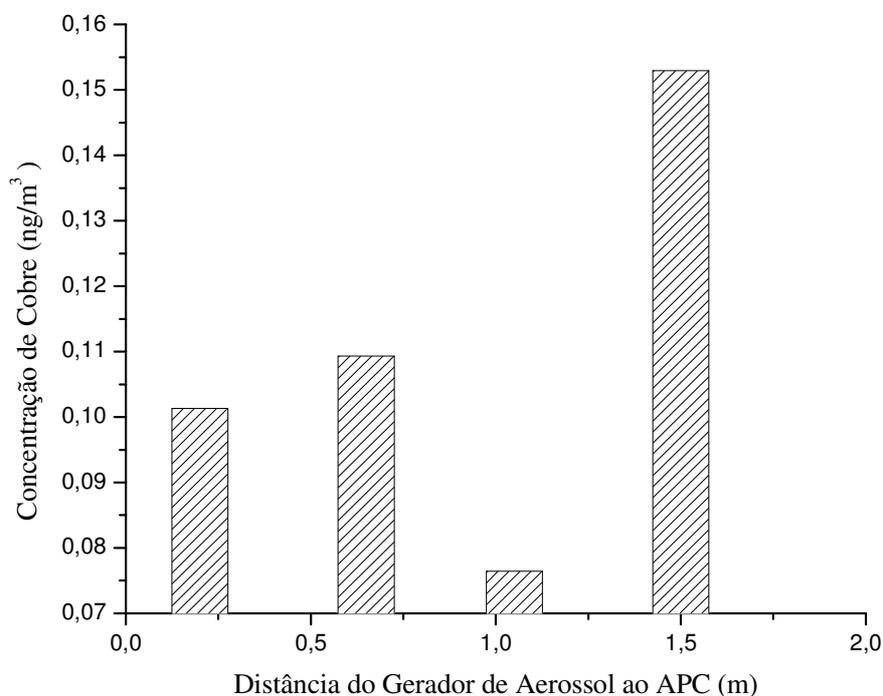


Figura 3.1. Gráfico mostrando a concentração de Cu nas amostras coletadas no primeiro experimento sem plantas, com as extremidades do túnel fechadas.

Este resultado mostra a interferência do sistema de coleta na dispersão da pluma e a perturbação causada por obstáculos à dispersão de aerossóis. Segundo a equação da dispersão gaussiana, a concentração deveria diminuir proporcionalmente ao quadrado da distância. Entretanto, este comportamento não foi observado, pois o amostrador na direção de propagação da pluma causava um movimento turbulento, reduzindo a velocidade de dispersão e aumentando a concentração local das partículas na posição  $PL_2$ .

Para eliminar o efeito de turbulência no interior do túnel e a perturbação causada pelos amostradores na dispersão da pluma foram realizados os seguintes ajustes no arranjo experimental:

- a. a extremidade do final do túnel foi mantida aberta durante o período de amostragem;
- b. os amostradores foram mantidos na mesma altura do gerador de aerossol, porém afastados do centro de geração da pluma;
- c. o comprimento do túnel foi aumentado para 2,10m; e
- d. os APC foram redistribuídos no túnel de tal forma que não interferissem na dispersão da pluma e a amostragem foi realizada nas posições definidas como  $PT_1$  a  $PT_4$ , distantes do gerador 0,20m, 0,82m, 1,44m e 2,06m, respectivamente.

O segundo teste teve duração de 39 horas e 15 minutos, distribuídas em cinco dias consecutivos, entre os dias 27 de julho e 02 de agosto de 2006, inclusive. No terceiro teste, a amostragem foi realizada por um período total de 35 horas, ao longo de cinco dias consecutivos, entre os dias 17 e 23 de agosto de 2006, inclusive.

Nas Figuras 3.2 e 3.3 são apresentados os gráficos das concentrações de Cu em função da distância ao gerador de aerossóis para o segundo e terceiro testes sem plantas, respectivamente.

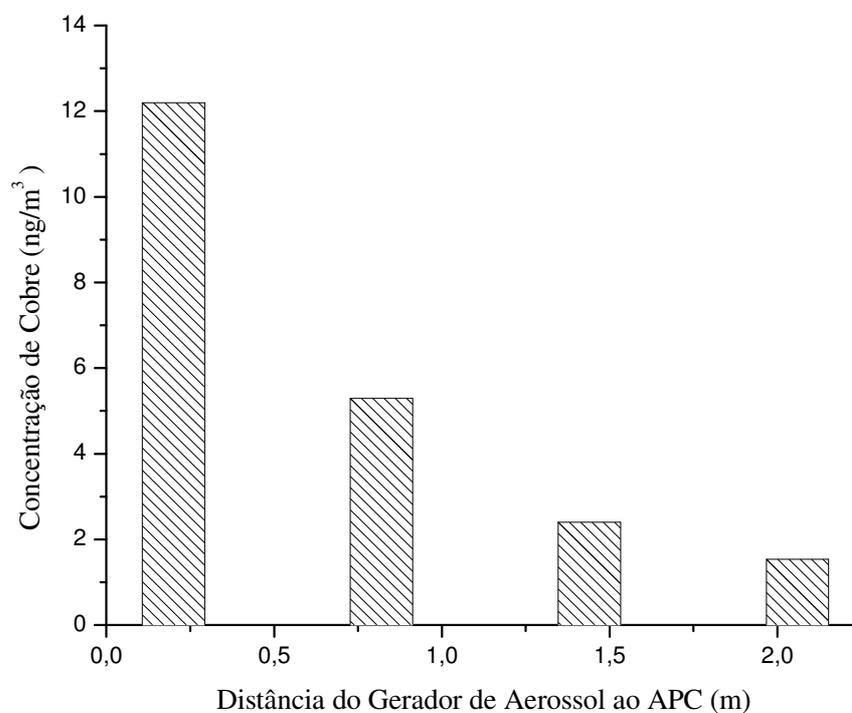


Figura 3.2. Gráfico mostrando a concentração de Cu nas amostras coletadas no segundo experimento sem plantas, com uma das extremidades do túnel fechada.

Os resultados das amostras coletadas no túnel sem plantas, após os ajustes realizados, mostraram que as concentrações de partículas de Cu variavam com a distância dos amostradores ao gerador de aerossóis.

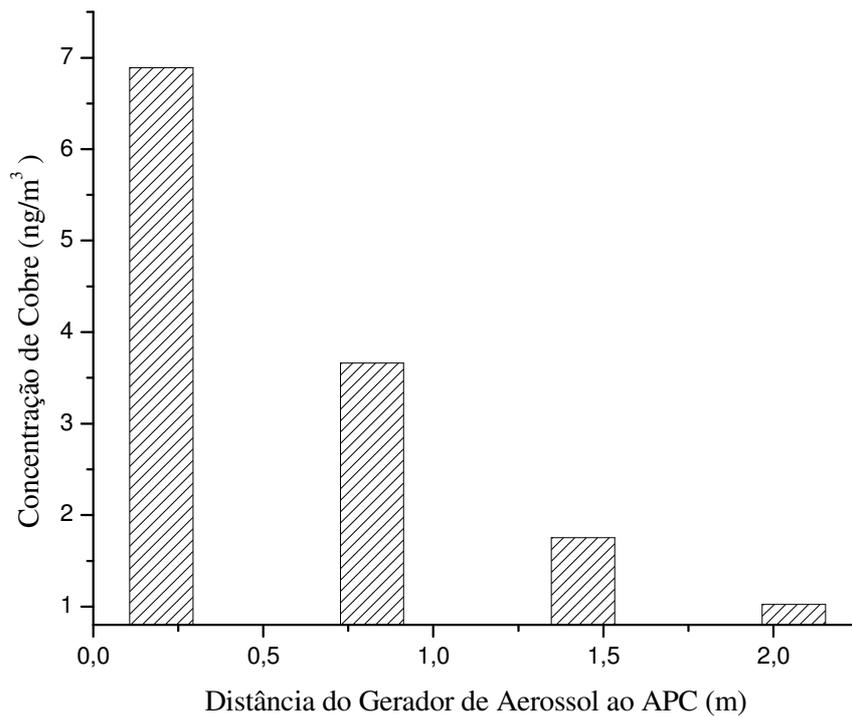


Figura 3.3. Curva da concentração de Cu nas amostras coletadas no terceiro experimento sem plantas, com uma extremidade do túnel aberta.

### 3.1.1.2 Calibração do Sistema

Para verificar se a dispersão da pluma seguia o modelo gaussiano no interior do túnel, adotou-se o procedimento descrito a seguir.

Utilizando-se os resultados obtidos no terceiro, foram calculados os coeficientes de dispersão  $\sigma$  para as posições  $PT_2$  a  $PT_4$ , através da Eq.2.15. Para tanto, na resolução da equação, foram considerados:

- $H = 0$ , pois a amostragem foi realizada na mesma altura que a fonte geradora;
- $\sigma_y = \sigma_z = \sigma$ , pois foi suposta uma dispersão de pluma simétrica em relação

ao eixo dos  $x$ ; e

-que o valor experimental obtido na posição  $PT_1$  foi utilizado na determinação do valor de  $Q$  a ser adotado na Eq.2.15.

Na Tabela 3.1 são apresentados os valores de  $\sigma$  obtidos na situação descrita anteriormente.

Tabela 3.1. Coeficientes de dispersão nas posições de amostragem no túnel.

Posição do APC	Coeficiente de Dispersão ( $m$ )
$PT_2$	0,00408
$PT_3$	0,00590
$PT_4$	0,00771

Obtidos os valores de  $\sigma$  nas diferentes posições de amostragem, foi possível calcular, através da Eq.2.15, os valores teóricos de concentrações esperados para as posições  $PT_2$  a  $PT_4$ , no segundo teste sem plantas, considerando-se o valor de  $Q$  da posição  $PT_1$ , e compará-los com os resultados experimentais obtidos neste teste. Na Figura 3.4 é apresentada a comparação entre os resultados teóricos e experimentais obtidos no segundo teste sem plantas.

A comparação entre os resultados teóricos e os experimentais mostra que se pode considerar uma dispersão gaussiana nos experimentos realizados no túnel, com os erros associados às medidas realizadas. Neste caso, o erro foi calculado considerando-se uma medida única.

Dos resultados obtidos no segundo e no terceiro experimentos, pode-se verificar que tanto, o problema da recirculação de ar na saída do túnel, quando este estava fechado nas duas extremidades, quanto o aumento da concentração de Cu na amostra coletada na posição  $PL_2$  foram solucionados, e que os valores obtidos para as concentrações nas quatro posições seguiram um comportamento esperado de

decaimento com a distância. Assim, a curva obtida com os dados do terceiro teste sem plantas passou a ser utilizada como curva base para representar a situação onde o túnel não possuía vasos de plantas no seu interior. Este experimento passou a ser denominado de experimento livre.

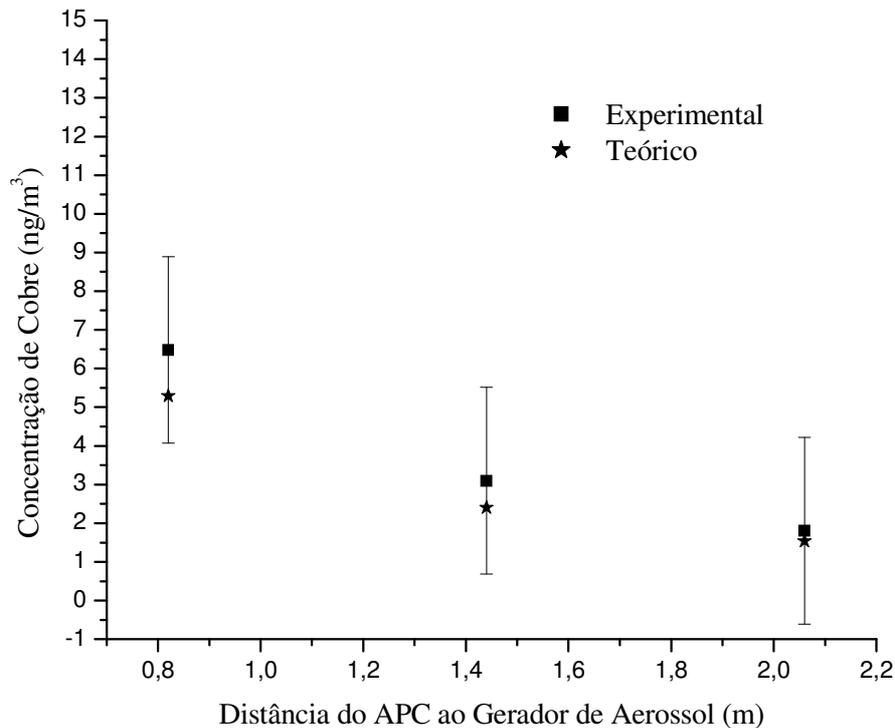


Figura 3.4. Comparação de resultados teóricos e experimentais do segundo teste sem plantas.

### 3.1.1.3 Amostragem com Plantas no Túnel

Para avaliar a interferência da vegetação na dispersão da pluma foram utilizados três arranjos experimentais. A influência da vegetação foi avaliada usando-se plantas cultivadas em vasos. A planta escolhida foi da família das Rutáceas (*Ruta Graveolens* L.) devido à homogeneidade das folhas existentes em suas copas.

No primeiro arranjo com plantas, adotou-se a mesma distribuição de APC descrita no experimento sem plantas, acrescentando-se quinze (15) vasos dessa mesma

planta, no interior do túnel, de tal forma que seis vasos ficassem localizados entre o primeiro e o segundo APC, mais seis vasos entre o segundo e o terceiro APC, e outros três vasos entre o terceiro e o quarto APC. Na Figura 3.5 são apresentadas as vistas lateral e superior do arranjo após a colocação dos vasos de plantas dentro do túnel. Este arranjo com 15 vasos de plantas passou a ser denominado de arranjo I.

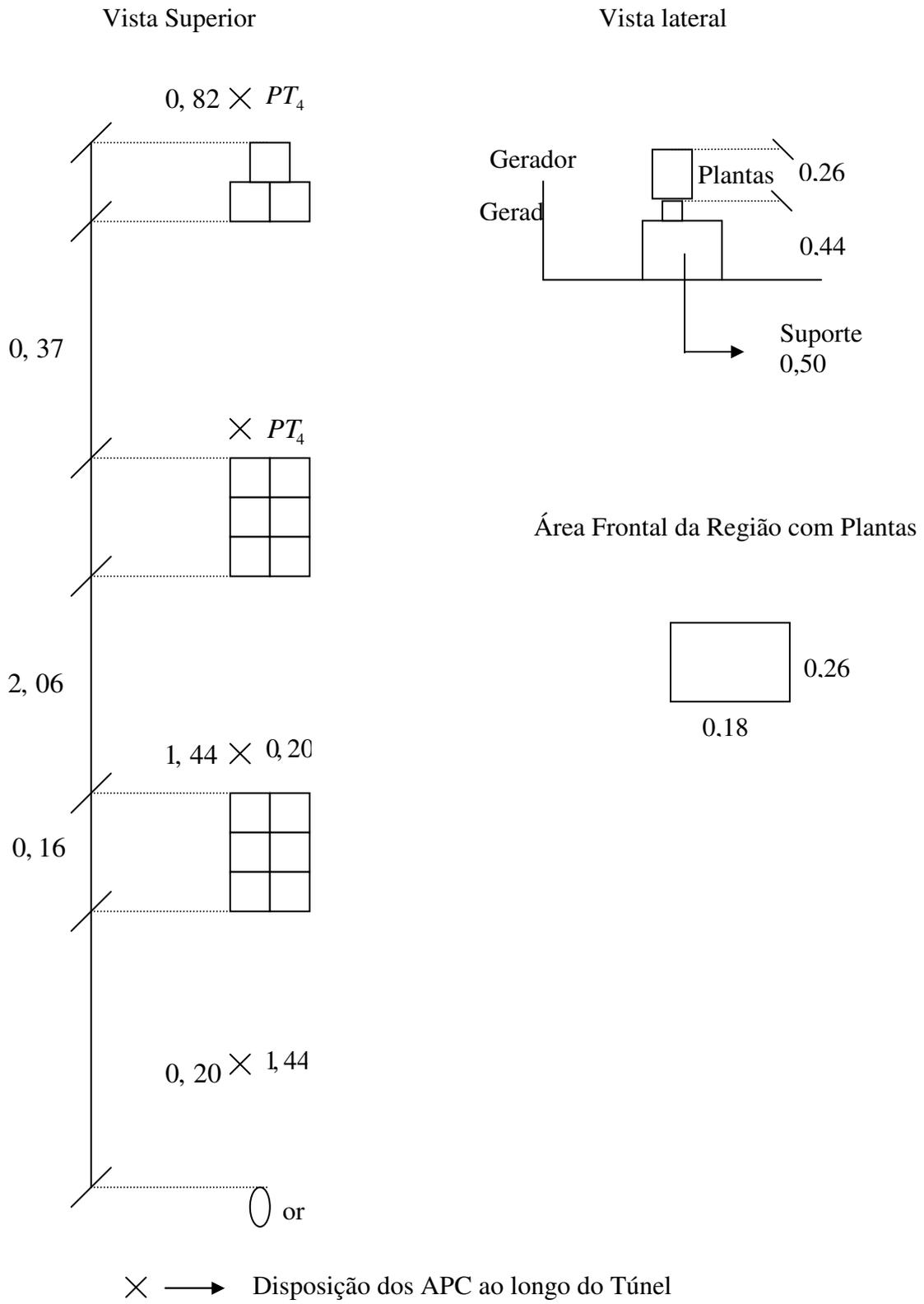


Figura 3.5. Disposição dos vasos de plantas no arranjo I.

Nas Figuras 3.6, 3.7 e 3.8 são apresentadas as fotografias dos vasos na disposição proposta para o arranjo I.



Figura 3.6. Plantas posicionadas entre  $PT_1$  e  $PT_2$ , no arranjo I.



Figura 3.7. Plantas posicionadas entre  $PT_2$  e  $PT_3$ , no arranjo I.



Figura 3.8. Plantas posicionadas entre  $PT_3$  e  $PT_4$ , no arranjo I.

A amostragem foi realizada por um período total de 39 horas e 15 minutos, ao longo de 09 dias não consecutivos, no período compreendido de 05 a 19 de setembro de 2006, inclusive. As amostras resultantes foram irradiadas e analisadas pelo método de PIXE.

O procedimento realizado com o arranjo I foi repetido em dois novos experimentos, denominados arranjos II e III. Nas Figuras 3.9 e 3.10 são apresentadas as disposições dos vasos de plantas no arranjo II, com 10 vasos, e no arranjo III, com 06 vasos.

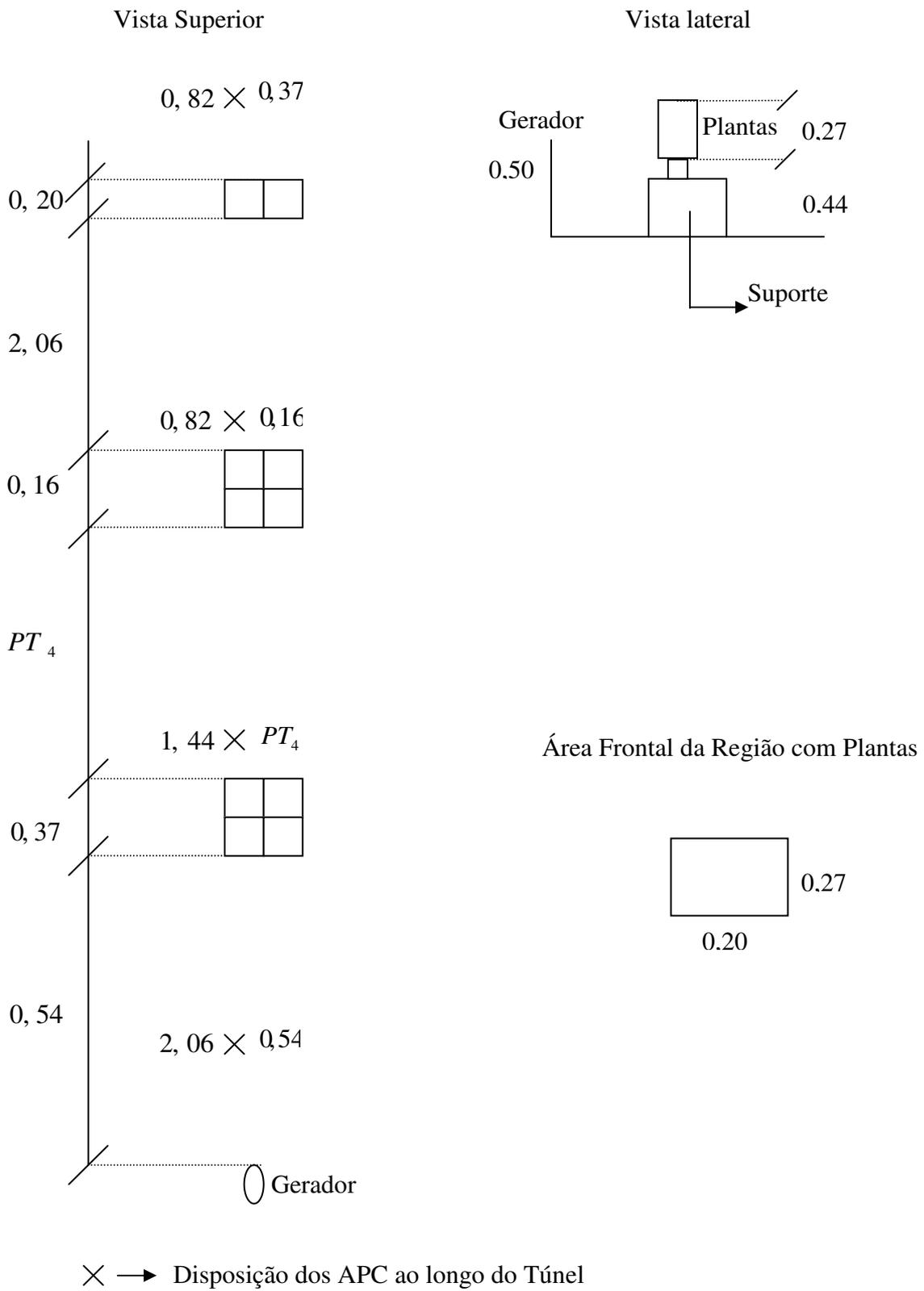


Figura 3.9. Disposição dos vasos de plantas no arranjo II.

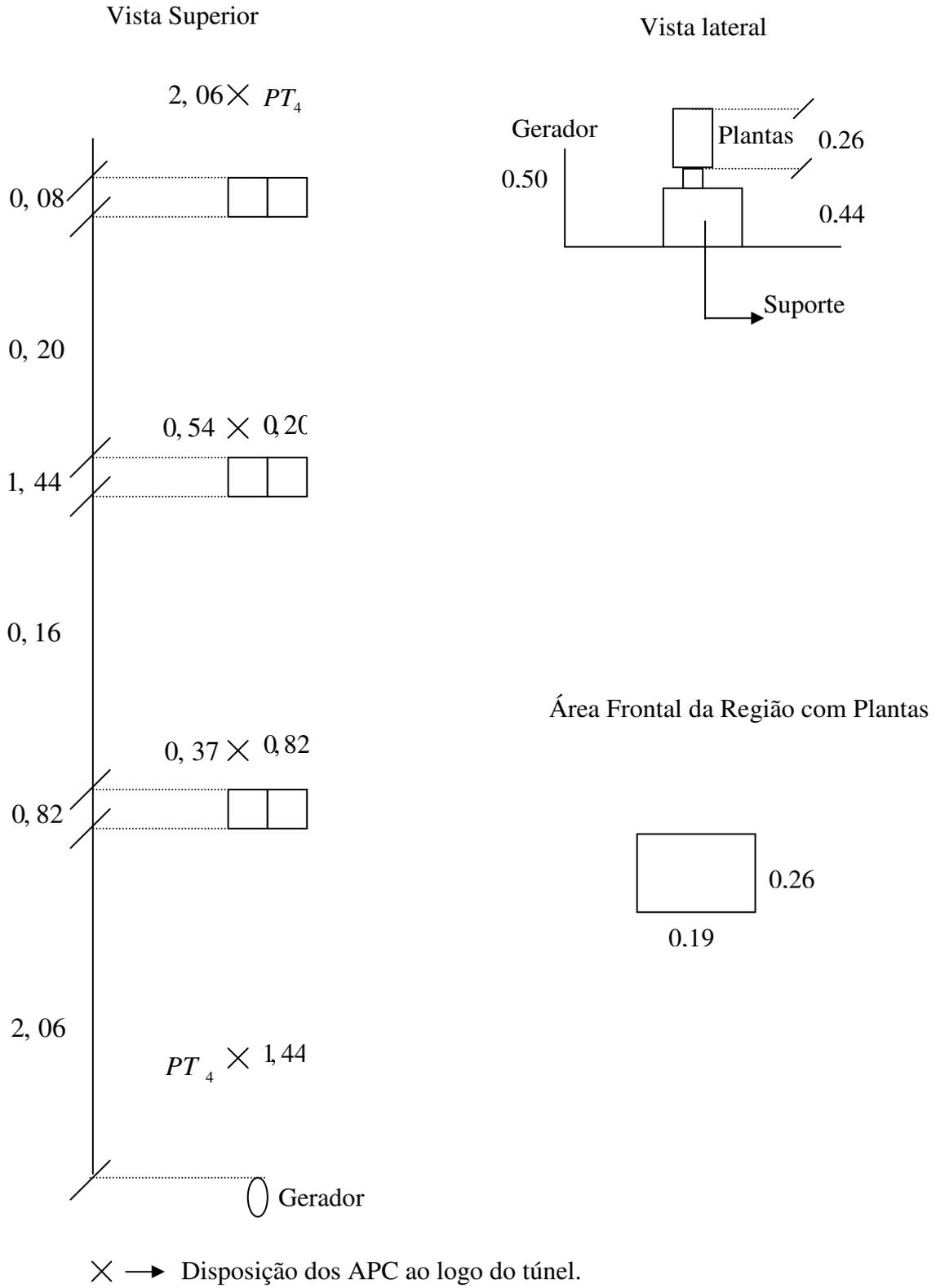


Figura 3.10. Disposição dos vasos de plantas no arranjo III.

