



**UNIVERSIDADE DO ESTADO DO RIO DE JANEIRO**  
**Centro de Tecnologia e Ciências**  
**Instituto de Química**

**Antonio Marco Siciliano**

**Estudo do impacto do complexo petroquímico COMPERJ na  
atmosfera**

Rio de Janeiro

2009

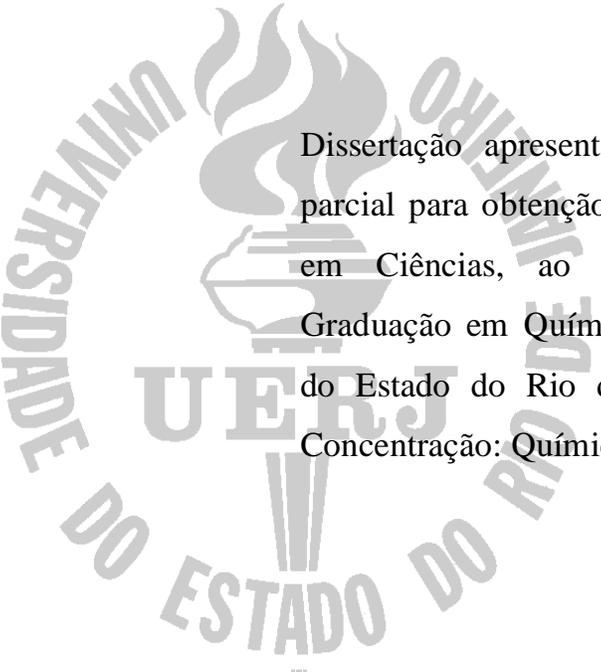
# **Livros Grátis**

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.

**Antonio Marco Siciliano**

**Estudo do impacto do complexo petroquímico COMPERJ na atmosfera**



Dissertação apresentada, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Ciências, ao Programa de Pós-Graduação em Química, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Área de Concentração: Química Ambiental

Orientador: Prof<sup>o</sup>. Dr<sup>o</sup>. Sérgio Machado Corrêa

Co-orientador: Dr<sup>o</sup>. Carlos Eduardo Fontes da Costa e Silva

Rio de Janeiro

2009

**CATÁLOGAÇÃO NA FONTE**  
**UERJ/ REDE SIRIUS/ BIBLIOTECA CTC/Q**

S566 Siciliano, Antonio Marco.  
Estudo do impacto do complexo petroquímico COMPERJ na  
atmosfera. / Antonio Marco Siciliano. - 2009  
133f

Orientador: Sérgio Machado Corrêa  
Orientador: Carlos Eduardo Fontes da Costa e Silva  
Dissertação (Mestrado) – Universidade do Estado do Rio de  
Janeiro, Instituto de Química.

1. Ar – Poluição - Teses. 2. Simulação (computadores) –  
Teses. I. Corrêa, Sérgio Machado. II. Silva, Carlos Eduardo  
Fontes da Costa e. III. Universidade do Estado do Rio de Janeiro.  
Instituto de Química. IV. Título.

CDU 628.395

Autorizo apenas para fins acadêmicos e científicos, a reprodução total ou parcial desta  
dissertação.

---

Assinatura

---

Data

Antonio Marco Siciliano

**Estudo do impacto do complexo petroquímico COMPERJ na atmosfera**

Dissertação apresentada, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Ciências, ao Programa de Pós-Graduação em Química, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Área de Concentração: Química Ambiental

Aprovado em \_\_\_\_\_

Banca Examinadora:

\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Sérgio Machado Corrêa (Orientador)  
Faculdade de Tecnologia da UERJ

\_\_\_\_\_  
Dr. Carlos Eduardo Fontes da Costa e Silva (Co-orientador)  
ESSS

\_\_\_\_\_  
Profa. Dra. Simone Lorena Quitério  
IFRJ – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio de Janeiro

\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Eduardo Monteiro Martins  
Faculdade de Engenharia da UERJ

Rio de Janeiro

2009

## DEDICATÓRIA

A Deus,  
por me permitir desenvolver este trabalho.

À minha família,  
pelo apoio e pela compreensão na minha ausência.

Aos meus pais, Mario e Concetta  
que sempre acreditaram na educação dos seus filhos.

Aos meus amigos,  
pela ajuda e auxílio prestados.

## **AGRADECIMENTOS**

Aos orientadores Sérgio Machado Corrêa e Carlos Eduardo Fontes da Costa e Silva, por suas inestimáveis colaborações e paciência no desenvolvimento deste trabalho.

Ao corpo docente e aos funcionários do Programa de Pós-Graduação em Química da UERJ pelo conhecimento e carinho dispensados.

A FAPERJ e ao CNPQ pelo suporte financeiro ao grupo de pesquisa e à Peugeot Citroen pela doação do software ISC3 AERMOD.

*“A ciência não é apenas compatível com a espiritualidade; ela é uma profunda fonte de espiritualidade”.*

*Carl Sagan*

## RESUMO

**SICILIANO, Antonio Marco.** *Estudo do impacto do complexo petroquímico COMPERJ na atmosfera.* 2009. 133f. Dissertação (Mestrado em Química) – Instituto de Química, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009

Os modelos de dispersão de ar têm sido utilizados amplamente para investigação de padrões de dispersão, comportamento de emissões, estimativas de potenciais riscos a saúde humana, elaboração de propostas de gerenciamento ambiental e, também, na previsão de impacto da qualidade do ar. Alguns modelos, homologados por agência de regulação de alguns países ou comunidades, servem de base para as análises de risco com auxílio de simulação. Somente após este tipo de análise uma unidade fabril terá direito à sua instalação e operação nestes países. Nesta dissertação, serão abordados os principais poluentes presentes em uma indústria petroquímica básica, uma revisão sobre os principais tipos de modelos existentes no mercado e um estudo de caso será realizado empregando os modelos AERMOD e OZIPR/SAPRC. A indústria petroquímica básica a servir de modelo será o Complexo Petroquímico do Rio de Janeiro, que deverá ser instalado no município de Itaboraí e com operação prevista para o ano de 2012.

De acordo com as simulações realizadas neste trabalho, o poluente NO<sub>x</sub> apresentou os resultados mais críticos violando em algumas áreas os padrões primários e secundários de emissão. Diante deste fato, o ozônio se tornou um poluente secundário importante a ser analisado. E para sua simulação, premissas tiveram que ser tomadas, devido a ausência de dados, criando cenários que apresentaram resultados díspares: Ora violando os limites, ora se mantendo abaixo deles. Apesar disso, estes cenários apontaram a mesma solução para minimizar esta formação de ozônio: controlar as emissões de compostos orgânicos voláteis.  
Palavras-chave: Poluição Atmosférica. Plumas. Dispersão. Ozônio. Modelagem.

## **ABSTRACT**

Air dispersion models have been widely used to investigate patterns of air dispersal, to predict emissions behavior, to estimate potential risks to human health, to develop environmental management procedures and also to evaluate the impact of air quality on the dispersion. Some models, approved by regulatory agencies, work as a simulation tool for risk analysis purposes because in some countries only by performing a risk analysis like such an industrial facility is allowed to be constructed and to operate. This dissertation will relate the main pollutants produced by a petrochemical facility, a review of the main air dispersion models available in the market and will present an air dispersion study case in a petrochemical facility considering the usage of AERMOD and OZIPR / SAPRC dispersion models. The petrochemical facility considered as a basic model will be the Petrochemical Complex of Rio de Janeiro, which should be installed in Itaboraí, which start up is planned for the year of 2012.

According to the simulations in this work, the pollutant NO<sub>x</sub> presented the more critical results violating primary and secondary limits in some areas. Given this fact, ozone has become an important secondary pollutant to be analyzed. To make it simulation became possible, assumptions had to be taken due to lack of data to create scenarios that resulted sometimes legal limits violation, another times no violation. Nevertheless, these scenarios pointed to the same solution to minimize this formation of ozone: control volatile organic compounds emissions.

**Keywords:** Atmosphere Pollution. Plumes. Dispersion. Ozone. Simulation

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Precursores obtidos pelo Gás Natural, Petróleo e Carvão Mineral.....	37
Figura 2 – Intermediários petroquímicos obtidos através do metano.....	38
Figura 3 – Intermediários petroquímicos obtidos através do eteno.....	38
Figura 4 – Intermediários petroquímicos obtidos através do BTEX.....	39
Figura 5 – Intermediários petroquímicos obtidos através do BTEX.....	39
Figura 6 – Unidade Petroquímica Básica.....	43
Figura 7 – Unidade Petroquímica Associada.....	43
Figura 8 – Esquema explicativo da dispersão em função do terreno.....	59
Figura 9 – Fontes direta, indireta e penetrante.....	61
Figura 10 – Efeito da Pluma Lateral em Zigue-Zague.....	63
Figura 11 – Efeito Downwash.....	64
Figura 12 – Localização das Estações Meteorológicas.....	71
Figura 13 – Rosa dos ventos da estação meteorológica Infraero para o ano de 2007 nos meses de março a agosto.....	72
Figura 14 – Rosa dos ventos da estação meteorológica de Sambaetiba para o ano de 2007 nos meses de março a agosto.....	72
Figura 15 – Rosa dos ventos da estação meteorológica de Macacu para o ano de 2007 nos meses de março a agosto.....	72
Figura 16 – Área do terreno incorporada ao estudo.....	74
Figura 17 – Localização das principais Fontes Emissoras do COMPERJ.....	76
Figura 18 – Bacias Aéreas da Região Metropolitana do RJ.....	77
Figura 19 – Concentração média ( $\mu\text{g m}^{-3}$ ) em 1 h de NOx usando os dados meteorológicos da estação de Macacu.....	86
Figura 20 – Concentração média ( $\mu\text{g m}^{-3}$ ) em 1h de NOx usando os dados da estação Meteorológica de Sambaetiba.....	86
Figura 21 – Concentração média ( $\mu\text{g m}^{-3}$ ) em 1h de NOx utilizando dados da estação meteorológica Infraero.....	87
Figura 22 – Concentração média ( $\mu\text{g m}^{-3}$ ) no período de 24 horas de SOx com dados da estação Macacu.....	89
Figura 23 – Concentração média ( $\mu\text{g m}^{-3}$ ) no período de 24 horas de SOx com dados da estação Sambaetiba.....	90

Figura 24 – Concentração média ( $\mu\text{g m}^{-3}$ ) no período de 24 horas de SOx com dados da estação Infraero ..... 90

