

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO  
CENTRO TECNOLÓGICO  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA  
PROJETO DE GRADUAÇÃO**

**ESTUDO DE PERDA DE INFORMAÇÃO  
COM MODIFICAÇÕES DE MONITORAMENTO  
EM REDE ESPACIAL DISPERSA**

**LUIZ ANTÔNIO RADAELI**

**VITÓRIA – ES**  
**ABRIL/2004**

**LUIZ ANTÔNIO RADAELI**

**ESTUDO DE PERDA DE INFORMAÇÃO  
COM MODIFICAÇÕES DE MONITORAMENTO  
EM REDE ESPACIAL DISPERSA**

Parte manuscrita do Projeto de Graduação do aluno Luiz Antônio Radaeli, apresentado ao Departamento de Engenharia Mecânica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, para obtenção do grau de Engenheiro Mecânico.

**VITÓRIA – ES  
ABRIL/2004**

**LUIZ ANTÔNIO RADAELI**

**ESTUDO DE PERDA DE INFORMAÇÃO  
COM MODIFICAÇÕES DE MONITORAMENTO  
EM REDE ESPACIAL DISPERSA**

**COMISSÃO EXAMINADORA:**

---

**Prof. M.Sc Rogério Silveira de Queiroz  
Orientador**

---

**Prof. D.Sc Rogério Ramos  
Examinador**

---

**Prof. MSc Elias Dalvi  
Examinador**

**Vitória - ES, 26 de Abril de 2004**

## **DEDICATÓRIA**

Aos alunos e professores do Curso de Engenharia Mecânica da UFES.

## **AGRADECIMENTOS**

À equipe da EcoSoft, em especial aos funcionários Igor Baptista de Araújo e Flávio Curbani, pela significativa ajuda na resolução de problemas que surgiram durante a fase de geração de análises estatísticas do presente trabalho.

Ao professor e orientador Rogério Silveira de Queiroz pela orientação científica e pelo aprendizado que me proporcionou.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Evolução da frota veicular na Região Metropolitana da Grande Vitória (RMGV).....	10
Figura 2 – Rede Automática de Monitoramento da Qualidade do Ar da RMGV .....	11
Figura 3 - Fluxo de dados no AERMOD.....	17
Figura 4 – Divisão das concentrações de origem industrial pelas concentrações de origem veicular para PM <sub>10</sub> .....	21
Figura 5 – Divisão das concentrações de origem industrial pelas concentrações de origem veicular para NO <sub>x</sub> .....	22
Figura 6 - Análise do percentual de ocorrência da direção do vento para a RAMQAR 2 (Carapina) .....	26
Figura 7 - Análise do percentual de ocorrência da direção do vento para a RAMQAR 4 (Enseada do Suá) .....	26
Figura 8 - Análise do percentual de ocorrência da direção do vento para a RAMQAR 6 (Vila Velha-Ibes) .....	27
Figura 9 - Análise do percentual de ocorrência da direção do vento para a RAMQAR 8 (Cariacica).....	27
Figura 10 - Esquema da direção do vento predominante na RMGV.....	28
Figura 11 - Principais resultados obtidos durante a filtragem dos dados separados por seqüencial para as concentrações médias de PM <sub>10</sub> em µg/m <sup>3</sup> .....	31
Figura 12 - Principais resultados obtidos durante a filtragem dos dados separados por seqüencial para as concentrações médias de NO <sub>x</sub> em µg/m <sup>3</sup> . .....	32
Figura 13 - Coeficiente de correlação em função da distância entre pares de estação para PM <sub>10</sub> – Verão .....	37
Figura 14 - Coeficiente de correlação em função da distância entre pares de estação para PM <sub>10</sub> – Outono .....	37
Figura 15 - Coeficiente de correlação em função da distância entre pares de estação para PM <sub>10</sub> – Inverno.....	38
Figura 16 - Coeficiente de correlação em função da distância entre pares de estação para PM <sub>10</sub> – Primavera.....	38

Figura 17 - Coeficiente de correlação em função da distância entre pares de estação para PM <sub>10</sub> – Todo período .....	39
Figura 18 - Coeficiente de correlação em função da distância entre pares de estação para NO <sub>x</sub> - Verão .....	39
Figura 19 - Coeficiente de correlação em função da distância entre pares de estação para NO <sub>x</sub> - Outono .....	40
Figura 20 - Coeficiente de correlação em função da distância entre pares de estação para NO <sub>x</sub> – Inverno .....	40
Figura 21 - Coeficiente de correlação em função da distância entre pares de estação para NO <sub>x</sub> – Primavera .....	41
Figura 22 - Coeficiente de correlação em função da distância entre pares de estação para NO <sub>x</sub> – Todo período.....	41
Figura 23 – Coeficiente de Correlação em função da distância de cada estação pela estação RAMQAr 6 .....	46
Figura 24 – Coeficiente de correlação em função da distância de cada estação pela estação RAMQAr 8 .....	46
Figura 25 – Coeficiente de correlação em função da distância de cada estação pela estação RAMQAr 4 .....	47

## LISTA DE TABELA

Tabela 1 - Resumo estatístico das concentrações de PM <sub>10</sub> (µg/m <sup>3</sup> ) nas estações da RAMQAr. ....	23
Tabela 2 - Resumo estatístico das concentrações de NO <sub>x</sub> (µg/m <sup>3</sup> ) nas estações da RAMQAr. ....	23
Tabela 3 - Análise de Percentil para as concentrações de PM <sub>10</sub> em µg/m <sup>3</sup> .....	24
Tabela 4 - Análise de Percentil para as concentrações de NO <sub>x</sub> em µg/m <sup>3</sup> . ....	25
Tabela 5 - Seqüencial dos dados filtrados de PM <sub>10</sub> e NO <sub>x</sub> para todas as estações da RMQAr. ....	29
Tabela 6 - Principais resultados obtidos durante a filtragem de dados para as concentrações médias de PM <sub>10</sub> em µg/m <sup>3</sup> .....	29
Tabela 7 - Principais resultados obtidos durante a filtragem de dados para as concentrações médias de NO <sub>x</sub> em µg/m <sup>3</sup> .....	30
Tabela 8 – Informação do Índice de Shannon para cada combinação de seis estações	44
Tabela 9 - Informação do Índice de Shannon para cada combinação de quatro estações .....	44



## SUMÁRIO

<b>DEDICATÓRIA.....</b>	<b>I</b>
<b>AGRADECIMENTOS .....</b>	<b>II</b>
<b>LISTA DE FIGURAS .....</b>	<b>III</b>
<b>LISTA DE TABELA .....</b>	<b>V</b>
<b>SUMÁRIO .....</b>	<b>VI</b>
<b>RESUMO.....</b>	<b>VII</b>
<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>8</b>
<b>2 DESCRIÇÃO DO MODELO MATEMÁTICO DE SIMULAÇÃO DE DISPERSÃO – AERMOD .....</b>	<b>15</b>
2.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS .....	15
2.2 PRINCIPAIS RESULTADOS DA MODELAGEM DA DISPERSÃO .....	20
<b>3 PRINCIPAIS RESULTADOS DO MONITORAMENTO .....</b>	<b>23</b>
3.1 ANÁLISE DA DIREÇÃO DO VENTO NA RMGV .....	26
<b>4 AVALIAÇÃO DE CRITÉRIOS DE AVALIAÇÃO .....</b>	<b>36</b>
4.1 ANÁLISE DE CORRELAÇÃO .....	36
4.2 INFORMAÇÃO DO ÍNDICE DE SHANNON PARA REDES DE MONITORAMENTO AMBIENTAL .....	42
4.2.1 UMA VARIÁVEL DE INTERESSE.....	42
4.2.2 APLICAÇÃO DO ÍNDICE DE SHANNON PARA A RAMQAr NA RMGV .....	44
<b>5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES .....</b>	<b>48</b>
<b>6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>49</b>

## RESUMO

Neste projeto objetiva-se testar a qualidade da informação gerada por um sistema espacialmente disperso de mensuração de uma variável dependente sujeita a flutuações temporais e espaciais de variáveis independentes com várias frequências superpostas.

A avaliação é feita pela resposta do sistema espacialmente disperso à retirada de um ou mais locais de sensoriamento, sendo verificada a perda de informação associada.

O sistema testado foi a Rede Automática de Monitoramento da Qualidade do Ar da Grande Vitória – RAMQAr.

Com início das atividades em junho de 2000, e contando atualmente com 7 estações de monitoramento ativas e um centro supervisor, a RAMQAr tem o objetivo de medir dados horários 24 horas por dia, sobre a presença e os níveis de contaminantes atmosféricos bem como dados meteorológicos.

No presente trabalho testa-se a diminuição da quantidade de monitores por exclusão da menor parcela possível de informação das estações, tomando-se como base os seguintes poluentes: Partículas Inaláveis ( $PM_{10}$ ) e Óxidos de Nitrogênio ( $NO_x$ ). Para realização da análise citada, utilizou-se uma medida de eficiência de multivariáveis, baseado na informação do Índice de Shannon.

As respostas das medições nas estações foram mapeadas inicialmente quanto à frequência dominante (fluxo veicular e fontes industriais) pelo uso de modelagem matemática da dispersão de emissões. Foi utilizada a ferramenta de modelagem AERMOD.

## 1 INTRODUÇÃO

A mensuração de variáveis com gradientes espaciais e temporais por sistemas automatizados e dispersos é uma técnica avançada que depende do projeto inicial e de atualizações à vista da qualidade da informação que está sendo obtida.

O mensurando nesses casos é, geralmente, função de variáveis independentes com flutuações temporais e direcionais com várias frequências superpostas.

O projeto de sistemas de detecção das variações do mensurando é feito por exercícios de modelagem, obviamente não capazes de reproduzir a natureza do sinal a ser avaliado, o que implica uma distribuição inicial dos sensores sob uma ou mais abordagens, normalmente dependentes de uma desejada representatividade espacial e temporal, da possibilidade de reconstrução do campo onde não há medições e da qualidade da informação.

A qualidade da informação deve ser testada por avaliação da resposta do sistema espacialmente disperso à retirada de um ou mais locais de sensoriamento. A representatividade espacial e temporal pode ser avaliada por técnicas convencionais de análise de variância e de famílias de funções densidade de probabilidades geradas.

No caso dos dados da RAMQAr da Grande Vitória, projeto escolhido para teste das alterações na qualidade de informações, foram utilizadas técnicas estatísticas descritivas e cálculos de índices de informação de Shannon, não sendo avaliadas a representatividade espacial e a cobertura populacional, aspectos que, pela sua abrangência e dificuldade devem ser objetos de outros trabalhos.

O projeto de uma nova rede de monitoramento de poluentes atmosféricos ou um possível incremento de uma rede de monitoramento já existente, tem chamado a atenção de diferentes pesquisadores no mundo inteiro. Uma aproximação da idéia citada acima foi seguida por Zimmerman e Horner (1991), Cressie (1990) e Mardia e Goodall (1990). Seguindo uma perspectiva diferente, baseado no índice de informação de Shannon, foram iniciados diversos estudos e os primeiros resultados foram apresentados por Caselton e Zidek (1984), Sampson e Guttorp (1992) e Guttorp et al. (1993) e mais tarde foi estendido para o contexto de multivariáveis por Pérez-Abreu e Rodríguez (1996). Esses resultados foram aplicados através de uma campanha de

monitoramento de dados de qualidade do ar de 15 dias para 04 poluentes na cidade do México em março de 1992. Recentemente a eficiência das redes de monitoramento de qualidade do ar de Helsinski e Brisbane foram estudadas por Karppinen et al. (2000) e por Morawska et al. (2002), respectivamente.

A Região Metropolitana da Grande Vitória (RMGV) abrange uma área de 1.461 km<sup>2</sup> e é um dos principais pólos de desenvolvimento urbano e industrial do estado, comportando uma população de aproximadamente 1.237.244 habitantes (43 % da população do estado). Cerca de 55 a 65 % das atividades industriais potencialmente poluidoras do Espírito Santo estão instaladas na RMGV, tais como: Siderurgia, Pelotização, Mineração (Pedreiras), Cimenteiras, Indústria Alimentícia, Usina de Asfalto e outras.

A poluição veicular na região, tal como ocorre em grandes cidades, é um problema que está afetando cada vez mais a qualidade do ar dos grandes centros urbanos. As emissões veiculares desempenham hoje um papel de destaque no nível de poluição do ar na RMGV, uma vez que as emissões industriais, principalmente de material particulado, já se encontram em avançado estágio de controle. A Figura 1 apresenta a evolução da frota de veículos na RMGV.

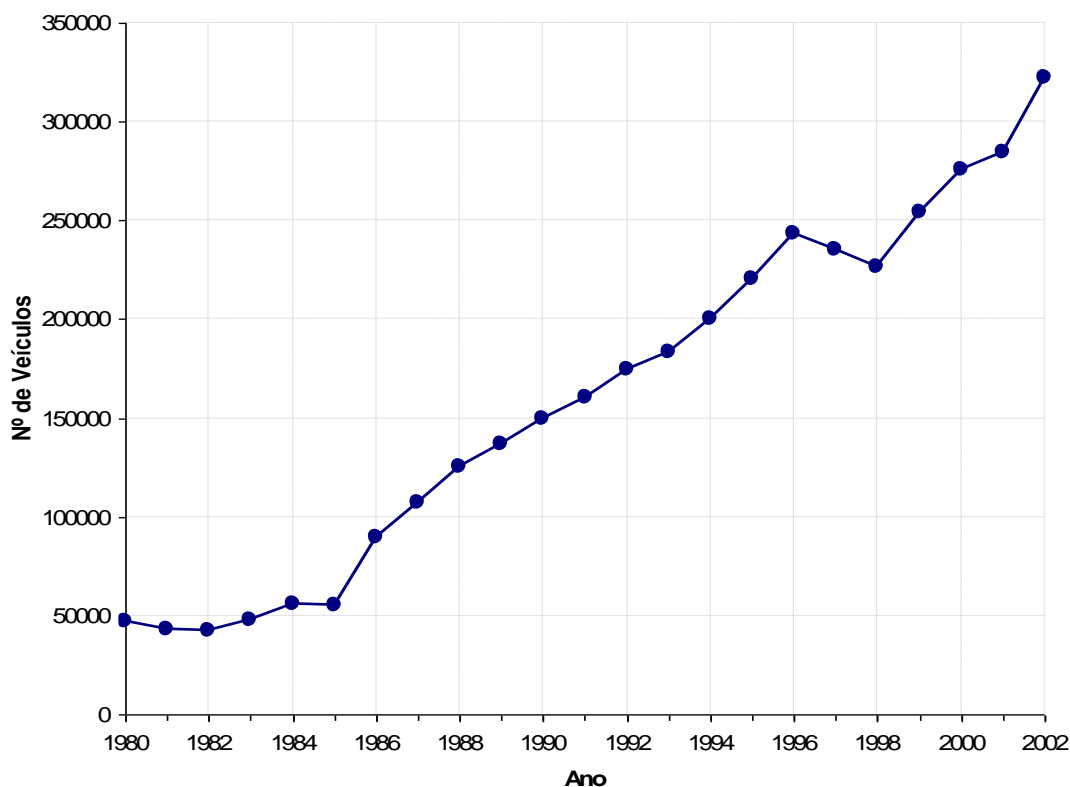


Figura 1 – Evolução da frota veicular na Região Metropolitana da Grande Vitória (RMGV)

Fonte: DETARN/ES

O relevo da região é caracterizado por cadeias montanhosas na porção Noroeste (Mestre Álvaro), oeste (Região Serrana) e planícies (Aeroporto e manguezais) e planaltos (Planalto de Serrano) na porção norte da Região. A porção sul é mais caracterizada por planícies (Barra do Jucu). Todas porções são intercaladas por maciços rochosos de pequeno e médio porte. As condições de relevo no geral são favoráveis em grande parte na região à circulação de ventos para dispersão de poluentes.