Nas Figuras 3.11, 3.12 e 3.13 são apresentadas as fotografias dos vasos na disposição proposta para o arranjo II.



Figura 3.11. Plantas posicionadas entre  $PT_1$  e  $PT_2$ , no arranjo II.



Figura 3.12. Plantas posicionadas entre  $PT_2$  e  $PT_3$ , no arranjo II.



Figura 3.13. Plantas posicionadas entre  $PT_3$  e  $PT_4$ , no arranjo II.

Nas Figuras 3.14, 3.15 e 3.16 são apresentadas as fotografias dos vasos na disposição proposta para o arranjo III.



Figura 3.14. Plantas posicionadas entre  $PT_1$  e  $PT_2$ , no arranjo III.



Figura 3.15. Plantas posicionadas entre  $PT_2$  e  $PT_3$ , no arranjo III.



Figura 3.16. Plantas posicionadas entre  $PT_3$  e  $PT_4$ , no arranjo III.

### 3.2 Proposta de Modelo

Buscou-se, inicialmente, propor um modelo que permitisse estimar o valor da concentração de cobre ao longo do túnel em função da concentração no ponto de liberação, da distância do ponto de avaliação até o ponto de liberação de material, da velocidade do vento e da densidade de vegetação existente entre essas duas posições. Para isso, estudou-se, no primeiro modelo, o comportamento da concentração de cobre ao longo do túnel, utilizando-se a equação de dispersão, enquanto que no segundo modelo buscou-se ajustar uma função aos valores de concentrações obtidos.

#### 3.2.1 Modelo Proposto I - Ajuste do Modelo de Dispersão Gaussiana

Na elaboração deste modelo, avaliou-se a correlação existente entre as concentrações de Cu nas amostras coletadas no túnel com vegetação e a densidade de vegetação existente entre o gerador de aerossóis e o ponto de amostragem. Para isto, adotou-se o procedimento descrito a seguir.

As concentrações de Cu obtidas nas amostras coletadas no túnel com vegetação, nas posições  $PT_2$  a  $PT_4$ , foram correlacionados com as concentrações resultantes do experimento livre, através da multiplicação destes valores por um fator de correção de forma exponencial, conforme expresso na Eq.3.1.

$$\langle C_{cv} \rangle_{PT_i} = (e^{k \cdot x_{PT_i}}) * \langle C_{sv} \rangle_{PT_i}, \quad (3.1)$$

onde  $\langle C_{cv} \rangle_{PT_i}$  é a concentração de Cu nas amostras coletadas no interior do túnel com vegetação na posição  $PT_i$ ,  $2 \leq i \leq 4$ ,  $x_{PT_i}$  é a distância da posição  $PT_i$  ao gerador de aerossóis, e  $\langle C_{sv} \rangle_{PT_i}$  é a concentração de Cu nas amostras coletadas no experimento livre (sem vegetação), na posição  $PT_i$ .

Os dados obtidos no experimento livre e nos experimentos com vegetação, na posição  $PT_1$ , foram utilizados no cálculo da taxa de liberação mássica de material  $Q$  e nos cálculos dos valores dos coeficientes de dispersão  $\sigma_y$ , nas posições  $PT_i$ ,  $2 \leq i \leq 4$ . A taxa de liberação mássica de material  $Q_{PT_1}$ , na posição  $PT_1$ , foi obtida através do quociente entre a massa de Cu coletada na amostragem realizada na posição  $PT_1$ , em gramas, e o tempo de amostragem, em segundos. Os valores dos coeficientes de dispersão  $\sigma$  foram obtidos, para cada posição de amostragem no arranjo livre, usando a Eq.2.15.

Após o cálculo dos valores de  $Q$  e de  $\sigma$ , foi possível estabelecer os valores de  $k$ , para as posições  $PT_i$ ,  $2 \leq i \leq 4$ , em cada arranjo, utilizando-se a Eq.3.2, que foi obtida pela combinação das Eqs. 3.1 e 2.15.

$$k_{PT_i} = \frac{1}{x_{PT_i}} * \ln \left[ \frac{\pi * < C_{cv} >_{PT_i} * (\sigma_{PT_i})^2 * \mu}{Q_{PT_i}} \right], \quad (3.2)$$

onde,  $x_{PT_i}$  é a distância do ponto de amostragem ao gerador de aerossóis,  $< C_{cv} >_{PT_i}$  é a concentração de Cu amostrada na posição  $PT_i$ ,  $\sigma_{PT_i}$  é o coeficiente de dispersão na posição  $PT_i$ , obtido através dos dados levantados no experimento livre,  $Q_{PT_i}$  é taxa de liberação mássica de material na posição  $PT_i$  e  $\mu$  a velocidade do vento no interior do túnel.

Assim, para posição  $PT_i$ ,  $2 \leq i \leq 4$ , obteve-se um valor de  $k$  que ajustava a Eq.3.1, mas que também era função da densidade de vegetação utilizada em cada arranjo.

Após a análise das fotografias obtidas em cada arranjo, com as diversas densidades, foi possível delimitar uma mesma região ao redor do amostrador, para cada posição e densidade, e calcular o percentual desta região que estava preenchido por vegetação.

Adotando-se uma região quadrada de lado igual a 11 cm, com o amostrador localizado no seu centro, foram calculados os valores dos percentuais das regiões que estavam preenchidas por vegetação. Os valores obtidos para  $k$ , em cada arranjo estudado foram então correlacionados com os percentuais determinados anteriormente para as posições  $PT_i$ ,  $2 \leq i \leq 4$ , considerando-se as densidades de vegetação existentes entre o ponto estudado e o ponto de liberação de material.

### ***3.3 Validação do Modelo Proposto***

O modelo proposto com base nos resultados da simulação em laboratório foi testado utilizando-se dados de dispersão de particulado em uma floresta, onde as distâncias são maiores e as condições meteorológicas atuam com maior intensidade.

Assim, na avaliação de uma região específica, há a necessidade de serem realizados, antes da utilização do modelo proposto, os seguintes procedimentos:

- a. analisar a fonte que está liberando o particulado para a atmosfera;
- b. estimar a densidade de vegetação existente entre o ponto de avaliação e o ponto de liberação do material;
- c. calcular os coeficientes de dispersão no ponto de avaliação;
- d. obter a velocidade do vento na região a ser analisada.

### 3.3.1 Amostragem Realizada no Jardim Botânico

A cidade do Rio de Janeiro, situada na costa do Oceano Atlântico, é uma das maiores cidades brasileiras, com aproximadamente sete milhões de habitantes distribuídos em 330 km<sup>2</sup>. Nesta região, a poluição atmosférica é originada de diferentes fontes, entre as quais se destaca o tráfego de veículos automotores empregando ignição a gasolina ou diesel.

Nesta região, está situado o JB, que foi originariamente criado por Dom João VI para cultivar espécies tropicais trazidas da Índia pelos portugueses. Atualmente, este parque é famoso por sua fauna e flora, possuindo mais de 5000 espécies de plantas e árvores tropicais e subtropicais, e ocupando 340 acres de floresta. Na Figura 3.17 pode-se visualizar um cenário diário fotografado no JB, onde se nota a existência de fauna.

As amostras de ar foram coletadas no JB do Rio de Janeiro, que possui vegetação e é contíguo a uma floresta tropical de mata atlântica. Um mapa do JB é apresentado na Figura 3.18, contendo a discriminação das aléias existentes no local.

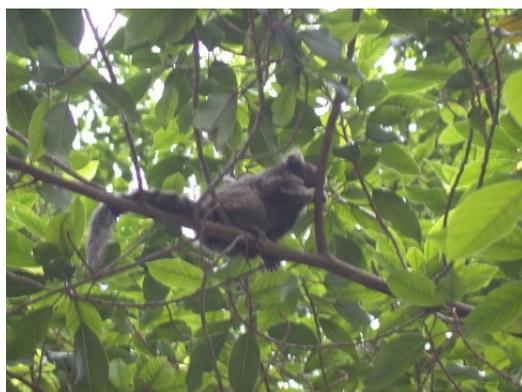


Figura 3.17. Fotografia tirada no Jardim Botânico.

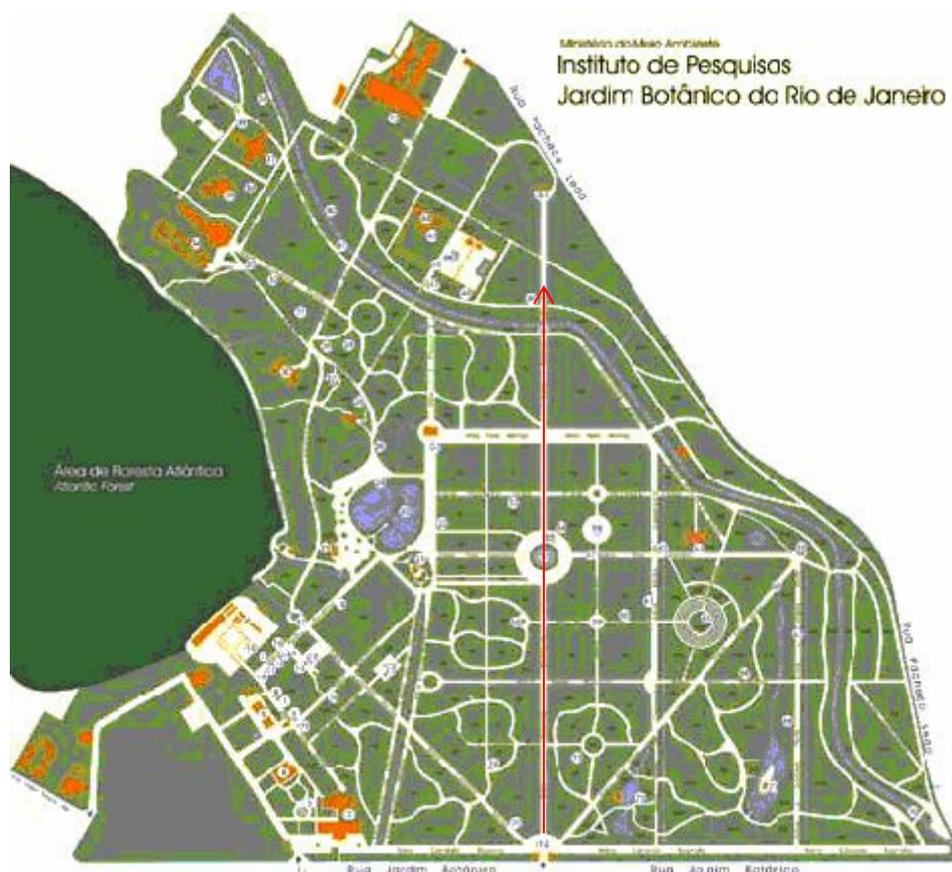


Figura 3.18. Mapa detalhado do Jardim Botânico, IPJBRJ (2006).

As amostras de aerossóis foram coletadas durante as estações de seca usando APC que selecionam as partículas do aerossol na fração fina. O diâmetro de corte do ciclone é de  $2,0 \mu\text{m}$ , a vazão de operação de  $2,0 \text{ l/min}$  e as partículas foram depositadas sobre filtros de polícarboneto (Nuclepore), com porosidade de  $0,4 \mu\text{m}$  e  $37 \text{ mm}$  de diâmetro. Uma variação de 10% na vazão acarreta uma diferença de 1% no valor do diâmetro de corte (DIAS DA CUNHA, 1997).

Os APC foram fixados em uma altura de aproximadamente  $1,60\text{m}$ , altura do nariz do homem padrão, durante o período de amostragem. Para isto, foram construídos suportes de fácil manejo, com ajustes para posicionar os APC na altura desejada e para manter o suporte equilibrado, independentemente do terreno onde se estivesse realizando a coleta. Na Figura 3.19, está ilustrado um dos suportes utilizados durante o período de amostragem realizada no JB.

No esquema apresentado na Figura 3.20 são mostrados os pontos onde foram coletadas as amostras de aerossóis dentro do Jardim Botânico. Próximo ao portão de acesso principal foram colocados três APC, espaçados aproximadamente 5m entre si, nas posições 1, 2 e 3; próximos ao chafariz foram colocados quatro APC, nas posições 4, 5, 6 e 7; e próximo ao portal da Antiga Academia de Belas Artes, foram colocados mais quatro APC, nas posições 8, 9, 10 e 11. Os pontos próximos ao chafariz localizaram-se dois nas margens da aléia e mais dois numa linha imaginária perpendicular à aléia, numa região de vegetação. Os pontos próximos ao portal localizaram-se um em cada margem da aléia, e mais dois numa linha perpendicular à aléia, numa região de vegetação. As posições estão numeradas da esquerda para a direita.

Em cada posição, um mesmo filtro foi utilizado durante todos os dias de amostragem, de tal forma que ao final da amostragem, cada ponto de coleta gerou um único filtro para ser analisado. Ao final de cada dia, o ciclone contendo o filtro era guardado para ser utilizado no dia seguinte e na mesma posição, tomando-se o cuidado para não agregar ao filtro partículas que estavam no copo suporte do ciclone. Para isso, retirava-se o copo de depósito de partículas maiores para transporte e manuseio do ciclone.

Os dados meteorológicos necessários para a realização do trabalho foram obtidos utilizando-se uma estação meteorológica portátil modelo WMR918, da OREGON SCIENTIFIC.

As concentrações de metais presentes nas amostras de partículas transportadas pelo ar foram determinadas usando-se a técnica de PIXE, para estabelecer a massa dos elementos presentes.



Figura 3.19. Suporte para os APC utilizados na amostragem no JB.

As amostras foram irradiadas no acelerador Van de Graaff usando um feixe de prótons de 2 MeV com uma corrente média de 30 nA para manter estável o fluxo de prótons, durante aproximadamente 90 min cada uma.

Estas amostras foram utilizadas para avaliar as concentrações de vanádio existentes em diversos pontos de amostragem. O vanádio foi escolhido como material traçador, pois este elemento existe na queima de combustível fóssil proveniente dos veículos automotores que circulam nas vizinhanças do JB e não aparece no solo, evitando o problema da resuspensão de material proveniente do solo.

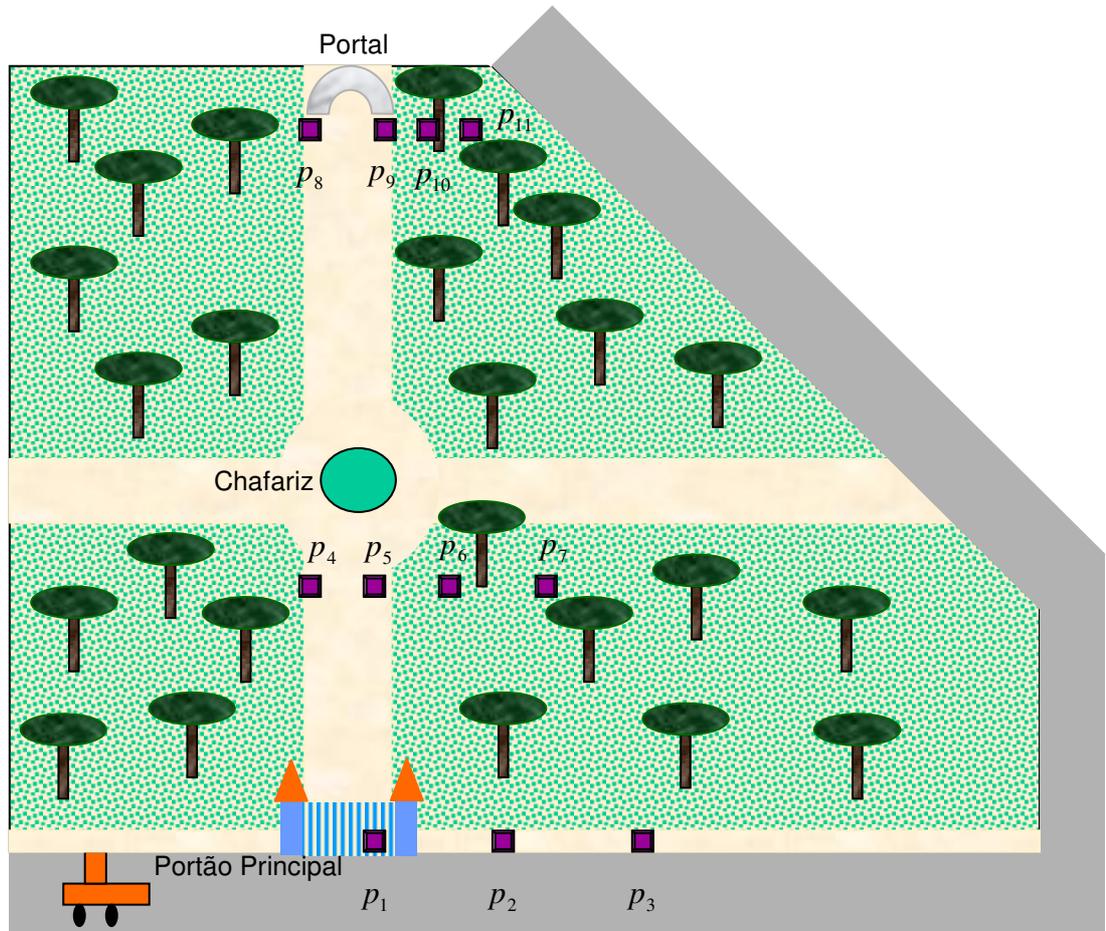


Figura 3.20. Esquema contendo os pontos de amostragem na Aléia Barbosa Rodrigues.

### 3.3.2 Amostragem Realizada em Angra dos Reis

A pesquisa por uma região com vegetação densa no Rio de Janeiro, longe dos grandes centros urbanos, apontou para uma localidade próxima a Angra dos Reis, nas coordenadas levantadas pelo GPS de S22 igual a 54.554 e W44 igual a 19.891. Nesta coordenada, foram coletadas amostras de ar adotando-se o mesmo procedimento de coleta descrito anteriormente, durante um período de 12 horas, e a uma altura de 1,60m do solo.

### 3.4 *Análise das Amostras por PIXE*

As amostras de aerossóis foram analisadas pelo método PIXE (Particle Induced X Ray Emission) para determinação da concentração elementar.

As amostras foram irradiadas na câmara de espalhamento localizada na linha a  $15^\circ$  do acelerador eletrostático Van de Graaff, de 4 MV, do Departamento de Física da Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-RIO). Foi usado um feixe de prótons de 2,0 MeV e uma corrente média no alvo de 30 nA.

Na figura 3.21 é mostrada uma vista parcial do arranjo experimental usado na linha de PIXE do acelerador van de Graaff. No primeiro plano pode ser visto o copo de Faraday usado para medir a carga, o visor usado para posicionar a amostra, a câmara em azul e a torre suporte de alvos (amostras). Na Figura 3.22 é apresentado um esquema simplificado do arranjo experimental utilizado.

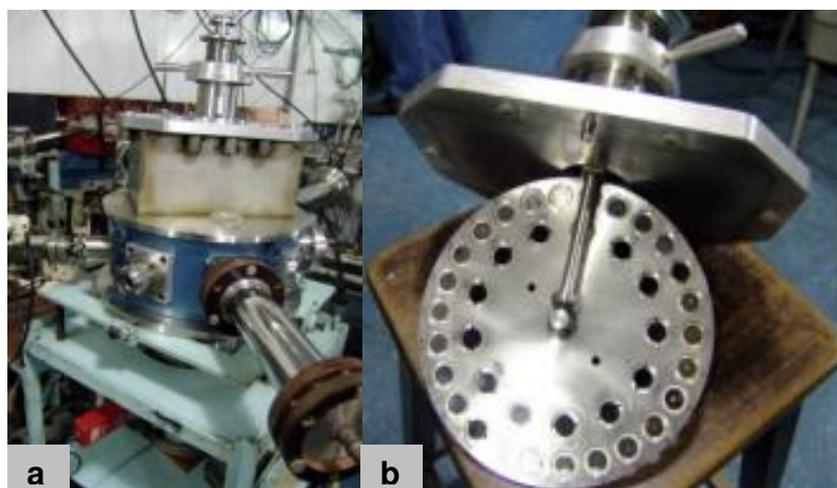


Figura 3.21. (a) Arranjo experimental da linha de PIXE no acelerador Van de Graaff da PUC-RJ. (b) Detalhe da torre suporte de amostra.

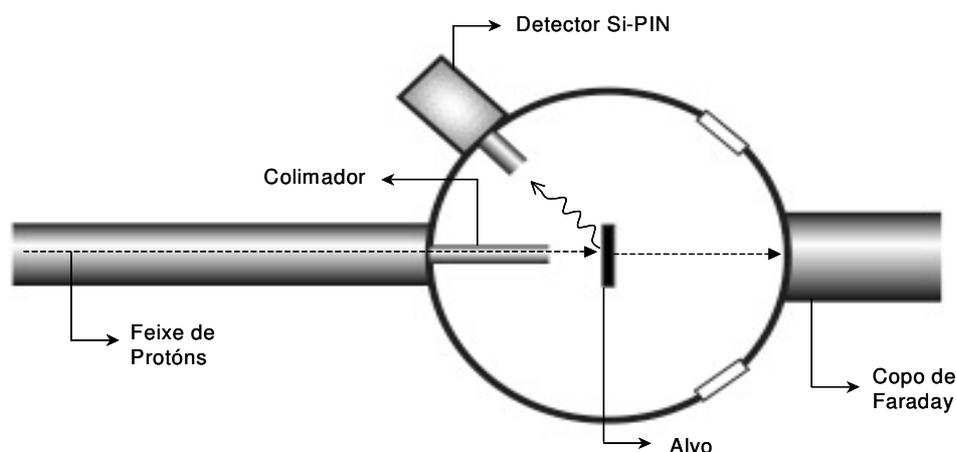


Figura 3.22. Esquema simplificado do arranjo experimental utilizado na técnica de PIXE.

As amostras foram fixadas em um disco que permite colocar 39 alvos no interior da câmara simultaneamente, e este foi fixado na torre de suporte da câmara, de forma a ficar disposto perpendicularmente à direção do feixe de prótons. A pressão interna na câmara de espalhamento é inferior a  $2 \times 10^{-6}$  torr.

Na entrada da câmara estão localizados dois colimadores de 4 e 5 mm de diâmetro cada um. O copo de Faraday, utilizado para determinação da corrente de que passa pelo alvo, foi colocado diametralmente oposto à entrada do feixe na câmara. O detector de raios X foi colocado a  $135^\circ$  em relação à direção do feixe incidente sobre as amostras. Os raios X característicos emitidos pelos elementos presentes nas amostras são detectados por um detector do tipo Si-PIN, com janela de berílio, modelo Ampitex, modelo XRT-100. Os espectros de raios X são analisados em um analisador multicanal (marca NORLAND) e armazenados em um computador conectado à saída do multicanal situado após o alvo. A carga e o tempo de irradiação são contados utilizando um Timer Counter, modelo Ortec EG7G 994.

### 3.4.1 Calibração do Arranjo de Irradiação

A curva de eficiência absoluta é determinada irradiando-se alvos padrões conhecidos nas mesmas condições experimentais das amostras e determinando-se as relações  $K_{\alpha}/K_{\beta}$  para cada elemento. A curva foi obtida normalizando a razão  $K_{\alpha}/K_{\beta}$  do elemento  $Z+1$  em relação à razão  $K_{\alpha}/K_{\beta}$  do elemento  $Z$ . Este procedimento, descrito em detalhes na literatura, evita a necessidade de correções devido à geometria do arranjo experimental (Paschoa, A.S. et al., 1977; Dias da Cunha, 1988). A curva de eficiência absoluta foi obtida utilizando-se um alvo de solução padrão de rubídio (Rb) e validada com alvos de soluções padrões de selênio (Se) e manganês (Mn), e está representada na Figura 3.23.