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Padrões Nacionais de Qualidade do Ar .....	21
Tabela 2 – Resumo do Anexo VI da Resolução CONAMA nº 382, 2006 .....	22
Tabela 3 – Poluentes e seus limites no CONAMA e EPA.....	23
Tabela 4 – Níveis de criticidade dos Poluentes .....	24
Tabela 5 – Fator de emissão de poluentes gasosos por combustível. ....	40
Tabela 6 – Fator de emissão de poluentes gasosos em uma refinaria de petróleo. ....	41
Tabela 7 – Produção planejada para o COMPERJ. ....	42
Tabela 8 – Diferenças entre o ISCST3 e o AERMOD. ....	51
Tabela 9 – Localização das Estações Meteorológicas do Estudo.....	70
Tabela 10 – Especificação de hidrocarbonetos para a região metropolitana do RJ por Corrêa (2003) no entorno da Av. Presidente Vargas em dezembro de 2002.....	79
Tabela 11 – Especificação de hidrocarbonetos no entorno da REDUC em junho de 2007.....	79
Tabela 12 – Concentração inicial de poluentes .....	81
Tabela 13 – Temperatura, umidade relativa e altura de mistura .....	81
Tabela 14 – Média das Temperatura e umidade relativa das estações do EIA (2007).....	82
Tabela 15 – Dados inventariados de emissão.....	84
Tabela 16 – Concentrações máximas obtidas de NOx por estação .....	88
Tabela 17 – Concentrações máximas obtidas de SOx por estação.....	91
Tabela 18 – Concentrações máximas obtidas de MP por estação .....	92
Tabela 19 – Concentrações máximas obtidas de CO por estação .....	93
Tabela 20 – Resultados das simulações com ozônio para o COMPERJ. ....	95
Tabela 21 – Comparativo de resultados com EIA (2007).....	103

## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Impacto na formação de ozônio com o decréscimo de emissão de NO <sub>x</sub> .....	97
Gráfico 2 – Impacto na formação de ozônio com o decréscimo de emissão de COV.....	98
Gráfico 3 – Isopleta de Ozônio para especiação REDUC – Cenário 2A.....	98
Gráfico 4 – Isopleta de Ozônio para especiação de Corrêa (2003) – Cenário 2B.....	99
Gráfico 5 – Reatividade Incremental de COVs para o Cenário 2A.....	100

## LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1– Modelo Determinístico.....	45
Equação 2– Navier-Stokes .....	46
Equação 3 – Equação da Continuidade.....	47
Equação 4– Distribuição Gaussiana.....	48
Equação 5– Cálculo da velocidade de fricção na CBL.....	53
Equação 6– Cálculo do comprimento de Monin-Obhukov na CBL.....	53
Equação 7– Cálculo da velocidade convectiva escalar na CBL.....	53
Equação 8– Cálculo da altura de mistura mecânica e da altura de mistura na CBL .....	54
Equação 9– Velocidade de fricção na SBL .....	54
Equação 10– Comprimento de Monin-Obhukov para SBL.....	54
Equação 11– Temperatura escalar .....	54
Equação 12– Cálculo da altura de mistura nas condições de SBL.....	54
Equação 13– Perfil de velocidade do vento em função da altura.....	55
Equação 14– Gradiente de temperatura em função da altura.....	55
Equação 15– Turbulência vertical total e suas componentes convectiva e mecânica .....	56
Equação 16– Turbulência vertical convectiva.....	56
Equação 17– Turbulência vertical mecânica e suas componentes .....	56
Equação 18– Cálculos das componentes da turbulência vertical mecânica.....	57
Equação 19– Turbulência lateral total e suas componentes convectiva e mecânica .....	57
Equação 20– Turbulência lateral convectiva.....	57
Equação 21– Turbulência lateral mecânica.....	57
Equação 22– Modelo de dispersão com o terreno .....	58
Equação 23– Fator utilizado para ponderação entre os estados limites de pluma horizontal e pluma que acompanha o terreno .....	58
Equação 24– Concentração nas condições de SBL .....	59
Equação 25– Função de distribuição lateral.....	59
Equação 26– Distribuição lateral.....	60
Equação 27– Dispersão vertical total.....	60
Equação 28– Concentração, nas condições de CBL, função das fontes direta, indireta e penetrante.....	60
Equação 29– Concentração nas condições de CBL para fonte direta .....	61
Equação 30– Concentração nas condições de CBL para fonte indireta.....	61

Equação 31– Concentração nas condições de CBL para fonte penetrante .....	62
Equação 32– Limite de pluma coerente .....	63
Equação 33– Limite de pluma randômica.....	63
Equação 34– Concentração total em função da pluma coerente e da pluma randômica .....	64
Equação 35– Concentração total em função dos cálculos do PRIME e do AERMOD.....	65
Equação 36– Cálculo do fator ponderador para determinação da concentração total quando do efeito de <i>downwash</i> .....	65
Equação 37– Fluxo de calor urbano.....	65
Equação 38– Cálculo de $\Delta T_{u-r}$ .....	66
Equação 39– Cálculo da altura da camada de mistura urbana .....	66
Equação 40– Velocidade convectiva escalar urbana .....	66
Equação 41– Cálculo da reatividade incremental positiva.....	80
Equação 42– Cálculo da reatividade incremental negativa.....	81

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ACGIH - *American Conference of Industrial Hygienists*

APA – Área de Proteção Ambiental

BEN – Balanço Energético Nacional

BTEX – Benzeno, tolueno, etileno e xileno

CBL – *Convective Boundary layer*

CECA – Comissão Estadual de Controle Ambiental

COMPERJ – Complexo Petroquímico do Rio de Janeiro

CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente

COV – Compostos orgânicos voláteis

Cp – Calor específico a pressão constante

EIA – Estudo de Impacto Ambiental

EPA – *Environment Protect Agency*

FEEMA – Fundação Estadual de Engenharia do Meio Ambiente

HCNM – Hidrocarbonetos não metânicos

INEA – Instituto Estadual do Ambiente. Antiga FEEMA.

IR – Reatividade Incremental

ISCST3 - *Industrial Source Complex Model*

MP – Material particulado

MTE – Ministério do Trabalho e Emprego

NO<sub>x</sub> – Óxidos de nitrogênio

NR – Norma Regulamentadora do MTE.

OZIPR - *Ozone Isopleth Package for Research*

PI – Partículas inaláveis

PM10 – Material particulado menor que 10 µm

PRIME - *Plume Rise Model Enhancements*

PTS – Partículas totais em suspensão

RIMA – Relatório de impacto ambiental

SAPRC - *Statewide Air Pollution Research Center*

SBL – *Stable boundary layer*

SO<sub>x</sub> – Óxidos de enxofre

USGS - *United States Geological Survey*

UTM – Universal transverse mercator

# SUMÁRIO

<b>INTRODUÇÃO E OBJETIVOS .....</b>	<b>19</b>
<b>1. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>21</b>
<b>1.1. LEGISLAÇÃO .....</b>	<b>21</b>
<b>1.2. LICENCIAMENTO AMBIENTAL .....</b>	<b>24</b>
<b>1.3. PRINCIPAIS POLUENTES LEGISLADOS E SEUS EFEITOS .....</b>	<b>26</b>
NOX - ÓXIDOS DE NITROGÊNIO .....	26
SOX - ÓXIDOS DE ENXOFRE .....	28
CO – MONÓXIDO DE CARBONO.....	29
COV – COMPOSTOS ORGÂNICOS VOLÁTEIS .....	29
MP – MATERIAL PARTICULADO .....	30
OZÔNIO.....	31
<b>1.4. PROCESSOS DE REFINO E PETROQUÍMICO E SEUS POLUENTES .....</b>	<b>32</b>
1.2.1. REFINO .....	32
1.2.2. PETROQUÍMICA.....	36
<b>1.5. O COMPLEXO PETROQUÍMICO DO RIO DE JANEIRO - COMPERJ .....</b>	<b>41</b>
<b>1.6. MODELOS DE DISPERSÃO .....</b>	<b>43</b>
1.4.1. MODELOS DETERMINÍSTICOS.....	45
1.4.2. MODELOS CAIXA.....	46
1.4.3. MODELOS CFD.....	46
1.4.5. MODELOS LAGRANGIANOS .....	46
1.4.6. MODELOS EULERIANOS .....	47
1.4.7. MODELOS GAUSSIANOS.....	47
<b>1.7. O SOFTWARE AERMOD.....</b>	<b>49</b>
<b>1.8. MODELO MATEMÁTICO DO AERMOD.....</b>	<b>52</b>
1.6.1. TRATAMENTO METEOROLÓGICO .....	52
1.6.2. TRATAMENTO TOPOGRÁFICO.....	58
1.6.3. CÁLCULO DA CONCENTRAÇÃO .....	59
1.1.4. TRATAMENTO DA PLUMA LATERAL EM ZIGUE-ZAGUE .....	62
1.1.5. EFEITO <i>DOWNWASH</i> .....	64
1.1.6. EFEITOS DA CAMADA URBANA.....	65
<b>1.9. MODELO OZIPR E SAPRC .....</b>	<b>66</b>
<b>2. METODOLOGIA .....</b>	<b>70</b>

<b>2.1. METODOLOGIA PARA O AERMOD .....</b>	<b>70</b>
<b>2.2. METODOLOGIA PARA O OZIPR E SAPRC .....</b>	<b>77</b>
<b>3. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>85</b>
<b>3.1. ÓXIDOS DE NITROGÊNIO - NOX.....</b>	<b>85</b>
<b>3.2. ÓXIDOS DE ENXOFRE – SOX .....</b>	<b>89</b>
<b>3.3. MATERIAL PARTICULADO – MP.....</b>	<b>92</b>
<b>3.4. MONÓXIDO DE CARBONO – CO.....</b>	<b>93</b>
<b>3.5. OZÔNIO .....</b>	<b>94</b>
<b>4. CONCLUSÕES.....</b>	<b>102</b>
<b>5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>106</b>
<b>6. ANEXO 1.....</b>	<b>110</b>
<b>7. ANEXO 2.....</b>	<b>112</b>
<b>8. ANEXO 3.....</b>	<b>119</b>
<b>9. ANEXO 4.....</b>	<b>121</b>
<b>10. ANEXO 5.....</b>	<b>124</b>
<b>11. ANEXO 6.....</b>	<b>126</b>

Este trabalho foi apresentado na 32ª Reunião Anual da Sociedade Brasileira de Química, realizada em 2009 na cidade de Fortaleza, com o título “Impacto Ambiental das Emissões Atmosféricas do Complexo Petroquímico do Rio de Janeiro”.