A RMGV possui, quanto ao comportamento térmico e de umidade (Edmon Nimer, 1989), clima tropical quente e úmido com subseção no mês de agosto. Este tipo climático se caracteriza pelo inverno ameno, onde a sensação de frio somente se verifica em forma de frentes frias esporádicas por ocasião das invasões do anticiclone polar, e pelo verão climático sempre quente e muito longo (aproximadamente de outubro a abril), com máxima normalmente em dezembro ou janeiro.

A poluição do ar é um dos principais problemas que afetam a qualidade ambiental em diversos centros urbanos espalhados no mundo. A RMGV está inserida nesse contexto e vem empenhando esforços para a criação de métodos de avaliação e dispositivos de fiscalização e controle das emissões atmosféricas.

Como resultado desses esforços, a antiga Secretaria de Estado para Assuntos do Meio Ambiente – SEAMA, em parceria com a Companhia Siderúrgica de Tubarão – CST e a Companhia Vale do Rio Doce – CVRD, colocou em funcionamento a Rede Automática de Monitoramento da Qualidade do Ar da Grande Vitória – RAMQAr que pode ser visualizada através da Figura 2.



Figura 2 – Rede Automática de Monitoramento da Qualidade do Ar da RMGV

Fonte: SEAMA, 2000.

As estações de qualidade do ar da RAMQAr estão classificadas conforme denominação abaixo.

- RAMQAr 1 – Estação Laranjeiras;
- RAMQAr 2 – Estação Carapina;
- RAMQAr 3 – Estação Jardim Camburi;
- RAMQAr 4 – Estação Enseada do Suá;
- RAMQAr 6 – Estação Vila Velha – Ibes;
- RAMQAr 7 – Estação Vila Velha – Centro;
- RAMQAr 8 – Estação Cariacica.

Com início das atividades em maio de 2000, e contando atualmente com 7 estações de monitoramento ativas e um centro supervisorio, a RAMQAr tem o objetivo de medir os seguintes poluentes: Partículas Totais em Suspensão (PTS), Partículas Inaláveis ( $PM_{10}$ ), Dióxido de Enxofre ( $SO_2$ ), Óxidos de Nitrogênio ( $NO_x$ ), Monóxido de Carbono (CO), Hidrocarbonetos (HC) e Ozônio ( $O_3$ ), gerados pelas mais diversas fontes. Além disso, são medidos os seguintes parâmetros meteorológicos: direção do vento, velocidade do vento, umidade relativa do ar, precipitação pluviométrica, pressão barométrica e temperatura do ar.

As estações de monitoramento da RAMQAr que medem os poluentes  $PM_{10}$  e  $NO_x$  são detalhados a seguir.

- Estação Laranjeiras -  $PM_{10}$  e  $NO_x$ ;
- Estação Carapina -  $PM_{10}$ ;
- Estação Jardim Camburi -  $PM_{10}$  e  $NO_x$ ;
- Estação Enseada do Suá -  $PM_{10}$  e  $NO_x$ ;
- Estação Vila Velha – Ibes -  $PM_{10}$  e  $NO_x$ ;
- Estação Vila Velha – Centro -  $PM_{10}$ ;
- Estação Cariacica -  $PM_{10}$  e  $NO_x$ .

Uma rede de monitoramento da qualidade do ar é uma ferramenta útil e eficaz, utilizada para tomada de decisões e elaboração de estratégias quanto à qualidade ambiental e saúde da população, quando se tratam de problemas relacionados à

poluição atmosférica. Sendo assim, a manutenção de uma rede preparada para a geração de dados consistentes e confiáveis é uma tarefa de extrema importância (SILVA e QUIROZ, 2003).

Devido a fatores diversos, entre eles limitações orçamentárias, a implementação de ampliações em uma rede de monitoramento da qualidade do ar, como consequência do rápido crescimento físico dos centros urbanos, do aumento populacional e veículos automotores em circulação, acaba por não se tratar de uma tarefa de fácil execução.

Na verdade para elaboração de projetos que visem ampliações da malha de cobertura de uma rede de monitoramento da qualidade do ar, é necessária a consideração da influência de múltiplos fatores. Nesse sentido, a avaliação estatística de modificações em uma rede existente, com vistas à sua otimização, é uma alternativa de baixo custo que deve ser considerada (SILVA e QUIROZ, 2003).

No presente trabalho, o principal propósito é estudar a possibilidade de exclusão de parâmetros de qualidade do ar das estações da RAMQAr, obtendo o mínimo possível de perda de informação de cobertura da rede das outras estações de qualidade do ar que ficaram remanescentes.

Utilizou-se para o presente trabalho dados de médias diárias para os poluentes Partículas Inaláveis ( $PM_{10}$ ) e Óxidos de Nitrogênio ( $NO_x$ ) para o período de janeiro de 2001 até Novembro de 2003.

As fontes emissoras de poluentes atmosféricos da Região Metropolitana da Grande Vitória podem ser classificadas em dois grandes grupos de fontes: *fontes industriais e fontes veiculares*. Cada estação da RAMQAr foi classificada como sendo uma estação do tipo industrial, veicular ou até mesmo industrial e veicular. Entende-se que uma estação é do tipo industrial ou veicular, quando na maior parte do tempo ela mede dados de qualidade do ar oriundo de processos industriais ou veículos automotores respectivamente.

Para classificação das estações utilizou-se o modelo matemático denominado AERMOD, para a modelagem matemática dos poluentes  $PM_{10}$  e  $NO_x$ . O AERMOD, desenvolvido pela U.S. Environmental Protection Agency – EPA, é um conjunto de formulações matemáticas preparadas para a realização de simulações de dispersão dos



poluentes na atmosfera, sendo o mesmo o substituto natural do ISC3 – modelo utilizado internacionalmente e desenvolvido por essa mesma instituição (U.S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY, 1998).

Para a realização da modelagem matemática necessita-se de informações de entrada de fontes emissoras de poluentes atmosféricos, dados meteorológicos, dentre outros. Foram realizadas duas modelagens matemáticas no presente trabalho, onde uma considerou a utilização do inventário já finalizado das principais fontes emissoras de poluentes atmosféricos para as principais indústrias da RMGV, e na outra modelagem considerou-se as principais vias de tráfego da RMGV para o ano de 2003. Após análise dos resultados obtidos da modelagem matemática, procedeu-se à classificação das estações de qualidade do ar da RMGV como sendo estações de influência industrial, tráfego ou até mesmo como sendo industrial e de tráfego.

Procedeu-se em seguida, à utilização dos dados de monitoramento de qualidade do ar da RAMQAr para geração de análises de estatística descritiva e análises da direção do vento predominante na RMGV.

No capítulo 4 apresenta-se a técnica para o cálculo do índice de Shannon utilizada no presente trabalho, como critério de avaliação adotado para otimização da Rede de Monitoramento da Qualidade do Ar da RMGV, seguida de diversas análises e gráficos de correlação entre os parâmetros estudados e as diversas estações de qualidade do ar avaliadas. Por fim, no capítulo 5 apresentam-se as principais conclusões e recomendações do presente trabalho.

## **2 DESCRIÇÃO DO MODELO MATEMÁTICO DE SIMULAÇÃO DE DISPERSÃO – AERMOD**

### **2.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS**

Dentre vários estudos e aplicações, com relação à qualidade do ar, um dos temas mais abordados se refere à dispersão dos poluentes na Camada Limite Planetária (CLP) – a camada de ar localizada próxima a superfície da Terra, onde prevalece o regime turbulento controlado pelas alterações térmicas e movimentos de fricção ocorridos na superfície terrestre.

Desde a década de 70 vários estudiosos vêm aplicando seus esforços para o desenvolvimento de aplicações que viessem a conhecer cada vez mais o fenômeno da dispersão dos poluentes na atmosfera.

Dessa forma, ao longo desses anos foram desenvolvidos diversos tipos de modelos computacionais para a realização desses trabalhos.

Nesse sentido, a American Meteorological Society (AMS) e a U.S. Environmental Protection Agency (EPA) iniciaram um trabalho conjunto com o intuito de desenvolver um novo modelo que atendesse as expectativas da comunidade científica e dos usuários em geral.

O novo modelo – o ARMIC Model, AERMOD – desenvolvido, trabalha com dispersão de curto alcance visando às fontes industriais estacionárias, o mesmo cenário assegurado atualmente pelo modelo denominado Industrial Source Complex (ISC), sendo a última versão o ISC3.

Com exceção das aplicações referentes à deposição seca e úmida, o AERMOD funciona como o substituto natural do ISC3, sendo, portanto aplicável a áreas urbanas ou rurais, terrenos planos ou com variações topográficas, emissões a baixos ou elevados níveis de altitude, contando com a capacidade de trabalhar com diferentes tipos de fontes (pontuais, área ou volumétricas).

O AERMOD consiste em dois pré-processadores no modelo da dispersão. O pré-processador meteorológico – AERMET – fornece ao AERMOD a informação meteorológica necessária para a caracterização da CLP. O pré-processador de terreno –

AERMAP –caracteriza o terreno e gera grades e elevações do receptor para o modelo de dispersão.

AERMOD é um modelo que considera a pluma em seu estado estacionário. Na Camada Limite Estacionária (CLE), a distribuição da concentração é suposta ser gaussiana na vertical e horizontal. Na Camada Limite Convectiva (CLC), a distribuição horizontal é suposta ser gaussiana, mas a distribuição vertical é descrita com uma função bi-Gaussiana da probabilidade de densidade. O AERMOD considera também toda a massa da pluma que penetrar na camada estável mais elevada, e permite então uma nova entrada na camada limite quando necessário e apropriado.

AERMOD incorpora, com uma aproximação simples e nova, conceitos atuais sobre o fluxo e dispersão em terrenos complexos. Onde apropriado, a pluma é modelada tanto impactando como seguindo o terreno. Esta aproximação foi projetada para ser fisicamente realística e de simples execução, ao evitar a necessidade de distinguir entre o terreno simples, intermediário e complexo, como é requerido pelos modelos atuais.

Uma das melhorias principais que o AERMOD traz é sua habilidade de caracterizar a CLP com a superfície e estratificações das camadas misturadas. O AERMOD constrói perfis verticais das variáveis meteorológicas requeridas, baseadas em medidas e em extrapolações daquelas medidas usando relacionamentos de similaridade (scaling). Os perfis verticais da velocidade de vento, do sentido do vento, da turbulência, da temperatura, e do gradiente de temperatura são estimados usando todas as observações meteorológicas disponíveis.

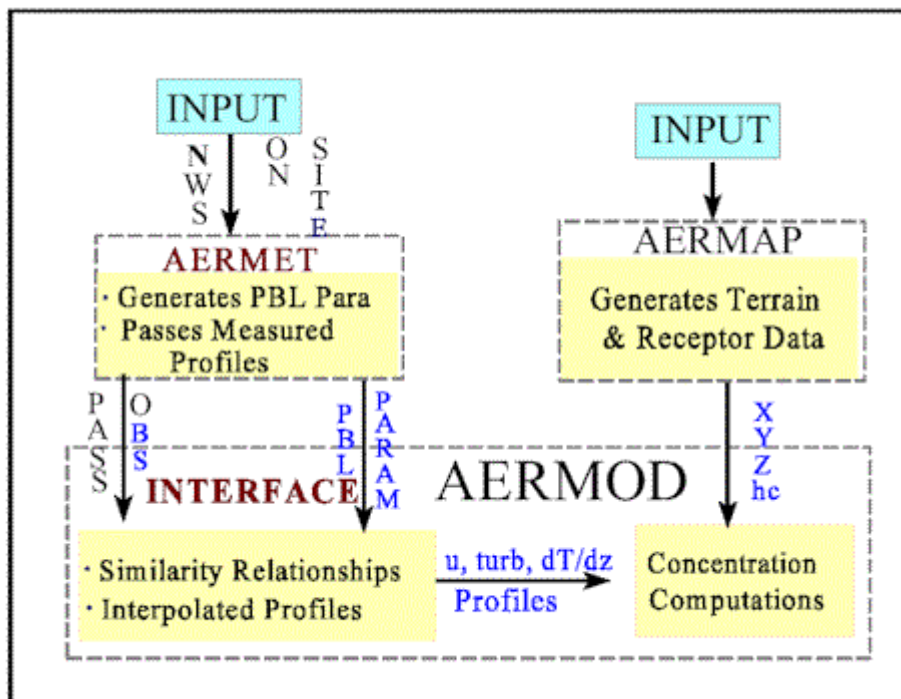


Figura 3 - Fluxo de dados no AERMOD.

A Figura 3 mostra o fluxo e o processamento da informação no AERMOD. O sistema em um programa principal (AERMOD) e em dois pré-processadores (AERMET e AERMAP). A finalidade principal do AERMET é calcular os parâmetros da camada limite para o uso do AERMOD. A interface meteorológica, interna ao AERMOD, usa estes parâmetros para gerar perfis das variáveis meteorológicas necessárias. Além disso, o AERMET encaminha todas as observações meteorológicas ao AERMOD.