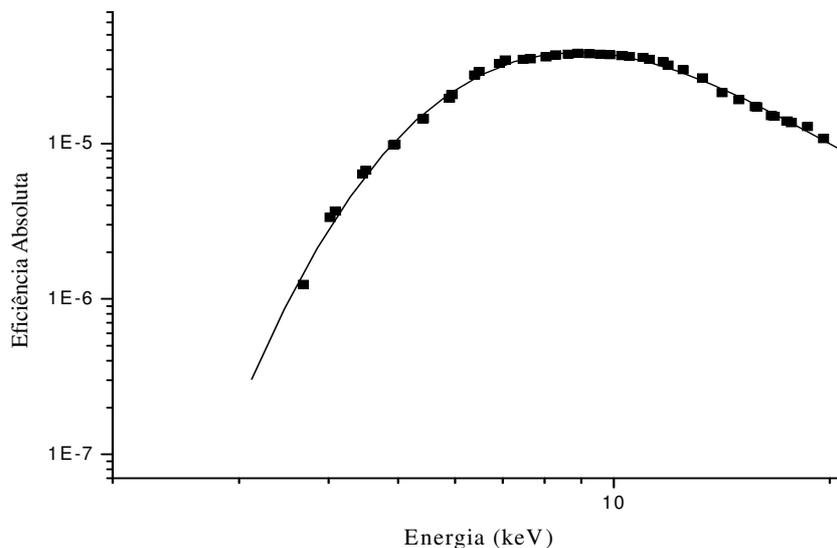


Figura 3.23. Curva de eficiência absoluta do detector de Raios X.

Foi utilizada, como absorvedor, uma folha de Al com 0,2 mm de espessura na janela do detector de raios X. O uso de absorvedores sobre a janela do detector tem por objetivo atenuar os raios X das linhas L, M, N,... de baixa energia, possibilitando obter-

se um espectro com baixo ruído de fundo e, portanto, mais fácil de analisar. Uma desvantagem no uso de absorvedores é a atenuação dos raios X de elementos leves como S, Si e K.

### 3.4.2 Limite de Detecção

O limite de detecção do método PIXE foi determinado pela Eq.3.3.

$$\text{LMD} = 3\sqrt{N_{\text{xBg}}}, \quad (3.3)$$

onde  $N_{\text{xBg}}$  representa o número de contagens da radiação de fundo na região de interesse.

O limite de detecção da técnica de PIXE, para cada elemento, depende da energia das partículas incidentes, da seção de choque dos elementos irradiados e do arranjo experimental. Devido à variação da seção de choque foram determinadas duas curvas de limite de detecção, uma para os elementos leves ( $Z \leq 42$ ), identificados pelas linhas  $K_{\alpha}$  e outra para os elementos pesados ( $Z \geq 43$ ), identificados pelas linhas  $L_{\alpha}$ . Nas Figuras 3.24 e 3.25, são apresentadas as curvas dos limites de detecção para os elementos de linhas de energia  $K_{\alpha}$  e  $L_{\alpha}$ , respectivamente.

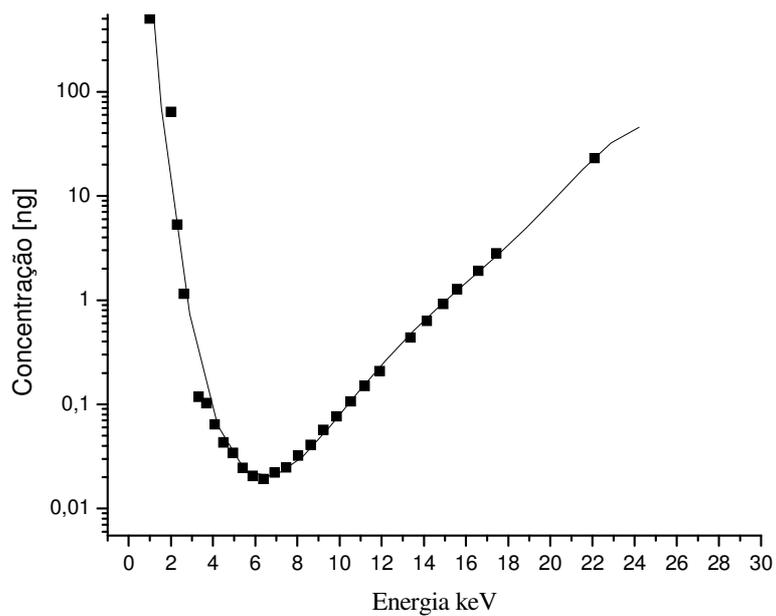


Figura 3.24. Curva do limite de detecção do método PIXE, para os elementos leves ( $Z \leq 42$ ), identificados pelas linhas de energia  $K_{\alpha}$ .

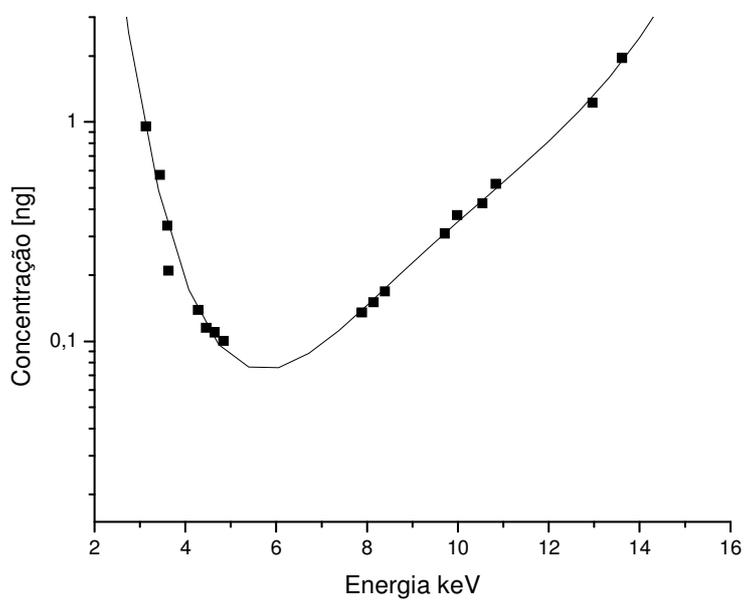


Figura 3.25. Curva do limite de detecção do método PIXE, para os elementos pesados ( $Z \geq 43$ ), identificados pelas linhas de energia  $L_{\alpha}$ .

O limite de detecção (LD) da técnica varia para cada elemento, estando na faixa de 0,018 a 500 ng para todos os elementos da Tabela Periódica. .

A uniformidade do feixe foi obtida com o sistema de colimadores utilizados. Assim, ao garantirmos que toda amostra estava dentro da área do feixe, foram eliminadas as incertezas associadas à não uniformidade do feixe e não homogeneidade da amostra.

### 3.4.3 Análise de Espectros

Os espectros multielementares obtidos das amostras foram analisados através do programa de computador FITU, desenvolvido para este fim no laboratório Van de Graaff (Barros Leite et al, 1978). A contribuição de cada elemento presente na amostra foi determinada comparando-se ao espectro padrão. O espectro padrão é obtido irradiando, nas mesmas condições experimentais das amostras, um alvo do elemento de interesse. O espectro padrão (espectro monoelementar) é sobreposto ao espectro da amostra (espectro multielementar). O alvo padrão é normalizado em relação à contribuição do elemento no espectro da amostra e em seguida é subtraída a contribuição do elemento no espectro da amostra. Os espectros dos elementos com  $Z \leq 42$  (Mo) são normalizados em relação as linhas  $K_{\alpha}$  e  $K_{\beta}$  e os espectros dos elementos mais pesados  $Z \geq 42$  são normalizados em relação as linhas  $L_{\alpha}$  e  $L_{\beta}$ .

## CAPÍTULO 4

### - Resultados e Discussões -

#### 4.1 Experimentos com Plantas no Túnel

Na simulação realizada no túnel foram utilizados vasos de plantas dispostos em arranjos conforme descritos no Capítulo 3.

##### 4.1.1 Arranjo I

Neste arranjo foram utilizados 15 vasos de plantas, dispostos em 2 grupos de 6 vasos e 1 grupo de 3 vasos, conforme apresentado na Figura 3.5. As concentrações de Cu nas amostras coletadas nas posições  $PT_1$  a  $PT_4$  são apresentadas na Tabela 4.1.

Tabela 4.1. Concentrações de Cu nas amostras coletadas no arranjo I.

Posição do APC	Concentração de Cu ( $ng / m^3$ )
$PT_1$	5,3221
$PT_2$	4,0239
$PT_3$	3,0163
$PT_4$	2,2799

##### 4.1.2 Arranjos II e III

Nos arranjos II e III foram utilizados 10 e 6 vasos de plantas, respectivamente. Assim como no arranjo I, os vasos foram dispostos em 3 grupos – 2 contendo 4 vasos e 1 contendo 2 vasos – no arranjo II, e em 3 grupos de 2 vasos cada, no arranjo III,

conforme apresentado nas Figuras 3.9 e 3.10. As concentrações de Cu nas amostras coletadas nas quatro posições no interior do túnel, nos arranjos II e III, são apresentadas na Tabela 4.2 e 4.3, respectivamente.

Tabela 4.2. Concentrações de Cu nas amostras coletadas no arranjo II.

Posição do APC (m)	Concentração de Cu ( $ng / m^3$ )
$PT_1$	9,2036
$PT_2$	5,9281
$PT_3$	3,1907
$PT_4$	2,0118

Tabela 4.3. Concentrações de Cu nas amostras coletadas no arranjo III.

Posição do APC (m)	Concentração de Cu ( $ng / m^3$ )
$PT_1$	4,9235
$PT_2$	2,5120
$PT_3$	1,1277
$PT_4$	0,7012

Os resultados obtidos mostraram a existência de variação da concentração de Cu com a distância dos amostradores ao gerador de aerossóis. Na Tabela 4.4 são apresentadas as concentrações de Cu normalizadas em relação às concentrações de Cu existentes nas amostras coletadas nas posições  $PT_1$  do experimento livre e dos experimentos com vegetação no interior do túnel.

Tabela 4.4. Concentrações normalizadas de Cu obtidas nas amostras coletadas no túnel.

Posição do APC	Concentrações normalizadas de Cu			
	Experimento Livre	Arranjo I	Arranjo II	Arranjo III
$PT_1$	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000
$PT_2$	0,5312	0,7561	0,6441	0,5102
$PT_3$	0,2542	0,5667	0,3467	0,2290
$PT_4$	0,1747	0,4284	0,2186	0,1424

As concentrações normalizadas de cada um dos experimentos foram comparadas. Nesta comparação, foi utilizado o teste estatístico não paramétrico pareado de Wilcoxon ( $\alpha = 0,5$ ). Os resultados indicam que a distribuição das concentrações de Cu obtida nas amostras coletadas em cada experimento não são estatisticamente iguais. Os detalhes da aplicação e as tabelas com os resultados dos testes utilizados são apresentados no Apêndice D.

Na Tabela 4.5 são apresentadas as taxas de liberação mássica para cada um dos experimentos considerados neste estudo, quais sejam: livre, arranjo I, arranjo II e arranjo III. Os valores de  $\sigma_y$  para cada posição de amostragem estão apresentados na Tabela 3.1.

Tabela 4.5. Taxas mássicas de material liberado nos experimentos estudados.

Arranjo Avaliado	Taxa Mássica $Q$ (g/s)
Livre	$2,2967 \cdot 10^{-13}$
I	$1,7741 \cdot 10^{-13}$
II	$3,0679 \cdot 10^{-13}$
III	$1,6412 \cdot 10^{-13}$

Após o cálculo dos valores de  $Q$  e de  $\sigma$ , foi possível estabelecer os valores de  $k$ , para as posições  $PT_i$ ,  $2 \leq i \leq 4$ , em cada arranjo. Os valores do parâmetro  $k$ , obtidos utilizando-se a Eq.3.2, e dos percentuais da região analisada que estava preenchida por vegetação são apresentados na Tabela 4.6.

Os valores obtidos para  $k$ , em cada arranjo estudado, foram correlacionados com os percentuais determinados anteriormente para as posições  $PT_i$ ,  $2 \leq i \leq 4$ , considerando-se as densidades de vegetação existentes entre o ponto estudado e o ponto de liberação de material.

Na Figura 4.1 são apresentados os valores de  $k$  em função do percentual preenchido por vegetação na área analisada, para as posições amostradas. Os valores dos parâmetros mostram que se pode realizar um ajuste linear para este conjunto de dados, considerando-se um coeficiente de correlação igual a 0,988.

Tabela 4.6. Valores do parâmetro  $k$  e dos percentuais de preenchimento com vegetação.

Arranjo	Posição de Amostragem					
	$PT_2$		$PT_3$		$PT_4$	
	$k$	%	$k$	%	$k$	%
I	0,43050	72	0,55671	73	0,51385	75
II	0,23506	47	0,21539	48	0,18725	50
III	-0,04915	22	-0,07245	23	-0,02073	25

Verificou-se, então, que existe uma correlação entre o valor de ajuste  $k$  e a densidade de vegetação existente entre o ponto de liberação de material e o ponto estudado. Assim, conhecendo-se a densidade de vegetação entre os pontos mencionados

anteriormente, que pode ser relacionada através de uma fotografia digital, e a quantidade de material liberado, pode-se estimar a concentração existente a uma determinada distância do ponto de liberação, no interior do túnel.

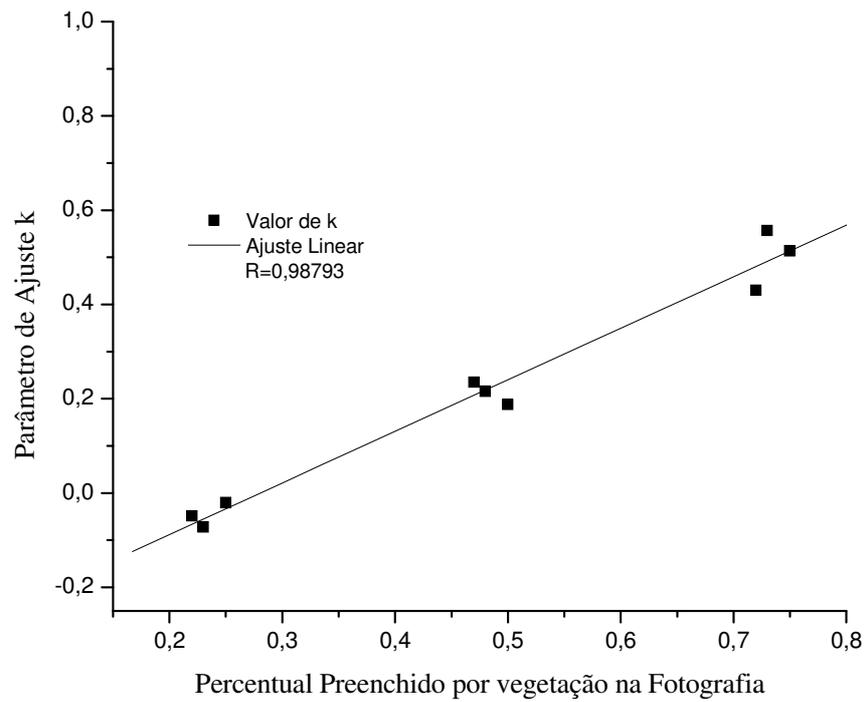


Figura 4.1. Ajuste linear dos valores do parâmetro  $k$  em função do percentual de vegetação.

#### 4.1.3 Modelo Proposto II

O comportamento da concentração em função da distância, para os experimentos realizados no túnel, com e sem vegetação, também foi avaliado através do ajuste de uma função aos valores obtidos de concentração de Cu nas amostras coletadas em cada experimento, normalizadas em relação à concentração encontrada no primeiro APC, e das distâncias ao gerador.

As concentrações normalizadas de Cu determinadas estão agrupadas na Tabela 4.7. Na Figura 4.2 é apresentado o gráfico que mostra a variação da concentração em relação à distância do amostrador ao gerador de aerossol, para os experimentos realizados.

As concentrações de Cu nas amostras coletadas nos diversos arranjos experimentais realizados foram ajustadas através de uma função que apresentasse o mesmo comportamento para cada conjunto separadamente.

Tabela 4.7 – Concentrações normalizadas de Cu nas amostras coletadas nos diversos arranjos.

Distância Gerador/APC	Arranjo Livre (S/ vasos)	Arranjo I (15 Vasos)	Arranjo II (10 Vasos)	Arranjo III (6 Vasos)
0,2	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000
0,82	0,5312	0,7561	0,6441	0,5102
1,44	0,2542	0,5667	0,3467	0,2290
2,06	0,1747	0,4284	0,2186	0,1424

Analisando-se o gráfico da Figura 4.2, nota-se que o comportamento referente a concentração de cobre no interior do túnel apresenta um padrão de sigmóide. Neste caso, a literatura recomenda a utilização o modelo sigmoidal de Boltzmann para se ajustar uma curva aos dados apresentados, (MOTULSKY, 1995). Após a realização do ajuste proposto aos dados levantados em cada um dos experimentos realizados no túnel, verificou-se que a função sigmóide de Boltzmann se ajustava satisfatoriamente aos valores encontrados, apresentando alto grau de ajuste ao fenômeno estudado.

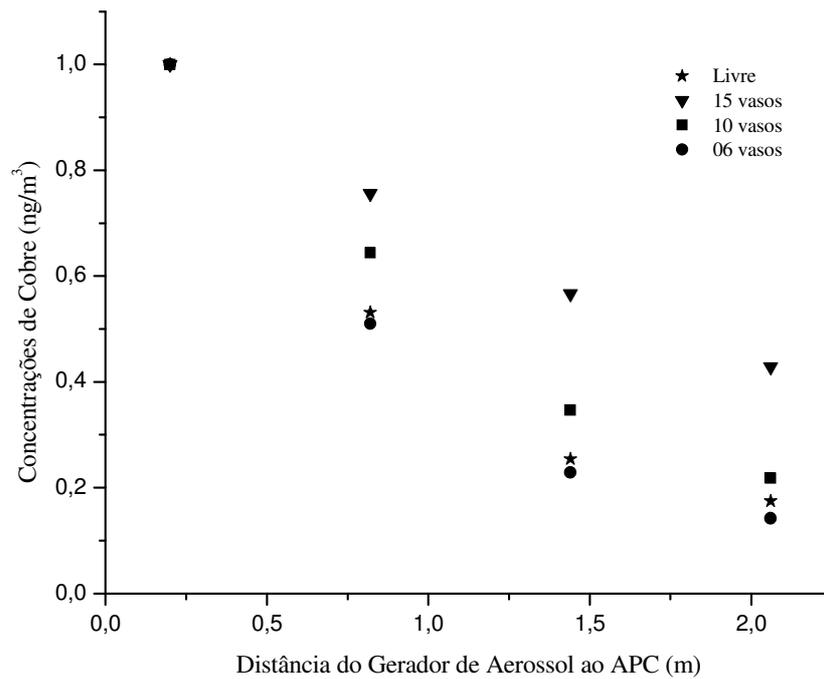


Figura 4.2. Concentrações normalizadas de Cu coletadas nos diversos experimentos.

Assim, foi possível ajustar cada conjunto de valores obtidos utilizando o modelo de Boltzmann, que é descrito pela Eq.4.1.

$$y(x) = \frac{A_1 - A_2}{1 + e^{(x-x_0)/dx}} + A_2, \quad (4.1)$$

onde  $A_1$ ,  $A_2$ ,  $x_0$  e  $dx$  são parâmetros de ajuste da equação, “e” é a base dos logaritmos neperianos e  $x$  é a variável independente, que representa a distância do gerador de aerossol ao amostrador analisado.

Na Tabela 4.8 são apresentadas as estimativas dos parâmetros encontrados para as equações de Boltzmann que se ajustavam aos valores de concentrações de Cu em cada arranjo, assim como o fator de determinação. As curvas obtidas são apresentadas na Figura 4.3.

Tabela 4.8. Estimativas dos parâmetros das sigmóides ajustadas a cada conjunto de dados.

Experimento Avaliado				
Parâmetros	Arranjo Livre	Arranjo I	Arranjo II	Arranjo III
$A_1$	1,38970	2,94721	1,29610	1,49380
$A_2$	0,15267	0,14492	0,16479	0,11513
$x_0$	0,50179	-0,92432	0,67809	0,44182
$dx$	0,38858	1,36620	0,46111	0,41459
$R^2$	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000

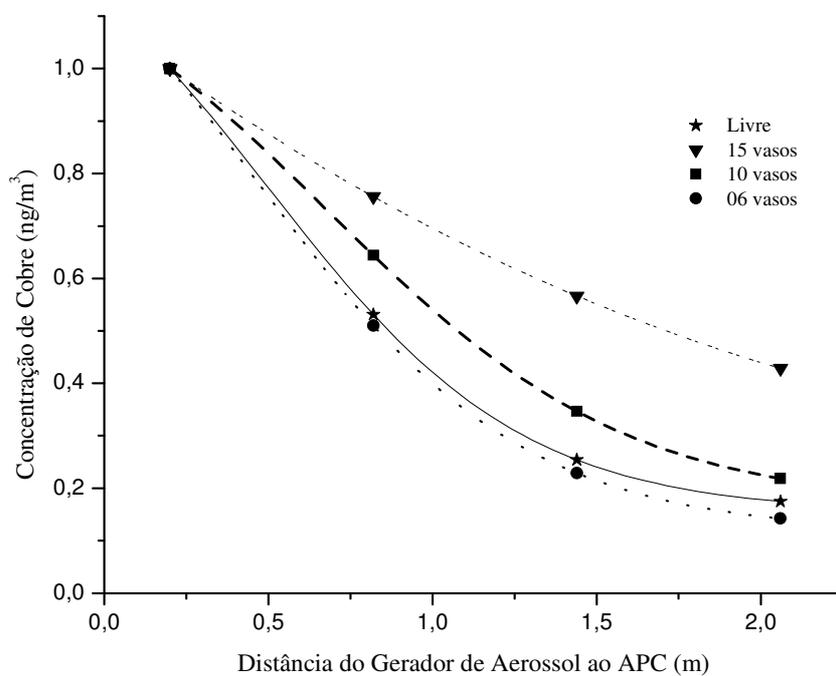


Figura 4.3. Curvas das sigmóides obtidas para os arranjos estudados.

A fim de avaliar a influência da densidade de vegetação na dispersão da pluma, adotou-se a metodologia descrita a seguir.

Inicialmente, tomou-se a sigmóide que se ajustava às concentrações normalizadas de Cu para o arranjo livre em função da distância ao gerador de aerossol e realizou-se uma análise de sensibilidade dos parâmetros envolvidos na equação de Boltzman. Após esta análise, verificou-se que ao se alterar somente o parâmetro  $A_2$ , a curva de ajuste obtida para o experimento do arranjo livre se deslocava de forma a se aproximar dos valores obtidos nos demais arranjos, onde os vasos de plantas estavam presentes.

Em seguida, estudou-se o comportamento da sigmóide obtida para o arranjo livre, quando se variava o parâmetro  $A_2$ , comparando o resultado determinado com os valores de concentrações encontradas nos arranjos I, II e III, e com o erro cometido ao se trocar a sigmóide encontrada para os arranjos com vasos de plantas por esta curva obtida quando se variava o parâmetro  $A_2$  na equação resultante do ajuste dos dados do experimento livre.

Assim, para os arranjos com vasos de plantas, foram obtidos os valores de  $A_2$  e do erro associado utilizando-se o procedimento anterior. Os valores do parâmetro  $A_2$  e do menor erro cometido ao se trocar a sigmóide encontrada para os arranjos com vasos de plantas pela curva obtida quando se variava o parâmetro  $A_2$  na equação que ajustava os dados do experimento livre são apresentados na Tabela 4.9, enquanto que nas Figuras 4.4, 4.5 e 4.6 são apresentadas as curvas de sigmóide obtidas para o arranjo livre e para um arranjo com plantas, além do melhor ajuste das sigmóides obtidas ao se variar  $A_2$ , com o menor erro.

Tabela 4.9. Valores de  $A_2$  e do menor erro para realizar o ajuste proposto.

Experimento Avaliado			
	Arranjo I	Arranjo II	Arranjo III
$A_2$	0,44	0,18	0,10
Erro (%)	10	10	10

Após os ajustes realizados, buscou-se relacionar o parâmetro  $A_2$  encontrado em cada caso com a densidade de vegetação correspondente, existente no caminho da pluma. Inicialmente, propôs-se relacionar este parâmetro  $A_2$  com o percentual preenchido por folhas de uma área delimitada em torno do amostrador. Para isso, utilizaram-se as fotografias digitais retiradas para cada arranjo estudado e os registros sobre estes arranjos. Na Tabela 4.10 estão apresentados os valores de  $A_2$  associados aos percentuais de vegetação na área analisada nas fotografias obtidas em cada arranjo.