## INTRODUÇÃO E OBJETIVOS

A ABNT NBR 8969/85 define, de forma geral, poluente atmosférico como toda e qualquer forma de matéria e/ou energia que, segundo suas características, concentração e tempo de permanência no ar, possam causar ou venha a causar danos à saúde, aos materiais, à fauna e à flora e seja prejudicial à segurança, ao uso e ao gozo da propriedade, à economia e ao bem-estar da comunidade.

A Resolução CONAMA nº 03, de 1990, define poluente atmosférico como qualquer forma de matéria ou energia com intensidade e em quantidade, concentração, tempo ou características em desacordo com os níveis estabelecidos, e que tornem ou possam tornar o ar: impróprio, nocivo ou ofensivo à saúde; inconveniente ao bem-estar público; danoso aos materiais, à fauna e flora; prejudicial à segurança, ao uso e gozo da propriedade e às atividades normais da comunidade.

A segunda definição difere da primeira quanto ao estabelecimento de limites fixados pela própria resolução CONAMA nº 03, de 1990.

Para avaliar o enquadramento de uma futura instalação, ou seja, para avaliar se as emissões de uma indústria, que ainda não existe, estarão dentro dos limites estabelecidos pelo CONAMA, os analistas de riscos de projetos lançam mão da utilização de simuladores baseados nos modelos de dispersão atmosférica, aprovados e referenciados por órgãos competentes, seja no Brasil ou no exterior.

Quando for adequada a utilização desses modelos, devem-se simular os piores cenários para fins de regulação (isto é, permissão de instalação e operação de uma indústria pelos órgãos ambientais).

Quando uma instalação industrial já está em funcionamento, outras metodologias podem ser empregadas para se obter maior acurácia como, por exemplo, o monitoramento on-line dos poluentes através de analisadores e amostradores.

O autor desta dissertação pretende utilizar um modelo de dispersão atmosférica do tipo gaussiano para averiguar os impactos das atividades de uma indústria petroquímica. Como estudo de caso, foi escolhido o complexo petroquímico do Rio de Janeiro (COMPERJ) devido à sua proximidade de uma área de proteção ambiental (APA de Guapimirim) e pelo fato desse complexo ainda estar no papel (projeto conceitual e básico).

Assim sendo, podem-se destacar os seguintes objetivos para este trabalho:

- Descrever os principais processos na indústria de refino de petróleo e petroquímico e os principais impactos dessas atividades sobre o ambiente atmosférico;
- Identificar dentre os processos de refino e petroquímico, aqueles que serão utilizados na primeira etapa de funcionamento do Complexo Petroquímico do Rio de Janeiro (COMPERJ), estudo de caso desta dissertação onde os simuladores AERMOD e OZIPR/SAPRC serão utilizados para prever os impactos ambientais atmosféricos das suas atividades na região;
- Descrever os tipos de modelos de dispersão de poluentes do ar existentes;
- Descrever o software AERMOD, cujo modelo foi desenvolvido pela USEPA e que é utilizado como ferramenta principal e obrigatória nos processos de regulação dos Estados Unidos da América (EUA);
- Descrever os modelos OZIPR e SAPRC para estimativa de formação do ozônio troposférico a partir das emissões de NO<sub>x</sub> e COVs;
- Apresentar os resultados da simulação, realizar uma comparação com os limites impostos pela legislação ambiental brasileira e os resultados apresentados pelo EIA/RIMA deste empreendimento.

Esta dissertação está estruturada em Revisão Bibliográfica, Metodologia, Resultados e Discussão, Conclusões e Referências Bibliográficas.

Na Revisão Bibliográfica, será apresentada a legislação vigente, os efeitos dos principais poluentes legislados, os processos de refino e petroquímico e sua relação com os poluentes atmosféricos emitidos e os processos do COMPERJ. Também será realizada uma revisão sobre os modelos de dispersão atmosférica disponíveis, apresentando o AERMOD (da USEPA), suas características, vantagens, desvantagens, similaridades e evoluções, além de um aprofundamento na modelagem matemática do AERMOD. Neste mesmo capítulo serão apresentados os detalhes dos modelos OZIPR e SAPRC para determinação da formação de ozônio na baixa atmosfera.

Na Metodologia, são apresentadas as premissas empregadas para realização das simulações tanto na utilização do AERMOD como na utilização do OZIPR/SAPRC, o levantamento de dados das emissões, topográficos e meteorológicos.

No capítulo Resultados e Discussões, são apresentados os resultados das simulações e uma comparação com os limites legais de cada poluente.

No último capítulo, são apresentadas as conclusões referentes à revisão bibliográfica e aos resultados das simulações.

## 1. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 1.1. Legislação

Os poluentes legislados são aqueles cujos efeitos sobre a saúde de plantas, animais e materiais foram documentados. Para eles existem legislação e monitores contínuos.

Estes poluentes são enquadrados em padrões primários e secundários. Os primeiros são valores para proteger a saúde com uma margem adequada de segurança, enquanto os últimos são valores designados para proteger o bem estar público (pessoas, animais, plantas, construções e visibilidade no ar).

Os poluentes legislados são: o ozônio, os óxidos de nitrogênio, dióxido de enxofre, monóxido de carbono, hidrocarbonetos totais, partículas inaláveis e partículas totais em suspensão.

Existe outra gama de poluentes, ditos não-legislados, que possuem importância na química da atmosfera e efeitos significativos na saúde e que, portanto, são tão importantes quanto os legislados. Podem-se citar os aldeídos, alcoóis, hidrocarbonetos específicos, hidrocarbonetos policíclicos aromáticos, metais etc.

Além disso, esses poluentes não regulados pela legislação ambiental podem vir a sê-lo pela segurança do trabalho, que possui como intento preservar a saúde do trabalhador e controlar a concentração dessas substâncias dentro dos limites da instalação industrial. É salutar sempre consultar as duas legislações.

Os padrões nacionais de qualidade do ar, apresentados na Tabela 1 são estabelecidos pela Resolução CONAMA nº 03, 1990.

Tabela 1 – Padrões Nacionais de Qualidade do Ar

<i>Poluentes</i>	<i>Tempo de Amostragem</i>	<i>Padrão Primário</i>	<i>Padrão Secundário</i>	<i>Método de Medição</i>
		$\mu\text{g m}^{-3}$	$\mu\text{g m}^{-3}$	
Partículas Totais em Suspensão (PTS)	24 horas <sup>(1)</sup> MGA <sup>(2)</sup>	240 80	150 60	Amostrador de grande volume

<i>Poluentes</i>	<i>Tempo de Amostragem</i>	<i>Padrão Primário</i> $\mu\text{g m}^{-3}$	<i>Padrão Secundário</i> $\mu\text{g m}^{-3}$	<i>Método de Medição</i>
Dióxido de Enxofre (SO <sub>2</sub> )	24 horas MAA <sup>(3)</sup>	365 80	100 40	Pararosanilina
Monóxido de Carbono (CO)	1 hora <sup>(1)</sup> 8 horas	40.000 10.000	40.000 10.000	Infravermelho não dispersivo
Ozônio (O <sub>3</sub> )	1 hora <sup>(1)</sup>	160	160	Quimiluminescência
Fumaça	24 horas <sup>(1)</sup> MAA <sup>(3)</sup>	150 60	100 40	Reflectância
Partículas Inaláveis (PM10)	24 horas <sup>(1)</sup> MAA <sup>(3)</sup>	150 50	150 50	Separação Inicial/Filtração
Dióxido de Nitrogênio (NO <sub>2</sub> )	1 hora <sup>(1)</sup> MAA <sup>(3)</sup>	320 100	190 100	Quimiluminescência

- (1) Não deve ser excedido mais que uma vez ao ano  
(2) Média Geométrica Anual  
(3) Média Aritmética Anual

Fonte: Resolução CONAMA nº3, 1990

Considerando uma série de problemas relativos à poluição atmosférica, a Resolução CONAMA nº 382, 2006, estabelece limites máximos de emissão de poluentes atmosféricos para fontes fixas dos segmentos industriais, citados em seus anexos. Cada anexo desta resolução é referente a um processo. Para o presente caso, o Anexo VI é o de maior importância por tratar de limites de emissão para poluentes atmosféricos dos processos de refino de petróleo em função da potência térmica nominal dos queimadores. A Tabela 2 faz um resumo deste anexo.

Tabela 2 – Resumo do Anexo VI da Resolução CONAMA nº 382, 2006

<b>Processo</b>	<b>Potência Térmica Nominal</b>	<b>MP</b> <i>(mg.Nm<sup>-3</sup>, em base seca e a 3% de oxigênio)</i>	<b>NO<sub>x</sub></b> <i>(como NO<sub>2</sub> em mg.Nm<sup>-3</sup>, em base seca e a 3% de oxigênio)</i>	<b>SO<sub>x</sub></b> <i>(Como SO<sub>2</sub> em mg.Nm<sup>-3</sup> em base seca e a 3% de oxigênio)</i>
Fornos e Caldeiras queimando gás de	< 10MW	150	320	70
	> 10MW e	125	320	70

<b>Processo</b>	<b>Potência Térmica Nominal</b>	<b>MP</b> <i>(mg.Nm<sup>3</sup>, em base seca e a 3% de oxigênio)</i>	<b>NOx</b> <i>(como NO<sub>2</sub> em mg.Nm<sup>-3</sup>, em base seca e a 3% de oxigênio)</i>	<b>SOx</b> <i>(Como SO<sub>2</sub> em mg.Nm<sup>-3</sup> em base seca e a 3% de oxigênio)</i>
refinaria	< 70MW			
	>70MW	50	200	70
Unidade de craqueamento catalítico	-	75	1200	600
Unidade de Recuperação de Enxofre	-	-	-	4,17 t/dia
Conversor de Amônia	-	-	720 mg Nm <sup>-3</sup> <i>(como NO<sub>2</sub>, em base seca e a 1% de oxigênio)</i>	-

Fonte: Resolução CONAMA nº 382, 2006

A Tabela 3 apresenta os limites de concentração e amostragem praticados pela legislação nacional e pela EPA (*Environmental Protection Agency*) dos EUA. Estas duas fontes estarão sendo utilizadas no capítulo de resultados para verificar o enquadramento das emissões do COMPERJ pelas duas legislações.