As características de superfície, rugosidade da superfície e a relação de Bowen, mais observações meteorológicas padrões (velocidade do vento, direção do vento, temperatura, e cobertura de nuvens), são inseridas no AERMET. O AERMET calcula então os parâmetros da CLP: velocidade de fricção ( $u^*$ ), comprimento de Monin-Obukhov ( $L$ ), velocidade da escala convectiva ( $w^*$ ), variação de temperatura ( $\theta^*$ ) altura de mistura ( $z_i$ ), e o fluxo de calor ( $H$ ). Estes parâmetros são então encaminhados à interface (que está dentro do AERMOD) onde as expressões de similaridade (conjuntamente com medições) são usadas para calcular os perfis verticais da velocidade do vento ( $u$ ), as flutuações laterais e verticais da Turbulência

( $\sigma_v$ ,  $\sigma_w$ ), o gradiente potencial da temperatura ( $d\theta/dz$ ), potencial de temperatura ( $\theta$ ) e a escala de tempo horizontal lagrangiana ( $T_{Ly}$ ).

O pré-processador AERMAP usa dados do terreno para calcular uma altura representativa de influência do terreno ( $h_c$ ), também denominada altura do terreno, que é definida excepcionalmente para cada posição do receptor. Para cada receptor, o AERMAP passa a seguinte informação ao AERMOD: a posição dos receptores ( $x_r$ ,  $y_r$ ), sua altura média acima do nível de mar ( $z_r$ ), e a escala específica da altura do terreno onde se localiza o receptor ( $h_c$ ).

A concentração, estimada pelo AERMOD, de acordo com a complexidade do terreno é dada pela equação 2.1:

$$C_T \{x_y, y_y, z_y\} = f \times C_{C,S} \{x_y, y_y, z_r\} + (1-f) \times C_{C,S} \{x_y, y_y, z_p\} \quad (2.1)$$

Onde:

$C_T \{x_y, y_y, z_y\}$  = Concentração total;

$C_{C,S} \{x_y, y_y, z_r\}$  = Concentração da pluma horizontal;

$C_{C,S} \{x_y, y_y, z_p\}$  = Concentração da pluma próxima ao terreno;

$f$  = Função de peso do estado da pluma;

$z_p$  = Altura do ponto receptor.

A formulação geral das expressões para a concentração em cada termo da equação 2.1, para CLC e o CLE podem ser escritas pela equação 2.2.

$$C\{x, y, z\} = (Q/u) \times p_y\{y, x\} \times p_z\{z, x\}, \quad (2.2)$$

Onde  $Q$  é a taxa da emissão da fonte,  $u$  é a velocidade efetiva do vento, e  $p_y$  e  $p_z$  são as funções da densidade da probabilidade  $y$  e  $z$  (p.d.f.), as quais descrevem as distribuições laterais e verticais da concentração, respectivamente. O AERMOD supõe um p.d.f. gaussiano tradicional para as distribuições laterais e verticais na CLE e para a distribuição lateral na CLC. A distribuição vertical da pluma na CLC reflete a natureza distintamente não-Gaussiana da distribuição vertical da velocidade nas camadas convectivas misturadas.

O AERMOD simula cinco tipos diferentes de pluma dependendo da estabilidade atmosférica e da posição acima da camada limite:

- direta,
- indireta,
- inserida,
- introduzida
- estável.

Durante condições estáveis, as plumas são modeladas com formulações gaussianas tradicionais. Durante condições convectivas ( $L < 0$ ) a distribuição horizontal é ainda gaussiana; a distribuição da concentração na vertical resulta de uma combinação de três tipos de pluma: 1) o material da pluma dentro da camada misturada que inicialmente não interage com o topo da camada; 2) o material indireto da pluma dentro da camada misturada que se levanta acima e tende inicialmente ao fundo perto do topo misturado da camada; e 3) o material penetrado da pluma que é liberado na camada misturada, mas devido a seu empuxo, penetra na camada estável mais elevada.

Durante condições convectivas, o AERMOD assegura também um caso especial onde uma fonte de pluma introduzida na qual o topo da chaminé (ou a altura da liberação) seja maior do que a altura de mistura. As fontes de plumas introduzidas são modeladas como plumas em circunstâncias estáveis, porém a influência da turbulência e os ventos dentro da camada de mistura estão considerados nos cálculos da não-homogeneidade enquanto a pluma passa através da camada de mistura aos receptores de alcance.

## **2.2 PRINCIPAIS RESULTADOS DA MODELAGEM DA DISPERSÃO**

No presente trabalho utilizou-se o AERMOD para realização da modelagem matemática da dispersão dos poluentes  $PM_{10}$  e  $NO_x$ .

Os dados meteorológicos inseridos no processador meteorológico AERMET foram obtidos das estações meteorológicas da RAMQAr Carapina e Enseada do Suá, e os dados de emissão de poluentes ( $PM_{10}$  e  $NO_x$ ) foram obtidos a partir do inventário já finalizado pelo LABNATA-UFES (Relatório interno 2004) das principais indústrias e vias de tráfego localizadas na Região Metropolitana da Grande Vitória para o ano de 2003. Ressalta-se que o objetivo inicial, depois do resultado da modelagem matemática para os poluentes  $PM_{10}$  e  $NO_x$ , é classificar todas as estações da RAMQAr em estações de influência industrial, veicular ou industrial/veicular.

Inicialmente procedeu-se à modelagem matemática para os poluentes  $PM_{10}$  e  $NO_x$ , para as condições de influência apenas industrial e em seguida apenas veicular, ou seja, foram realizadas 4 modelagens matemáticas conforme segue abaixo.

- Modelagem para  $PM_{10}$  – Industrial;
- Modelagem para  $PM_{10}$  – Veicular;
- Modelagem para  $NO_x$  – Industrial;
- Modelagem para  $NO_x$  – Veicular.

Em seguida dividiu-se as concentrações médias anuais de origem industrial pelas concentrações médias anuais de origem veicular para os poluentes  $PM_{10}$  e  $NO_x$ .

As estações monitoradoras de  $PM_{10}$  e  $NO_x$  da RAMQAr da RMGV podem ser classificadas com respeito às influências industriais e veiculares de acordo com as Figuras 4 e 5.

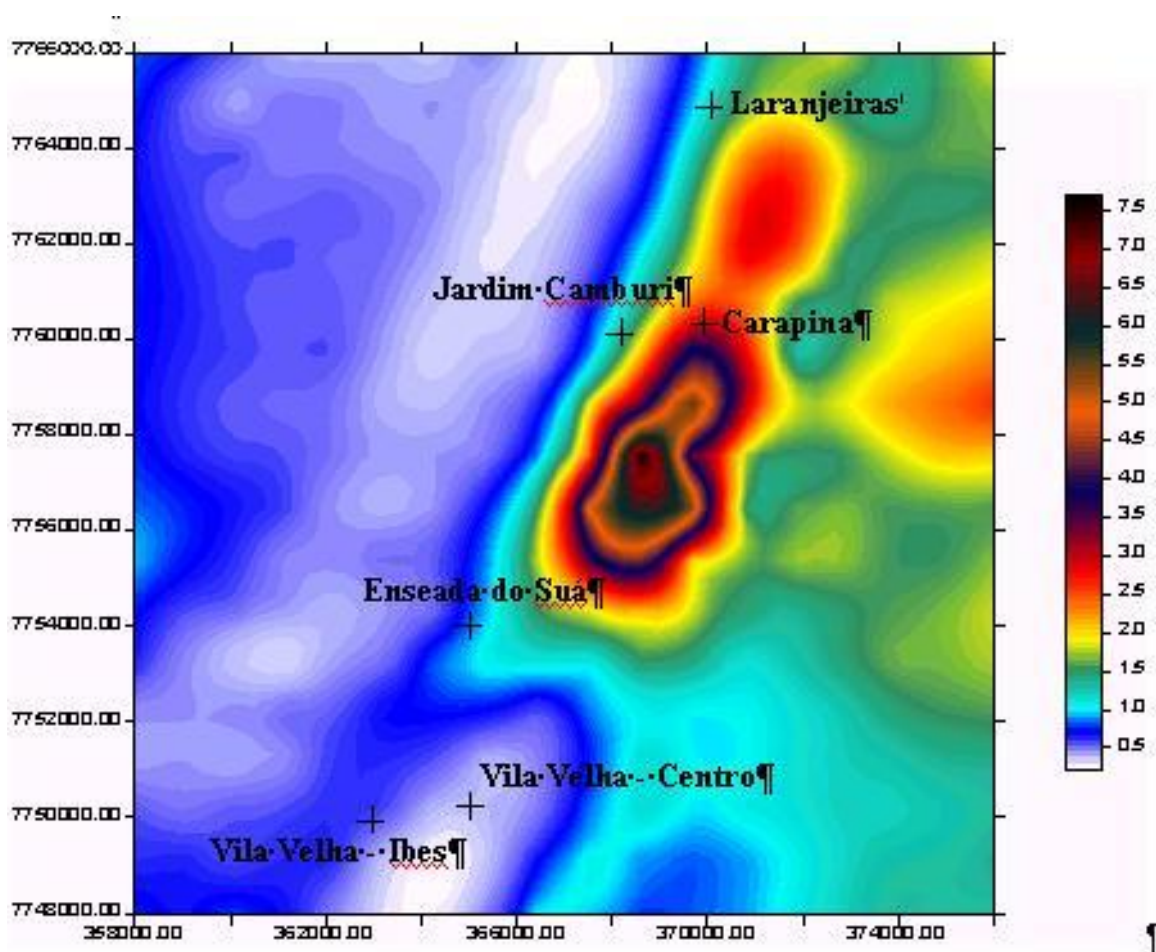


Figura 4 – Divisão das concentrações de origem industrial pelas concentrações de origem veicular para  $PM_{10}$

- Estações Vila Velha - Centro, IBES e Cariacica - Predominância Veicular;
- Estação Enseada – Predominância Industrial / Veicular (Transição baixa);
- Estações Jardim Camburi e Laranjeiras – Predominância Industrial / Veicular (Transição alta);
- Estação Carapina – Predominância Industrial.

Ressalta-se que a estação de Cariacica não aparece na Figura 4, porém conclui-se pela própria Figura que ela é uma estação de influência veicular.



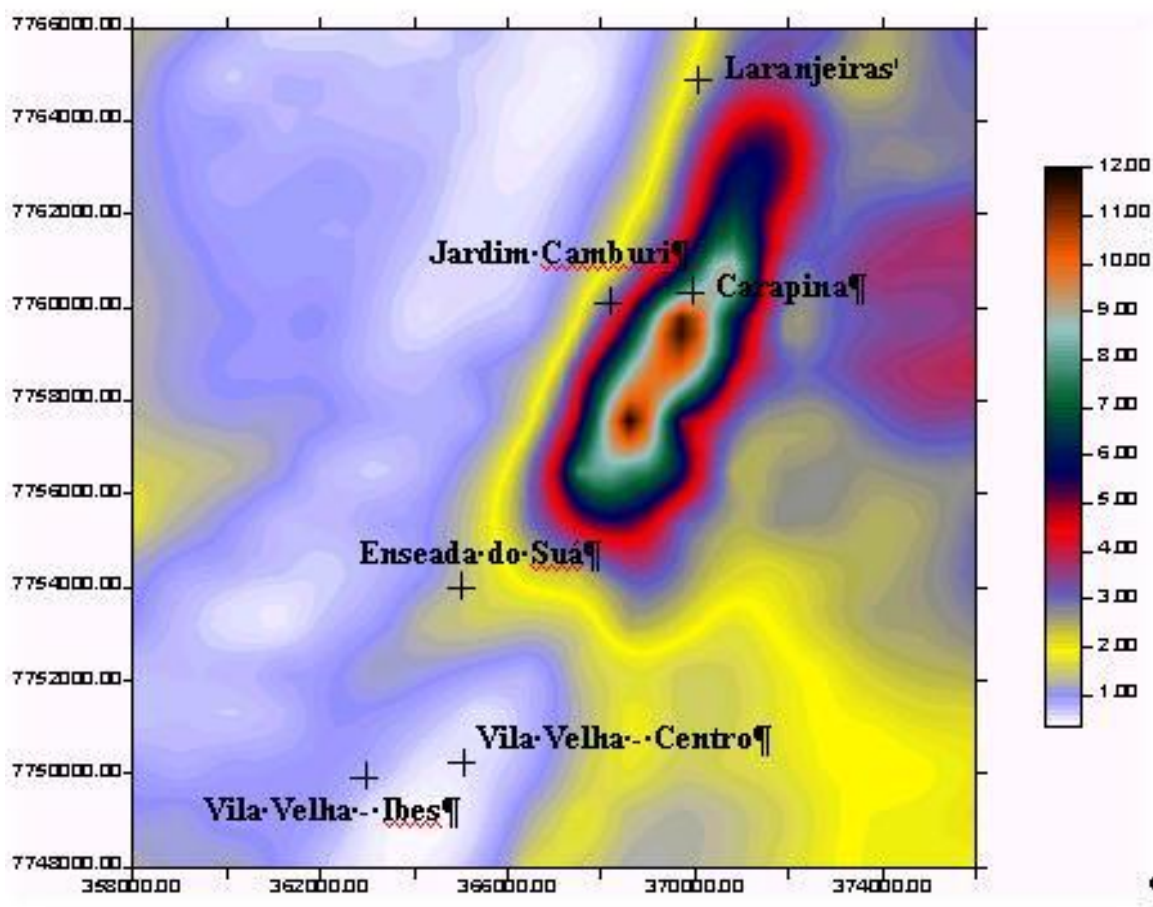


Figura 5 – Divisão das concentrações de origem industrial pelas concentrações de origem veicular para NO<sub>x</sub>

- Estações Vila Velha-Centro, IBES e Cariacica - Predominância Veicular;
- Estações Jardim Camburi, Enseada e Laranjeiras – Predominância Industrial / Veicular (Transição alta);
- Estação Carapina – Predominância Industrial.

Ressalta-se que a estação de Cariacica não aparece na Figura 5, porém conclui-se pela própria figura que ela é uma estação de influência veicular.