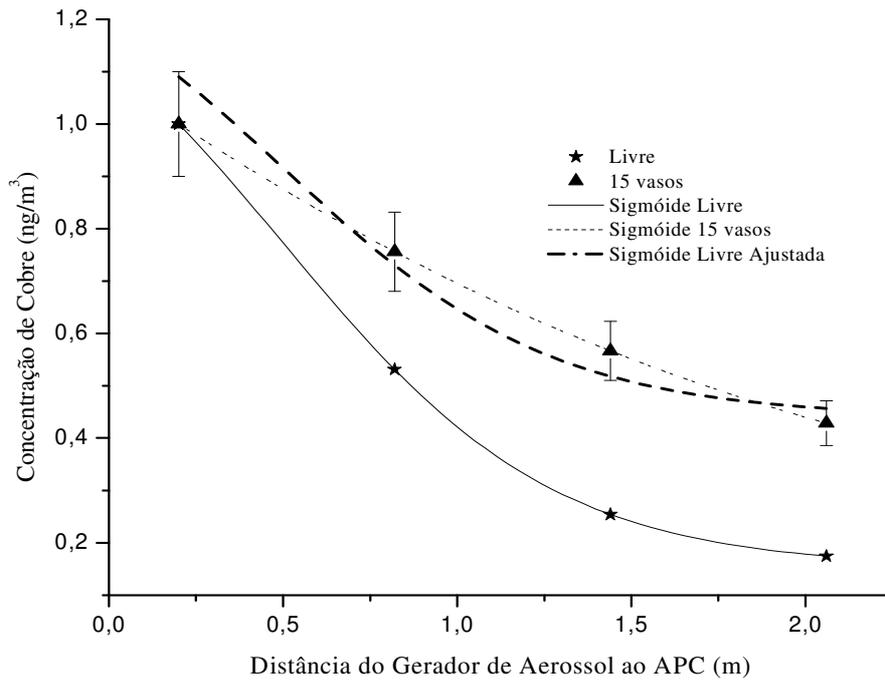


Figura 4.4. Ajuste de sigmóide do arranjo livre para o arranjo I.

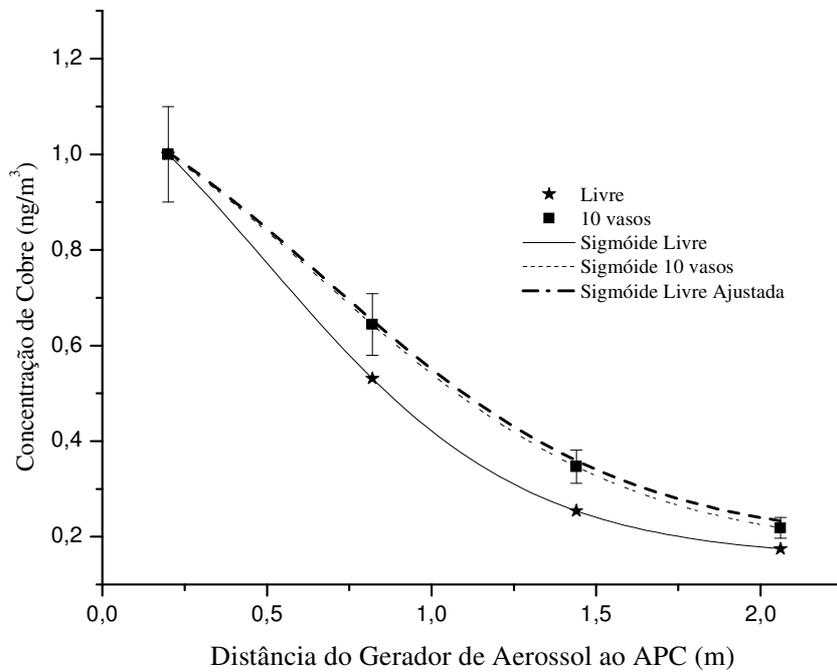


Figura 4.5. Ajuste de sigmóide do arranjo livre para o arranjo II.

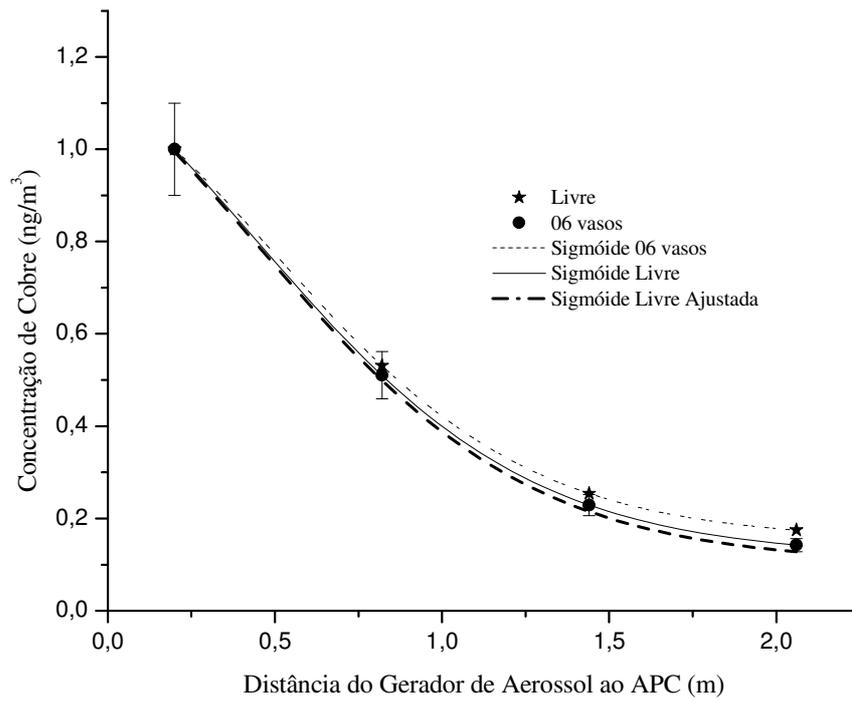


Figura 4.6. Ajuste de sigmóide do arranjo livre para o arranjo III.

Tabela 4.10. Valores correspondentes entre  $A_2$  e o percentual de preenchimento da fotografia, em cada Arranjo.

Experimento Avaliado			
	Arranjo I	Arranjo II	Arranjo III
$A_2$	0,44	0,18	0,10
(%)	75	50	25

A relação entre o percentual de preenchimento de vegetação na região delimitada em torno do ponto de amostragem e o parâmetro  $A_2$  da sigmóide ajustada aos valores obtidos no experimento sem vegetação é apresentada na Figura 4.7.

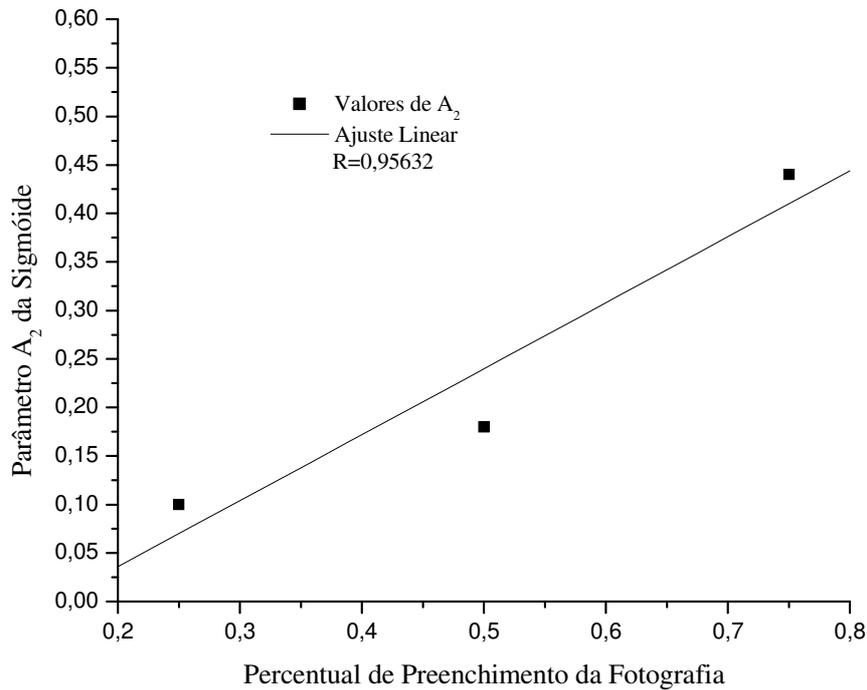


Figura 4.7 – Relação entre o percentual de preenchimento da fotografia e o parâmetro  $A_2$  da Sigmóide.

A fim de verificar o erro associado a este procedimento, foram obtidos os valores do parâmetro  $A_2$  através do ajuste linear resultante. Estes valores de  $A_2$  foram substituídos na equação de Boltzmann, ajustando assim a equação resultante dos dados do experimento livre numa equação que representava a equação nos experimentos com vegetação.

Os valores obtidos em cada ponto, usando as equações ajustadas, foram comparados com os valores experimentais. Os resultados mostram que este procedimento gerou estimativas de concentrações nas posições no interior do túnel com vegetação com erros inferiores a 53%. Os resultados obtidos estão apresentados nas Tabelas 4.11 a 4.13.

Tabela 4.11. Concentrações normalizadas de Cu no arranjo I.

Posição do APC	Arranjo I		
	Experimental	$A_2$ Ajustado	Erro (%)
$PT_1$	1,0000	1,0809	7,4875
$PT_2$	0,7561	0,7099	6,5070
$PT_3$	0,5667	0,4905	15,5262
$PT_4$	0,4284	0,4275	0,2110

Tabela 4.12. Concentrações normalizadas de Cu no arranjo II.

Posição do APC	Arranjo II		
	Experimental	$A_2$ Ajustado	Erro (%)
$PT_1$	1,0000	1,0274	2,6629
$PT_2$	0,6441	0,5919	8,8105
$PT_3$	0,3467	0,3345	3,6431
$PT_4$	0,2186	0,2605	16,0955

Tabela 4.13. Concentrações normalizadas de Cu no arranjo III.

Posição do APC	Arranjo III		
	Experimental	$A_2$ Ajustado	Erro (%)
$PT_1$	1,0000	0,9738	2,6926
$PT_2$	0,5102	0,4740	7,6400
$PT_3$	0,2290	0,1785	28,2995
$PT_4$	0,1424	0,0936	52,1848

Assim, tendo-se a fotografia da região com vegetação, determina-se a região em torno do local de interesse e, conseqüentemente, o percentual de preenchimento de vegetação. Através do ajuste linear realizado anteriormente, obtém-se o valor do parâmetro  $A_2$  correspondente a este percentual e a equação da sigmóide para a região. Substituindo-se o valor de  $A_2$  na equação da sigmóide ajustada aos dados de arranjo livre, determina-se a concentração de Cu no ponto estudado no interior da região com vegetação.

#### **4.2 Validação do Modelo proposto**

Conforme descrito anteriormente, o modelo proposto com base nos resultados da simulação em laboratório foi testado utilizando-se dados de dispersão de particulado em uma floresta, onde as distâncias são maiores e as condições meteorológicas atuam com maior intensidade.

##### **4.2.1 Experimentos Realizados no Jardim Botânico**

A caracterização dos aerossóis foi realizada determinando-se a concentração de metais, na fração fina do aerossol,  $d_{\text{aer}} < 2,5 \mu\text{m}$ .

Partículas contendo Ca, Ti, V, Cr, Fe, Ni, Cu, e Zn foram identificadas nas amostras coletadas no Jardim Botânico. Partículas contendo Ca e Zn são de origem orgânica, enquanto que a principal fonte geradora de partículas contendo Ti, Cr, Ni e Cu é o efeito do intemperismo sobre o rochedo próximo. Partículas transportadas pelo ar contendo Vanádio (V) indicam a presença de partículas geradas pela queima de combustível fóssil usados nos veículos automotores que circulam nas vias próximas ao Jardim Botânico, como a Rua Jardim Botânico e a Rua Pacheco Leão. Deste modo, as

partículas contendo V foram usadas como indicador da dispersão do aerossol gerado pelo tráfego de veículos.

As concentrações de Vanádio determinadas nos locais de amostragem são apresentadas na Figura 4.8. As amostras do grupo A ( $P_1$ ,  $P_2$  e  $P_3$ ) foram coletadas junto à Rua Jardim Botânico, as amostras do grupo B ( $P_8$  a  $P_{11}$ ) foram coletadas junto à Rua Pacheco Leão, e as amostras do grupo C ( $P_4$  a  $P_7$ ) foram coletadas no centro da Aléia Principal (Barbosa Rodrigues) do JB, próximo ao chafariz. Estes três grupos foram comparados, aplicando-se o teste estatístico não paramétrico de Mann-Whitney ( $p=0,05$ ), e os resultados mostraram que não existe diferença estatística significativa entre eles. Este comportamento é devido ao fato do JB ser ladeado por duas vias de tráfego intenso: as Ruas Pacheco Leão e Jardim Botânico, conforme apresentado no esquema da Figura 3.18. Outra fonte de aerossol nesta amostragem foi a constante movimentação de veículos automotores no interior do JB, usados na manutenção do JB. Os detalhes da aplicação e as tabelas com os resultados dos testes são apresentadas no Apêndice D.

Para analisar a interferência da vegetação do JB na dispersão, as amostras foram reagrupadas em dois grupos: grupo D ( $P_6$ ,  $P_7$ ,  $P_{10}$  e  $P_{11}$ ), amostras coletadas nas Aléias do JB, e grupo E ( $P_1$ ,  $P_2$ ,  $P_3$ ,  $P_4$ ,  $P_5$ ,  $P_8$  e  $P_9$ ), amostras coletadas nas áreas com vegetação.

Analisando-se os resultados dos experimentos realizados no JB, não foi possível avaliar a influência da vegetação do JB na dispersão da pluma. Alguns fatores podem ter contribuído para este fato, tais como: a densidade da vegetação no interior do JB e a circulação de veículos no interior do JB. Outra fonte de aerossol nesta amostragem foi a constante movimentação de veículos automotores tanto na Rua Jardim

Botânico quanto na Rua Pacheco Leão, que são ruas de intenso movimento de veículos e ambas podem ser consideradas como fonte de aerossóis.

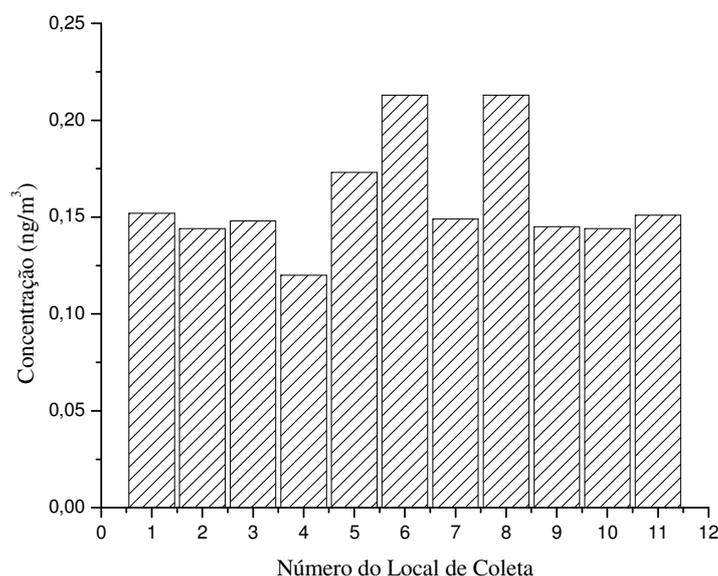


Figura 4.8. Concentração de Vanádio amostrado nas posições  $P_1$  a  $P_{11}$ , no Jardim Botânico.

Ao serem analisados os valores das concentrações encontradas nas amostras coletadas no Jardim Botânico, verificou-se que os valores obtidos são inferiores àqueles encontrados na Gávea, (LIZARRAGA, 1997 e ZAMORA, 2001). Este fato ratifica a expectativa de que numa região onde exista vegetação, as concentrações tendem a diminuir, pois a vegetação funciona como filtro.

Ao se aplicar os dados ao modelo apresentado, verificou-se que estes não se ajustaram ao que foi proposto. Isto pode ter ocorrido pelo fato dos valores das concentrações não apresentarem diferença estatística, ou seja, as mostras pertencerem à mesma distribuição estatística, uma vez que a Rua Pacheco Leão e a Rua Jardim Botânico podem ter atuado como duas fontes distintas e o efeito de superposição pode

ter mascarado os resultados, ou seja, as concentrações na região do chafariz foram originárias destas duas fontes distintas.

Assim, buscando validar as propostas apresentadas e o efeito de superposição foi estudado uma nova região com vegetação densa, localizada no município de Angra dos Reis.

#### 4.2.2 Experimentos Realizados em Angra dos Reis

A pesquisa por uma região com vegetação densa no Rio de Janeiro, longe dos grandes centros urbanos, apontou para uma localidade próxima a Angra dos Reis, nas coordenadas levantadas pelo GPS de S22 igual a 54,554 e W44 igual a 19,891. Nesta coordenada, foram coletadas amostras de ar adotando-se o mesmo procedimento de coleta descrito anteriormente, durante um período de 12 horas, e a uma altura de 1,60m do solo. A velocidade média do vento durante o experimento foi de 1,6  $m/s$ , e a temperatura manteve-se entre 27 e 30 °C. Utilizando-se o GPS, foi repetido o mesmo procedimento em cada um dos pontos identificados na Tabela 4.14.

Os resultados obtidos para as massas e concentrações de Vanádio, nas posições de coleta, estão apresentados na Tabela 4.15. Assim, foi possível obter-se a taxa de liberação mássica na posição  $PT_1$ , ou seja,  $1,276E-13 g/s$ .

Na Tabela 4.16 são apresentados os valores da concentração de Vanádio determinados nas amostras coletadas, normalizados em relação à posição  $PT_1$ .

Na Figura 4.9 é apresentado o gráfico da concentração de Vanádio normalizada em relação à distância do ponto de amostragem até a posição  $PT_1$ , além da sigmóide que melhor ajusta os pontos dados com erro inferior a 10 %. Pode-se observar que a distribuição da concentração segue uma sigmóide, e que à medida que se avança na mata densa, a concentração de Vanádio não varia significativamente. Assim, as

primeiras camadas de folhas funcionaram como um grande cinturão de folhas que impediu a dispersão de particulado menos fino para distâncias maiores.

Tabela 4.14. Localização dos pontos de amostragem em Angra dos Reis.

Posição da Coleta	Localização		Distância até $PT_1$ (m)
	S22	W44	
$PT_1$	54,554	19,891	00
$PT_2$	54,583	19,904	57
$PT_3$	54,613	19,900	113
$PT_4$	54,641	19,900	165
$PT_5$	54,674	19,919	243
$PT_6$	54,698	19,945	297
$PT_7$	54,719	19,950	364

Tabela 4.15. Massas e concentrações de V existentes no material colhido em Angra dos Reis.

Posição da coleta	Massa de V (ng)	Concentração de V ( $\mu\text{g} / \text{m}^3$ )
$PT_1$	5,511	3,827
$PT_2$	0,491	0,341
$PT_3$	0,472	0,328
$PT_4$	0,441	0,306
$PT_5$	0,429	0,298
$PT_6$	0,410	0,285
$PT_7$	0,391	0,272

Tabela 4.16. Concentrações normalizadas de Vanádio existentes no material colhido em Angra dos Reis.

Posição da coleta	Concentração de V ( $\mu\text{g} / \text{m}^3$ )	Concentração Normalizada de V
$PT_1$	3,827	1,0000
$PT_2$	0,341	0,0891
$PT_3$	0,328	0,0856
$PT_4$	0,306	0,0800
$PT_5$	0,298	0,0778
$PT_6$	0,285	0,0744
$PT_7$	0,272	0,0709

O percentual de preenchimento de uma região em torno do ponto de amostragem foi determinado de forma similar àquela adotada no experimento realizado no interior do túnel. Ou seja, foram retiradas fotografias no sentido de  $PT_i$  para  $PT_1$ ,  $2 \leq i \leq 7$ , delimitada uma região quadrada em torno quadrada de 11 cm de lado com o detector localizado no seu centro, e calculado o percentual de preenchimento deste quadrado.

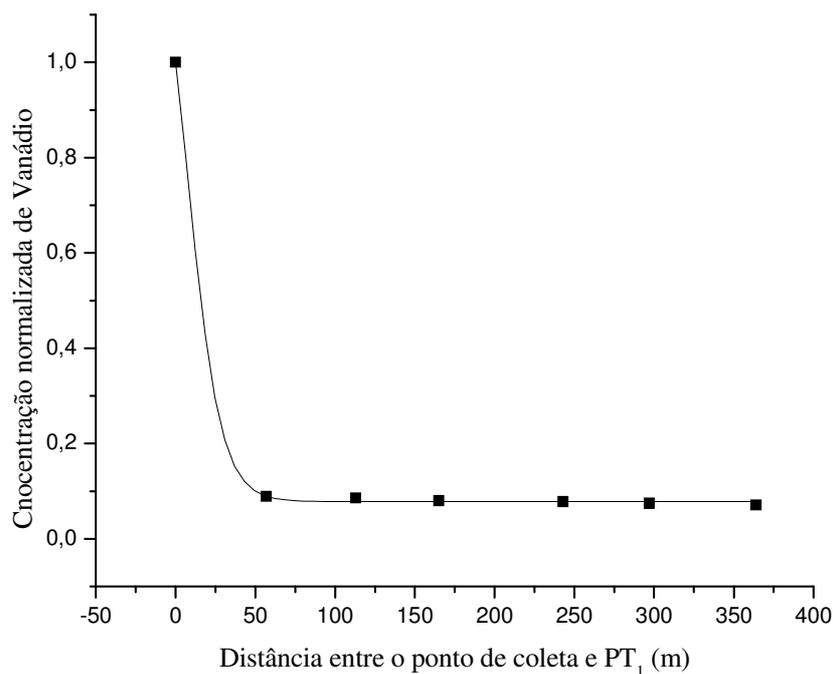


Figura 4.9. Gráfico das concentrações normalizadas de Vanádio coletado em Angra dos Reis.

#### 4.2.3 Validação do Modelo I

Os dados levantados na amostragem de ar realizada em Angra dos Reis foram trabalhados na busca da validação do modelo proposto I, quais sejam:

- a. velocidade do vento aferida no dia da coleta, de  $1,6\text{ m/s}$ , constante durante o período de amostragem de ar;
- b. temperatura próxima a  $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; e
- c. direção preferencial do vento de  $PT_1$  para  $PT_i$ .

Assim, considerando-se  $\sigma_x = \sigma_y = \sigma$ , foi possível calcular os coeficientes de dispersão utilizando-se as expressões apresentadas na Tabela 2.2. Os resultados obtidos estão apresentados na Tabela 4.17.

A partir da Eq.3.2, e utilizando-se os coeficientes de dispersão obtidos anteriormente, foram calculados os valores do parâmetro  $k$  em cada posição de coleta.

Estes valores de  $k$  obtidos para as posições  $PT_i$ ,  $2 \leq i \leq 7$ , assim como o percentual de preenchimento da fotografia obtida na posição de coleta  $PT_i$ , no sentido de  $PT_1$ , estão apresentados na Tabela 4.18. O percentual de preenchimento foi obtido utilizando-se a metodologia apresentada quando da descrição do modelo I.

Na Figura 4.10 é apresentado o gráfico do percentual de preenchimento da região definida na fotografia versus o parâmetro de ajuste  $k$ , além da função sigmóide que melhor se ajusta este conjunto de dados. Verificou-se existir uma diferença entre o coeficiente angular da reta de ajuste dos dados apresentados no gráfico da Figura 4.10 e o da Figura 4.7. Esta diferença pode ter ocorrido devido ou à diferença na ordem de grandeza das distâncias envolvidas nos experimentos ou à diferença de densidade de vegetação existente nos experimentos realizados no túnel e em Angra dos Reis. Entretanto, a modelagem apresentada pode ser adotada levando-se em consideração as distâncias até a fonte e a densidade de vegetação da região estudada.

Tabela 4.17. Coeficientes de dispersão calculados nos locais de amostragem em Angra dos Reis.

Posição da coleta	Coeficiente de dispersão(m)
$PT_2$	12,504
$PT_3$	24,719
$PT_4$	35,999
$PT_5$	52,806
$PT_6$	64,362
$PT_7$	78,609

Tabela 4.18. Parâmetro de ajuste e percentual de preenchimento das fotografias de Angra dos Reis.

Posição da coleta	Parâmetro K ( $m^{-1}$ )	Percentual de Preenchimento
$PT_2$	0,25437	0,900
$PT_3$	0,13997	0,920
$PT_4$	0,10000	0,930
$PT_5$	0,07094	0,935
$PT_6$	0,05923	0,940
$PT_7$	0,04929	0,945

A fim de validar o modelo proposto, utilizou-se a curva obtida com os dados de Angra dos Reis e verificou-se a sua validade aplicando-o aos dados obtidos no Jardim Botânico supondo-se a superposição do efeito de duas fontes distintas, conforme discutido anteriormente. Nestes dois locais estudados, as distâncias eram compatíveis e a densidade de vegetação, superiores àquelas estudadas no interior do túnel.

Utilizando-se os dados apresentados na Figura 4.10, foi possível calcular, adotando-se o modelo I, os valores médios das concentrações de Vanádio nas posições próximas ao chafariz, no interior da vegetação, além da taxa de liberação mássica das fontes provenientes da Rua Pacheco Leão e da Rua Jardim Botânico. Na Tabela 4.19 estão apresentados os valores das massas e as concentrações de vanádio, encontrados nas amostras coletadas no interior do Jardim Botânico, além dos tempos de amostragem adotados em cada caso.