Tabela 3 – Poluentes e seus limites no CONAMA e EPA

<b>Poluentes</b>	<b>Tempo de Amostragem h</b>	<b>Padrão CONAMA µg m<sup>-3</sup></b>	<b>Padrão EPA µg m<sup>-3</sup></b>
PTS	24	240	
SO <sub>2</sub>	24	365	365
CO	1	40000	40000
	8	10000	10000
O <sub>3</sub>	1	160	235
	8	160	157
PM10	24	150	150
NO <sub>2</sub>	1	320	100
HCNM	3		160

A Resolução CONAMA nº 03, 1990, determina ainda a criticidade dos poluentes. Esta criticidade é classificada nos níveis de atenção, alerta, emergência e crítico para que providências sejam tomadas para salvaguarda da população e do meio ambiente. A Tabela 4 apresenta essas informações.

Tabela 4 – Níveis de criticidade dos Poluentes

<b>Poluente</b>	<b>Unidade</b>	<b>Atenção</b>	<b>Alerta</b>	<b>Emergência</b>	<b>Crítico</b>
SO <sub>2</sub>	µg m <sup>-3</sup>	800	1600	2100	2620
PI	µg m <sup>-3</sup>	250	420	500	600
CO	ppm	15	30	40	50
O <sub>3</sub>	µg m <sup>-3</sup>	200	800	1000	1200
NO <sub>2</sub>	µg m <sup>-3</sup>	1130	2260	3000	3750

Fonte: Resolução CONAMA nº3, 1990

## 1.2. Licenciamento Ambiental

No Estado do Rio de Janeiro, a autorização, localização, ampliação e operação de empreendimentos e atividades utilizadores de recursos ambientais considerados efetiva ou potencialmente poluidores e aqueles capazes, sob qualquer forma, de causar degradação ambiental são de responsabilidade do INEA através do procedimento de licenciamento ambiental. (INEA, 2009)

De acordo com o INEA (2009), o Sistema de Licenciamento de Atividades Poluidoras (SLAP) foi instituído pelo Decreto estadual nº 1.633, de 21 de dezembro de 1977, em consonância com o Decreto-lei nº 134, de 16 de junho de 1975, alterados em parte pela Lei estadual nº 5101, de 04 de outubro de 2007, que criou o Instituto Estadual do Ambiente – INEA. Neste sistema, há três fases de licenciamento correspondendo a um tipo de licença: LP (licença prévia), LI (licença de instalação) e a LO (licença de operação).

Na fase de licença prévia é autorizada a localização do empreendimento, com base nos planos federais, estaduais e municipais de uso do solo, e estabelece os requisitos básicos a serem obedecidos nas fases subsequentes. Ainda nesta fase, para os empreendimentos de grande magnitude ou impacto ambiental significativo são exigidos o seu EIA/RIMA (Estudo de Impacto Ambiental e Relatório de Impacto Ambiental) conforme disposto na Resolução Conama nº 001, de 23/01/1986, e na Lei Estadual nº 1.356/88 e suas alterações, e DZ-0041-

R-13 – “Diretriz para Realização de Estudo de Impacto Ambiental - EIA e do respectivo Relatório de Impacto Ambiental – Rima” (INEA, 2009).

O artigo 1º da Lei nº 1.356, de 03 de outubro de 1988 define quais empreendimentos dependerão da apresentação do EIA/RIMA para requerimento da LP. Além deste artigo, a CECA (Comissão Estadual de Controle Ambiental - órgão colegiado formado por representantes do INEA, IBAMA, UERJ, FIRJAN e CREA-RJ) pode determinar que certo empreendimento específico deverá elaborar o seu EIA/RIMA.

INEA (2009) orienta a realização de cada EIA por instrução técnica específica seguindo os critérios da DZ-041 – “Diretriz para Realização de Estudo de Impacto Ambiental - EIA e do Respectivo Relatório de Impacto Ambiental – RIMA”.

Para o COMPERJ, na época a FEEMA (então INEA) criou a instrução técnica específica DECON Nº 1/2007<sup>1</sup> para o empreendimento. Neste documento, a simulação de plumas de poluentes atmosféricos deve atender as seguintes premissas:

- Utilização de modelo de simulação, sendo recomendado o modelo regulatório do US-EPA, em sua última versão;
- Série mínima de três anos consecutivos de dados meteorológicos, representativos da região do empreendimento;
- Características topográficas da região;
- Grade cartesiana com resolução de 500 x 500 metros em coordenadas UTM;
- Base cartográfica em escala adequada, em coordenadas UTM, que permita a sobreposição das saídas gráficas do modelo;
- Raio mínimo de 20.000 metros ao redor da fonte;
- Realização de análise crítica sobre os resultados obtidos na modelagem em relação à qualidade do ar, apresentando, para cada poluente, tabelas contendo os valores das 30 maiores concentrações máximas de curto período e das 10 maiores concentrações médias de longo período, com as respectivas localizações;

---

<sup>1</sup> Disponível no endereço <http://www.feema.rj.gov.br/IT/IT%2001-2007%20COMPERJ.pdf> e acessado no dia 6 de novembro de 2009.

- Utilização dos dados de projeto fornecidos pelo fabricante do equipamento e, na sua ausência, estimativas por fatores de emissão com base na última versão do US-EPA AP 42, para o cálculo das emissões;
- Fornecimento em meio digital: memorial de cálculo contendo os dados de entrada e saída do modelo, fatores de emissão utilizados, comprovados por documentação pertinente, cálculos de emissão e respectivas transformações de unidades, informações sobre a topografia considerada e arquivo meteorológico utilizado para modelagem;
- Caracterização dos poluentes tradicionais previstos na Resolução CONAMA nº03/90, além de HC total, COV e BTX; e
- Considerar vários cenários:
  - Unidades individualmente;
  - Todas as unidades conjuntamente;
  - Além das unidades próprias, as de transformação de terceiros;
  - Além das unidades próprias, as de transformação de terceiros e os impactos da alteração do sistema viário; e
  - Cenário anterior para os próximos 10 anos.

### **1.3. Principais poluentes legislados e seus efeitos**

Neste item são apresentados os efeitos causados pelos poluentes legislados, principais fontes de emissão nos EUA e no RJ.

#### **NO<sub>x</sub> - Óxidos de nitrogênio**

Há várias definições para NO<sub>x</sub> e, cabe ressaltar que há outras variantes do termo (NO<sub>y</sub>, NO<sub>z</sub> e NH<sub>y</sub>, por exemplo) representando outros subgrupos de compostos nitrogenados. Para WHO(2000), NO<sub>x</sub> representaria todas as gamas de compostos nitrogenados sendo o NO<sub>2</sub>, o mais importante e representativo deles. Para EPA<sup>2</sup>, há a classificação de NO<sub>x</sub>

---

<sup>2</sup> Informação disponível em <http://www.epa.gov/air/oaqps/pams/analysis/noy/noxtxt.html#analyses> e acessado no dia 6 de novembro de 2009.

(representando  $\text{NO} + \text{NO}_2$ ),  $\text{NO}_y$  (representando os  $\text{NO}_x$ ,  $\text{HNO}_3$ , nitratos orgânicos e inorgânicos) e  $\text{NO}_z$  (produtos de oxidação dos  $\text{NO}_x$ ). Segundo CONAMA, pela resolução nº 382 de 26 de dezembro de 2006,  $\text{NO}_x$  se refere a soma das concentrações de monóxido de nitrogênio e dióxido de nitrogênio sendo expresso como dióxido de nitrogênio.

São produzidos sempre que um combustível é queimado em presença de ar em uma chama quente. Quando submetido a altas temperaturas, parte do nitrogênio e oxigênio gasosos se combinam para formar óxido nítrico ( $\text{NO}$ ). Gradualmente este óxido nítrico é oxidado por elementos da atmosfera, como o ozônio, para formar dióxido de nitrogênio ( $\text{NO}_2$ ). Conseqüentemente, esta é a rota mais significativa na produção deste gás (WHO, 2000 e 2005).

Para reduzir a produção de  $\text{NO}_x$ , segundo Baird (2002), algumas usinas termelétricas nos EUA utilizam queimadores especiais projetados para operar com baixa temperatura de chama. Além disso, a formação de  $\text{NO}_x$  pode ser bastante reduzida pela realização de combustão em estágios: No primeiro estágio, de alta temperatura, a queima é estequiométrica com o ar; no segundo estágio, de baixa temperatura, é fornecido excesso de ar para garantir a queima completa. Outras usinas, ainda Baird (2002), principalmente no Japão e na Europa, foram adaptadas com versões em larga escala de conversores catalíticos, com o objetivo de transformar  $\text{NO}_x$  em  $\text{N}_2$  antes de liberar os gases da queima no ar.

O  $\text{NO}_x$  é responsável por: eutrofização de ambientes aquáticos; formação de ozônio troposférico junto com os COVs; aquecimento global através do  $\text{N}_2\text{O}$ , um importante gás de efeito estufa; problemas respiratórios quando na forma de névoa; e em altas concentrações, pode agravar o quadro para edemas pulmonares, além de poluição visual quando na forma de partículas de nitrato.

O maior problema ambiental referente ao  $\text{NO}_x$  é a deposição ácida. O  $\text{NO}_x$  é convertido a ácido nítrico e só é neutralizado ao encontrar uma rocha alcalina no solo.

Segundo USEPA (2003), nos EUA, as fontes de emissão estão distribuídas da seguinte forma: 56% veículos, 22% energia, 17% combustão industrial, comercial e residencial e 5% por outras fontes.

Segundo FEEMA (2007), na região metropolitana do RJ, as fontes de emissão estão distribuídas da seguinte forma: 66,50% por fontes móveis e 33,48% por fontes fixas. Nas fontes fixas, o setor petroquímico é responsável por 38,00% e o setor de geração elétrica por 46,32%

## SO<sub>x</sub> - Óxidos de Enxofre

Os principais compostos de enxofre na atmosfera são o SO<sub>2</sub>, SO<sub>3</sub>, H<sub>2</sub>S e H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>.

Segundo Baird (2002), a principal fonte antrópica de SO<sub>2</sub> é a combustão de carvão, um sólido que, dependendo da área geográfica de onde é extraído, contém de 1 a 9% de enxofre.

Cabe salientar outros setores industriais (BAIRD, 2002):

- A indústria de petróleo emite dióxido de enxofre no ar diretamente como SO<sub>2</sub> ou indiretamente como H<sub>2</sub>S quando o petróleo é refinado e o gás natural purificado antes da distribuição. A reação de Claus é normalmente empregada nas refinarias para converter H<sub>2</sub>S e SO<sub>2</sub> em S sólido, uma substância benigna do ponto de vista ambiental.
- A indústria de polpa celulósica e papel possui o H<sub>2</sub>S também como um poluente comum nas suas emissões.
- A indústria de metais não-ferrosos é grande fonte pontual de SO<sub>2</sub>, pois muitos metais ocorrem na natureza na forma de minérios à base de sulfeto.