### 3 PRINCIPAIS RESULTADOS DO MONITORAMENTO

No presente trabalho utilizou-se dados de monitoramento da qualidade do ar para o período de janeiro de 2001 a novembro de 2003 para os poluentes  $PM_{10}$  e  $NO_x$  para todas as sete estações de monitoramento da RAMQAr. Ressalta-se que as análises estatísticas foram geradas a partir de dados horários.

Nas Tabela 1 e 2, apresentam-se os principais resultados da análise de estatística descritiva para cada uma das sete estações da RAMQAr para os poluentes  $PM_{10}$  e  $NO_x$  respectivamente.

Tabela 1 - Resumo estatístico das concentrações de  $PM_{10}$  ( $\mu g/m^3$ ) nas estações da RAMQAr.

Análise	RAMQAr 1	RAMQAr 2	RAMQAr 3	RAMQAr 4	RAMQAr 6	RAMQAr 7	RAMQAr 8
Média Aritmética	28,8	23,2	26,4	27,6	24,4	23,7	39,8
IC	0,3	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,4
Desvio Padrão	19,1	14,4	15,6	20,0	17,2	15,9	27,6
Mínimo Ocorrido	0,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Máximo Ocorrido	401,8	395,9	356,2	263,4	289,4	200,2	360,8
Número de Medições	24607	23930	24988	24881	25095	24053	24276

Tabela 2 - Resumo estatístico das concentrações de  $NO_x$  ( $\mu g/m^3$ ) nas estações da RAMQAr

Análise	RAMQAr 1	RAMQAr 2	RAMQAr 3	RAMQAr 4	RAMQAr 6	RAMQAr 7	RAMQAr 8
Média Aritmética	31,9	X	45,6	49,6	29,7	X	47,9
IC	0,3	X	0,4	0,5	0,3	X	0,5
Desvio Padrão	21,4	X	31,5	38,1	25,9	X	43,5
Mínimo Ocorrido	2,2	X	0,0	0,0	0,0	X	0,0
Máximo Ocorrido	245,0	X	311,2	274,5	331,4	X	551,7
Número de Medições	25131	X	23364	24555	24347	X	24276

Nas Tabelas 1 e 2 acima, entende-se por intervalo de confiança o intervalo em um dos lados de uma média, calculada a partir do desvio padrão e do tamanho da população, com um nível de significância de 95%. Assim, a média aritmética das

medições de  $PM_{10}$  da RAMQAr 1 varia entre 28,5 e 29,1  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . Número de medições são todos os dados de monitoramento válidos durante o período de janeiro de 2001 a novembro de 2003.

Observa-se que os dados de  $PM_{10}$  mostrados na Tabela 1 apresentam concentrações médias variando entre 23 e 29  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , exceto para a RAMQAr 8 (Cariacica) que apresenta concentração média substancialmente superior a todas as outras (39,8  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ). Isso se deve ao fato da estação de Cariacica ser influenciada por intenso fluxo de veículos pesados a diesel. Além disso, como já concluído no capítulo 2, a estação de Cariacica é uma estação predominantemente de influência veicular.

Observa-se que os dados de  $NO_x$  mostrados na Tabela 2 apresentam concentrações médias variando entre 29 e 48  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . As estações que tiveram maiores concentrações médias foram as estações de Jardim Camburi, Enseada do Suá e Cariacica.. As estações de Jardim Camburi e Enseada obtiveram altas concentrações médias devido principalmente fato do intenso fluxo de veículos leves ao redor da região e pelas fontes industriais localizadas em setores onde ocorrem direções do vento predominantes.

As observações citadas acima, também podem ser verificadas através de uma análise de percentil para os poluentes  $PM_{10}$  e  $NO_x$  conforme Tabela 3 e 4 respectivamente. Utilizou-se para esta análise percentuais de 5, 10, 25, 50, 75, 90 e 95 %.

Tabela 3 - Análise de Percentil para as concentrações de  $PM_{10}$  em  $\mu\text{g}/\text{m}^3$

Percentil (%)	RAMQAr 1	RAMQAr 2	RAMQAr 3	RAMQAr 4	RAMQAr 6	RAMQAr 7	RAMQAr 8
5	8,3	7,9	7,7	7,6	6,0	6,4	8,7
10	10,8	9,9	10,0	9,8	8,1	8,5	11,7
25	16,3	14,0	15,7	14,8	13,1	13,2	19,7
50	25,0	20,0	24,0	22,6	20,6	20,0	33,9
75	36,5	28,5	33,5	33,9	30,8	29,6	52,7
90	49,9	39,8	44,4	49,7	44,8	43,3	74,7
95	61,4	48,3	52,7	65,4	56,3	54,0	91,0

Tabela 4 - Análise de Percentil para as concentrações de NO<sub>x</sub> em µg/m<sup>3</sup>.

Percentil (%)	RAMQAr 1	RAMQAr 2	RAMQAr 3	RAMQAr 4	RAMQAr 6	RAMQAr 7	RAMQAr 8
5	8,4	X	10,4	6,5	4,7	X	7,3
10	10,9	X	14,0	9,5	7,0	X	9,7
25	17,7	X	22,8	19,2	12,3	X	17,4
50	27,5	X	37,3	40,6	21,8	X	33,5
75	39,5	X	60,1	71,4	38,4	X	66,8
90	56,8	X	88,6	101,2	62,9	X	102,0
95	71,6	X	108,3	122,0	82,5	X	127,8

Analisando os resultados para PM<sub>10</sub> mostrados pela Tabela 3, podemos observar que os maiores resultados de concentração foram obtidos pela RAMQAr 8 (Estação Cariacica). Todas as outras estações de monitoramento mantiveram resultados parecidos. Se pegarmos o percentil de número 50 para a RAMQAr 8, observamos que 50 % das medições (metade) deram resultados de concentração de até 33,9 µg/m<sup>3</sup>. Para a mesma estação, 75 % das vezes as medições de concentração deram valores de até 52,7 µg/m<sup>3</sup>.

Analisando os resultados para NO<sub>x</sub> mostrados pela Tabela 4, podemos observar que os maiores resultados de concentração foram obtidos pelas estações: RAMQAr 3 (Jardim Camburi), RAMQAr 4 (Enseada do Suá) e RAMQAr 8 (Cariacica). As estações RAMQAr 1 (Laranjeiras) e RAMQAr 6 (Vila Velha-Ibes) mantiveram comportamentos bem parecidos. Se pegarmos o percentil de número 50 para a RAMQAr 3, 4 e 8 observamos que 50 % das medições (metade das vezes) deram resultados de concentração de até 37,3, 40,6 e 33,5 µg/m<sup>3</sup> respectivamente. Para as mesmas estações, 75 % das vezes as medições de concentração deram valores de até 60,1, 71,4 e 66,8 µg/m<sup>3</sup> respectivamente.

### 3.1 ANÁLISE DA DIREÇÃO DO VENTO NA RMGV

Uma análise da direção do vento foi realizada para as estações da RAMQAr 2 (Carapina), RAMQAr 4 (Enseada do Suá), RAMQAr 6 (Vila Velha - Ibes) e RAMQAr 8 (Cariacica) para o período de janeiro de 2001 a novembro de 2003. Os resultados das análises da direção do vento para cada uma das estações citadas acima, são apresentadas pelas Figuras 6, 7, 8 e 9.

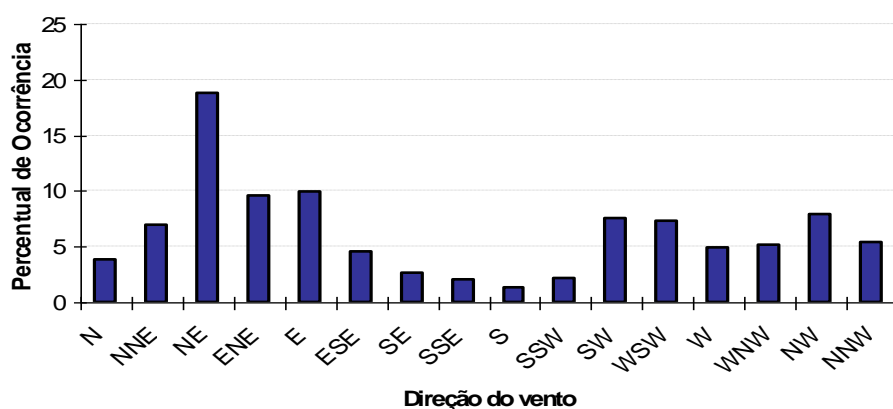


Figura 6 - Análise do percentual de ocorrência da direção do vento para a RAMQAr 2 (Carapina)

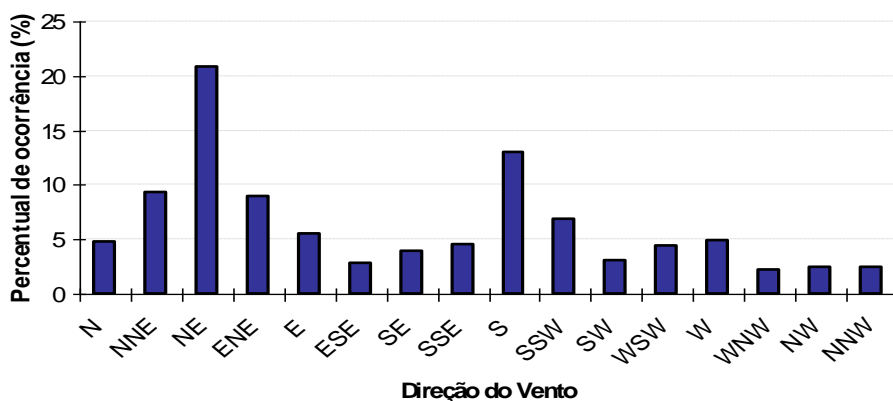


Figura 7 - Análise do percentual de ocorrência da direção do vento para a RAMQAr 4 (Enseada do Suá)

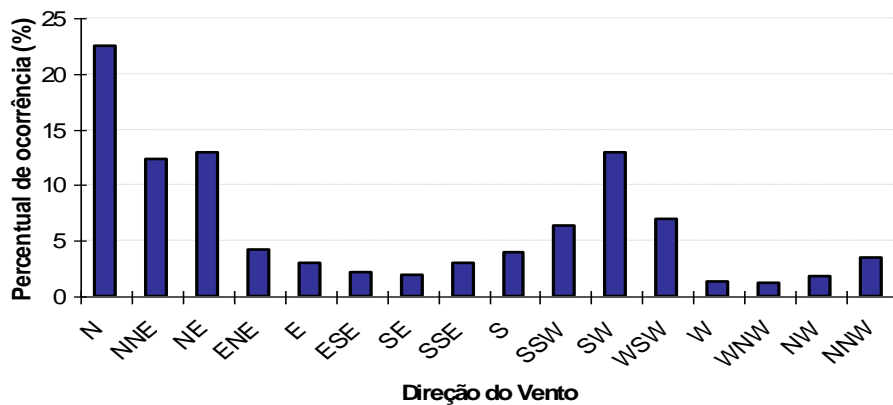


Figura 8 - Análise do percentual de ocorrência da direção do vento para a RAMQAr 6 (Vila Velha-Ibes)

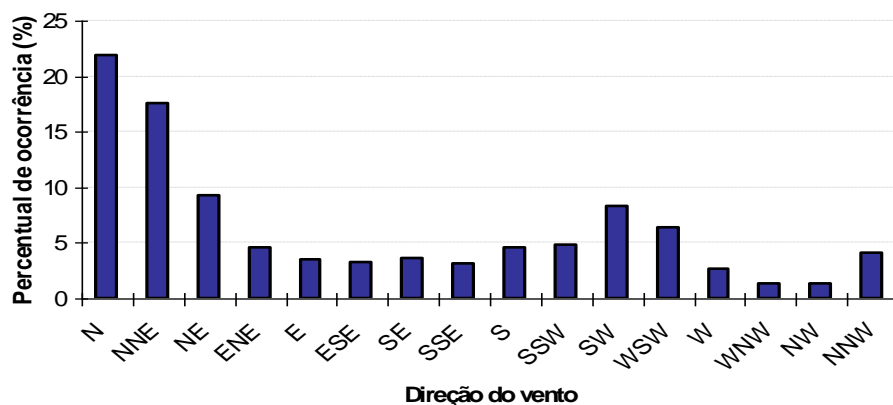


Figura 9 - Análise do percentual de ocorrência da direção do vento para a RAMQAr 8 (Cariacica)

Através das Figuras 6, 7, 8 e 9 conclui-se que a predominância da direção do vento encontra-se entre os quadrantes de N (Norte - 0°) a E (Leste - 90°) e de S (Sul - 180°) a W (Oeste - 270°).