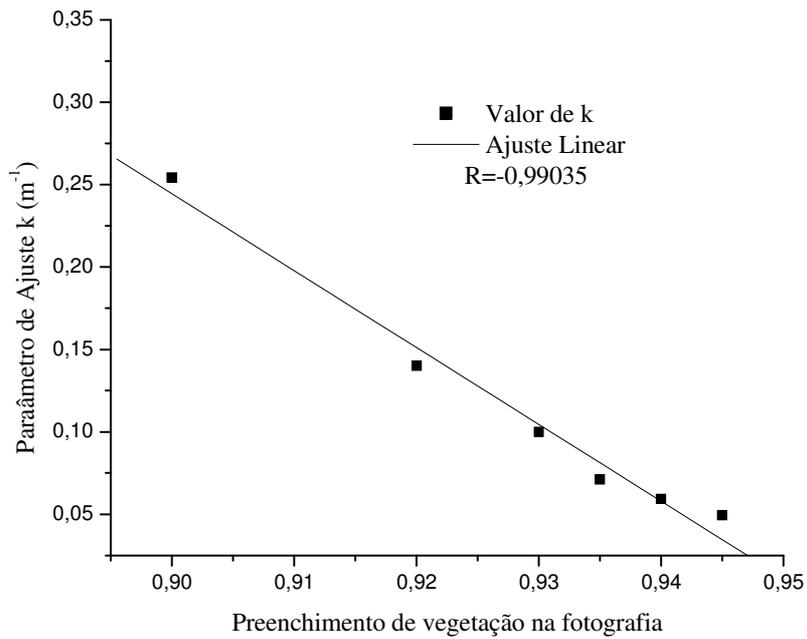


Figura 4.10. Relação entre o parâmetro k e o percentual de preenchimento das fotografias de Angra dos Reis.

Assim, os dados obtidos no Jardim Botânico foram aplicados ao modelo proposto I, utilizando a curva levantada em Angra dos Reis e considerando-se duas fontes geradoras de aerossóis: uma localizada na Rua Jardim Botânico e a outra, na Rua Pacheco Leão.

Tabela 4.19. Dados obtidos no interior do Jardim Botânico.

Local	Posição da Amostragem	Massa de V (ng)	Concentração de V ( $ng / m^3$ )	Tempo de amostragem (minutos)
Rua Jardim Botânico	$P_1$	0,5374	0,1524	1763
	$P_2$	0,5192	0,1402	1851
Chafariz	$P_6$	0,3886	0,1110	1750
	$P_7$	0,5374	0,1489	1805
Rua Pacheco Leão	$P_{10}$	0,4952	0,1435	1726
	$P_{11}$	0,5474	0,1574	1739

Na validação deste modelo, foi utilizada a curva da Figura 4.10 para levantar os valores do parâmetro de ajuste  $k$  correspondentes às distâncias das duas fontes ao chafariz do interior do Jardim Botânico. Os valores de  $k$  obtidos e o valor dos coeficientes de dispersão calculados para estas distâncias estão apresentados na Tabela 4.20.

Tabela 4.20. Parâmetros de ajuste  $k$  e coeficiente de dispersão para as distâncias do JB.

Distância da Fonte	Parâmetro K ( $m^{-1}$ )	Coefficiente de Dispersão (m)
355	0,05785	76,7012
249	0,08119	54,0937

A média das massas de Vanádio obtidas experimentalmente nas posições  $P_1$  e  $P_2$  foi utilizada para calcular a taxa de liberação mássica, ( $Q_1$ ), equivalente a uma fonte localizada na Rua Jardim Botânico. Assim como a média das massas de Vanádio

encontradas nas posições  $P_{10}$  e  $P_{11}$  foi utilizada para calcular a taxa de liberação mássica, ( $Q_2$ ), equivalente a uma fonte localizada na Rua Pacheco Leão. Os valores encontrados para estas taxas de liberação mássica e as concentrações de Vanádio obtidas aplicando-se o modelo proposto I estão apresentados na Tabela 4.21.

Tabela 4.21. Taxa de liberação mássica  $Q_1$  e  $Q_2$ , e concentrações de Vanádio pelo modelo proposto I.

Origem	Taxa de liberação Mássica (g/s)	Concentração (Modelo I) (ng / m <sup>3</sup> )
$P_1$ e $P_2$	4,877E-15	0,1828
$P_{10}$ e $P_{11}$	5,014E-15	0,2734

A concentração de Vanádio no chafariz, aplicando-se o modelo proposto I, foi obtida considerando-se que a direção do vento manteve-se constante no sentido da fonte para o chafariz. Os valores encontrados foram comparados com a concentração experimental levantada para o mesmo local a fim de validar o modelo proposto. Entretanto, durante o experimento realizado no Jardim Botânico observou-se que o vento permaneceu no sentido da Rua Jardim Botânico para o chafariz em 80% do tempo de amostragem.

Comparando-se o valor ponderado, calculado através do modelo proposto I, com o valor médio obtido experimentalmente para a região de vegetação próxima ao chafariz, constata-se um erro inferior a 48%, ou seja, dentro do estudado na proposta deste modelo. Assim, este modelo pode ser validado utilizando-se os dados levantados no interior do Jardim Botânico.

#### 4.2.4 Validação do Modelo II

Objetivando validar o segundo modelo, foram utilizados os dados de Angra dos Reis para levantar a Sigmóide compatível com as distâncias utilizadas no primeiro modelo. Para isto, foram estimados os valores teóricos da concentração de Vanádio nas posições equivalentes a  $PT_i$ ,  $2 \leq i \leq 7$ , sem a interferência da vegetação na dispersão da pluma, utilizando-se a Eq.2.15. Além disso, o valor experimental obtido para a posição  $PT_1$  foi utilizado para determinar a taxa de liberação mássica deste experimento. Neste modelo foram adotadas as mesmas suposições do modelo I.

Os valores das concentrações normalizadas de Vanádio para uma mesma posição, com e sem vegetação, estão apresentados na Figura 4.11, assim como o ajuste de uma Sigmóide de Boltzmann a estes dois conjuntos de dados.

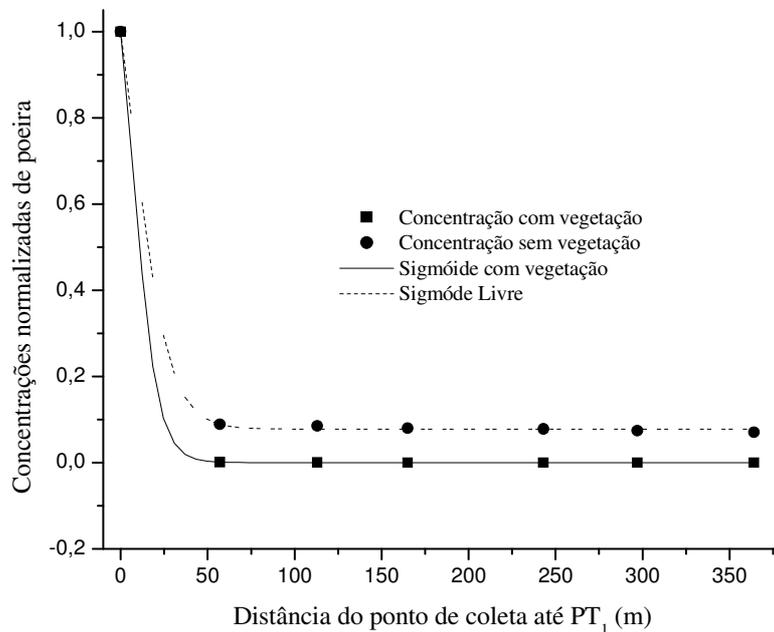


Figura 4.11. Sigmóides obtidas dos experimentos realizados em Angra dos Reis.

Na Figura 4.12 é apresentado o ajuste realizado na sigmóide do experimento livre, calculado teoricamente, para uma Sigmóide que ajustasse os dados obtidos com vegetação, em Angra dos Reis.

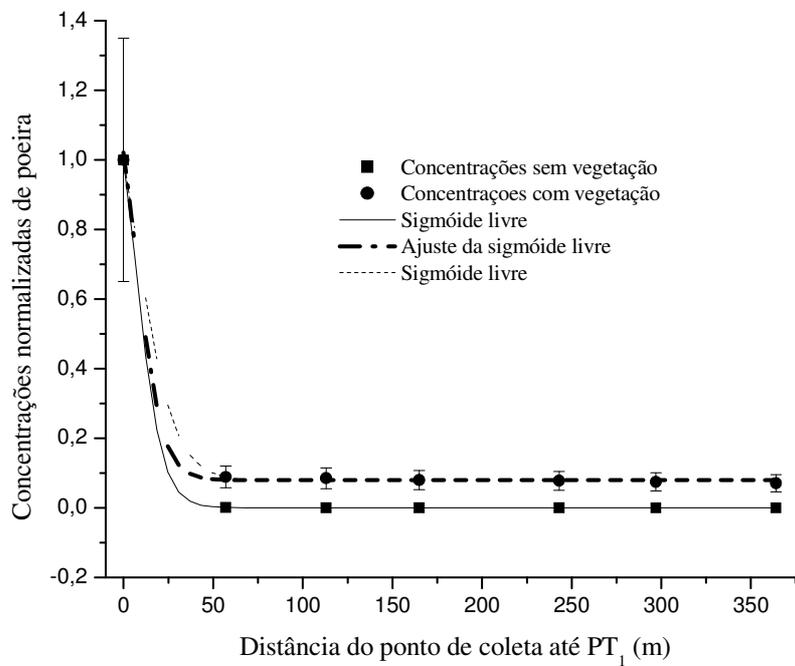


Figura 4.12. Ajuste da Sigmóide de Boltzmann aos dados de Angra dos Reis.

Assim, adotando-se o mesmo procedimento apresentado anteriormente para este modelo, variou-se o valor do parâmetro  $A_2$  na equação da sigmóide construída com os valores calculados pela Eq. 2.15, de tal forma que esta se aproximasse da sigmóide construída a partir dos dados experimentais. Verificou-se que nesta situação, o erro apresentado foi bem menor do que os 10 % encontrados nos experimentos realizados no interior do túnel. Pode-se observar, também, que tanto no experimento realizado no túnel quanto em Angra dos Reis, os dados obtidos se ajustam a uma função sigmóide.

Entretanto, para obter-se a validação deste modelo, seria necessária a realização de novos experimentos numa região com densidade de vegetação e distâncias

compatíveis com as estudadas nos experimentos de realizados em Angra dos Reis, e utilizando-se a curva de  $A_2$  versus percentual de preenchimento encontrar a Sigmóide para esta nova região.

## CAPÍTULO 5

### - Conclusões e Sugestões -

A análise dos resultados obtidos nos experimentos realizados neste trabalho permite concluir que os objetivos propostos foram alcançados. O ajuste do comprimento do túnel, bem como o correto posicionamento dos amostradores permitiu a realização de testes que comprovaram que a dispersão da pluma no interior do túnel construído no laboratório seguia o modelo gaussiano.

A variação da quantidade de vasos de plantas colocadas no interior do túnel permitiu a geração de dados que foram utilizados na busca de um parâmetro que ajustasse o modelo gaussiano para representar o efeito da perturbação da vegetação na dispersão da pluma.

Os valores calculados para este parâmetro foram correlacionados com a densidade de vegetação, representada pelo percentual de preenchimento, pelas plantas, de uma região definida em torno dos amostradores, através da comparação de diferentes arranjos de plantas com os resultados obtidos para regiões sem obstáculos.

Nestes experimentos, pode ser verificado o efeito de barreira provocado pela presença da vegetação, que diminuía a dispersão de particulado, causando um aumento na concentração amostrada num determinado ponto, quando comparado com o experimento livre.

Utilizando os valores medidos de concentração no ar, em função da distância do gerador de aerossol, foi ainda, ajustada uma função Sigmóide que representava o comportamento observado para cada conjunto. Neste modelo, verificou-se ser possível a substituição das Sigmóides obtidas para os experimentos com 6, 10 e 15 vasos de

plantas pela Sigmóide obtida para o experimento livre, fazendo-se variar apenas um dos parâmetros da equação, o parâmetro  $A_2$ , com erros inferiores a 10%. Este parâmetro foi também correlacionado com o percentual de preenchimento da área de dispersão pela vegetação.

Assim, nos experimentos realizados no interior do túnel construído em laboratório, pode-se estimar o valor da concentração de Cu nos pontos avaliados em função da concentração no ponto de liberação de material, da velocidade do vento e da densidade de vegetação existente entre o ponto de liberação e o local de amostragem, adotando-se o modelo I, isto é utilizando um fator de correção para a curva gaussiana, ou utilizando-se a um ajuste por uma Sigmóide, correspondente ao modelo II.

A validação dos modelos utilizando-se os dados levantados no Jardim Botânico não foi possível num primeiro instante, por diferenças entre os experimentos em túnel e no Jardim botânico, que incluíam a existência de mais de uma fonte de contaminação, as distâncias estudadas nos experimentos e na densidade de vegetação. Foi então efetuado um novo experimento de campo, utilizando vanádio com traçador, em Angra dos Reis, numa região com distâncias e densidade compatíveis com as encontradas no Jardim Botânico. Os parâmetros de ajuste e as Sigmóides foram novamente levantados para esta nova situação.

Verificou-se que a correlação existente entre o parâmetro de ajuste e o percentual de preenchimento da fotografia, no caso do modelo I, seguia, para o experimento em angra dos Reis, a mesma tendência obtida com os dados do laboratório, com uma variação no coeficiente angular da reta de ajuste. No modelo II, também foi possível ajustar o parâmetro  $A_2$  de tal forma que se obteve uma Sigmóide ajustada a partir de valores calculados para uma região sem obstáculos.

A validação do modelo I foi realizada aplicando-se a curva obtida com os dados de Angra dos Reis, aos dados levantados no Jardim Botânico, considerando que no JB existiam duas fontes principais geradoras de vanádio.

Analisando-se os resultados obtidos, pode-se concluir que o modelo I apresentou resultados compatíveis com a tendência levantada em laboratório com erros inferiores a 48%.

Ao serem analisados os valores das concentrações encontradas nas amostras coletadas no Jardim botânico, verificou-se que os resultados obtidos foram inferiores àqueles encontrados na Gávea, (LIZARRAGA, 1997 e ZAMORA, 2001). Este fato ratifica a expectativa de que numa região onde exista vegetação, as concentrações tendem a diminuir, pois a vegetação funciona como filtro.

Não foi possível validar o modelo II, pois seria necessário realizar novos experimentos em uma região com vegetação e distâncias compatíveis com aquelas estudadas em Angra dos Reis.

Os resultados obtidos neste estudo permitiram então tanto o ajuste de uma função de correção para a equação gaussiana de forma a considerar o efeito da presença de vegetação no caminho de uma pluma em dispersão, como sugerir a possibilidade de modelar a dispersão por uma função Sigmóide. Ficou bastante evidente que a vegetação funciona como uma barreira à dispersão, porém permite alguma penetração, o que torna o sistema diferente de um sistema simples de barreira física.

Seria importante dar continuidade a este estudo, no sentido de investigar o efeito da floresta não só como barreira física, mas também sob os aspectos químicos e biológicos. Desta forma, experimentos futuros deveriam considerar também a concentração depositada nas plantas, em função da distância, da densidade foliar, e de

características das plantas, além de considerar variações nas características de dispersão, tais como velocidade de vento e estabilidade atmosférica. Estes resultados permitiriam então avaliar as conseqüências de liberações atmosféricas, próximo a regiões de floresta, no sentido de avaliar com mais precisão o destino dos poluentes, tanto em relação à floresta em si, que, conforme observado após o acidente de Chernobyl em diversos locais da Europa, poderia funcionar como um absorvedor do material disperso, como também em relação a áreas habitadas mais distantes, que poderiam estar sendo mais preservadas pela barreira provocada pela floresta. Estes resultados seriam relevantes no estudo de conseqüências de acidentes e do planejamento de medidas de proteção para a população e para o meio ambiente.

**REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

ADALPE, F.; FLORES, J. M.; GARCIA, R.; NELSON, J. W. **PIXE Analysis of Atmospheric Aerosols from a Simultaneous Three site sampling during the autumn of 1993 in Mexico City.** Nuclear Instrument and Methods in Physics Research B - Beam Interactions with Materials and Atoms, Holanda, v. 109, p. 502 - 505, 1996.

ADALPE, F.; FLORES, J., M.; DIAZ, R. V.; CRUMPTON, D. **Temporal Variations in Elemental Concentrations of Atmospheric Aerosols in Mexico City.** Nuclear Instrument and Methods in Physics Research B - Beam Interactions with Materials and Atoms, Holanda, v. 75, p. 304 - 307, 1993.

ADALPE, F.; FLORES, J., M.; DIAZ, R. V.; MIRANDA, J.; CAHILL, T. A.; ANDRADES, J. R.. **Nuclear Instrument and Methods in Physics Research. B - Beam Interactions with Materials and Atoms,** Holanda, v. 4, p. 373 - 388, 1991.

ADRIANO, D.C.; HOYT, G. D.; PINDER, J.E. **Fallout of Cesium on a Forest Ecosystem in the Vicinity of a nuclear Reprocessing Plant.** Health Physics, v. 40, p.369-376, 1981.

AGRAWAL, A.; SAHU, k. k.; PANDEY, B. D. **Solid Waste Management in Non-ferrous Industries in Índia.** Resources, Conservation and Recycling 42(2), p. 99-120, 2004.

ALLEN, A. G.; MIGUEL, A. **Indoor Organic and Inorganic Pollutants: in-situ Formation and Dry Deposition in Southeastern Brazil.** Atmospheric Environment, v. 28, p. 3519 - 3526, 1995.

ANDREA, D. A.C. **A Determinação Quantitativa de Fontes de Material Particulado na Atmosfera da Cidade de São Paulo.** Dissertação de Mestrado. Instituto de Física, Universidade de São Paulo, 1999.

APOSTOLLI, P.. **La Speciazione Dei Metalli in Medicina del Lavoro** Speciation of metals in occupational health. **La medicina del lavoro**, v. 89, n.1, p. 3 - 16, 1998.

ARTAXO, P.; RABELLO, M. L. C.; MAENHAUT, W.; GRIEKEN, R. V. Trace Elements and Individual Particle Analysis of Aerosol Particles from the Antarctic Peninsula. **TELLUS**, v. 44B, p. 318 - 334, 1992.

ARTAXO,P.; WOUTERS L., HAGEDOREN S.; DIERCK, I.; VAN GRIEKEN, R. **Laser Microprobe Mass Analysis of Mason Basin Aerosols.** Atmospheric Environmental, v. 27A, n. 3, p. 661-668, 1993a.

ARTAXO, P.; GERAB, F.; RABELLO, M. L. C. **Elemental Composition of Aerosol Particles from Two Background Monitoring Stations In The Amazon Basin.** Nuclear Instruments and Methods In Physics Research B - Beam Interactions With Materials and Atoms, Estados Unidos, v. 75, p. 277-281, 1993 b.

ARTAXO, P.; GERAB, F.; YAMASOE, M. A.; MARTINS, J. V. **Fine Mode Aerosol Composition In Three Long Term Atmospheric Monitoring Sampling Stations In The Amazon Basin.** Journal of Geophysical Research, v. 99, n. D11, p. 22857-22868, 1994.

ARTAXO, P.; FERNANDES, E. T.; MARTINS, J. V.; YAMASOE, M. A.; LONGO, K. M.; ECHALAR, F.; GERAB, F.; CASTANHO, A.; MAENHAUT, W. **Large Scale Biomass Burning and Biogenic Aerosol Characterization In The Amazon Basin.** Proceedings of the International Symposium on Atmospheric Chemistry and Future Global Environmental., São Paulo, SP, p. 162-164, 1997.

ARTAXO, P., et al. **Large Scale Aerosol Source Apportionment in Amazônia.** Journal of Geophysical Research, v.103, D24, p. 31837-31848, 1998.

ARTAXO, P.; CAMPOS, R. C.; FERNANDES, E. T.; MARTINS, J. V.; XIAO, Z.; LINDQVIST, O.; FERNÁNDEZJIMÉNEZ, M. T.; MAENHAUT, W.. **Large Scale Mercury and Trace Element Measurements in the Amazon Basin.** Atmospheric Environment, Estados Unidos, v. 34, n. 24, p. 4085-4096, 2000.

ARTAXO, P.; MARTINS, J. V.; YAMASOE, M. A.; PROCÓPIO, A. S.; PAULIQUEVIS, T. M.; ANDREAE, M. O.; GUYON, P.; GATTI, L. V.; LEAL, A. M. C.. **Physical and chemical properties of aerosols in the wet and dry season in Rondonia, Amazonia.** Journal of Geophysical Research, Estados Unidos, v. 107, n. D20, p. 8081-8095, 2002.

BENGTSSON, G. B. **Mobility of Superficially Applied Cesium -134 and Strontium-85 in Apple Branches Under Precipitation –Tree Conditions.** Analyst, v. 117, July 1992.

BENOIT, R. **On the Integral of the Surface Layer Profile –Gradient Functions.** Journal of Applied Meteorology, v.16, p. 859-860, 1977.

BONNETT, P.J.P.; ANDERSON, M.A. **Radiocaesium Dynamics in Coniferous Forest Canopy: a Mid-Wales Study.** The Science of the total Environment 136, p.259-277, 1993.

BOSANQUET, C. H.; PEARSON, J. L. **The Spread of Smoke and Gases from Chimneys.** Trans. Faraday Society, v.32, p. 1249, 1936.

BROCK, F. V.; HEWSON, E. W. **Analog Computing Techniques Applied to Atmospheric Diffusion-Continuous Point Source.** J. of Applied Meteorology, v. 21, n. 1, p. 129-144, fev. 1963.

BUNNZL, K.; KRACKE W; SCHIMMACK, W.; ZELLES, L. **Forms of Fallout <sup>137</sup>Cs and <sup>239,240</sup>Pu in Successive Horizons of a Forest Soil.** Journal Environmental Radioactivity, v. 39, n.1, p. 55-68, 1998.

BUNNZL, K.; KRACKE W; SCHIMMACK, W. **Vertical Migration of Plutonium-239 + -240, Americium-241 and Cesium-137 Fallout in a Forest soil Under Spruce.** Analyst, V.117, March 1992.

BUNNZL, K.; KRACKE W.. **Cumulative Deposition of  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{238}\text{Pu}$ ,  $^{239,240}\text{Pu}$  and  $^{241}\text{Am}$  from Global Fallout in Soils from Forest, Grassland and Arable Land in Bavaria (FRG).** Journal Environment Radioactivity 8, p 1-14, 1988.

BUSINGER, J. A.; ARYA, S. P. S. **Height of the Mixed Layer in the Stably Stratified Planetary Boundary Layer.** Advances in Geophysics, v. 18A, P. 73-92, 1974.

CAMPBELL, J. L. **Instrumentation, Fundamentals and Quantification.** John Wiley, p. 19-99, New York, 1995.

CARMICHAEL, G. R. **Numerical Technique for the Investigation of the Transport and Dry Deposition of Chemically Reactive Plumes.** Atmospheric Environment, v. 14, n. 12, p. 1433-1438, 1980.

CARPENTIERI, M.; ANDREA, C.; ZIPOLI L. **Wind Tunnel Experiments of Tracer Dispersion Downwind from a Small-scale Physical Model of a Landfill.** Environmental Modelling & Software, v. 19, n. 10, P. 881-885, 2004.

CARVALHO, S. M. M.; DIAS DA CUNHA, K.; BAPTISTA, G. B.; BARROS LEITE, C. V.; PASCHOA, A. S.. **Particle size distribution of yellow cake in a Brazilian uranium mill.** Annals of Occupational Hygiene, Inglaterra, v. 32, p. 865-869, 1988.

CROWL, D. A.; LOUVAR, J. F. . **Chemical Process Safety: Fundamentals with Applications,** Prentice Hall PTR, New Jersey, p. 171- 215, 2002.

DALIA, K. C. P. **Identificação de eventos de transporte atmosférico por análise de micropartículas no ar e no depósito glacial da Ilha Rei George – Península Antártica.** 2002. 60 f.. Dissertação de mestrado (Mestrado em Física) - Instituto de Biofísica, Universidade de Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

DECESARI, S.; FUZZI, S.; FHACCHINI, M. C.; MAENHAUT, W.; SCHKOLNIK, G.; FALKOVICH, A. H.; RUDICH, Y.; CLAESYS, M.; ARTAXO, P.; ANDREAE, M. O. **Characterization of the Organic Composition of Aerosols from Rondônia, Brazil, During the LBA-SMOCC 2202 Experiment and its Representation Through Model Compounds.** Atmospheric Chemistry and Physics, França, v. 6, p. 375-402, 2006.

DE PINHO, A. G.; MONTENEGRO, E. C.; LEITE FILHO, C. V. B.; BAPTISTA, G. B.; PASCHOA, A. S. **Potencialidades e possíveis aplicações de um novo método analítico.** Anais da Academia Brasileira de Ciências, v. 51, p. 365-372, 1979.

DIAS DA CUNHA, K., EVANGELISTA, H., DALIA, K. C., SIMÕES, J.C., BARROS LEITE, C.V. **Application of 252 Cf PDMS to characterize airborne particles deposited in an Antarctic glacier.** Science of Total Environment, v. 323, p. 123-135, 2004.