Quando a emissão de SO<sub>2</sub> é concentrada, torna-se viável a passagem do gás sobre um catalisador para promover a oxidação a SO<sub>3</sub> (trióxido de enxofre), seguido de adição de água para produção de ácido sulfúrico concentrado comercial e; já no caso de emissão diluída de SO<sub>2</sub>, este pode ser removido através do uso de carbonato de cálcio ou óxido de cálcio nas formas de sólido úmido pulverizado, pasta sólida úmida ou partículas finas. O resultado final é sulfito ou sulfato de cálcio que pode ser destinado para aterros ou ser tratado para ser vendido como gesso. (BAIRD, 2002)

O maior problema ambiental referente ao SO<sub>x</sub> é a chuva ácida. O SO<sub>x</sub> é convertido a ácido sulfúrico e só é neutralizado, assim como os NO<sub>x</sub>, ao encontrar uma rocha alcalina no solo.

Os problemas de saúde mais sérios são causados pela combinação de altas concentrações de material particulada, dióxido de enxofre e seus poluentes secundários.

Segundo FEEMA (2007), na região metropolitana do RJ, as fontes de emissão estão distribuídas da seguinte forma: 11,85% por fontes móveis e 88,15% por fontes fixas. Nas fontes fixas, o setor petroquímico é responsável por 50,50% e o setor de geração elétrica por 36,53%

## **CO – Monóxido de Carbono**

Segundo a WHO (2000), o Monóxido de Carbono (CO) é um gás incolor e inodoro, pouco solúvel em água e menos denso que o ar. Além disso, reage imediatamente com a hemoglobina formando a carboxiemoglobina, a qual reduz a capacidade transportadora de oxigênio pelo sangue até as células. A exposição ao monóxido de carbono é responsável por um grande número de eventos fatais.

As emissões, ainda WHO (2000) seriam de 2.600 milhões de toneladas anuais onde 60% seriam de atividades humanas e o restante de processos naturais.

A poluição com monóxido de carbono antropogênica se deve principalmente à combustão de material carbonáceo com deficiência de oxigênio, onde a maior parte das emissões seriam provenientes dos veículos com motores de combustão interna que trafegam pelas cidades. Outras fontes seriam os vários processos industriais, termelétricas a carvão e incineradores de resíduo. Cabe ressaltar o seu papel na poluição do ar de interiores, onde sua geração se deve aos aquecedores a óleo, gás e querosene, fogões a gás e a lenha e o hábito do fumo (WHO, 2000).

Segundo FEEMA (2007), na região metropolitana do RJ, as fontes móveis são responsáveis por 98,00% das emissões.

## **COV – Compostos Orgânicos Voláteis**

Este é outro termo, como o NOx, que possui várias definições distintas: Segundo a EPA<sup>3</sup>, entende-se por compostos orgânicos voláteis qualquer composto de carbono, excluindo-se monóxido de carbono, dióxido de carbono, ácido carbônico, carbeto metálico e carbonatos, que participam das reações fotoquímicas atmosféricas. Já WHO (2005) considera COV como todos os hidrocarbonetos e compostos de carbono que existem na atmosfera na fase vapor.

A fonte predominante, segundo WHO (2005), é tipicamente o vazamento de sistemas pressurizados (metano e gás natural), a evaporação de líquidos combustíveis dos

---

<sup>3</sup> Informação disponível em [http://www.epa.gov/ttn/naaqs/ozone/ozonetech/def\\_voc.htm](http://www.epa.gov/ttn/naaqs/ozone/ozonetech/def_voc.htm) e acessado no dia 6 de novembro de 2009

tanques dos veículos e a combustão incompleta veicular e industrial de combustíveis e dos processos de incineração.

Os efeitos dos COVs ao meio ambiente e a saúde humana vão desde irritação da mucosa, problemas hematológicos, hepáticos e renais até problemas neurológicos. Além disso, alguns COVs são responsáveis pela degradação do ozônio estratosférico, aumento do efeito estufa e formação de ozônio troposférico.

A legislação da segurança do trabalho brasileira possui um interesse especial para os compostos de benzeno, tolueno, etilbenzeno e xileno, conhecidos como BTEX, por apresentarem altos índices de toxicidade. Esta informação, como de outros diversos químicos, está disponível na NR-15, anexo 11 no *site* do MTE (Ministério do Trabalho e Emprego). Outra possível fonte seria o material atualizado da ACGIH (*American Conference of Industrial Hygienists*) disponível para aquisição no seu *site*.

Segundo USEPA (2003), nos EUA, as fontes de emissão estão distribuídas da seguinte forma: 50% por processos comerciais e industriais, 45% por veículos e 5% por utilização de solventes.

Segundo FEEMA (2007), na região metropolitana do RJ, as fontes de emissão estão distribuídas da seguinte forma: 67,34% por fontes móveis e 32,66% por fontes fixas. Nas fontes fixas, o setor petroquímico é responsável por 89,71% das emissões.

### **MP – Material Particulado**

O material particulado pode ser definido como partículas finas de sólidos ou líquidos que se encontram suspensas no ar, em geral invisíveis, individualmente, a olho nu (BAIRD, 2002).

São classificados qualitativamente como grossas ou finas (quando maior ou menor que 2,5  $\mu\text{m}$  respectivamente) e podem ser monitoradas como MP<sub>10</sub>, concentração total, usualmente em  $\mu\text{g m}^{-3}$ , de todas as partículas menores que 10 $\mu\text{m}$ , o que corresponde a faixa das partículas inaláveis; como MP<sub>2,5</sub>, que corresponde às partículas finas respiráveis; e como PTS (particulados totais em suspensão), concentração de todos os particulados no ar.

As principais fontes de emissão destes materiais são, no caso dos materiais mais grossos, de origem natural. Nas zonas rurais, este material se resume a desintegração de rochas, portanto, material formado basicamente por silicatos; já nas proximidades oceânicas, a spray salino; e em outras áreas, ao pólen liberado pelas plantas e as partículas de cinzas

vulcânicas. Já para os materiais finos, as principais fontes são antropogênicas por conta de reações químicas e da coagulação de partículas ainda menores. Cita-se como exemplo, a queima incompleta de combustíveis à base de carbono, principalmente a exaustão de veículos motores, e com destaque para aqueles movidos a motor ciclo diesel (BAIRD, 2002).

As partículas finas são mais prejudiciais a saúde humana por conta, segundo Baird (2002), dos seguintes pontos:

- Os particulados finos permanecem pelo ar durante dias ou semanas, enquanto que as partículas mais grossas se depositam quase que instantaneamente;
- As partículas grossas são filtradas de modo eficiente pelo nariz e pela garganta não alcançando os pulmões;
- Para uma mesma quantidade de material, a área superficial do material particulado fino é superior ao do material particulado grosso, apresentando por tanto uma capacidade muito superior de carrear moléculas de gás adsorvido até os órgãos do sistema respiratório.
- Os dispositivos para filtrar material particulado (precipitadores eletrostáticos e filtros de manga) são mais eficientes quanto maior o diâmetro dessas partículas.

Segundo FEEMA (2007), na região metropolitana do RJ, as fontes de emissão estão distribuídas da seguinte forma: 42,39% por fontes móveis e 57,61% por fontes fixas. Nas fontes fixas, o setor petroquímico é responsável por 20,00% e o setor de geração elétrica por 51,00%

### **Ozônio**

O  $O_3$  não é emitido diretamente no ar, mas surge como poluente secundário através de reações fotoquímicas entre óxidos de nitrogênio ( $NO_x$ ) e compostos orgânicos voláteis (COV) na presença de luz (USEPA, 2003).

O  $O_3$  é formado pela recombinação do oxigênio molecular com um átomo de oxigênio, que é produzido pela fotólise do  $NO_2$ , que resulta no átomo de oxigênio e na molécula de NO. Em uma via inversa, NO reage com  $O_3$  reconduzindo à  $O_2$  e  $NO_2$  e este ciclo é controlado pela luz solar e sua taxa líquida mantém o nível de  $O_3$  relativamente constante. Entretanto, a oxidação de COVs, quando em níveis consideráveis, forma radicais peroxi que

fazem a transformação do NO a NO<sub>2</sub> sem destruir as moléculas de O<sub>3</sub>, causando uma perturbação no equilíbrio fotoquímico, o que resulta em um incremento de O<sub>3</sub> (WHO, 2005).

Os COVs exercem uma grande influência na formação de O<sub>3</sub>, e cada COV individual contribui de forma diferente, o que será mostrado adiante no item 1.7. Quando a razão COV/NO<sub>x</sub> é baixa, a taxa de formação de O<sub>3</sub> é controlada pelos COVs e; quando a razão COV/NO<sub>x</sub> é alta, o controle é feito pelos NO<sub>x</sub>.

Problemas relatados sobre o O<sub>3</sub> são: não-desenvolvimento das colheitas, fragilização dos vegetais, danos nas folhas de uma planta, endurecimento de borrachas, branqueamento de cores de determinados artigos, piora nos quadros sintomáticos das pessoas asmáticas, irritações de vias aéreas, dificuldades respiratórias e escoriações na pele. (USEPA, 2003).

Para evitar a sua formação, a quantidade de poluentes primários emitidos no ar, principalmente NO<sub>x</sub> e hidrocarbonetos deve ser reduzida. No caso dos hidrocarbonetos, atenção especial deve ser dada a aqueles que contenham ligações duplas.

#### **1.4. Processos de refino e petroquímico e seus poluentes**

Antes do aprofundamento no estudo da dispersão atmosférica, cabe um breve descritivo sobre os processos de refino e petroquímicos e seus impactos na qualidade do ar.

##### **1.2.1. Refino**

Segundo Lora (2002), as principais emissões gasosas de uma indústria de refino de petróleo seriam SO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S, NH<sub>3</sub>, NO<sub>x</sub>, CO, hidrocarbonetos, mercaptanas, ácidos, aldeídos, cetonas e substâncias orgânicas carcinogênicas. As caldeiras e fornos industriais, presente em qualquer processo químico, seriam responsáveis pelas emissões de NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub>, CO, aldeídos, ácidos orgânicos e benzopireno. Ou seja, as fontes principais desses poluentes são as numerosas operações de aquecimento e a geração de vapor, processos que envolvem reações de combustão.