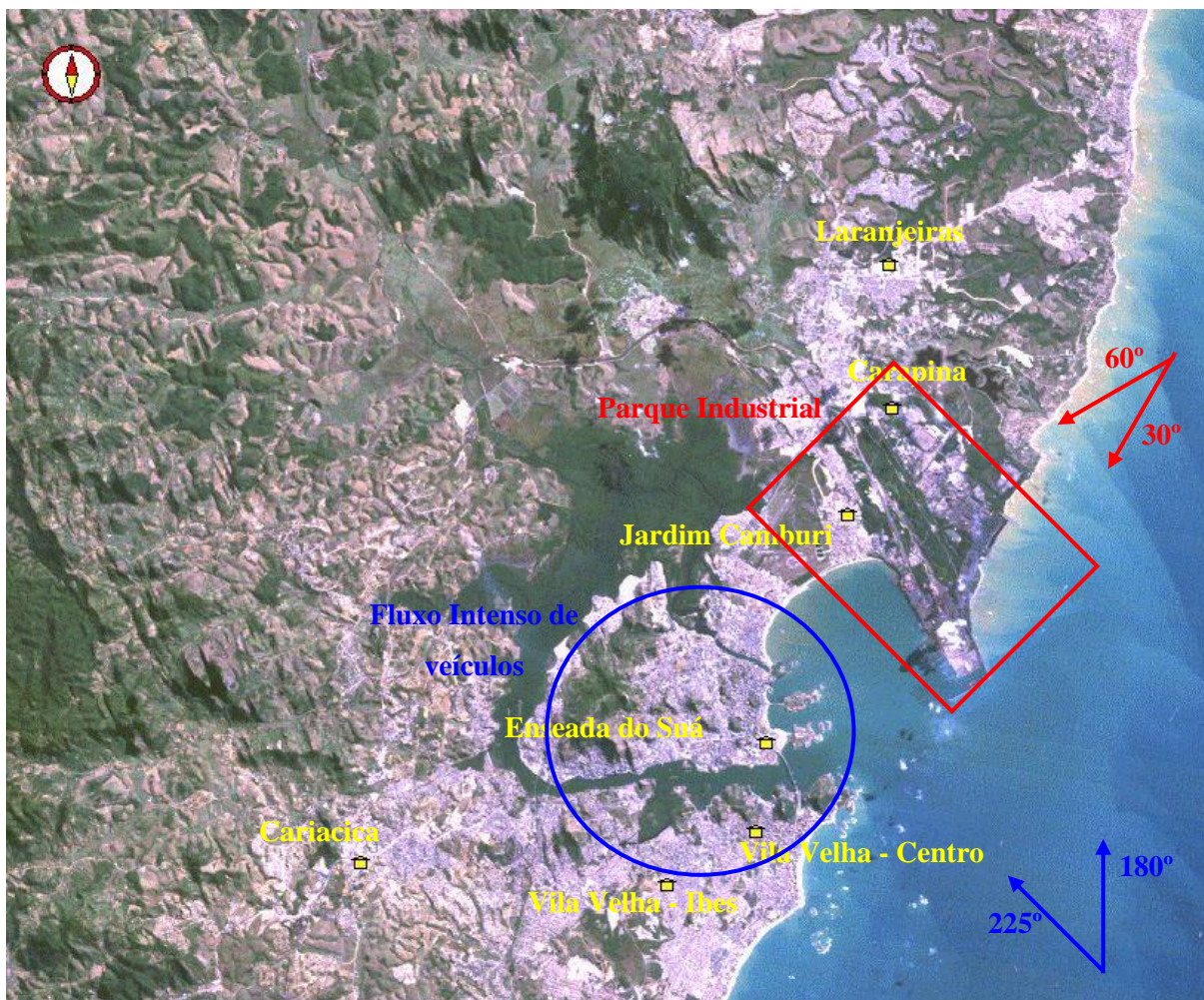


Figura 10 - Esquema da direção do vento predominante na RMGV.

Com o objetivo de encontrar concentrações médias medidas em todas as estações da RAMQAr apenas nessas direções predominantes, procedeu-se em seguida na filtragem dos dados de medições para  $PM_{10}$  e  $NO_x$  apenas quando a direção do vento estivesse medindo num ângulo de  $30^\circ$  a  $60^\circ$  e de  $180^\circ$  a  $225^\circ$ . Ressalta-se que para a filtragem dos dados, utilizou-se a estação RAMQAr 6 (Enseada do Suá) como referência.

Quando a direção do vento estiver entre  $30^\circ$  e  $60^\circ$  (vento que vêm desta direção), ela têm uma característica de trazer predominantemente os poluentes emitidos pelo parque industrial da ponta de tubarão, conforme Figura 10. Quando a direção do vento estiver entre  $180^\circ$  e  $225^\circ$  (vento que vêm desta direção), ela têm uma

característica de trazer predominantemente os poluentes emitidos pelo grande fluxo de veículos, conforme Figura 10.

Após filtragem inicial, o próximo passo era de separar esse dados de monitoramento de PM<sub>10</sub> e NO<sub>x</sub> em dados medidos durante o dia (06:30 às 23:30) e dados medidos durante a noite (00:30 às 05:30). Feito isso, consegue-se enxergar aquilo que é emitido apenas pelas indústrias (período noturno) e aquilo que é emitido pelas indústrias e pelo fluxo de veículos (período diurno), conforme Tabela 5.

Tabela 5 - Sequencial dos dados filtrados de PM<sub>10</sub> e NO<sub>x</sub> para todas as estações da RMQAr.

Condição inicial		Sequência	Influência
Direção do vento	Entre 30° e 60°	A	Industrial
	Entre 180° e 225°	B	Veicular
Período do dia	00:30 às 05:30	X	Industrial
	06:30 às 23:30	Y	Industrial + Veicular

Após filtragem dos dados, as Tabelas 6 e 7 apresentam os principais resultados obtidos para os poluentes PM<sub>10</sub> e NO<sub>x</sub>.

Tabela 6 - Principais resultados obtidos durante a filtragem de dados para as concentrações médias de PM<sub>10</sub> em µg/m<sup>3</sup>

Ssequência	RAMQAr 1	RAMQAr 2	RAMQAr 3	RAMQAr 4	RAMQAr 6	RAMQAr 7	RAMQAr 8
Média A-X	24,9	16,0	16,2	16,5	12,5	15,1	18,2
Média A-Y	37,1	24,1	30,3	36,8	31,7	31,6	40,3
Média B-X	15,9	18,5	14,7	17,7	16,9	17,0	26,2
Média B-Y	25,9	26,6	28,4	28,8	27,4	27,7	48,3
Média do período	28,8	23,2	26,4	27,6	24,4	23,7	39,8



Tabela 7 - Principais resultados obtidos durante a filtragem de dados para as concentrações médias de NO<sub>x</sub> em µg/m<sup>3</sup>

Ssequência	RAMQAr 1	RAMQAr 2	RAMQAr 3	RAMQAr 4	RAMQAr 6	RAMQAr 7	RAMQAr 8
Média A-X	17,4	X	21,5	12,9	12,6	X	20,9
Média A-Y	35,3	X	38,9	50,2	40,5	X	30,5
Média B-X	22,3	X	26,5	24,1	19,1	X	47,5
Média B-Y	37,1	X	73,0	70,2	30,7	X	87,0
Média do período	31,9	X	45,6	49,6	29,7	X	47,9

A seqüência denominada média do período, mostradas nas Tabelas 6 e 7, mostram os resultados calculados para PM<sub>10</sub> e NO<sub>x</sub> respectivamente, durante todo o período de estudo, ou seja, de janeiro de 2001 a novembro de 2003. Nesta média do período não se considerou o filtro realizado para as outras seqüências. As Tabelas 6 e 7 podem ser resumidas em dois gráfico para melhor visualização dos resultados para os poluentes PM<sub>10</sub> e NO<sub>x</sub> conforme Figuras 11 e 12 respectivamente.

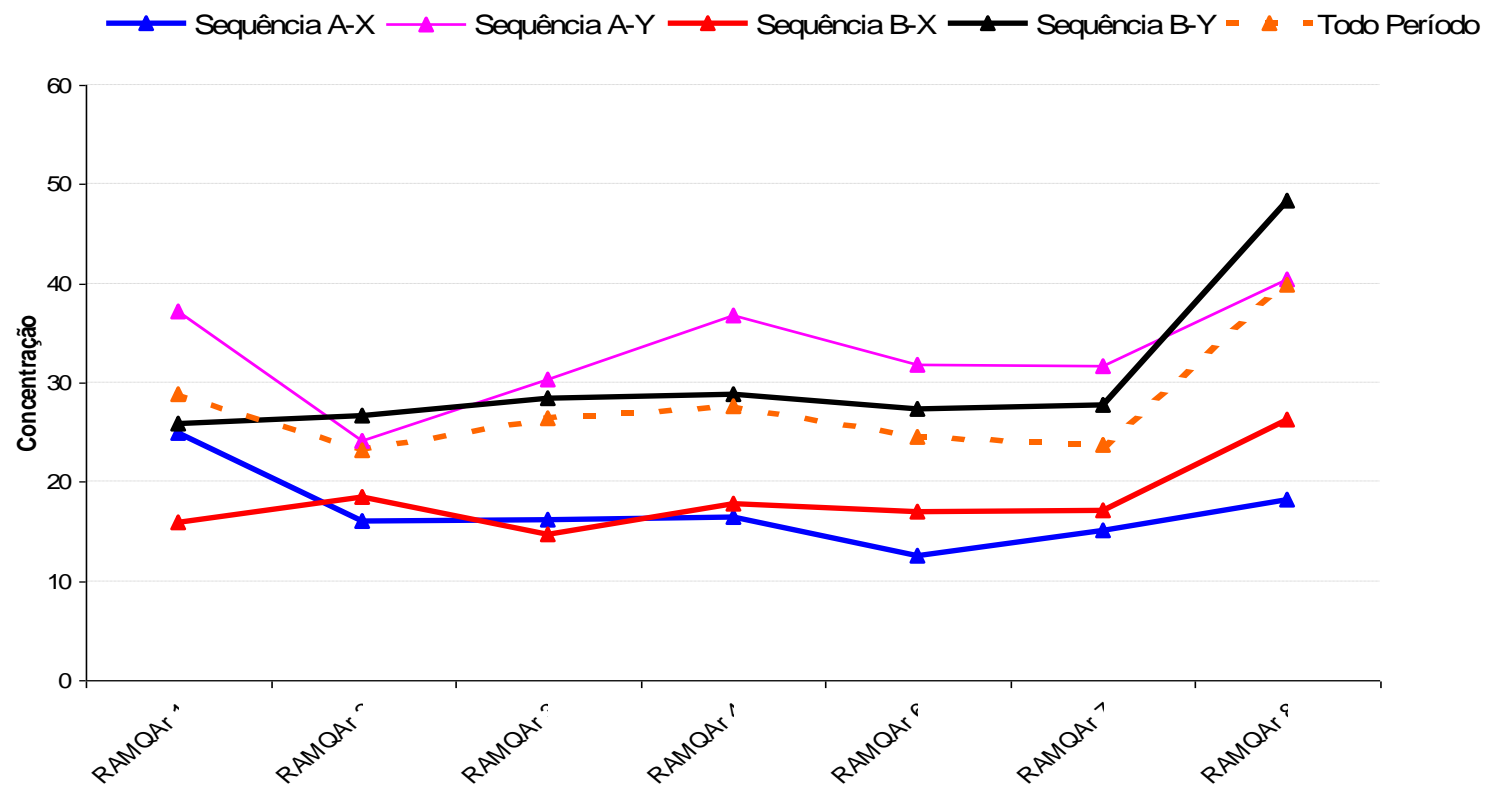


Figura 11 - Principais resultados obtidos durante a filtragem dos dados separados por sequencial para as concentrações médias de  $PM_{10}$  em  $\mu g/m^3$ .

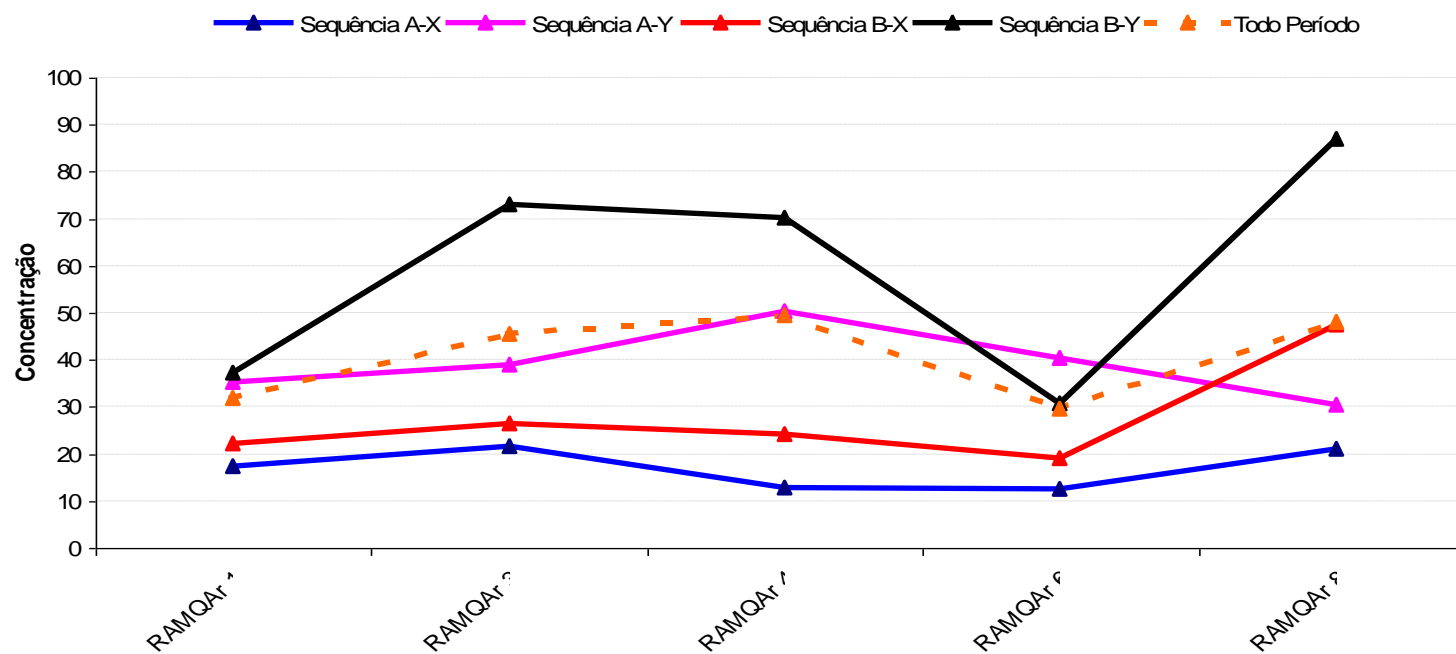


Figura 12 - Principais resultados obtidos durante a filtragem dos dados separados por sequencial para as concentrações médias de NO<sub>x</sub> em µg/m<sup>3</sup>.

É importante ressaltar que o esquema de direções do vento apresentados pela Figura 10 devem ser vistos com ressalvas para a estação RAMQAr 1 (Estação Laranjeiras), visto que ela está localizada ao norte na imagem de satélite. Conclui-se, portanto que a seqüência A mostrada pela Tabela 5 será veicular e conseqüentemente a seqüência B será de influência industrial.

Pelos resultados apresentados na Tabela 6 para  $PM_{10}$ , pode-se elencar as observações abaixo.