DIAS DA CUNHA, K.; BARROS LEITE, C.V.. **Metal trace analysis by PIXE and PDMS techniques.** Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Denmark, v. 187, p. 401-407, 2002.

DIAS DA CUNHA, K.; PEREIRA, J. A. M.; LEITE, C. V. B.. **PIXE and PDMS Methods Applied to Aerosol Analysis**. *Aerosol Science and Technology*, USA, v. 32, n. 5, p. 453-464, 2000.

DIAS DA CUNHA, K.; LIPSZTEIN, J. L.; LEITE, C. V. B.. **Occupational Exposure to Thorium in two Brazilian Niobium Mine**. *Radiation Protection Dosimetry*, INGLATERRA, v. 79, n. 1, p. 63-66, 1998a

DIAS DA CUNHA, K.; LIPSZTEIN, J. L.; FANG, C. P.; LEITE, C. V. B.. **A Cascade Impactor to Mineral Particle Analysis**. *Aerosol Science and Technology*, USA, v. 29, p. 126-132, 1998b.

DIAS DA CUNHA, K. M. A. **Contribuição ao estudo da exposição ocupacional ao tório no Brasil**. 1997. 100 f.. Tese (Doutorado em Biofísica) – Instituto de Biofísica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

DIAS DA CUNHA, K.; LIPSZTEIN, J. L.; LEITE, C. V. B.. **Occupational Exposure to Thorium - Air Monitoring**. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, v. 177, n. 1, p. 81-89, 1994.

DIAS DA CUNHA, K. M. A.. **Caracterização de partículas de tório e urânio existentes em poeira de monazita**. 1988. Dissertação de mestrado - Instituto de Biofísica da Universidade do Estado do Rio de Janeiro.

EAGLEMAN, J. R. **Meteorology, the atmosphere in action**. 2. ed. Belmont, Wadsworth Publishing Company, 1985.

ECHALAR, F.; GAUDICHET, A.; CACHIER, H.; ARTAXO, P. **Aerosol Emissions By Tropical Forest And Savanna Biomass Burning: Characteristic Trace Elements And Fluxes**. Geophysical Research Letters, Washington, Estados Unidos, v. 22, p. 3039-3042, 1995.

EPA. **Effects of Acid Rain: Forests**. U. S. Environmental Protection Agency. <http://www.epa.gov>, 2006 .

ERTEL, J.; ZIEGLER, H. **Cs-134/137 contamination and root uptake of different forest trees before and after Chernobyl accident**. Radiation and Environmental Biophysics, 30, p. 147-157, 1991.

FAIZ, A.; GAUTAM, S.; BURKI, E.. **Air Pollution from motor vehicles: issues and options for Latin American countries**. The Science of the total Environment. V. 169, p. 303-310, 1995.

FREITAS, S.; LONGO, K. M.; DIAS, M. A. F. S.; DIAS, P. S.; CHATFIELD, R.; PRINS, E.; ARTAXO, P.; RECUERO, F. **Monitoring the Transport of Biomass Burning Emissions in South America**. Environmental Fluid Mechanics, v. 5, n.1-2, p. 135-167, 2004.

FRENKIEL, F. N. **Application of Statistical Theory of Turbulent Diffusion to Micrometeorology.** Journal of Meteorology, v.9, p.252, 1952.

GERAB, F.; ARTAXO, P.; SWITLICKI, E.; PALLON, J.. **Scanning Proton Microprobe Applied To Analysis Of Individual Particles From The Amazon Basin.** Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Estados Unidos, v. 136, p. 318-323, 1998a.

GERAB, F.; ARTAXO, P.; GILLET, R.; AYERS, G.. **Pixe, Pige and Ion Chromatography of Aerosol Particles From Northeast Amazon Basin.** Nuclear Instruments & Methods in Physics Research. Section B. Beam Interactions with Materials and Atoms, Estados Unidos, v. 136, p. 955-960, 1998b.

GRAHAM, B.; GUYON, P.; BRACERO, O. L. M.; ARTAXO, P.; ANDREAE, M. O.. **Organic compounds present in the natural Amazonian aerosol: Characterization by gas chromatography-mass spectrometry.** Journal of Geophysical Research, Washington, Estados Unidos, v. 108, n. D24, p. 4766-4788, 2003.

GRAHAM, B.; ARTAXO, P.; GYON, P.; BRACERO, O. L. M.; ANDREAE, M. O. **Organic Compounds Present in the Natural Amazonian Aerosol: Characterization by Gas Chromatography-mass Spectrometry.** Journal of Geophysical Research, 2004.

GUIMARÃES, J. R. D.; FOSTIER, A.; FORTI, M. C.; MELFI, A. J. ; KEHRIG, H.; MAURO, J. B. N. ; MALM, O. ; KRUG, J. F. **Mercury in Human and Environmental Samples from Two Lakes in Amapá, Brazilian Amazon.** *Ambio*, Suécia, v. 28, n. 4, p. 296-301, 1999.

GUO, J.; ATARASHI-ANDOH, M.; AMANO, H. **Variation of  $^{14}\text{C}$ ,  $^{137}\text{Cs}$  and Stable carbon Composition in forest Soil and Its Implications.** *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, v. 225, n. 1, p. 223-229, 2003.

GUYON, P.; FRANK, G. P.; WELLING, M.; CHAND, D.; ARTAXO, P.; NISHIOKA, G.; RIZZO, L. V.; LOYD, J.; KOLLE, O.; DIAS, M. A. F.S. **Airborne Measurements of Trace Gases and Aerosol Particles Emissions from Biomass Burning in Amazonian.** *Atmospheric Chemistry and Physics*, v. 5, p.2989-3002, 2005.

HINDS, W.C. **Aerosol Technology- Properties, behavior and measurement of airborne particles.** Wiley Interscience Publication, John Wiley & Sons, p. 105-219, 1982.

HACON, S.; ARTAXO, P.; GERAB, F.; YAMASOE, M. A.; CALIXTO, R.; CONTI, L. F.; LACERDA, D.. **Atmospheric Mercury And Trace Elements In The Region Of Alta Floresta In The Amazon Basin.** *Water, Air and Soil Pollution*, v. 80, n. 1-4, p. 273-283, 1995.

HUANG, C. H. Theory o **Dispersion in Turbulent Shear Low**. Atmospheric Environment, v. 13, p. 453-463, 1979.

HUS, M.; KOSUTE, K.; LULIÉ, S.. **Radioactive contamination of wood and its products**. Journal of Environmental Radioactivity, v. 55, p. 179 – 186, 2001.

IAEA. **Generic Models for Use in Assessing the Discharges of Radioactive Substances to the Environment**. Safety Reports Series 19, International Atomic Energy Agency, Vienna, 2001.

IPJBRJ. Instituto de Pesquisas Jardim Botânico, <http://www.jbrj.gov.br/>, 2006.

JOHANSSON, S. A. E.; JOHANSSON, T. B.. **Analytical application of particle induced X-ray emission**. Nuclear Instruments and Methods, v. 137, p. 473-516, 1976.

KITABAYASHI, K. **Wind Tunnel Simulation of Air Flow and Pollutant Diffusion Over Complex Terrain**. Atmospheric Environment, v. 25A, n. 7, p. 1155-1161, 1991.

KUBATOVÁ, A.; VERMEYLEN, R.; CLAYES, M.; CAFMEYER, J.; MAENHAUT, W.; ROBERTS, G.; ARTAXO, P. **Carbonaceous aerosol characterization in the Amazon basin, Brazil: Novel dicarboxylic acids and related compounds**. Atmospheric Environment, Estados Unidos, v. 34, n. 29, p. 5037-5051, 2000.

LACERDA, L. D.; MARINS, R. V. **Anthropogenic mercury emissions to the atmosphere in Brazil: the impact of gold mining.** Journal of Geochemical Exploration, v. 58, p. 223-229, 1997.

LAMB, R. G.; CHEN, W. H.; SEINFELD, J. H. **Numeric-Empirical Analysis of Atmospheric Diffusion Theories.** Journal of Atmospheric Sciences, v.32, p. 1794-1807, 1975.

LAMB, R.G.; DURAN, D. R. **Eddy Diffusivities Derived from a Numerical Model of the Convective Boundary Layer.** Nuovo Cimento, 1C, p. 1-17, 1977.

LAMB, R. G. **A Regional Scale Model of Photochemical Air Pollution. Parte 3: Test of the Numerical Algorithms.** Office of Research and Development, Environmental Science Research Laboratory, U.S.,EPA, Research Triangle Park, NC, 1985.

LANTZ, R. B. **Use of 3D Numerical Air Pollution Models in planning Plant Location, Design and Operation.** Canadian Petroleum Technology, v. 11, n.3, 1972.

LAWSON, D. R.; WINCHESTER, J. W.. **Sulfur and trace element concentration relationships in aerosols from the South American continent.** Geophysical Research Letters. v. 5, p. 195 - 198, 1978.

LEE, H. N. **Finite Element Numerical Study of Atmospheric Turbulent Motion and Diffusion in Planetary Boudary Layer.** Proc. of Int. Conf. in Numerical Methods in Laminar and Turbulent Flow, John Wiley and Sons, New Yourk, p.781-791, jul 1978.

MAENHAUT, W.; FERNANDEZ-JIMENEZ, M. T.; RAJTA, I.; ARTAXO, P. **Two year study of atmospheric aerosols in Alta Floresta, Brazil: Multielemental composition and source apportionment.** Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Holanda, v. 189, p. 243-249, 2002.

MACHADO, W., MOSCATELLI, M., REZENDE, L. G., LACERDA, L. D. **Mercury, zinc and copper accumulation in mangrove sediments surrounding a large landfill in southeast Brazil.** Environmental Pollution, v.120, n. 2, p. 455-461, 2002.

MASSAYOSHI, Y.; BUNZL, K.. **Environmental effect studies on a forest ecosystem in Germany.** Radioisotopes, Tokyo, v. 42, p. 108-188, 1993.

MELBOURNE, W. H. **Wind Tunnel Modelling of Buoyant Chimney.** Proc. Of the 3<sup>rd</sup> Australasian Conference on Hydraulics & Fluid Mechanics, p. 81-85, nov. 1968.

MICHIOKA, T.; SATO, M.; KANZAKI, T.; SADA, K. **Wind Tunnel Experiment for Predicting a Visible Plume Region from a Wet Cooling Tower.** Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, v. 95, n. 8, P. 741-754, 2007.

MOORE, D. R. J.; TEED, R. S.; RICHARDSON, G. M. **Derivation of an Ambient water Quality Criterion for Mercury: Taking Account os Site-Specific Conditions.** Environmental Toxicology and Chemistry, 22(12), p. 3069-3080,2003.

MOTULSKY, H. **Intuitive Biostatistics.** Oxford University Press, New York, NY, 1995.

MYRUP, L. O.; RANZIERI, A. J. **A Consistent Scheme for Estimating Diffusivities to be used in Air Quality Models**. Rep. Ca-DOT\_TIL-7169-376-32, California Department of Transportation, Sacramento, 1976.

MYTTENAERE, C.; SCHELL, W. R.; THIRY, Y.; SOMBRE, L.; RONNEAU C.; VAN DER STEGEN DE SCHRIECK J.. **Modeling of Cs-137 cycling in forest: recent developments and research needed**. The Science of Total Environment. V.136, p. 77-91, 1993.

NEJEDLÝ, Z., et al. **Quality assurance of environmental PIXE analysis in Prague**. Nuclear Instrument and Methods in Physics Research B - Beam Interactions with Materials and Atoms, Holanda, v. 136-138, p. 981-985, 1998.

NIKOLOVA, I.; JOHANSON, J.; CLEGG, S. **The Accumulation of  $^{137}\text{Cs}$  in the biological compartment of forest soils**. Journal of Environmental Radioactivity 47, p.319-326, 2000.

O'BRIEN, J. **On the Vertical Structure of the Eddy Exchange Coefficient in the Planetary Boundary Layer**. J. of Atmospheric Sciences, v. 27, p. 1213-1215, 1970.

OHBA, R.; UKEGUCHI, N.; KAKISHIMA, S.; LAMB, B. **Wind Tunnel Experiment of Gas Diffusion in Stably Stratified Flow Over a Complex Terrain**. Atmospheric Environment, v. 24A, n.8, p. 1987-2001, 1990.

OULD-DADA, Z.; COPPLESTONE, D.; TOAL, M.; SHOW, G.. **Effect of forest edges on deposition of radioactive aerosols**. Atmospheric Environment 36, p. 5595 – 5606, 2002a.

OULD-DADA, Z.. **Dry deposition profile of small particles within a model spruce canopy**. The science of the Total Environmental, v. 286, p.83 -96, 2002b.

ORSINI, C. Q., et al. **Variation of elemental composition with particle size in the St. Louis Aerosol**. Nuclear Instrument and Methods, v. 142, p. 91-96, 1977.

PANOFSKY, H. A., DUTTON, J. A. **Atmospheric Turbulence – Models and Methods for Engineering Applications**, John Wiley& Sons , New York, 1984.

PASCHOA, A. S.; MONTENEGRO, E. C.; MARGULIS, W.; DE PINHO, A. G.; Barros Leite, C. V.; BAPTISTA, G. B.. **PIXE elemental analysis of air particulates and a geochemical reference sample**. Proceeding of the Third International Conference on Nuclear Method in Environmental and Energy Research, Columbia, Missouri, USA. James R. Vogt (Ed.), CONF-771072 USRDA-21, 1977.

PETER, V. S. **Mercury contamination associated with small-scale gold mining in Tanzania and Zimbabwe**. The Science of the Total Environment, v. 259, n. 1-3, p. 105-113, 2000.

PETERS, E.C.; GASMAN, N.J.; FIRMAN, J.C.; RICHMOND, R.H.; POWER, E.A..

**Ecotoxicology of tropical marine ecosystems.** Journal of Environmental Toxicology and Chemistry, v. 16, p. 12-40, 1997.

PFEIFFER, W. C., et al. **Mercury concentrations in inland waters of gold-mining areas in Rondônia, Brazil.** The Science of the total Environment, v. 87, p. 233-240, 1989.

PLACHON, F. A. M.; BOUTRON, C. F.; BARBANTE, C.; et al. **Short-Term Variations in the Occurrence of Heavy Metals in Antarctic Snow from Coasts Land Since 1920s.** The Science of the Total Environment. 300 (1-3), p.129-142, 2002.

PROCÓPIO, A. S.; ARTAXO, P; REMER, L. A.; KAUFMAN, Y. J.; HOLBEN, B.. **Modeled spectral optical properties for smoke aerosols in Amazonia.** Geophysical Research Letters, Estados Unidos, v. 30, n. 24, p. 2265-2270, 2003.

PROCÓPIO, A. S.; ARTAXO, P.; KAUFMAN, Y. J.; REMER, L. A.; SCHAFER, J. S.; HOLBEN, B. N.; **Multyear Analysis of Amazonian Biomass Burning Smoke radioactive forcing of Climate.** Geophysical Research Letters, v. 31, p. 3108, 3112, 2004.

PTERSEN, R. L.; RATICLIFF, M. A. **SLAB/DEGADIS Model Prediction Versus Wind Tunnel Observations for Homogeneous and Heterogeneous Roughness.** Proc. Of the 82<sup>nd</sup> A&WMA Annual Meeting. Anaheim, CA,USA, jun. 1989.

RICHARDSON, L. F.; PROCTOR, D. **Diffusion Over Distances Ranging from 3 Km to 86 Km.** Memoirs of the Royal Meteorological Society, v.1, n. 1, 1925.

RICHARDSON, L. F. **Atmospheric Diffusion Shown on a Distance-Neighbor Graph.** Proc. Of Royal Society, A, v.110, p. 709, 1926.

ROSSBY, C. G. **A Generalization of the theory of the Mixing Length with Applications to Atmospheric and Oceans Turbulences.** Massachusetts Institute of Technology Meteorological Papers, v. 1, n.4, 1932.

SALDIVA, P. H. N., et al. **Respiratory alterations due to urban air pollution: An experimental study in rats.** Environmental Research, v. 57, p. 19 - 33, 1992.

SCHATZMAN, M.; KONIG, G.; LOHMEYER, O. **A Wind Tunnel Modelling of Small-Scale Meteorological. Boundary-Layer Meteorology,** v.41, p.241, 1987.

SCHIMMACK, W.; BUNZL, K. **Transport of  $^{85}\text{Sr}$ ,  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{65}\text{Zn}$  and  $^{109}\text{Cd}$  in two forest soils as observed in undisturbed soil columns.** Radiochimica Acta 58/59, p. 297-300, 2002.

SCHIMMACK, W.; FOSTER, H., BUNZL, K.; KREUTZER K. **Deposition of radio cesium to the soil by stem flow, throughfall and leaf-fall from beech trees.** Radiation and Environmental Biophysics, 32, p. 137-150, 1992.

SEINFELD, J. H.; PARDIS, S. N. **Atmospheric chemistry and Physics of Air pollution to Climate Change**, John Wiley, New York, USA, 1998.

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

SEINFELD, J. H. **Atmospheric Chemistry and Physics of Air Pollution**. John Wiley & Sons. New York, USA, 2006.

SHIR, C. C., **Pilot Study in Numerical Techniques for Predicting Air Pollutant Distribution Downwind from a Line Stack**. Atmospheric Environment, v. 4, n. 4, p. 387-407, jul. 1970.

SHI, R. F.; CUI G. X.; WANG Z. S.; XU, C. X.; ZHANG, Z. S. **Large Eddy Simulation of Wind Field and Plume Dispersion in Building Array**. Atmospheric Environment, 2007.

SHOAIB RAZA, S.; IQBAL, M.. **Atmospheric dispersion modeling for an accidental release from the Pakistan Research Reactor-1 (PARR-1)**. Annals of Nuclear Energy, v. 32, p 1157-1166, 2005.

SPEKTOR, D.; HOFMEISTER, V. A.; ARTAXO, P.; BRAGA, J.A.P.; ECHALAR, F.; NOGUEIRA, D.P.; HAYES, C.P.; THURSTON, G.; LIPPMANN, M. **Effects of heavy industrial pollution on respiratory function in the Children of Cubatão, Brazil:A Preliminary Report**. Environmental Health Perspectives, v. 94,p. 51-54, 1991.

SUTON, O. G. A. **A Theory of Eddy Diffusion in the Atmosphere**. Proc. of Royal Society, A, v. 135, p. 143, 1932.

SUTON, O. G. **The Problem of Diffusion in the Lower Atmosphere**. Quart. F. R. Meteorological Society, v. 73, p. 257, 1947.

SUTON, O. G. **Micrometeorology**, New York, McGraw-Hill, p. 286, 1953.

TAYLOR, G. I. **Diffusion by Continuous Movements**. Proc. London Math. Soc., v. 20, n. 196, 1921.

TAYLOR, G. I. **Reprinted in the Scientific Papers of Sir Geoffrey Ingram Taylor**, G. K. Batchelor, Ed., London: Cambridge Univ. Press, 1960.

TEUNISSEN, H. W. **Wind Tunnel and Full Scale Comparison of Mean Wind Flow Over an Isolated Low Hill**. J. Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, v. 15, n. 1-3, p. 271-286, dez. 1983.

TIKHOMIROV, G.S.; SHCHEGLOV, A. I. **Main investigation results on the forest radioecology in the Kyshtym and Chernobyl accident zones**. Science of the Total Environment, v. 157, p. 45 - 57, 1994.

TIRABASSI, T. TAGLIAZUCCA, M., ZANNERTI, P.. **KAPPA-G, A Non-Gaussian Dispersion Model: Description and Evaluation Against Tracer Measurement**. Journal of the Air Pollution Control Association, v.36, p. 592-596, 1986.

TIRABASSI, T. **Analytical Air Pollution Advection and Diffusion Models**. Water, Air and Soil Pollution, v. 47, p. 19-24, 1989.

TRIANTAFYLLOU, A.G.; KASSOMENOS, P.A.. **Aspects of atmospheric flow and dispersion of air pollutants in a mountainous basin**. The Science of the Total Environment, v. 297, p. 85-103, 2002.

TRINDADE, H. A.; PFEIFFER, W. C.; COSTA RIBEIRO, C. L. **Atmospheric concentration of metals and total suspended particles in Rio de Janeiro**. Environmental Science and Technology, v. 15, p. 84-89, 1981.

TREBS, I.; LARA, L. L.; ZERI, L. M. M.; GATTI, L. V. ARTAXO, P.; DUGLI, R.; SLANINA, J.; ANDREA, M. O.; MEIXNER, F. **Dry and Wet Deposition of atmospheric nitrogen compounds in a tropical environment, Rondonia, Brazil**. Atmospheric Chemistry and Physics, USA. v. 6, p. 471-491, 2006.

TREBS, I., et al. **Dry and wet deposition of inorganic nitrogen compounds to a tropical pasture site (Rondônia, Brazil)**. Atmospheric Chemistry and Physics Discussions, v. 5, p. 3131–3189, 2005.

TURNER, D. B. **Workbook of atmospheric Dispersion Estimates, An Introduction to Dispersion Modeling**, Lewis Publishers. Boca Raton, FL, 1994.

URIBE-HERNANDEZ, R.; PÉREZ-ZAPATA, A. J.; FLORES, J. M.; ALDAPE, F.;  
HERNANDEZ-MÉNDEZ, B.. **Lead Contents in blood samples of a children  
population of Mexico City related to levels of airborne lead determined by PIXE.**

International Journal of PIXE, v. 6, p. 255-262, 1996.

WANG, K.; STATHOPOULOS, T. **Exposure Model for Wind Loading of Buildings.**

Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, v. 95, n. 9-11, p. 1511-1525,  
2007.

WONG, H. K. T.; GAUTHIER, A.; NRIAGU, J. O. **Dispersion and toxicity of metals  
from abandoned gold mine tailings at Goldenville, Nova Scotia, Canada.** The

Science of The Total Environment, v. 228, n. 1, p. 35-47, 1999.

WOUTERS, L.; HAGEDOREN, S.; DIERCK, I.; ARTAXO, P; GRIEKEN, R. V..

**Laser Microprobe Mass Analysis of Amazon Basin Aerosols.** Atmospheric  
Environment, Estados Unidos, v. 27, n. 5, p. 661-668, 1993.

WHITBY, T. K.. **The physical characteristics of sulfur aerosols.** Atmospheric  
Environment (1967), v. 12, p.135-159, 1978.

YAMASOE, M. A.; ARTAXO, P; MIGUEL, A. H.; ALLEN, A. G.. **Chemical  
composition of aerosol particles from direct emissions of biomass burning in the  
Amazon Basin: water soluble species and trace elements.** Atmospheric Environment,  
Estados Unidos, v. 34, n. 10, p. 1641-1652, 2000.

YOSHIDA, S.; MURAMATSU, Y.; DVORNIK, A. M.; ZHUCHENKO, T. A.;  
LINKOV, I. **Equilibrium of Radiocesium with Stable Cesium with the Biological  
Cycle of Contaminated Forest Ecosystems.** Journal of Environmental Radioactivity, v.  
75, p. 301-313, 2004.

ZAR, J. H. **Bioestatistical Analysis.** Prentice Hall, Upper Saddle River, N. J., 1999.

## APÊNDICE A

### - Calibração das bombas de lapela -

As bombas de lapela foram calibradas usando um calibrador primário da Gillian. Os tempos de amostragem de todas as amostras de aerossóis são apresentados nas Tabelas A.1 a A.11, enquanto que as curvas de calibração, nas Figuras A.1 a A.11.

Tabela A.1. Dados da calibração da bomba de lapela 1.

Bomba 1: nº de Série 056995				
Vazão da Bomba (ℓ/min)	Vazão do Calibrador Primário (ℓ/min)			
	$v_1$	$v_2$	$v_3$	$\bar{v} \pm \sigma$
0,5	0,71	0,86	0,59	0,65 ± 0,09
1,5	1,09	1,09	1,02	1,05 ± 0,05
2,0	1,55	1,55	1,54	1,55 ± 0,01
2,5	1,95	1,93	1,93	1,94 ± 0,02
3,0	2,22	2,21	2,23	2,23 ± 0,01

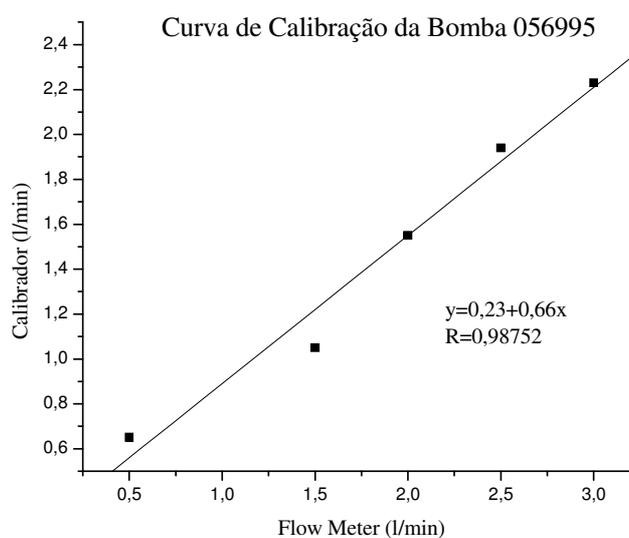


Figura A.1. Curva de calibração da bomba 1.