O refino de petróleo é constituído por processos físicos, térmicos e químicos para separação do óleo cru (petróleo) nas suas principais frações, as quais são depois tratadas através de uma série de etapas de separação e conversão. Os produtos primários dessa indústria são classificados dentro das seguintes categorias (CHERESEMINOF, 2002):

- Combustível (gasolina, diesel, óleo combustível, GLP, gasolina para aviação, óleo combustível residual, querosene e coque);
- Produtos finais não-combustíveis (solventes, óleos lubrificantes, graxas, ceras, asfalto e coque);e
- Insumos petroquímicos (nafta, etano, propano, butano, etileno, propileno, butadieno, benzeno, tolueno e xileno) utilizados na produção de fertilizantes, pesticidas, tintas, graxas, *thinners*, solventes, material de limpeza, detergentes, refrigerantes, anti-congelantes, resinas, selantes, isolantes, borrachas, plásticos e fibras sintéticas.

Segundo Chereseminof (2002), nos EUA, cerca de 90% dos produtos do petróleo utilizados são da categoria de combustíveis e 43% desse total é gasolina. Já no Brasil, em 2007, cerca de 95% dos produtos do petróleo utilizados são da categoria de combustíveis e 18% desse total é gasolina, segundo o Balanço Energético Nacional, BEN (2008).

O óleo cru (petróleo) é uma mistura de diferentes hidrocarbonetos e de pequenas quantidades de impurezas. A composição do óleo cru pode variar significativamente dependendo da sua fonte e, por isso, as refinarias de petróleo são sistemas complexos de múltiplas operações, as quais dependem das propriedades do óleo cru e dos produtos finais desejados. Dessa forma, duas refinarias nunca são iguais.

As principais operações unitárias são brevemente descritas a seguir e, quando aplicável, as emissões atmosféricas que são originárias da sua atividade são listadas segundo Chereseminof (2002):

**Dessalinização:** tratamento para remoção de sais corrosivos. Este processo envolve a mistura de óleo cru quente com água, na proporção de 3 a 10%, para que os sais sejam dissolvidos na fase aquosa.

**Destilação Atmosférica:** o óleo cru dessalgado é aquecido por baterias de trocador e fornalha a quase 400°C e segue para uma coluna de destilação submetida a pressão atmosférica. Quase toda a alimentação é vaporizada e separada em várias frações através de condensação nos 30 a 50 pratos existentes dentro dessa coluna. Pequenas colunas laterais (*side-stripper*) de 10 pratos com injeção de vapor ajudam a melhorar a separação dos produtos retirados nos pratos laterais da coluna.

As frações obtidas neste processo unitário seriam nafta, gasolina, querosene, óleo combustível leve, óleo diesel, gasóleo, lubrificantes, produto de fundo pesado, que será utilizado em outros processos, e gás de refinaria não condensável formado basicamente por metano e etano.

As emissões atmosféricas desse processo unitário são as resultantes do processo de queima de combustíveis nas fornalhas para aquecimento do óleo e as emissões fugitivas.

**Destilação a vácuo:** as frações pesadas da destilação atmosférica são a alimentação deste processo. O princípio da destilação a vácuo é similar a destilação atmosférica com a diferença de não utilizar colunas *stripper* e aplicar vácuo de 1379 a 4826 Pa para aumentar a volatilização e a separação.

As principais fontes de emissões desse processo são: a queima de combustíveis na fornalha e alguns leves (gases) que escapam do topo do condensador.

**Craqueamento Térmico (Visco-redução):** este processo usa calor e pressão para quebrar moléculas grandes de hidrocarbonetos em moléculas mais leves, menores. Esse processo tem sido largamente substituído pelo craqueamento catalítico e muitas refinarias não o utilizam mais por ser economicamente inviável.

As emissões atmosféricas dessa operação unitária são as resultantes da queima de combustíveis nas fornalhas para aquecimento do óleo e as emissões fugitivas.

**Coqueamento:** é um processo unitário utilizado para reduzir a produção de óleo combustível de baixo valor agregado em combustíveis mais nobres como gasolina e diesel. Além desses produtos, gera coque (material essencialmente carbono, sólido, com algumas impurezas) que pode ser utilizado em siderúrgicas e indústrias galvânicas.

Dentro da categoria de coqueamento, há diferentes processos, cabendo ressaltar o coqueamento retardado e o coqueamento fluidizado.

As emissões atmosféricas desse processo unitário incluem queima de combustível, as emissões fugitivas e os particulados, estes quando da remoção de coque do processo.

**Craqueamento catalítico:** este processo utiliza calor, pressão e catalisador do tipo zeólita para quebrar moléculas grandes em menores. Ele vem substituindo o craqueamento térmico por ser capaz de produzir mais gasolina com alto valor de octanas e menos óleo combustível e gases.

Há inúmeros tipos de processo de craqueamento catalítico, dentre os quais se pode citar os processos com reator de leito fixo, reator de fluido móvel e reator de leito fluidizado.

O craqueamento catalítico é a fonte mais significativa de poluição atmosférica dentro de uma refinaria. A poluição por esse processo engloba: emissões por queima de combustível, emissões fugitivas, e, principalmente, emissões durante a regeneração do catalisador. Nesta última, altas concentrações de monóxido de carbono são geradas e devem ser convertidas a dióxido de carbono em um regenerador ou aquecedor.

**Hidro craqueamento catalítico e Hidrotratamento:** o primeiro processo utiliza um reator de craqueamento catalítico em leito fixo sobre pressão de 8,3 a 13,8 MPa na presença de hidrogênio. A matéria-prima utilizada são as correntes de difícil craqueamento, onde não é possível empregar eficientemente a unidade de craqueamento catalítico.

Como o catalisador do hidro craqueamento pode ser desativado por certos contaminantes, a corrente que alimenta esse processo deve ser tratada no hidrotratamento, onde amônia e ácido sulfídrico são eliminados.

As emissões atmosféricas desses processos são resultantes da queima de combustíveis nas fornalhas para aquecimento do óleo e emissões fugitivas. Como os catalisadores são regenerados fora da refinaria, o processo de regeneração não gera emissões nos entornos da refinaria.

**Alquilação:** processo que tem como objetivo aumentar a octanagem de uma corrente através da junção de uma olefina a uma isoparafina através do uso de ácido sulfúrico como catalisador. As emissões atmosféricas desse processo se resumem em emissões fugitivas.

**Isomerização:** processo que tem como objetivo aumentar a octanagem de uma corrente através do rearranjo na geometria das moléculas sem remover ou adicionar nenhum átomo novo a estas moléculas. Tipicamente, parafinas são convertidas em isoparafinas na presença de catalisador adequado sob temperaturas de até 200°C.

Emissões atmosféricas são originárias de queima de combustível nos fornos e emissões fugitivas.

**Polimerização:** este processo é ocasionalmente utilizado para conversão de propano e butano em componentes que aumentam a octanagem da gasolina. A corrente de alimentação do processo é lavada com soda cáustica para remoção de mercaptanas. O processo de polimerização é realizado a altas pressões na presença de ácido fosfórico (catalisador).

Emissões de dióxido de enxofre podem ocorrer durante o processo de lavagem cáustica.

**Reforma Catalítica:** a reforma catalítica é o processo pelo qual uma corrente com baixa octanagem (gasolina ou nafta) é convertida para uma corrente com alta octanagem devido à formação de compostos aromáticos. Várias reações ocorrem durante o processo, dentre as quais se destacam a desidrogenação de naftenos a aromáticos, a desidrociclicização de parafinas a aromáticos, a isomerização e o hidro craqueamento. Esse processo emprega uma

série de três a seis reatores com leito fixo ou leito fluidizado. Devido às restrições pela presença de benzeno na gasolina, a reforma está cada vez menos em uso pelo mundo afora.

As emissões atmosféricas se resumem à queima de combustível nos fornos e às emissões fugitivas que podem conter benzeno, um sério risco ocupacional por ser carcinogênico, ocasionando leucopenia.

**Tratamento Químico:** no refino de petróleo, o tratamento químico é utilizado na remoção ou alteração das propriedades indesejáveis associadas aos compostos de enxofre, nitrogênio ou oxigênio. Exemplos são a extração de enxofre das frações leves do petróleo (propano, propileno, butano e butileno) e o adoçamento para as frações da gasolina e do diesel. Entende-se por adoçamento o processo segundo o qual há a conversão de mercaptanas em dissulfeto, ou seja, o enxofre não é removido da fração, mas convertido a um composto com características mais desejáveis (no caso, ausência de odor).

Nesses processos, a emissão atmosférica se resume a emissões fugitivas que podem conter dissulfetos.

### 1.2.2. Petroquímica

A Figura 1 apresenta um paralelo entre os precursores obtidos pelo petróleo, gás natural e o carvão mineral, e os respectivos intermediários que servem como base para a produção de toda a indústria química mundial. A fonte a ser utilizada, petróleo, gás, ou carvão será sempre função da viabilidade econômica de sua logística, processamento e, infelizmente, em menor escala, do impacto ambiental.

Um processo leva o nome de petroquímico quando o produto final for originário do petróleo, ou seja, do processo de refino. Para os casos de gás natural e carvão mineral, empregam-se, respectivamente, os termos gasquímico e carboquímico.

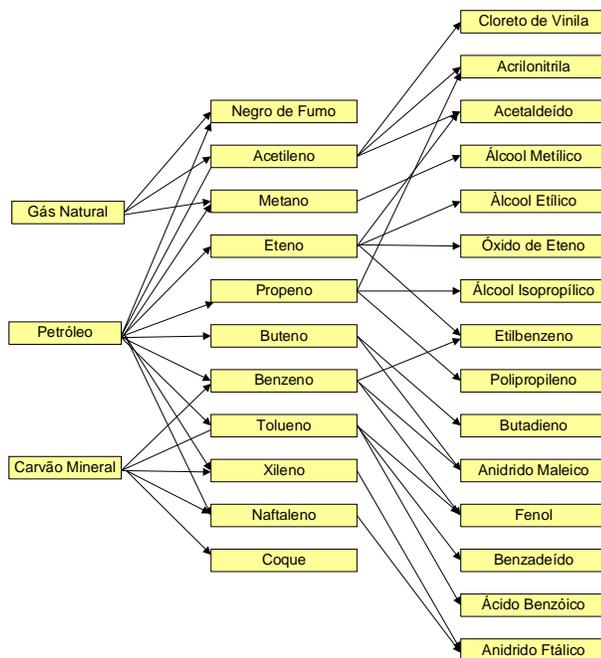


Figura 1 – Precursores obtidos pelo Gás Natural, Petróleo e Carvão Mineral.