- Os resultados de concentração média durante o dia e durante a noite, onde a direção do vento é predominantemente oriunda do setor industrial (seqüências A-Y e A-X) mostraram resultados relativamente maiores para as concentrações diurnas, para todas as estações da RAMQAr. Isso é justificado pela influência maior de outras fontes emissoras de  $PM_{10}$  que são ativas durante o dia e passivas durante a noite.
- Os resultados de concentração média durante o dia e a noite, onde a direção do vento é predominantemente de influência veicular (seqüências B-Y e B-X) mostraram resultados relativamente maiores para as concentrações diurnas, para todas as estações da RAMQAr. Isso é justificado pela influência maior do fluxo de veículos durante o período diurno.
- Os resultados de concentração média durante o dia para as direções do vento predominantemente industrial e veicular (seqüências A-Y e B-Y), mostraram concentrações médias de influência industrial bem próximas das concentrações médias de influência veicular para as estações de Carapina, Jardim Camburi, Vila Velha-Ibes e Vila Velha-Centro. Isso é justificado pelo fato das estações citadas acima ficarem em regiões que refletem o impacto tanto de influência industrial quanto veicular. Já para as estações de Cariacica e de Laranjeiras verificou-se para o período diurno concentrações médias maiores para as direções do vento que predominantemente transportam emissões de fontes veiculares e para a estação da Enseada do Suá, verificou-se concentrações médias diurnas de influência predominantemente industrial, superiores às concentrações médias diurnas, de influência predominantemente veicular.

- Os resultados de concentração média durante a noite para as direções do vento que transportam emissões de fontes industrial e veiculares (seqüências A-X e B-X), mostraram concentrações médias de influência industrial bem próxima das concentrações médias de influência veicular para as estações de Carapina, Jardim Camburi, Enseada do Suá, Vila Velha-Ibes e Vila Velha-Centro. Isso é justificado pelas localizações das estações citadas acima ficarem em regiões que refletem o impacto tanto de influência industrial quanto veicular. Já para as estações de Cariacica e de Laranjeiras verificou-se para o período noturno concentrações médias maiores para as direções do vento que transportam emissões de fontes predominantemente veicular. Deve-se ressaltar que as estações de Cariacica e de Laranjeiras ficam situadas em regiões de alto fluxo de veículos pesados.

Pelos resultados apresentados na Tabela 7 para  $\text{NO}_x$ , pode-se elencar as observações abaixo.

- Os resultados de concentração média durante o dia e durante a noite, onde a direção do vento transporta emissões de fontes predominantemente industrial (seqüências A-Y e A-X) mostraram resultados relativamente maiores para as concentrações diurnas, para todas as estações da RAMQAr. Isso é justificado em virtude da influência maior de fontes emissoras industriais durante o período diurno para o poluente  $\text{NO}_x$ .
- Os resultados de concentração média durante o dia e durante a noite, onde a direção do vento é predominantemente de influência veicular (seqüências B-Y e B-X) mostraram resultados relativamente maiores para as concentrações diurnas, para todas as estações da RAMQAr. Isso é justificado em virtude da influência maior do fluxo de veículos durante o período diurno para o poluente  $\text{NO}_x$ .
- Os resultados de concentração média durante o dia para as direções do vento que transportam emissões de fontes industrial e veicular (seqüências A-Y e B-Y), apresentaram concentrações médias maiores para as direções do vento que transportam emissões de fontes predominantemente veicular para as estações de Jardim Camburi,

Enseada e Cariacica. Isso é justificado em virtude do alto fluxo de veículos automotores naquela região. A estação de Vila Velha-Ibes apresentou concentração média diurna de influência industrial superior e a estação de Laranjeiras apresentou concentrações médias diurnas bem próximas para os dois casos.

- Os resultados de concentração média durante a noite para as direções do vento que transportam emissões de fontes industrial e veicular (seqüências A-X e B-X), apresentaram concentrações médias maiores para as direções do vento que transportam emissões de fontes predominantemente veicular para as estações de Jardim Camburi, Enseada do Suá, Vila Velha-Ibes e Cariacica. A estação de Laranjeiras apresentou concentrações médias noturnas de influência industrial superiores às de influência veicular.

Conforme mostrado pela Figura 11, verifica-se para os resultados de  $PM_{10}$ , que as concentrações médias diurnas de influência predominantemente industrial e veicular mantiveram-se superiores às concentrações médias para todo o período de estudo para todas as estações da RAMQAr, com um destaque maior para as concentrações médias de influência predominantemente industrial (seqüência A-Y). As concentrações noturnas de influência predominantemente industrial e veicular mantiveram-se em patamares inferiores às concentrações médias para todo o período estudado.

Conforme mostrado pela Figura 12, verifica-se para os resultados de  $NO_x$  que as concentrações médias diurnas de influência predominantemente industrial e veicular são superiores às concentrações médias para todo o período de estudo em todas as estações da RAMQAr, com um destaque maior para as concentrações médias de influência predominantemente veicular (seqüência B-Y). As concentrações noturnas de influência industrial e veicular mantiveram-se em patamares inferiores as concentrações médias para todo o período estudado.

## 4 CRITÉRIOS DE AVALIAÇÃO

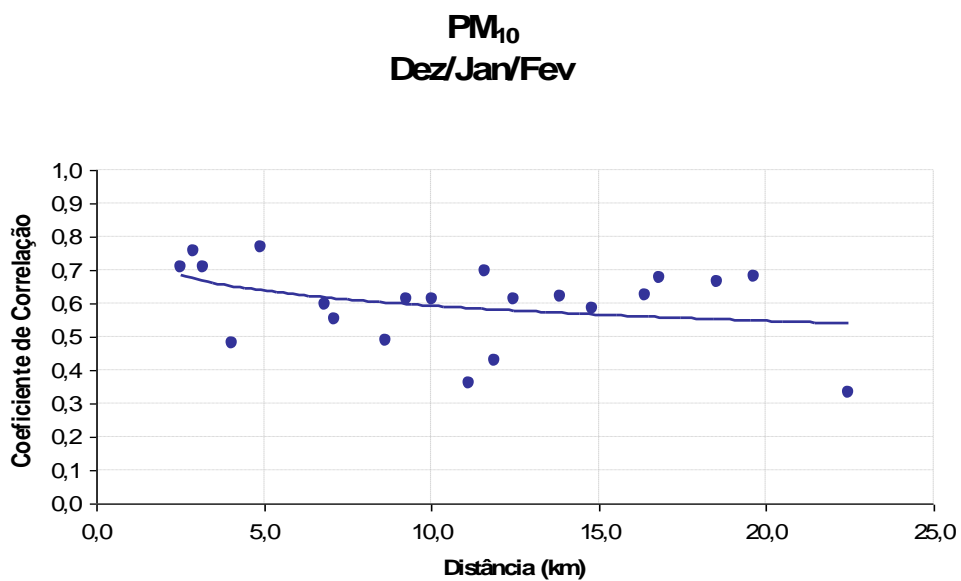
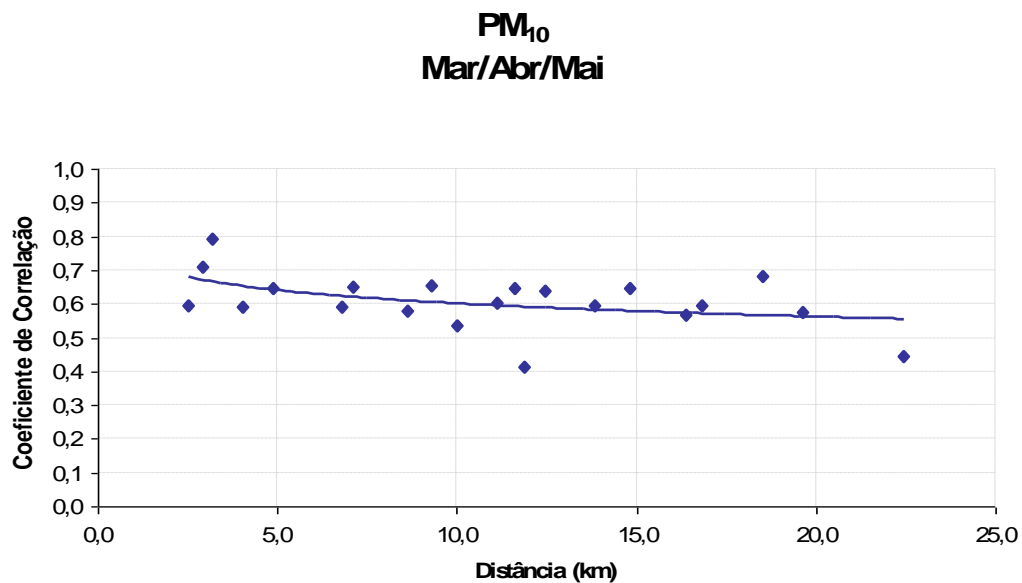
### 4.1 ANÁLISE DE CORRELAÇÃO

Procedeu-se inicialmente ao cálculo do coeficiente de correlação para todos os pares de estações de qualidade do ar da RAMQAr para os poluentes  $PM_{10}$  e  $NO_x$  durante o período de janeiro de 2001 a novembro de 2003. Para análise de correlação, utilizou-se concentrações médias de 24 horas. O uso de concentrações de médias de curto período de tempo (1 hora, por exemplo) implicaria uma influência maior de flutuações de níveis de concentração em virtude de alguma condição meteorológica ou até mesmo de características de emissão.

Inicialmente calculou-se, para cada par de estação, coeficientes de correlação para cada estação do ano e coeficientes de correlação para todo o período de estudo.

As Figuras 13, 14, 15, 16 e 17 mostram o coeficiente de correlação por pares de estações em função da distância em km das estações de  $PM_{10}$ . Com isso, verifica-se que o coeficiente de correlação tende a diminuir com o aumento da distância entre estações. Verifica-se também que o comportamento dos gráficos permanecerá o mesmo, independente da estação do ano. A estação inverno (meses de Junho, Julho e Agosto) e a estação primavera (meses de setembro, outubro e novembro) foram os meses de maior coeficiente de correlação.

As Figuras 18, 19, 20, 21 e 22 mostram o coeficiente de correlação por pares de estações em função da distância em km das estações de  $NO_x$ .

Figura 13 - Coeficiente de correlação em função da distância entre pares de estação para PM<sub>10</sub> – VerãoFigura 14 - Coeficiente de correlação em função da distância entre pares de estação para PM<sub>10</sub> – Outono



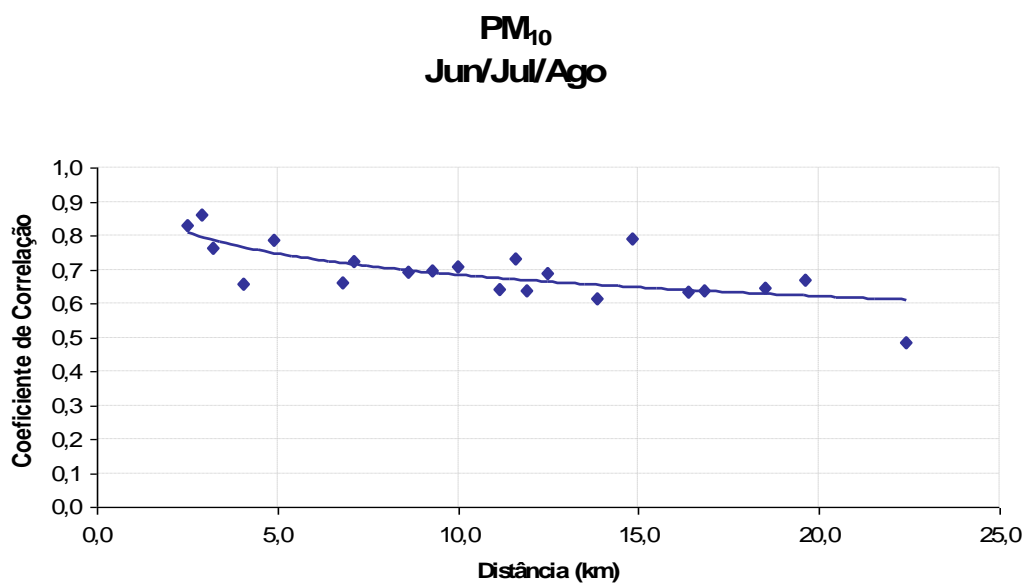


Figura 15 - Coeficiente de correlação em função da distância entre pares de estação para PM<sub>10</sub> – Inverno

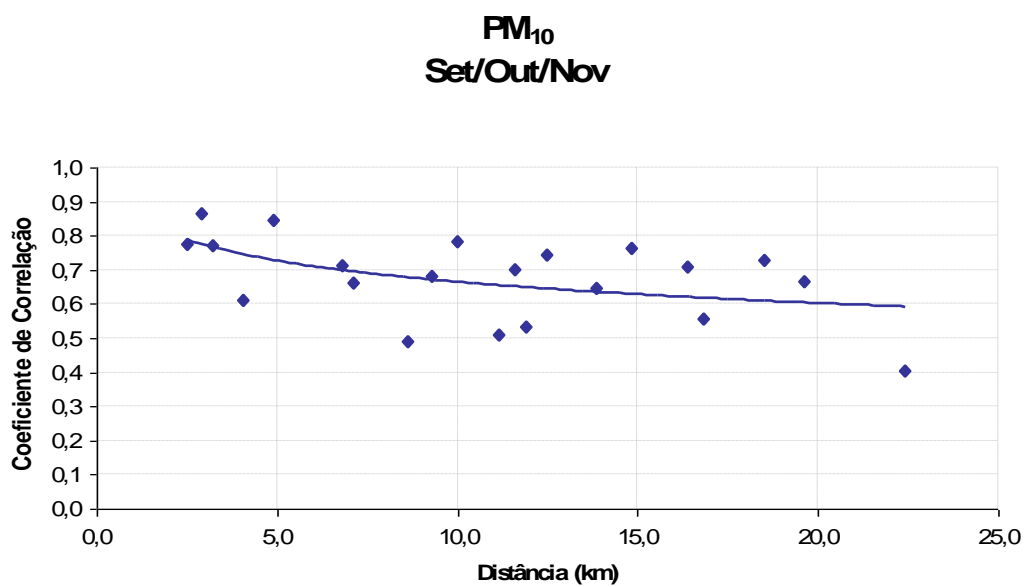


Figura 16 - Coeficiente de correlação em função da distância entre pares de estação para PM<sub>10</sub> – Primavera