Tabela A.2. Dados da calibração da bomba de lapela 2.

Bomba 2: nº de Série 523355				
Vazão da Bomba (ℓ/min)	Vazão do Calibrador Primário (ℓ/min)			
	$v_1$	$v_2$	$v_3$	$\bar{v} \pm \sigma$
1,0	0,78	0,79	0,78	$0,78 \pm 0,00$
1,5	1,34	1,32	1,31	$1,33 \pm 0,02$
2,0	1,73	1,72	1,72	$1,72 \pm 0,00$
2,5	2,12	2,10	2,10	$2,11 \pm 0,01$
3,0	2,47	2,47	2,47	$2,47 \pm 0,00$

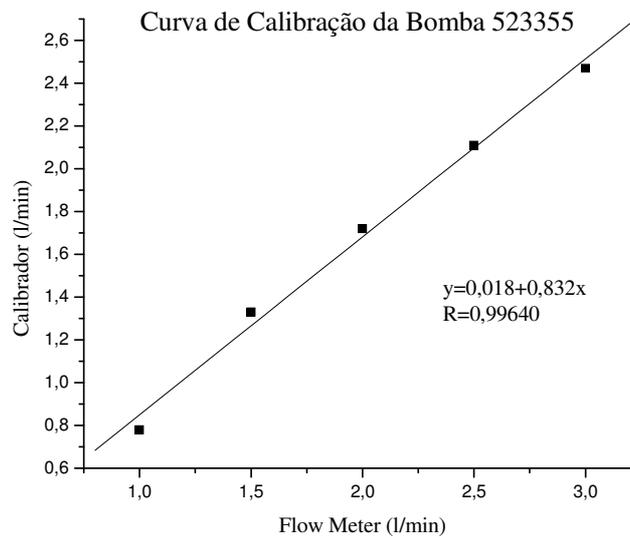


Figura A.2. Curva de calibração da bomba 2.

Tabela A.3. Dados da calibração da bomba de lapela 3.

Bomba 3: nº de Série 560332				
Vazão da Bomba (ℓ/min)	Vazão do Calibrador Primário (ℓ/min)			
	$v_1$	$v_2$	$v_3$	$\bar{v} \pm \sigma$
1,0	0,98	0,93	0,94	$0,96 \pm 0,03$
1,5	1,40	1,38	1,36	$1,38 \pm 0,03$
2,0	1,89	1,89	1,90	$1,89 \pm 0,01$
2,5	2,32	2,31	2,31	$2,32 \pm 0,01$
3,0	2,77	2,75	2,75	$2,76 \pm 0,01$

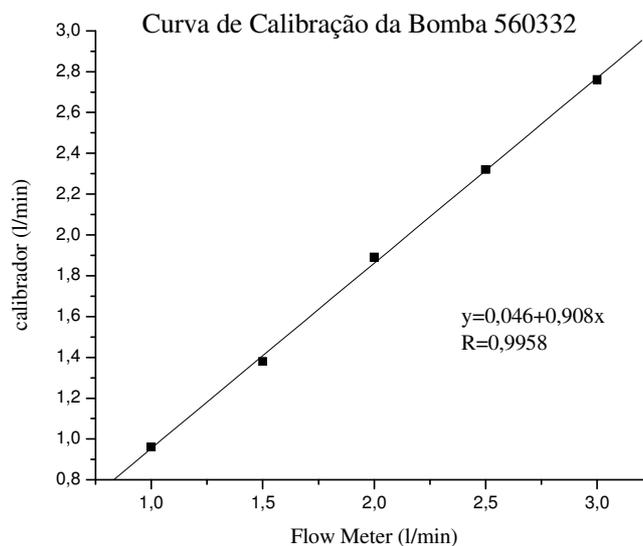


Figura A.3. Curva de calibração da bomba 3.

Tabela A.4. Dados da calibração da bomba de lapela 4.

Bomba 4: nº de Série 537268				
Vazão da Bomba (ℓ/min)	Vazão do Calibrador Primário (ℓ/min)			
	$v_1$	$v_2$	$v_3$	$\bar{v} \pm \sigma$
1,0	0,88	0,90	0,86	$0,87 \pm 0,01$
1,5	1,35	1,33	1,35	$1,35 \pm 0,00$
2,0	1,85	1,85	1,85	$1,85 \pm 0,00$
2,5	2,36	2,36	2,396	$2,36 \pm 0,00$
3,0	2,89	2,89	2,89	$2,89 \pm 0,00$

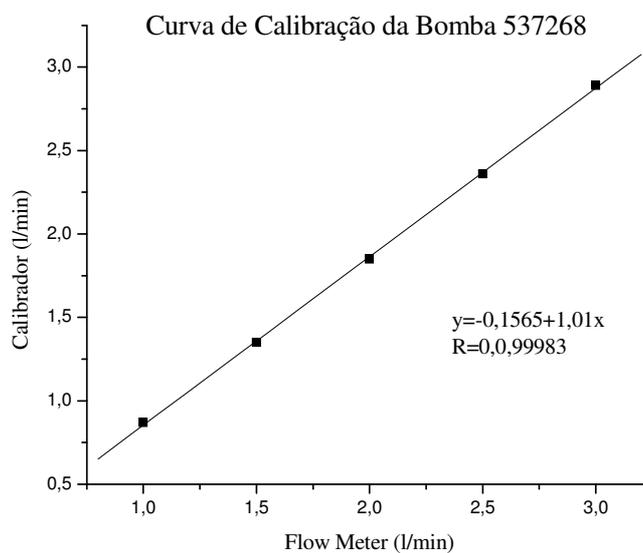


Figura A.4. Curva de calibração da bomba 4.

Tabela A.5. Dados da calibração da bomba de lapela 5.

Bomba 5: nº de Série 537276				
Vazão da Bomba (ℓ/min)	Vazão do Calibrador Primário (ℓ/min)			$\bar{v} \pm \sigma$
	$v_1$	$v_2$	$v_3$	
1,0	0,80	0,80	0,78	$0,79 \pm 0,01$
1,5	1,17	1,18	1,16	$1,17 \pm 0,00$
2,0	1,50	1,51	1,50	$1,50 \pm 0,00$
2,5	2,05	2,05	2,05	$2,05 \pm 0,00$
3,0	2,42	2,41	2,40	$2,41 \pm 0,01$

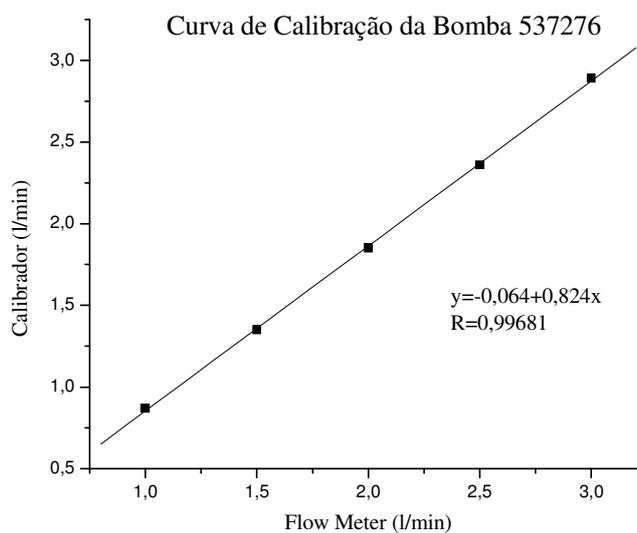


Figura A.5. Curva de calibração da bomba 5.

Tabela A.6. Dados da calibração da bomba de lapela 6.

Bomba 6: n <sup>o</sup> de Série 537288				
Vazão da Bomba (ℓ/min)	Vazão do Calibrador Primário (ℓ/min)			
	$v_1$	$v_2$	$v_3$	$\bar{v} \pm \sigma$
1,0	0,89	0,89	0,88	$0,89 \pm 0,00$
1,5	1,34	1,36	1,37	$1,35 \pm 0,02$
2,0	1,88	1,87	1,89	$1,88 \pm 0,00$
2,5	2,39	2,39	2,40	$2,39 \pm 0,00$
3,0	2,96	2,93	2,96	$2,96 \pm 0,00$

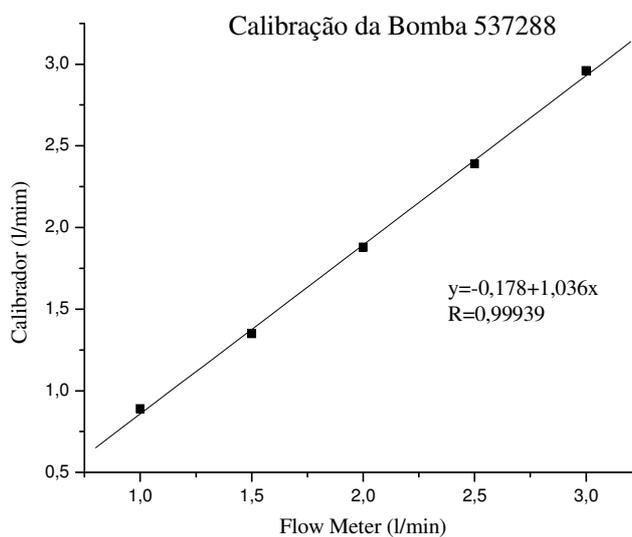


Figura A.6. Curva de calibração da bomba 6.

Tabela A.7. Dados da calibração da bomba de lapela 7.

Bomba 7: nº de Série 733263				
Vazão da Bomba (ℓ/min)	Vazão do Calibrador Primário (ℓ/min)			
	$v_1$	$v_2$	$v_3$	$\bar{v} \pm \sigma$
1,5	1,18	1,16	1,16	$1,017 \pm 0,00$
2,0	1,70	1,69	1,69	$1,69 \pm 0,01$
2,5	2,18	2,19	2,19	$2,19 \pm 0,01$
3,0	2,73	2,74	2,72	$2,72 \pm 0,00$
3,5	3,21	3,19	3,21	$3,21 \pm 0,00$

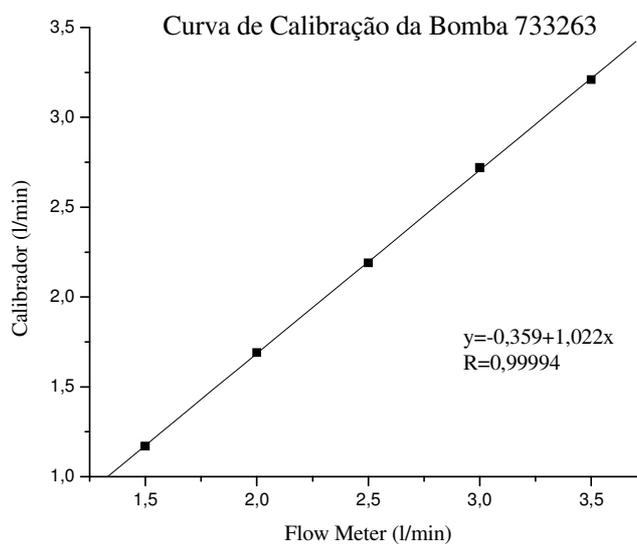


Figura A.7. Curva de calibração da bomba 7.

Tabela A.8. Dados da calibração da bomba de lapela 8.

Bomba 8: nº de Série 733201				
Vazão da Bomba ( $\ell/\text{min}$ )	Vazão do Calibrador Primário ( $\ell/\text{min}$ )			
	$v_1$	$v_2$	$v_3$	$\bar{v} \pm \sigma$
1,5	1,34	1,35	1,34	$1,34 \pm 0,00$
2,0	1,87	1,86	1,86	$1,86 \pm 0,01$
2,5	2,38	2,38	2,39	$2,39 \pm 0,00$
3,0	2,89	2,88	2,88	$2,88 \pm 0,01$
3,5	3,34	3,34	3,36	$3,35 \pm 0,01$

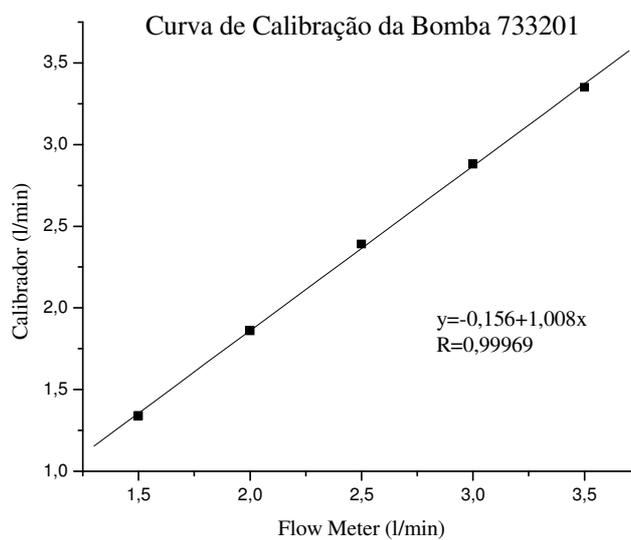


Figura A.8. Curva de calibração da bomba 8.

Tabela A.9. Dados da calibração da bomba de lapela 9.

Bomba 9: nº de Série 733292				
Vazão da Bomba (ℓ/min)	Vazão do Calibrador Primário (ℓ/min)			
	$v_1$	$v_2$	$v_3$	$\bar{v} \pm \sigma$
1,5	1,34	1,34	1,35	$1,34 \pm 0,00$
2,0	1,80	1,79	1,77	$1,79 \pm 0,02$
2,5	2,38	2,39	2,38	$2,38 \pm 0,00$
3,0	2,95	2,96	2,97	$2,96 \pm 0,01$
3,5	3,34	3,35	3,38	$3,36 \pm 0,02$

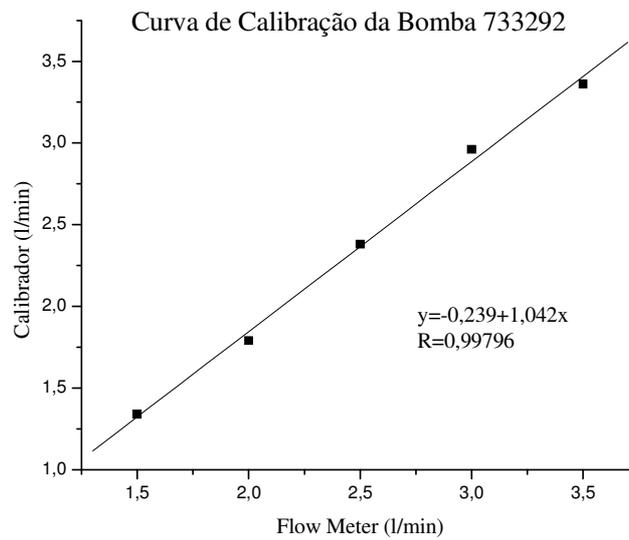


Figura A.9. Curva de calibração da bomba 9.

Tabela A.10. Dados da calibração da bomba de lapela 10.

Bomba 10: nº de Série 733323				
Vazão da Bomba (ℓ/min)	Vazão do Calibrador Primário (ℓ/min)			
	$v_1$	$v_2$	$v_3$	$\bar{v} \pm \sigma$
1,5	1,32	1,31	1,32	$1,32 \pm 0,00$
2,0	1,84	1,83	1,84	$1,84 \pm 0,00$
2,5	2,30	2,29	2,29	$2,30 \pm 0,00$
3,0	2,81	2,82	2,82	$2,81 \pm 0,01$
3,5	3,29	3,30	3,29	$3,29 \pm 0,00$

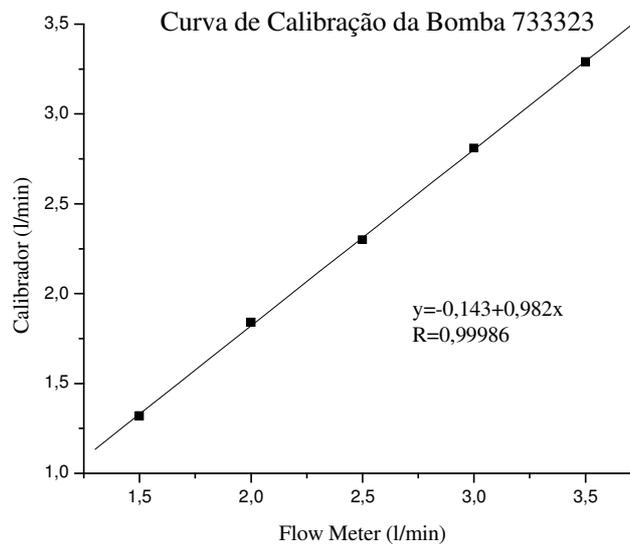


Figura A.10. Curva de calibração da bomba 10.

Tabela A.11. Dados da calibração da bomba de lapela 11.

Bomba 11: nº de Série 733352				
Vazão da Bomba (ℓ/min)	Vazão do Calibrador Primário (ℓ/min)			
	$v_1$	$v_2$	$v_3$	$\bar{v} \pm \sigma$
1,5	1,27	1,27	1,26	$1,26 \pm 0,01$
2,0	1,73	1,73	1,73	$1,73 \pm 0,00$
2,5	2,28	2,28	2,28	$2,28 \pm 0,00$
3,0	2,78	2,78	2,80	$2,79 \pm 0,01$
3,5	3,22	3,24	3,22	$3,22 \pm 0,01$

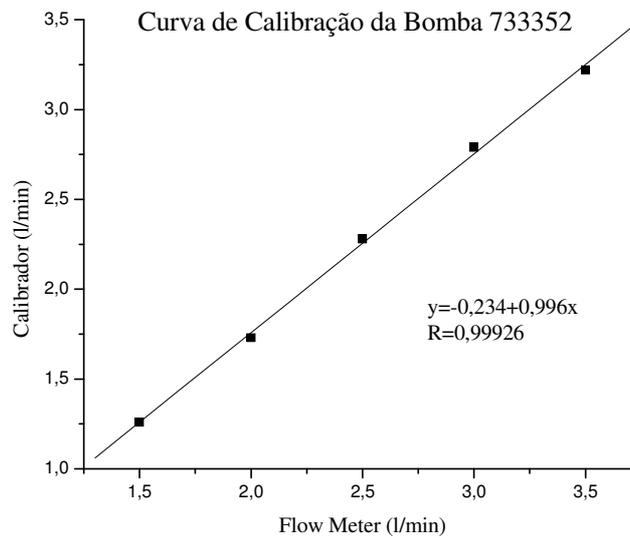


Figura A.11. Curva de calibração da bomba 11.

Assim, as calibrações obtidas para as bombas de lapela utilizadas nos experimentos manterem uma vazão de 2 ℓ/min estão apresentadas na Tabela A.12.

Tabela A.12. Calibração das Bombas de Lapelas.

Bomba	Valor na Escala da Bomba de Lapela (ℓ/min)
1	2,7
2	2,4
3	2,2
4	2,1
5	2,3
6	2,1
7	2,3
8	2,1
9	2,1
10	2,2
11	2,2

## Apêndice B

### - Tempos de amostragem -

Na Tabela B.1 são apresentados os tempos de amostragem de aerossóis, em minutos, em cada ponto de coleta no Jardim Botânico, ou seja, nas posições  $P_1$  a  $P_{11}$ , enquanto que na Tabela B.2 são apresentadas as condições meteorológicas existentes durante os dias de amostragem no Jardim Botânico.

Nas Tabelas B.3, B.4, B.5 e B.6, B.7 e B.8, os tempos relativos às amostras coletadas nos experimentos realizados no túnel.

Tabela B.1. Tempos de amostragens nas posições  $P_1$  a  $P_{11}$  no JB.

Data de Coleta	Localização das amostras coletadas										
	$P_1$	$P_2$	$P_3$	$P_4$	$P_5$	$P_6$	$P_7$	$P_8$	$P_9$	$P_{10}$	$P_{11}$
Duração da coleta (min)											
16/01/06	433	429	399	353	407	357	411	360	360	350	361
17/01/06	240	350	NC	225	345	343	344	344	345	346	347
18/01/06	558	540	NC	NC	532	540	540	522	522	515	515
19/01/06	532	532	NC	NC	535	510	510	515	515	515	516

NC: Não Coletada

Tabela B.2. Dados meteorológicos existentes no local da amostragem

Data	Velocidade do Vento ( $m/s$ )	Temperatura Ambiente ( $^{\circ}C$ )	Umidade do ar (%)
16/01/06	1,2 – 1,8	34,0	45
17/01/06	1,2 – 2,1	34,6	46
18/01/06	1,2 – 2,0	30,0	64
19/01/06	1,4 – 2,3	35,0	42

Tabela B.3. Tempos de amostragens no primeiro teste realizado no túnel.

<b>Primeiro Teste</b>			
Tempo total de Amostragem: 3.450 minutos			
Data	Início	Término	$\Delta t$ (minutos)
31/03/2006	11h00min	16h49min	349
03/04/2006	09h30min	16h43min	433
04/04/2006	09h50min	16h55min	425
05/04/2006	08h35min	12h28min	233
06/04/2006	10h05min	17h05min	420
07/04/2006	10h40min	16h40min	360
10/04/2006	11h20min	14h20min	180
11/04/2006	11h15min	16h50min	335
12/04/2006	10h30min	16h00min	330
13/04/2006	09h50min	16h15min	385

Tabela B.4. Tempos de amostragens no segundo teste realizado no túnel.

<b>Segundo Teste</b>			
Tempo total de Amostragem: 2.355 minutos			
Data	Início	Término	$\Delta t$ (minutos)
27/07/2006	09h30min	17h30min	480
28/07/2006	09h15min	17h15min	480
31/07/2006	08h15min	17h15min	540
01/08/2006	08h00min	17h00min	540
02/08/2006	08h00min	13h15min	315

Tabela B.5. Tempos de amostragens no terceiro teste realizado no túnel.

<b>Terceiro Teste</b>			
Tempo total de Amostragem: 2.100 minutos			
Data	Início	Término	$\Delta t$ (minutos)
17/08/2006	13h00min	17h00min	240
18/08/2006	08h20min	17h00min	520
21/08/2006	08h30min	17h00min	510
22/08/2006	08h30min	17h00min	510
23/08/2006	08h20min	13h40in	320

Tabela B.6. Tempos de amostragens no experimento com 15 vasos de plantas.

<b>Arranjo com Plantas 1 (15 Vasos)</b>			
Tempo total de Amostragem: 3.720 minutos			
Data	Início	Término	$\Delta t$ (minutos)
05/09/2006	15h00min	15h25min	25
06/09/2006	09h40min	16h10min	390
11/09/2006	09h12min	18h12min	540
12/09/2006	09h00min	17h00min	480
13/09/2006	08h45min	17h00min	495
14/09/2006	09h55min	17h00min	425
15/09/2006	08h15min	17h00min	525
18/09/2006	09h20min	17h00min	460
19/09/2006	09h10min	15h30min	390

Tabela B.7. Tempos de amostragens no experimento com 10 vasos.

<b>Arranjo com plantas 2 (10 vasos)</b>			
Tempo total de Amostragem: 1.290 minutos			
Data	Início	Término	$\Delta t$ (minutos)
21/11/2006	09h15min	19h55min	640
22/11/2006	08h00min	17h35min	575
23/11/2006	08h00min	09h15min	75

Tabela B.8. Tempos de amostragens no experimento com 6 vasos.

<b>Experimento III com Plantas (06 vasos)</b>			
Tempo total de Amostragem: 2.400 minutos			
Data	Início	Término	$\Delta t$ (minutos)
13/10/2006	08h40min	18h40min	600
16/10/2006	07h33min	18h33min	660
17/10/2006	07h25min	17h55min	630
18/10/2006	07h30min	16h00min	510

## Apêndice C

### - Resultados dos experimentos realizados no túnel -

Na Tabela C.1 são apresentadas as concentrações de Cu determinadas nas amostras coletadas nos APC localizados nas posições  $PL_1$  a  $PL_4$ , durante o primeiro teste realizado no interior do túnel fechado e sem plantas .

Tabela C.1. Concentrações de Cu nas amostras coletadas no primeiro teste.

Posição do APC	Concentração de Cu ( $\mu g / m^3$ )
$PL_1$	0,1013
$PL_2$	0,1093
$PL_3$	0,0764
$PL_4$	0,1529

A partir do segundo teste, todos os experimentos realizados no interior do túnel, com ou sem vegetação, ocorreram com a extremidade oposta ao gerador aberta. Na Tabela C.2 são apresentadas as concentrações de Cu determinadas nas amostras coletadas nos APC localizados nas posições  $PT_1$  a  $PT_4$ , durante o segundo teste realizado no interior do túnel.

Tabela C.2. Concentrações de Cu nas amostras coletadas no segundo teste.

Posição do APC	Concentração de Cu ( $ng / m^3$ )
$PT_1$	12,1966
$PT_2$	5,2921
$PT_3$	2,4017
$PT_4$	1,5387

Na Tabela C.3 são apresentadas as concentrações de Cu determinadas nas amostras coletadas nos APC localizados nas posições  $PT_1$  a  $PT_4$ , durante o terceiro teste realizado no interior do túnel sem plantas.