Fonte: Shreve e Brink (1977)

As Figuras 2, 3, 4 e 5 apresentam, para fins de exemplos, os diversos intermediários obtidos a partir do metano, eteno, propeno, buteno e BTEX, os precursores petroquímicos mais importantes. Diante disso, a partir de uma refinaria que tem o objetivo de fornecer insumo para outras indústrias ao seu redor, tem-se idéia da grande diversidade do parque industrial que se pode formar, ou seja, um complexo, no sentido *stricto sensu* da palavra.



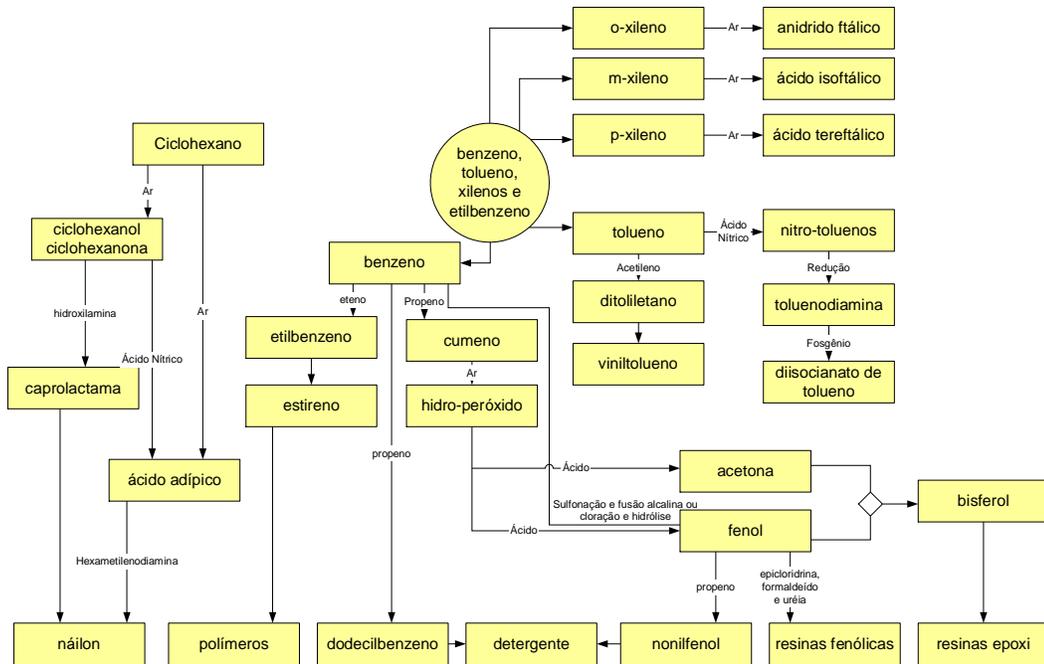


Figura 4 – Intermediários petroquímicos obtidos através do BTEX.

Fonte: Shreve e Brink (1977)

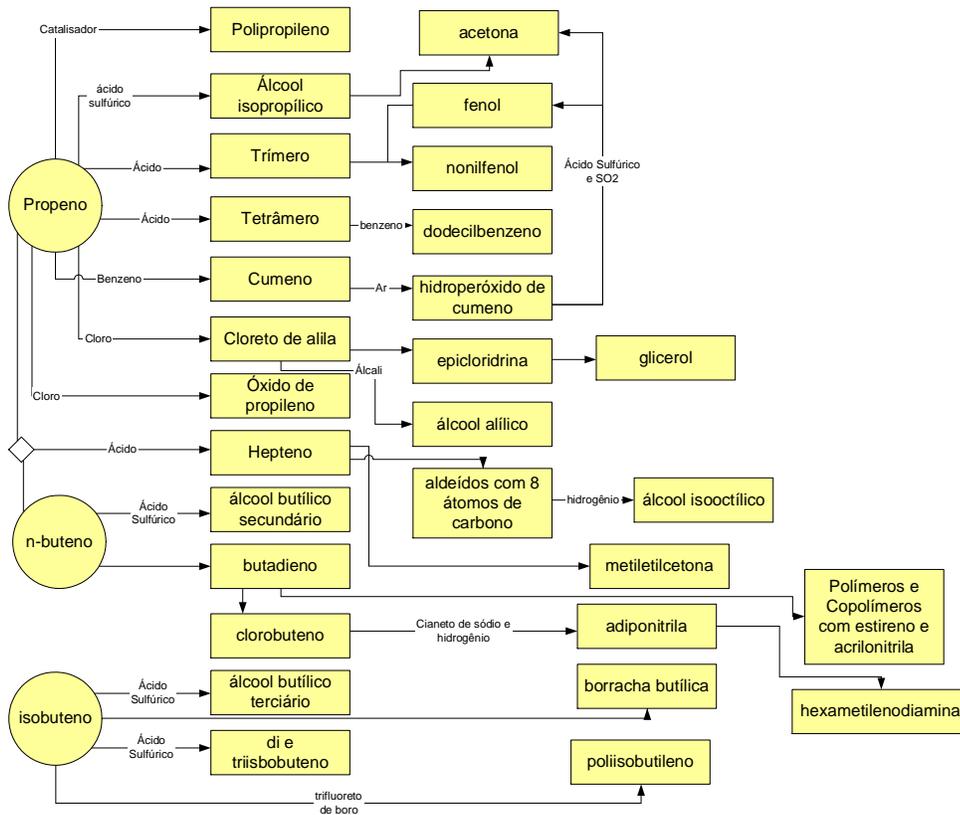


Figura 5 – Intermediários petroquímicos obtidos através do BTEX.

Fonte: Shreve e Brink (1977)

Como pode ser visto nas descrições anteriores de todos os processos de uma refinaria (o mesmo raciocínio pode ser usado para os processos petroquímicos), focando o tema poluição atmosférica, as emissões decorrentes dos processos de queima de combustível para aquecimento em fornos e caldeiras e as emissões evaporativas e fugitivas são os maiores problemas.

A Tabela 5 (LORA, 2002) apresenta uma estimativa de emissão para processos de queima em fornos e caldeiras para alguns combustíveis.

Ainda Lora (2002) apresenta a quantidade de poluentes gasosos emitidos em uma refinaria de petróleo, de acordo com informações do Banco Mundial em 1997 (Tabela 6). Esta informação pode ser interessante em uma análise preliminar utilizando os modelos de dispersão para analisar o impacto de uma refinaria em determinado local.

Tabela 5 – Fator de emissão de poluentes gasosos por combustível.

<b>Combustível e aplicação</b>	<b>SOx</b>	<b>NOx</b>	<b>CO</b>
Diesel em caldeiras industriais	17,04 kg de S m <sup>-3</sup>	2,4 kg m <sup>-3</sup>	0,6 kg m <sup>-3</sup>
Gás Natural em caldeiras de grande capacidade com queima frontal	-	4480.10 <sup>-6</sup> kg m <sup>-3</sup>	1344.10 <sup>-6</sup> kg m <sup>-3</sup>
Gás Natural em caldeiras de grande capacidade com queima tangencial	-	2720.10 <sup>-6</sup> kg m <sup>-3</sup>	384.10 <sup>-6</sup> kg m <sup>-3</sup>

Fonte: Lora(2002)

Tabela 6 – Fator de emissão de poluentes gasosos em uma refinaria de petróleo.

<b>Poluentes</b>	<b>Fator de Emissão</b>
Particulados	0,1 a 3,0 kg (t de óleo cru) <sup>-1</sup> 0,2 a 6,0 kg (t de óleo cru) <sup>-1</sup>
SOx	0,1 kg (t de óleo cru) <sup>-1</sup> para refinaria com unidades de recuperação de enxofre pelo processo Clauss.
NOx	0,3kg (t de óleo cru) <sup>-1</sup>
BTX	2,5 kg (t de óleo cru) <sup>-1</sup>
COV	1 kg (t de óleo cru) <sup>-1</sup>

Fonte: Lora (2002)

### 1.5. O complexo petroquímico do Rio de Janeiro - COMPERJ

O complexo petroquímico do Rio de Janeiro (COMPERJ), conforme informado em seu Relatório de Impacto Ambiental - RIMA (2007) será composto, na primeira fase do empreendimento, por:

- Uma refinaria, denominada de Unidade Petroquímica Básica - UPB, onde ocorrerá a separação de petróleo, óleo pesado do campo Marlin, em frações, e
- Uma central petroquímica, denominada de Unidade Petroquímica Associada - UPA, que compreenderá um conjunto de unidades geradoras de produtos petroquímicos básicos e de matéria-prima para produção de polímeros.

Este complexo será instalado no município de Itaboraí no Rio de Janeiro, no baixo rio Macacu e rio Caceribu em uma área de 45 km<sup>2</sup>, devendo afetar economicamente uma região já intitulada de CONLESTE, formada pelos municípios de Itaboraí, São Gonçalo, Cachoeiras de Macacu, Casimiro de Abreu, Guapimirim, Niterói, Magé, Maricá, Rio Bonito, Silva Jardim e Tanguá.

Segundo o RIMA (2007), o objetivo desse complexo será a produção de 2,3.10<sup>6</sup> t ano<sup>-1</sup> de resinas plásticas de três tipos: polietileno, polipropileno e poli(tereftalato de etila) (PET) consumindo 1,3.10<sup>6</sup> t ano<sup>-1</sup> de eteno e 880.10<sup>3</sup> t de propeno. Além dessas resinas plásticas, serão produzidos outros petroquímicos (ácido tereftálico – TPA, glicol etilênico,

benzeno, estireno e butadieno) e produtos de refinaria (óleo diesel, nafta, coque e enxofre). A Tabela 7, retirada do RIMA (2007), apresenta com maiores detalhes essa produção.

Tabela 7 – Produção planejada para o COMPERJ.

<b>Produtos</b>	<b>Produção (<math>10^3</math> t ano<sup>-1</sup>)</b>
Diesel	535
Nafta	284
Coque	700
Eteno	1.300
Propeno	881
Benzeno	608
Butadieno	157
p-Xileno	700
Enxofre	45
Polipropileno	850
Polietileno	800
Estireno	500
Glicol etilênico	600
Ácido tereftálico (TPA)	500
Poli(tereftalato de etila) (PET)	600

Fonte: RIMA (2007)

Os processos presentes na UPB serão: destilação, hidrotratamento, hidrocrackeamento, produção de aromáticos, extração de butadieno, coqueamento, pirólise e o craqueamento catalítico petroquímico (PFCC). Já os processos da UPA serão: produção de polietileno, polipropileno, glicol etilênico, TPA, PET e estireno.