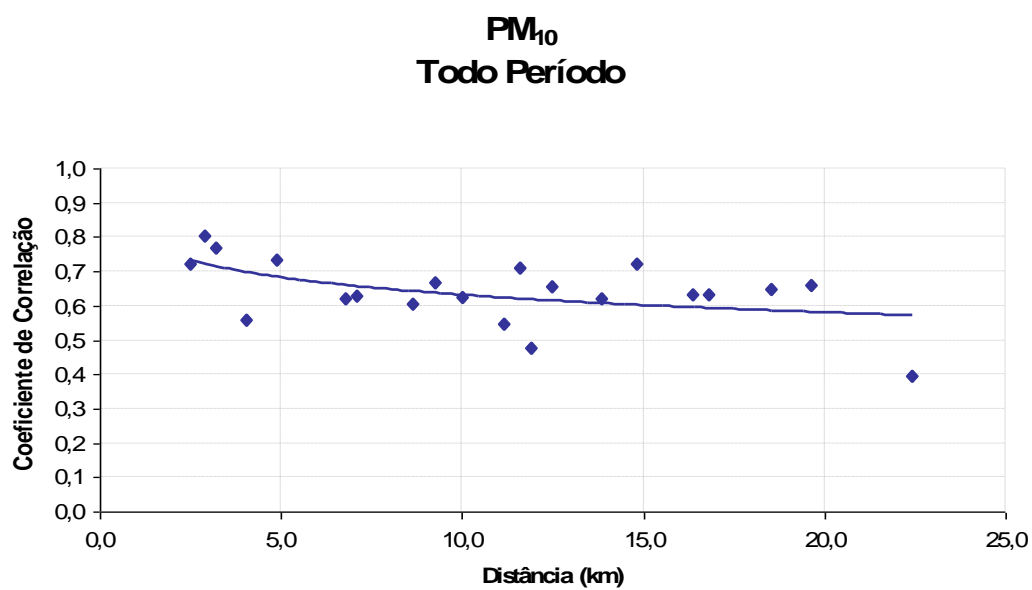


Figura 17 - Coeficiente de correlação em função da distância entre pares de estação para PM<sub>10</sub> – Todo período

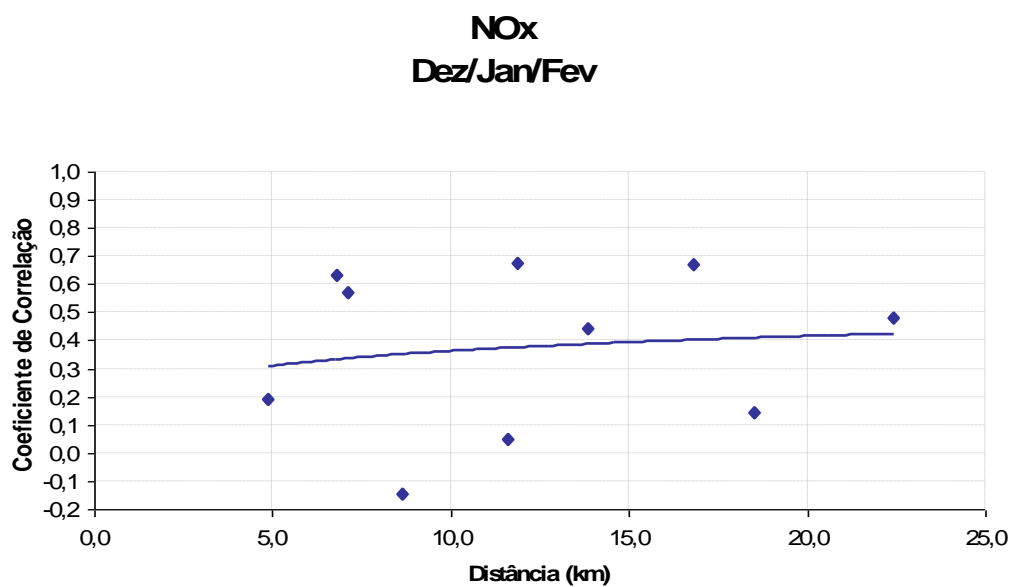


Figura 18 - Coeficiente de correlação em função da distância entre pares de estação para NO<sub>x</sub> - Verão

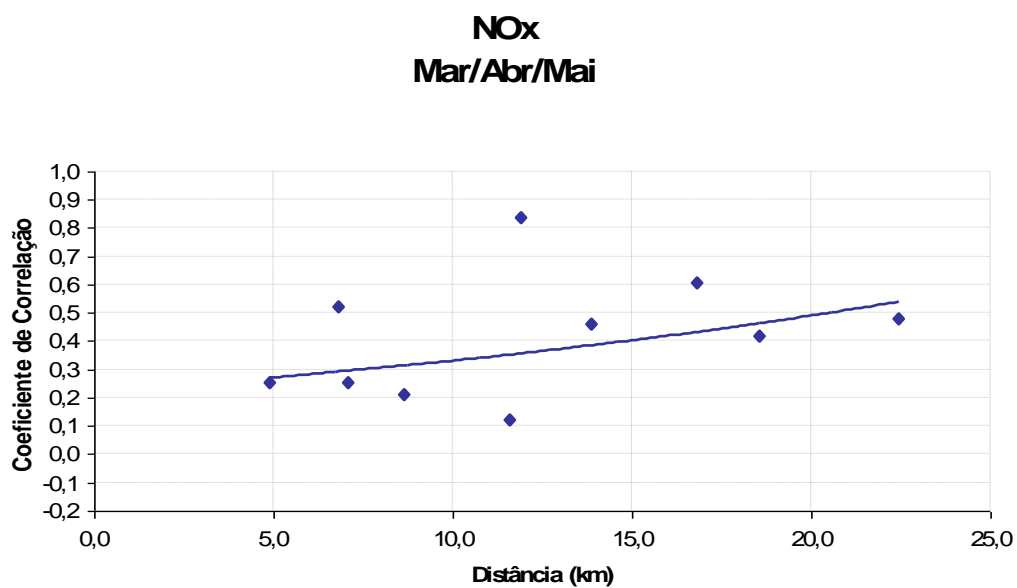


Figura 19 - Coeficiente de correlação em função da distância entre pares de estação para NO<sub>x</sub> - Outono

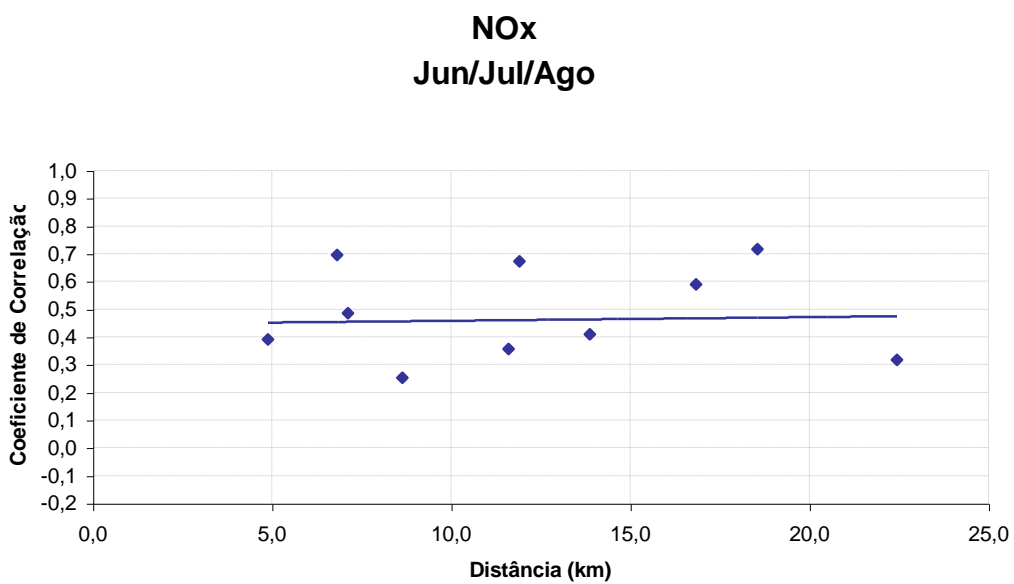


Figura 20 - Coeficiente de correlação em função da distância entre pares de estação para NO<sub>x</sub> – Inverno

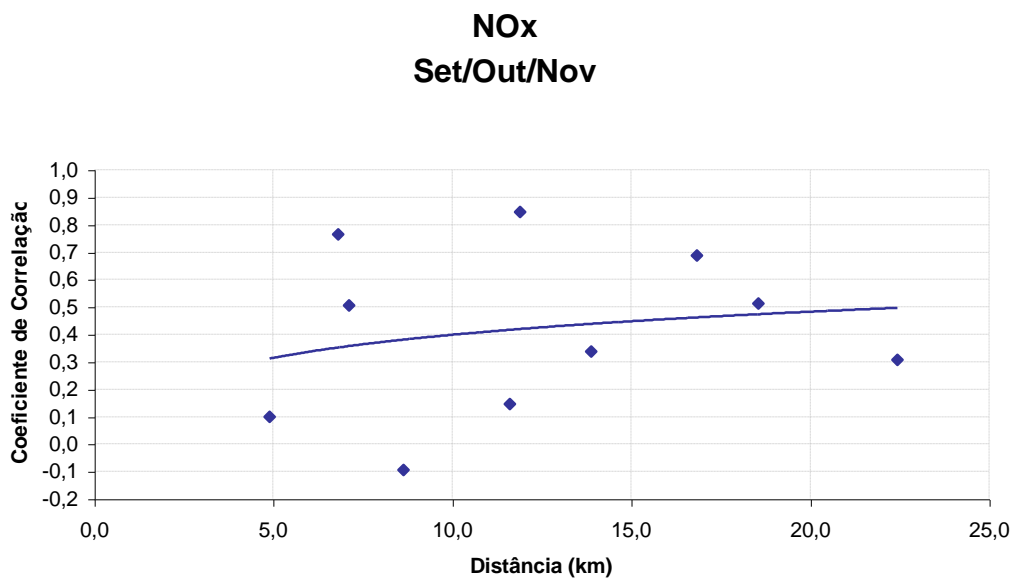


Figura 21 - Coeficiente de correlação em função da distância entre pares de estação para NO<sub>x</sub> – Primavera

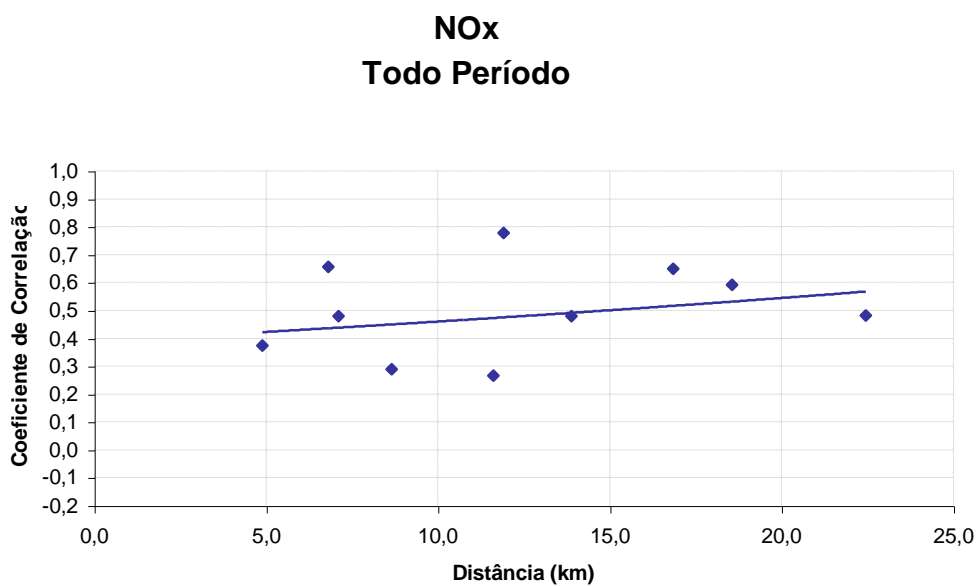


Figura 22 - Coeficiente de correlação em função da distância entre pares de estação para NO<sub>x</sub> – Todo período

## 4.2 INFORMAÇÃO DO ÍNDICE DE SHANNON PARA REDES DE MONITORAMENTO AMBIENTAL

### 4.2.1 UMA VARIÁVEL DE INTERESSE

Vamos assumir um conjunto de  $m$  locais de medição, onde estações de monitoramento da qualidade do ar estão medindo continuamente a magnitude das variáveis de interesse; o subconjunto  $A$  de  $n$  destas estações são monitoradas e o complemento  $B$  de  $m-n$  estações são não monitoradas. Sendo assim, para cada instante  $t$  ( $t=1, \dots, T$ ), temos  $\mathbf{M}_t = \{M_{t,1}, \dots, M_{t,n}\}$  que são as medições de  $X$  estações monitoradas e  $\mathbf{U}_t = \{U_{t,1}, \dots, U_{t,m-n}\}$  são as correspondentes estações não monitoradas. (Usualmente coloca-se o sub-índice  $t$ ).

Temos que  $f_{M,U}$  representa a densidade conjunta de  $\mathbf{M}$  e  $\mathbf{U}$ , e temos que  $f_M, f_U$  correspondem a densidade marginal. Diante disso, o índice de informação de Shannon (Shannon, 1948, Klir e Folder, 1988; Pérez-Abreu e Rodríguez, 1966) é definido pela equação 4.1

$$I(M,U) = \int \ln \left\{ \frac{f_{M,U}(x,y)}{f_M(x)} \right\} f_{M,U}(x,y) dx dy \quad (4.1)$$

Note que, se  $\mathbf{M}$  e  $\mathbf{U}$  são independentes, temos que  $f_{M,U}(x,y) = f_M(x)f_U(y)$  e  $I(M,U) = 0$

Se o vetor dimensional  $m$  ( $\mathbf{M}, \mathbf{U}$ ) tem uma distribuição normal com o vetor médio de covariância  $\mu$  da matriz  $\Sigma$  o índice de informação de Shannon se reduz a equação 4.2

$$I(M,U) = -\frac{1}{2} \ln \frac{\det(\Sigma)}{\det(\Sigma_{11})\det(\Sigma_{22})} \quad (4.2)$$

Temos assim que  $\Sigma_{11}$  e  $\Sigma_{22}$  representam a matriz de covariância de  $M$  e  $U$ , respectivamente, e  $\det(.)$  indica a determinante da matriz correspondente.

No presente trabalho não se considerou a opção para a retirada de duas ou mais estações de monitoramento, embora seja possível o cálculo do índice de Shannon para outras configurações.