Tabela C.3. Concentrações de Cu nas amostras coletadas no terceiro teste.

Posição do APC	Concentração de Cu ( $ng / m^3$ )
$PT_1$	6,8919
$PT_2$	3,6610
$PT_3$	1,7517
$PT_4$	1,0241

Nas Tabelas C.4 a C.9 são apresentadas as concentrações dos elementos identificados nas amostras coletadas nos diversos pontos de amostragem no interior do Jardim Botânico.

Tabela C.4. Concentrações dos elementos identificados nas amostras do JB.

Amostras Obtidas no Jardim Botânico (Janeiro de 2006)											
Concentrações ( ng/m3 )											
Elemento	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11
K	3,7725	2,2548	8,6970	2,4219	2,4422	3,6497	1,7326	5,8689	3,9845	4,4122	2,6711
Ca	3,8599	2,2564	4,8323	1,0059	1,6280	2,2809	2,0322	2,6487	2,1034	2,3733	1,7231
Sc	0,4464	0,2644	1,2212	0,4287	0,3934	0,3437	0,4393	1,1329	0,4591	0,4886	0,2753
Ti	0,6830	0,4571	0,8992	0,1918	0,3615	0,3835	0,3420	0,6507	0,3087	0,3812	0,3232
V	0,1524	0,1442	0,1485	0,1200	0,1726	0,1110	0,1488	0,2126	0,1454	0,1437	0,1574
Cr	0,3000	0,1875	1,1472	0,2686	0,3161	0,4129	0,2857	1,0127	0,4442	0,4434	0,2872
Mn	0,1230	0,1302	0,2491	0,0557	0,1017	0,1056	0,1189	0,3687	0,1252	0,1364	0,0958
Fe	3,3338	2,9706	3,5614	0,9693	1,7756	1,8895	1,8494	2,4639	2,4216	2,5171	1,2541
Co	0,0497	0,0650	0,2091	0,0620	0,0212	0,0826	0,0781	0,1557	0,1024	0,1164	0,0276
Ni	0,0500	0,0268	0,2997	0,0627	0,1215	0,1091	0,0781	0,0839	0,1375	0,1309	0,0350
Cu	0,0656	0,0632	0,0000	0,0000	0,0309	0,0000	0,0406	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Zn	0,0883	0,0681	0,0000	0,0105	0,0535	0,0000	0,0706	0,1862	0,0000	0,0442	0,0336
Br	0,1649	0,0682	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,1649	0,1758

Tabela C.5. Concentrações dos elementos identificados nas amostras do JB, na entrada principal.

Amostras Obtidas no Jardim Botânico (Janeiro de 2006)			
Concentrações ( ng/m <sup>3</sup> )			
Elemento	$P_1$	$P_2$	$\bar{P} \pm \sigma$
K	3,7725	2,2548	3,0137 $\pm$ 1,0732
Ca	3,8599	2,2564	3,0582 $\pm$ 1,1338
Sc	0,4464	0,2644	0,3554 $\pm$ 0,1287
Ti	0,6830	0,4571	0,5701 $\pm$ 0,1597
V	0,1524	0,1442	0,1483 $\pm$ 0,0058
Cr	0,3000	0,1875	0,2438 $\pm$ 0,0795
Mn	0,1230	0,1302	0,1266 $\pm$ 0,0051
Fe	3,3338	2,9706	3,1522 $\pm$ 0,2568
Co	0,0497	0,0650	0,0574 $\pm$ 0,0108
Ni	0,0500	0,0268	0,0384 $\pm$ 0,0164
Cu	0,0656	0,0632	0,0644 $\pm$ 0,0017
Zn	0,0883	0,0681	0,0782 $\pm$ 0,0143
Br	0,1649	0,0682	0,1166 $\pm$ 0,0684

Tabela C.6. Concentrações dos elementos identificados nas amostras do JB, no chafariz com vegetação.

Amostras Obtidas no Jardim Botânico (Janeiro de 2006)			
Concentrações ( ng/m3 )			
Elemento	$P_6$	$P_7$	$\bar{P} \pm \sigma$
K	3,6497	1,7326	2,6912 $\pm$ 1,3556
Ca	2,2809	2,0322	2,1566 $\pm$ 0,1759
Sc	0,3437	0,4393	0,3915 $\pm$ 0,0676
Ti	0,3835	0,342	0,3628 $\pm$ 0,0293
V	0,111	0,1488	0,1299 $\pm$ 0,0267
Cr	0,4129	0,2857	0,3493 $\pm$ 0,0899
Mn	0,1056	0,1189	0,1123 $\pm$ 0,0094
Fe	1,8895	1,8494	1,8695 $\pm$ 0,0284
Co	0,0826	0,0781	0,0804 $\pm$ 0,0032
Ni	0,1091	0,0781	0,0936 $\pm$ 0,0219
Cu	0	0,0406	0,0203 $\pm$ 0,0287
Zn	0	0,0706	0,0353 $\pm$ 0,0499
Br	0	0	0,0000 $\pm$ 0,0000

Tabela C.7. Concentrações dos elementos identificados nas amostras do JB, no final da aléia com vegetação.

Amostras Obtidas no Jardim Botânico (Janeiro de 2006)			
Concentrações ( ng/m <sup>3</sup> )			
Elemento	$P_{10}$	$P_{11}$	$\bar{P} \pm \sigma$
K	4,4122	2,6711	3,5417 $\pm$ 1,2311
Ca	2,3733	1,7231	2,0482 $\pm$ 0,4598
Sc	0,4886	0,2753	0,3820 $\pm$ 0,1508
Ti	0,3812	0,3232	0,3522 $\pm$ 0,0410
V	0,1437	0,1574	0,1506 $\pm$ 0,0097
Cr	0,4434	0,2872	0,3653 $\pm$ 0,1105
Mn	0,1364	0,0958	0,1161 $\pm$ 0,0287
Fe	2,5171	1,2541	1,8856 $\pm$ 0,8931
Co	0,1164	0,0276	0,0720 $\pm$ 0,0628
Ni	0,1309	0,0350	0,0830 $\pm$ 0,0678
Cu	0,0000	0,0000	0,0000 $\pm$ 0,0000
Zn	0,0442	0,0336	0,0389 $\pm$ 0,0075
Br	0,1649	0,1758	0,1704 $\pm$ 0,0077

Tabela C.8. Concentrações dos elementos identificados nas amostras do JB, no chafariz sem vegetação.

Amostras Obtidas no Jardim Botânico (Janeiro de 2006)			
Concentrações ( ng/m3 )			
Elemento	$P_4$	$P_5$	$\bar{P} \pm \sigma$
K	2,4219	2,4422	2,4321 $\pm$ 0,0144
Ca	1,0059	1,6280	1,3170 $\pm$ 0,4399
Sc	0,4287	0,3934	0,4111 $\pm$ 0,0250
Ti	0,1918	0,3615	0,2767 $\pm$ 0,1200
V	0,1200	0,1726	0,1463 $\pm$ 0,0372
Cr	0,2686	0,3161	0,2924 $\pm$ 0,0336
Mn	0,0557	0,1017	0,0787 $\pm$ 0,0325
Fe	0,9693	1,7756	1,3725 $\pm$ 0,5701
Co	0,0620	0,0212	0,0416 $\pm$ 0,0288
Ni	0,0627	0,1215	0,0921 $\pm$ 0,0416
Cu	0,0000	0,0309	0,0155 $\pm$ 0,0218
Zn	0,0105	0,0535	0,0320 $\pm$ 0,0304
Br	0,0000	0,0000	0,0000 $\pm$ 0,0000

Tabela C.9. Concentrações dos elementos identificados nas amostras do JB, no final da aléia sem vegetação.

Amostras Obtidas no Jardim Botânico (Janeiro de 2006)			
Concentrações ( ng/m3 )			
Elemento	$P_8$	$P_9$	$\bar{P} \pm \sigma$
K	5,8689	3,9845	4,9267 $\pm$ 1,3325
Ca	2,6487	2,1034	2,3761 $\pm$ 0,3856
Sc	1,1329	0,4591	0,7960 $\pm$ 0,4764
Ti	0,6507	0,3087	0,4797 $\pm$ 0,2418
V	0,2126	0,1454	0,1790 $\pm$ 0,0475
Cr	1,0127	0,4442	0,7285 $\pm$ 0,4020
Mn	0,3687	0,1252	0,2470 $\pm$ 0,1722
Fe	2,4639	2,4216	2,4428 $\pm$ 0,0299
Co	0,1557	0,1024	0,1291 $\pm$ 0,0377
Ni	0,0839	0,1375	0,1107 $\pm$ 0,0379
Cu	0,0000	0,0000	0,0000 $\pm$ 0,0000
Zn	0,1862	0,0000	0,0931 $\pm$ 0,1317
Br	0,0000	0,0000	0,0000 $\pm$ 0,0000

## Apêndice D

### - Resultados dos testes estatísticos -

#### *D.1 Teste estatístico aplicado aos dados levantados no Jardim Botânico*

O objetivo dos testes de hipótese de 2 amostras é avaliar os parâmetros da população através da análise estatística da amostra. Os testes não paramétricos são testes de hipótese que analisam os parâmetros das populações.

As amostras de aerossóis coletadas no Jardim Botânico foram comparadas, para tal foram classificadas em 5 grupos: grupo A - amostras coletadas junto ao portão principal do Jardim Botânico (amostras  $P_1$ ,  $P_2$  e  $P_3$ ); grupo B – amostras coletadas junto ao muro da rua Pacheco Leão (amostras  $P_8$ ,  $P_9$ ,  $P_{10}$  e  $P_{11}$ ); grupo C – amostras coletadas nas aléias do JB (amostras  $P_1$ ,  $P_2$ ,  $P_3$ ,  $P_4$ ,  $P_5$ ,  $P_8$  e  $P_9$ ); no grupo D – amostras coletadas nas áreas com vegetação (amostras  $P_6$ ,  $P_7$ ,  $P_{10}$  e  $P_{11}$ ) e no grupo E – Amostras coletadas próximas ao chafariz (amostras  $P_4$ ,  $P_5$ ,  $P_6$  e  $P_7$ ).

As concentrações de cada grupo foram comparadas utilizando-se o teste estatístico não paramétrico de Mann-Whitney, com  $\alpha = 0,05$  (erro aceito dentro do intervalo de confiança de  $1\sigma$ ), e adotando-se as seguintes hipóteses:

- a.  $H_0$  = concentrações de vanádio comparadas em 2 grupos são iguais;
- b.  $H_1$  = concentrações de vanádio comparadas em 2 grupos são distintas;
- c.  $U = n_1 \cdot n_2 + [n_1(n_1 + 1)/2] - R_1$ , onde:

1)  $n_1$  e  $n_2$  = número de observações nos grupos 1 e 2, respectivamente;

e

2)  $R_1$  = soma dos postos das observações no grupo 1.

d.  $U' = n_1 \cdot n_2 - 1$ ;

e. o menor dos valores entre  $U$  e  $U'$  denomina-se  $U_{Calculado}$ ; e

f. se  $U_{Calculado} \geq U_{\alpha; n_1; n_2} = U_{\alpha; n_2; n_1}$ , a hipótese  $H_0$  deve ser rejeitada.

Na Tabela D.1 são apresentados os valores das concentrações de V coletadas nas posições descritas nos Grupos A e B.

Tabela D.1. Concentrações de V coletadas nas posições dos grupos A e B.

Grupo A		Grupo B	
Posições da Coleta	Concentrações de V (ng / m <sup>3</sup> )	Posições da Coleta	Concentrações de V (ng / m <sup>3</sup> )
$P_1$	0,152	$P_8$	0,213
$P_2$	0,144	$P_9$	0,145
$P_3$	0,368	$P_{10}$	0,144
		$P_{11}$	0,151

Na Tabela D.2 são apresentadas as concentrações de V ordenadas em ordem crescente e os resultados relativos ao teste estatístico não paramétrico de Mann-Whitney, com  $\alpha = 0,05$ , para os Grupos A e B. Neste teste, a hipótese  $H_0$  adotada foi: as concentrações de V coletadas nos Grupos A e B são iguais, ou seja, pertencem à mesma distribuição.

Tabela D.2. Concentrações de V coletadas nas posições dos grupos A e B, ordenadas.

Grupo B		Grupo A	
Concentrações de V ( $ng / m^3$ )	Posto	Concentrações de V ( $ng / m^3$ )	Posto
0,144	1,5	0,144	1,5
0,145	3	0,152	5
0,151	4	0,368	7
0,213	6		
$n_1 = 4$	$R_1 = 14,5$	$n_2 = 3$	$R_2 = 13,5$

Aplicando-se o teste descrito anteriormente, para  $n_1 = 4$  e  $n_2 = 3$ , tem-se  $U = 7,5$ ,  $U' = 4,5$  e, conseqüentemente,  $U_{crítico} = 12$ , (ZAR, 1999). Assim, como  $U_{Calculado} < U_{crítico}$ , tem-se que a hipótese  $H_0$  não deve ser rejeitada, ou seja, as amostras são iguais. Logo, não existem diferenças entre as concentrações de V nas amostras coletadas nos grupos A e B e as mostras pertencem à mesma distribuição.

Na Tabela D.3 são apresentados os valores das concentrações de V coletadas nas posições descritas nos Grupos A e E.

Tabela D.3. Concentrações de V coletadas nas posições dos grupos A e E.

Grupo A		Grupo E	
Posições da Coleta	Concentrações de V ( $ng / m^3$ )	Posições da Coleta	Concentrações de V ( $ng / m^3$ )
$P_1$	0,152	$P_4$	0,120
$P_2$	0,144	$P_5$	0,173
$P_3$	0,368	$P_6$	0,213
		$P_7$	0,149

Na Tabela D.4 são apresentadas as concentrações de V ordenadas em ordem crescente e os resultados relativos ao teste estatístico não paramétrico de Mann-Whitney, com  $\alpha = 0,05$ , para os Grupos A e E. Neste teste, a hipótese  $H_0$  adotada foi: as concentrações de V coletadas nos Grupos A e E são iguais, ou seja pertencem a mesma distribuição.

Tabela D.4. Concentrações de V coletadas nas posições dos grupos A e E, ordenadas.

Grupo E		Grupo A	
Concentrações de V ( $ng / m^3$ )	Posto	Concentrações de V ( $ng / m^3$ )	Posto
0,120	1	0,144	2
0,149	3	0,152	4
0,173	5	0,368	7
0,213	6		
$n_1 = 4$	$R_1 = 15$	$n_2 = 3$	$R_2 = 13$

Aplicando-se o teste descrito acima, para  $n_1 = 4$  e  $n_2 = 3$ , tem-se  $U = 7$ ,  $U' = 5$  e, conseqüentemente,  $U_{crítico} = 12$ , (ZAR, 1999). Assim, como  $U_{Calculado} < U_{crítico}$ , tem-se que a hipótese  $H_0$  não deve ser rejeitada, ou seja, as amostras são iguais. Logo, não existem diferenças entre as concentrações de V nas amostras coletadas nos grupos A e E, e as amostras pertencem à mesma distribuição.

Na Tabela D.5 são apresentados os valores das concentrações de V coletadas nas posições descritas nos Grupos C e D.

Tabela D.5. Concentrações de V coletadas nas posições dos grupos C e D.

Grupo C		Grupo D	
Posições da Coleta	Concentrações de V ( $ng / m^3$ )	Posições da Coleta	Concentrações de V ( $ng / m^3$ )
$P_1$	0,152	$P_6$	0,213
$P_2$	0,144	$P_7$	0,149
$P_3$	0,368	$P_{10}$	0,144
$P_4$	0,120	$P_{11}$	0,151
$P_5$	0,173		
$P_8$	0,213		
$P_9$	0,145		

Na Tabela D.6 são apresentadas as concentrações de V ordenadas em ordem crescente e os resultados relativos ao teste estatístico não paramétrico de Mann-Whitney, com  $\alpha = 0,05$ , para os Grupos C e D. Neste teste, a hipótese  $H_0$  adotada foi: as concentrações de V coletadas nos Grupos C e D são iguais, ou seja, pertencem à mesma distribuição.

Aplicando-se o teste descrito acima, para  $n_1 = 7$  e  $n_2 = 3$ , tem-se  $U = 13$ ,  $U' = 15$  e, conseqüentemente,  $U_{crítico} = 19$ , (ZAR, 1999). Assim, como  $U_{Calculado} < U_{crítico}$ , tem-se que a hipótese  $H_0$  não deve ser rejeitada, ou seja, as amostras são iguais. Logo, não existem diferenças entre as concentrações de V nas amostras coletadas nos grupos C e D, e as amostras pertencem à mesma distribuição.

Tabela D.6. Concentrações de V Coletadas nas posições dos Grupos C e D, ordenadas.

Grupo C		Grupo D	
Concentrações de V ( $ng / m^3$ )	Posto	Concentrações de V ( $ng / m^3$ )	Posto
0,120	1	0,144	2,5
0,144	2,5	0,149	5
0,145	4	0,173	6
0,152	7	0,213	9,5
0,173	8		
0,213	9,5		
0,368	11		
$n_1 = 7$	$R_1 = 43$	$n_2 = 4$	$R_2 = 23$

## D.2 Teste estatístico aplicado aos dados levantados no túnel

As amostras de aerossóis coletadas nos experimentos realizados no túnel foram comparadas, para tal foram classificadas em 4 grupos: grupo 1 - amostras coletadas no experimento sem plantas; grupo 2 – amostras coletadas no experimento com 15 vasos de plantas no túnel; grupo 3 – amostras coletadas no experimento com 10 vasos de plantas no túnel; no grupo 4 – amostras coletadas no experimento com 6 vasos de plantas no túnel. As concentrações normalizadas dos experimentos realizados nos grupo definidos anteriormente foram comparadas utilizando o teste estatístico não paramétrico pareado de Wilcoxon, com  $\alpha = 0,5$ , e adotando-se as seguintes hipóteses:

a.  $H_0$  = as duas distribuições são equivalentes;

b.  $T' = m \cdot (n + 1) - T$ , onde:

1)  $T$  = a soma dos postos com menor frequência de sinal;

2)  $m$  = número de postos com menor frequência de sinal; e

3)  $n$  = número de amostras em cada Grupo.

c. o menor dos valores entre  $T$  e  $T'$  denomina-se  $T_{Calculado}$ ; e

d. se  $T_{Crítico} \geq T_{Calculado}$ , a hipótese  $H_0$  deve ser rejeitada.

Na Tabela D.7 é apresentado o levantamento dos dados necessários para a aplicação do teste de Wilcoxon, considerando a hipótese  $H_0$  de que as duas distribuições são iguais.

Tabela D.7. Dados para o Teste de Wilcoxon para as amostras coletadas nas posições dos Grupos 1 e 3.

Grupo 1	Grupo 3	Diferenças	Posto	Sinal do Posto
$X_{1j}$	$X_{2j}$	$d_j = X_{1j} - X_{2j}$	$ d_j $	$\pm  d_j $
1,0000	1,0000	0,0000	1	1
0,5314	0,7142	-0,1828	2	-2
0,2835	0,0709	0,2126	4	4
0,2443	0,0520	0,1923	3	3

Aplicando-se o teste, para  $n = 4$ , tem-se  $T = 2$ ,  $m = 1$ ,  $T' = 3$  e  $T_{crítico} = 2$ .

Assim, como  $T_{Calculado} \leq T_{crítico}$ , tem-se que a hipótese  $H_0$  deve ser rejeitada, ou seja, existem diferenças entre as concentrações de Cu nas amostras coletadas nos grupos 1 e 3.

Na Tabela D.8 é apresentado o levantamento dos dados necessários para a aplicação do teste de Wilcoxon, considerando a hipótese  $H_0$  de que as duas distribuições são iguais.

Tabela D.8. Dados para o Teste de Wilcoxon para as amostras coletadas nas posições dos Grupos 1 e 2.

Grupo 1	Grupo 2	Diferenças	Posto	Sinal do Posto
$X_{1j}$	$X_{2j}$	$d_j = X_{1j} - X_{2j}$	$ d_j $	$\pm  d_j $
1,0000	1,0000	0,0000	1	1
0,5314	0,7561	-0,2247	2	-2
0,2835	0,5667	-0,2832	4	-4
0,2443	0,4284	-0,1841	3	-3

Aplicando-se o teste, para  $n = 4$ , tem-se  $T = 1$ ,  $m = 1$ ,  $T' = 4$  e  $T_{crítico} = 2$ .

Assim, como  $T_{Calculado} \leq T_{crítico}$ , tem-se que a hipótese  $H_0$  deve ser rejeitada, ou seja, existem diferenças entre as concentrações de Cu nas amostras coletadas nos grupos 1 e 2.

Na Tabela D.9 é apresentado o levantamento dos dados necessários para a aplicação do teste de Wilcoxon, considerando a hipótese  $H_0$  de que as duas distribuições são iguais.

Tabela D.9. Dados para o Teste de Wilcoxon para as amostras coletadas nas posições dos Grupos 1 e 4.

Grupo 1	Grupo 4	Diferenças	Posto	Sinal do Posto
$X_{1j}$	$X_{4j}$	$d_j = X_{1j} - X_{4j}$	$ d_j $	$\pm  d_j $
1,0000	1,0000	0,0000	1	1
0,5314	0,4275	0,1039	4	4
0,2835	0,2699	0,0136	2	2
0,2443	0,1649	0,0794	3	3

Aplicando-se o teste, para  $n = 4$ , tem-se  $T = 0$ ,  $m = 0$ ,  $T' = 0$  e  $T_{crítico} = 2$ .

Assim, como  $T_{Calculado} \leq T_{crítico}$ , tem-se que a hipótese  $H_0$  deve ser rejeitada, ou seja, existem diferenças entre as concentrações de Cu nas amostras coletadas nos grupos 1 e 4.

Na Tabela D.10 é apresentado o levantamento dos dados necessários para a aplicação do teste de Wilcoxon, considerando a hipótese  $H_0$  de que as duas distribuições são iguais.

Tabela D.10. Dados para o Teste de Wilcoxon para as amostras coletadas nas posições dos Grupos 2 e 3.

Grupo 2	Grupo 3	Diferenças	Posto	Sinal do Posto
$X_{1j}$	$X_{2j}$	$d_j = X_{1j} - X_{2j}$	$ d_j $	$\pm  d_j $
1,0000	1,0000	0,0000	1	1
0,7561	0,7142	0,0419	2	2
0,5667	0,0709	0,4958	4	4
0,4284	0,0520	0,3764	3	3

Aplicando-se o teste, para  $n = 4$ , tem-se  $T = 0$ ,  $m = 0$ ,  $T' = 0$  e  $T_{crítico} = 2$ .

Assim, como  $T_{Calculado} \leq T_{crítico}$ , tem-se que a hipótese  $H_0$  deve ser rejeitada, ou seja, existem diferenças entre as concentrações de Cu nas amostras coletadas nos grupos 2 e 3.

Na Tabela D.11 é apresentado o levantamento dos dados necessários para a aplicação do teste de Wilcoxon, considerando a hipótese  $H_0$  de que as duas distribuições são iguais.

Tabela D.11. Dados para o Teste de Wilcoxon para as amostras coletadas nas posições dos Grupos 2 e 4.

Grupo 2	Grupo 4	Diferenças	Posto	Sinal do Posto
$X_{1j}$	$X_{2j}$	$d_j = X_{1j} - X_{2j}$	$ d_j $	$\pm  d_j $
1,0000	1,0000	0,0000	1	1
0,7561	0,4275	0,3286	4	4
0,5667	0,2699	0,2968	3	3
0,4284	0,1649	0,2635	2	2

Aplicando-se o teste, para  $n = 4$ , tem-se  $T = 0$ ,  $m = 0$ ,  $T' = 0$  e  $T_{crítico} = 2$ .

Assim, como  $T_{Calculado} \leq T_{crítico}$ , tem-se que a hipótese  $H_0$  deve ser rejeitada, ou seja, existem diferenças entre as concentrações de Cu nas amostras coletadas nos grupos 2 e 4.

Na Tabela D.12 é apresentado o levantamento dos dados necessários para a aplicação do teste de Wilcoxon, considerando a hipótese  $H_0$  de que as duas distribuições são iguais.

Tabela D.12. Dados para o Teste de Wilcoxon para as amostras coletadas nas posições dos Grupos 3 e 4.

Grupo 4	Grupo 3	Diferenças	Posto	Sinal do Posto
$X_{1j}$	$X_{2j}$	$d_j = X_{1j} - X_{2j}$	$ d_j $	$\pm  d_j $
1,0000	1,0000	0,000	1	1
0,4275	0,7142	-0,2867	4	-4
0,2699	0,0709	0,1990	3	3
0,1649	0,0520	0,1129	2	2

Aplicando-se o teste, para  $n = 4$ , tem-se  $T = 4$ ,  $m = 1$ ,  $T' = 1$  e  $T_{crítico} = 2$ .

Assim, como  $T_{Calculado} \leq T_{crítico}$ , tem-se que a hipótese  $H_0$  deve ser rejeitada, ou seja, existem diferenças entre as concentrações de Cu nas amostras coletadas nos grupos 3 e 4.