Antes da aplicação propriamente dita do cálculo do Índice de Shannon na Rede Automática de Monitoramento da Qualidade do Ar (RAMQAr) da Região Metropolitana da Grande Vitória, procedeu-se na realização do teste estatístico Shapiro-Wilk para normalização dos dados de monitoramento de todas as estações da RAMQAr para os poluentes  $PM_{10}$  e  $NO_x$ . Para normalização dos dados de monitoramento, foi explorado o uso da transformação de Box-Cox (Atkinson and Cox, 1988; Broemeling, 1982), onde ela obedece a equação 4.3 abaixo.

$$y^\lambda = \begin{cases} \frac{y^\lambda - 1}{\lambda}, & se \lambda \neq 0, \\ \log(y), & se \lambda = 0 \end{cases} \quad (4.3)$$

No presente trabalho, todos os dados de monitoramento de  $PM_{10}$  e  $NO_x$  obedecem uma distribuição próxima a LogNormal, e portanto utilizou-se a equação 4.3 para  $\lambda=0$ .

#### 4.2.2 APLICAÇÃO DO ÍNDICE DE SHANNON PARA A RAMQAr NA RMGV

Usando a equação 4.3, procedeu-se no cálculo do Índice de Shannon, excluindo uma estação no tempo para cada configuração. Na RMAQAr da RMGV, temos um total de sete estações de monitoramento que medem o poluente PM<sub>10</sub> e cinco estações de monitoramento que medem o poluente NO<sub>x</sub>. Assim temos um total de sete configurações possíveis para o poluente PM<sub>10</sub> e cinco configurações possíveis para o poluente NO<sub>x</sub>. O procedimento inicial é de eliminar uma estação qualquer no tempo e estudar a perda de informação obtida após a retirada desta estação. As Tabelas 8 e 9 apresentam os principais resultados no cálculo do Índice de Shannon para cada configuração para os poluentes PM<sub>10</sub> e NO<sub>x</sub> respectivamente.

Tabela 8 – Informação do Índice de Shannon para cada combinação de seis estações para o poluente PM<sub>10</sub>.

Configuração	Estações Monitoradas	Estação Não Monitorada	Índice de Shannon	Perda de Informação
1	1-2-3-4-6-7	8	0,34	0,53
2	1-2-3-4-6-8	7	0,59	0,18
3	1-2-3-4-7-8	6	0,72	0,00
4	1-2-3-6-7-8	4	0,52	0,28
5	1-2-4-6-7-8	3	0,58	0,19
6	1-3-4-6-7-8	2	0,59	0,17
7	2-3-4-6-7-8	1	0,45	0,37

Tabela 9 - Informação do Índice de Shannon para cada combinação de quatro estações para o poluente NO<sub>x</sub>.

Configuração	Estações Monitoradas	Estação Não Monitorada	Índice de Shannon	Perda de Informação
1	1-3-4-6	8	0,50	0,00
2	1-3-4-8	6	0,17	0,66
3	1-3-6-8	4	0,48	0,05
4	1-4-6-8	3	0,40	0,20
5	3-4-6-8	1	0,30	0,41

Observa-se pela Tabela 8 para o poluente  $PM_{10}$  que a configuração de número 3 mostra o maior Índice de Informação de Shannon, onde o conjunto de estações de monitoramento RAMQAr 1, 2, 3, 4, 7 e 8 (configuração ótima) obtém o máximo de informação possível com a exclusão da estação RAMQAr 6 (Vila Velha-Ibes) comparado com as outras configurações.

Com o Índice de Informação de Shannon, calculou-se o mínimo de perda de informação para cada tipo de configuração para o poluente  $PM_{10}$ , conforme é observado pela Tabela 8. Em resumo, busca-se encontrar para cada tipo de configuração as estações adequadas para medir o poluente  $PM_{10}$  retirando-se uma estação e obtendo-se o mínimo de perda de informação para cada configuração. Esta perda de informação é calculada em função da diferença relativa com o respectivo valor maior do Índice de Shannon. Note portanto que a configuração de número 3 apresentada na Tabela 8 para o poluente  $PM_{10}$  apresenta o mínimo de perda de informação, como exemplo pode-se observar que a pior configuração é a de número 1 retirando-se a estação RAMQAr 8, com uma perda de informação de 53 %, ou com uma eficiência de 47 %.

Da mesma forma, observa-se pela Tabela 9 para o poluente  $NO_x$ , que a melhor configuração é a de número 1, onde o conjunto de estações de monitoramento RAMQAr 1, 3, 4 e 6 (configuração ótima) obtém o máximo de informação possível com a exclusão da estação RAMQAr 8 (Cariacica). Entretanto, nota-se que para o poluente  $NO_x$  uma outra opção de configuração é a de número 3, com uma perda mínima de informação de apenas 5 % retirando-se a estação RAMQAr 4 e deixando as estações RAMQAr 1, 3, 6 e 8.

A Figura 23 mostra o gráfico da distância e coeficiente de correlação para cada par de estações, mantendo-se fixa a estação RAMQAr 6 (Vila Velha-Ibes) para o poluente  $PM_{10}$  durante todo o período de estudo.

As Figuras 24 e 25 mostram os gráficos da distância e coeficiente de correlação para cada par de estações, mantendo-se fixa a estações RAMQAr 8 (Cariacica) e RAMQAr 4 (Enseada do Suá) respectivamente, para o poluente  $NO_x$  durante todo o período de estudo.



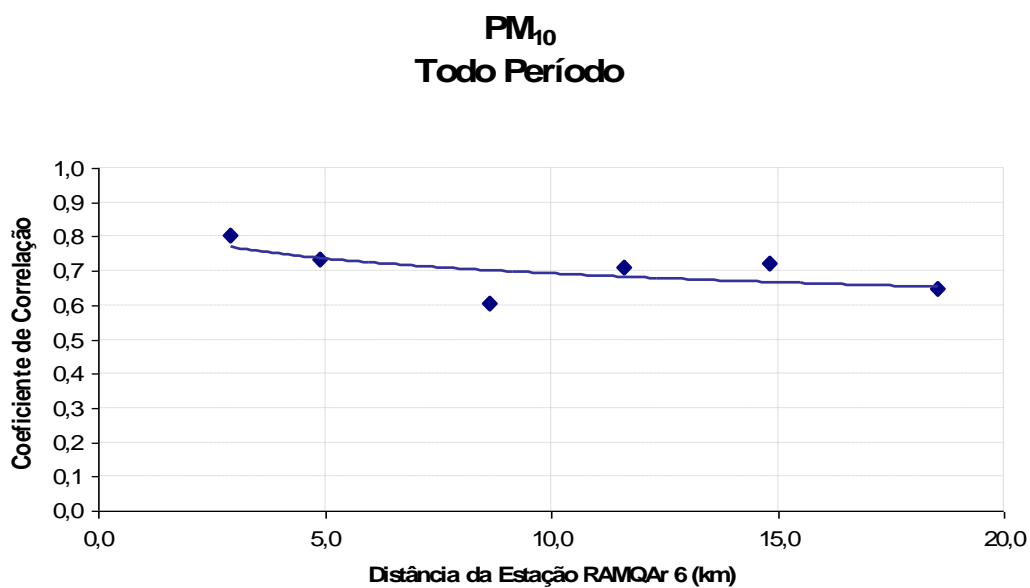


Figura 23 – Coeficiente de Correlação em função da distância de cada estação pela estação RAMQAr 6 para PM<sub>10</sub>.

Observa-se pela Figura 23 um alto coeficiente de correlação variando entre 0,6 e 0,8 quando se mantém fixa a estação RAMQAr 6 em relação as outras estações de monitoramento.

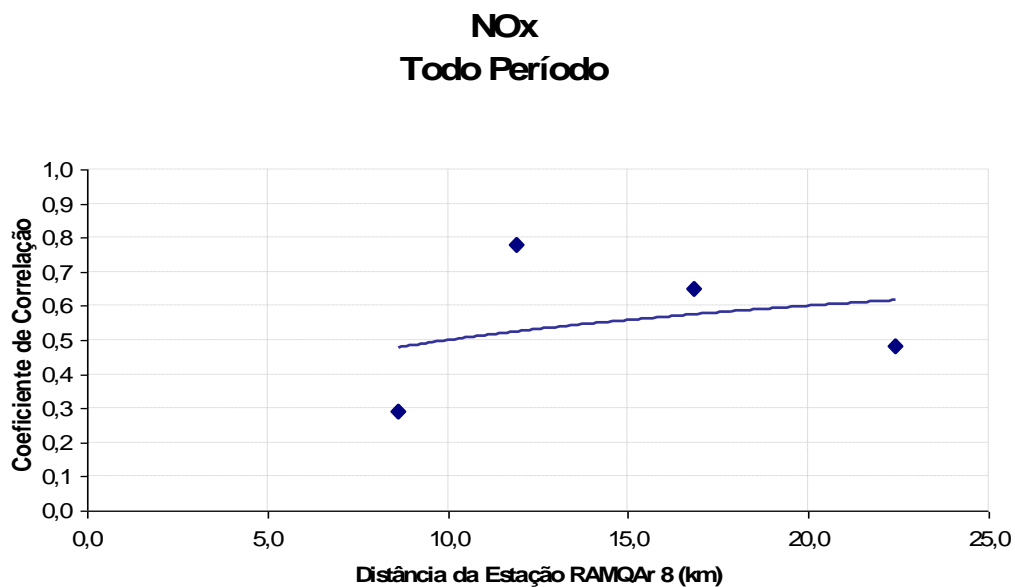


Figura 24 – Coeficiente de correlação em função da distância de cada estação pela estação RAMQAr 8 para NO<sub>x</sub>.

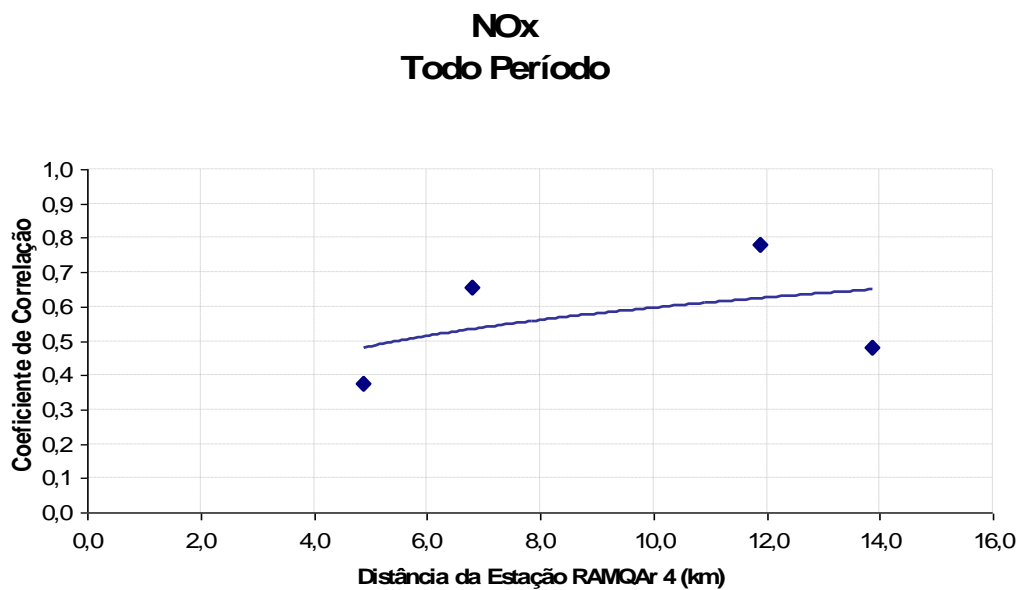


Figura 25 – Coeficiente de correlação em função da distância de cada estação pela estação RAMQAr 4 para NO<sub>x</sub>.

Nota-se pelas Figuras 24 e 25, que as linha de tendência de cada uma das figuras possuem comportamento similar com valores de coeficiente de correlação variando entre 0,3 e 0,8.

## 5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

A poluição na Região Metropolitana da Grande Vitória para os poluentes  $PM_{10}$  e  $NO_x$ , dependem bastante da taxa de urbanização da região, aumento da capacidade produtiva das principais indústrias e aumento do fluxo de veículos, características regionais, distância dos locais de emissão das fontes emissoras de  $PM_{10}$  e  $NO_x$ . A busca da otimização de redes de monitoramento com um número mínimo de estações deve ser considerado em projeto de análises de dados de monitoramento de redes já existentes.

No presente trabalho, adotou-se uma técnica de estudo da menor parcela de perda de informação em redes de monitoramento de poluentes atmosféricos, denominado Índice de Informação de Shannon. Foi realizado o cálculo do Índice Shannon para os poluentes  $PM_{10}$  e  $NO_x$  para todas as estações de monitoramento da qualidade do ar da Grande Vitória para um período de estudo adotado no presente trabalho de janeiro de 2001 a novembro de 2003.

A melhor configuração para o poluente  $PM_{10}$ , adotando-se a retirada de uma estação de monitoramento das sete existentes, é a eliminação do monitoramento de  $PM_{10}$  da RAMQAr 6 (Vila Velha-Ibes), obtendo-se o mínimo de perda de informação para as outras estações remanescentes. Já para  $NO_x$ , adotou-se a retirada da estação RAMQAr 8 (Cariacica), obtendo-se assim o mínimo de perda de informação possível para as outras estações remanescentes de  $NO_x$ .

A remoção dos poluentes  $PM_{10}$  e  $NO_x$  em duas ou mais estações de monitoramento não foi avaliada no presente trabalho, mas certamente a perda de informação nos dados será maior.

É importante destacar que o presente trabalho se baseou num determinado critério de avaliação de redes de monitoramento, e que, certamente, outros critérios de avaliação de estudo de perda de informação em redes de monitoramento podem resultar em diferentes conclusões.

## 6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] SILVA, C.; QUIROZ, A. Optimization of the atmospheric pollution monitoring network at Santiago de Chile. **Atmospheric Environment**. Vol. 37. pp. 2337-2345. 2003.

[2] WU, H. W. Y.; CHAN, L. Y. Comparative study of air quality surveillance networks in Hong Kong. **Atmospheric Environment**. Vol. 31. Nº 7. pp. 935-945. 1997.

[3] U.S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. **AERMOD Description of Model Formulation** 1998 Disponível em: <<http://www.epa.gov/scram001>>. Acesso em: 17 mar. 2004.

[4] DEMERGIAN, K. L. A review of national monitoring networks in North América. **Atmospheric Environment**. Vol. 34. pp. 1861-1884. 2000.

[5] SEAMA. **Rede Automática de Monitoramento da Qualidade do Ar da Grande Vitória**. [Vitória, 2000]. 1 folder.