Os processos da UPB e suas relações são apresentados no esquema da Figura 6, enquanto a Figura 7 mostra a Unidade Petroquímica Associada (UPA).

Diante do apresentado neste capítulo, pode-se concluir que, além das emissões fugitivas dos vários processos presentes na UPA e na UPB, haverá a contribuição principal das emissões decorrentes dos processos de queima de combustível para aquecimento em fornos e caldeiras e as contribuições momentâneas durante a regeneração dos catalisadores dos processos catalíticos.

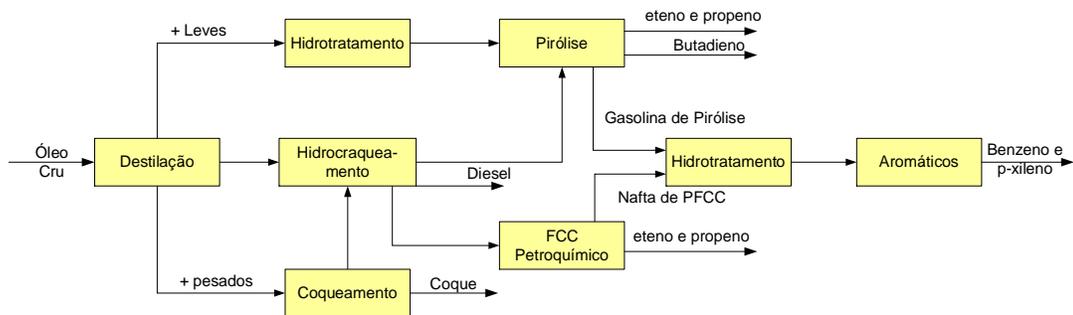


Figura 6 – Unidade Petroquímica Básica.

Adaptado de RIMA(2007)

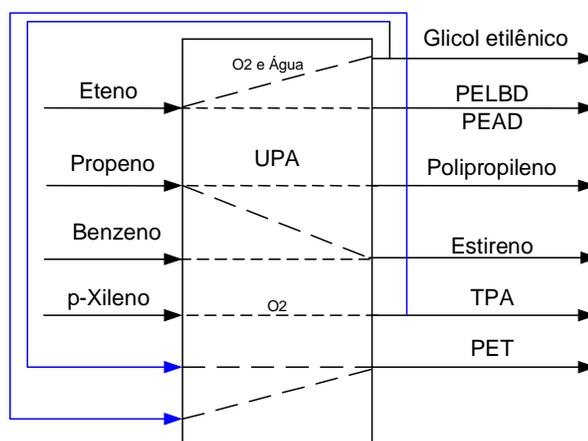


Figura 7 – Unidade Petroquímica Associada.

Adaptado de RIMA(2007)

## 1.6. Modelos de dispersão

Segundo Holmes e Morawska (2006), modelos de dispersão utilizam equações matemáticas descrevendo o comportamento da atmosfera, incluindo fenômenos de dispersão e processos físicos e químicos dentro da pluma para cálculo de concentrações em várias localizações.

Segundo Souto González et al. (2004), a modelagem de dispersão de ar é uma ferramenta poderosa não só para pesquisa, mas também para a educação em engenharia ambiental.

Modelos de dispersão de ar têm sido utilizados amplamente para investigação de padrões de dispersão e comportamento de emissões de ar em algumas áreas (MEHDIZADEH e RIFAI, 2004) e, também, para estimar potenciais riscos à saúde humana (ZHOU et al.;

2003), através da previsão da qualidade do ar. Com essa informação é possível prever o impacto acumulativo de concentrações de poluente e elaborar uma proposta de gerenciamento ambiental.

Segundo Kesarkar et al. (2007), a dispersão de poluentes é completamente governada por parâmetros meteorológicos locais e, portanto, essa informação é crucial como dado de entrada para um modelo de dispersão. A mistura vertical de poluentes do ar depende fortemente da profundidade e estratificação da camada limite planetária, a qual é governada pelos fenômenos de fluxo de calor sensível, de movimento vertical de larga escala e de advecção horizontal.

Do ponto de vista de movimentação do ar, a atmosfera se divide em Camada Limite Planetária e Camada Geostrófica (LORA, 2002). A primeira vai desde a superfície da Terra até uma altura de 500 m e os fatores que determinam a velocidade e direção do vento dentro desta faixa são o gradiente de pressão horizontal, o esforço de cisalhamento e a força de Coriolis. Para a segunda, a velocidade e direção do vento são determinadas apenas pela pressão horizontal e a força de Coriolis, não havendo efeito da superfície sobre ela.

Os modelos de dispersão de poluição atmosférica podem ser classificados segundo os seguintes critérios (LORA, 2002):

- Pela estrutura básica do modelo
  - Determinístico ou não-determinístico (estático)
  - Estacionário ou dependente do tempo
- Pelo marco de referência (Euleriano ou Lagrangiano)
- Pelo dimensionamento do domínio computacional (unidimensional, bidimensional, tridimensional, ...)
- Pelo método de resolução das equações do modelo (analítico ou numérico)

Lora (2002) ainda classifica os modelos segundo o atendimento aos seus objetivos:

- Pesquisa Científica – Aquisição de conhecimento sobre os processos básicos de atmosfera, provar novas teorias e educação.
- Gerenciamento da Qualidade do Ar e tomada de decisões – Incorporação de restrições com relação à qualidade do ar no planejamento dos sistemas de utilização do solo e do transporte.

- Impacto Ambiental - Estudo do impacto da contaminação do ar por novas fontes.
- Episódios de Poluição do Ar – Localização de áreas danificadas no caso de acidentes que provoquem contaminação do ar e criação de um sistema de alerta.

Holmes e Morawska (2006), em seu trabalho de revisão sobre modelos de dispersão, apresentam os tipos de modelo existentes e utilizados atualmente: Box (caixa), Gaussiano, Lagrangiano e modelos computacionais de fluido dinâmica (CFD).

Alguns exemplos de modelo de dispersão são os seguintes (HOLMES e MORAWSKA, 2006):

- Modelos Caixa: AURORA, CPB, PBM e OZIPR.
- Modelos CFD: ARIA Local, MISKAM, AEROFOR2, URM-1ATM, MADRID, CALGRID e UNI-AERO.
- Modelos Lagrangianos: GRAL, TAPM, ARIA Regional.
- Modelos Gaussianos: CALINE4, HIWAY2, CAR-FMI, OSPM, CALPUFF, AEROPOL, AERMOD, UK-ADMS e SCREEN3.

As próximas seções apresentam um breve descritivo sobre os principais modelos enumerados acima.

#### 1.4.1. Modelos Determinísticos

Segundo Lora (2002) são aqueles baseados na equação da difusão (Equação 1) para o cálculo da concentração de poluentes no ar.

A variação de concentração de um poluente em um dado volume é dada pela intensidade da fonte emissora, do transporte por convecção em função do vento e da difusão molecular e turbulenta.

$$\frac{\partial c}{\partial t} = \bar{u} \nabla c - \nabla \bar{F}_t + Q + R$$

Equação 1 – Modelo Determinístico

Sendo a variável  $c$  a concentração do poluente;  $\bar{u}$ , o vetor vento;  $\bar{F}_t$ , o fluxo turbulento de poluentes;  $R$ , o termo de remoção de poluentes (deposição seca e úmida, reações); e  $Q$ , a fonte de emissão de dado poluente.

### 1.4.2. Modelos Caixa

São baseados na conservação de massa. Necessitam de entrada de dados de meteorologia mais simples, emissões e movimentos de poluentes para dentro e fora da caixa. O interior da caixa não é definido e a massa de ar é tratada como mistura perfeita e as concentrações são uniformes no seu interior (HOLMES e MORAWSKA, 2006).

Segundo Holmes e Morawska (2006), a principal vantagem desse modelo é, por ser simples, possibilitar a inclusão de esquemas mais detalhados de reações químicas e permitir um tratamento detalhado da dinâmica dos aerossóis, foco dos trabalhos desses autores.

### 1.4.3. Modelos CFD

Estes modelos apresentam análise complexa do fluxo do fluido baseados na conservação de massa e do momento resultante da equação de Navier-Stokes (Equação 2), usando diferenças finitas ou métodos de volume finito nas três direções (HOLMES e MORAWSKA, 2006).

$$\frac{\partial v}{\partial t} + (v \cdot \nabla)v = -\nabla p + \eta \nabla^2 v$$

Equação 2– Navier-Stokes

### 1.4.5. Modelos Lagrangianos

Segundo Lora (2002), a abordagem de Lagrange introduz o conceito de função de densidade probabilística.

Esses modelos são similares aos modelos caixa quando definem a região de massa de ar como uma caixa de ar contendo uma concentração inicial de poluentes. O modelo Lagrangiano segue a trajetória da caixa de acordo com a direção do vento, ou seja, a concentração de um poluente é produto de um termo fonte e da concentração inicial, combinados com a função probabilidade de densidade daquele poluente se mover de um ponto a outro. Desta forma, estes modelos incorporam variações na concentração devido à

velocidade do fluido, à turbulência dos componentes dos ventos e à difusão molecular. (HOLMES e MORAWSKA, 2006).

#### 1.4.6. Modelos Eulerianos

São aqueles que procuram avaliar a concentração de cada espécie através da equação da continuidade (Equação 3) e os perfis de velocidade e temperatura através das equações de Navier-Stokes (Equação 2) e de Energia.

$$\frac{\partial c_i}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_j} u_j c_i + D_i \frac{\partial^2 C_i}{\partial x_j \partial x_j} + R_i + S_i(x, t)$$

Equação 3 – Equação da Continuidade

Onde  $c_i$  é a concentração de uma dada espécie química,  $u_j$  é a componente  $j$  do fluido;  $D_i$ , a difusividade molecular da espécie;  $R_i$ , a velocidade de geração da espécie por reação química;  $S_i$ , a velocidade de adição da espécie em uma dada localidade.

O problema principal da abordagem de Euler é o fechamento, pois sempre existem mais variáveis dependentes que equações e o enorme esforço computacional associado (LORA, 2002).

#### 1.4.7. Modelos Gaussianos

Considerando-se as inerentes imprecisões das informações sobre um empreendimento que ainda não existe, a utilização de modelos complexos nem sempre constitui uma grande vantagem.

Devido à sua simplicidade e facilidade de solução, modelos Gaussianos são amplamente empregados na modelagem de dispersão atmosférica para propósitos de regulação. A equação da teoria estatística de Gauss é uma solução analítica simplificada da equação básica da difusão, segundo Lora (2002), equação esta apresentada com maiores detalhes na seção de Modelos Determinísticos (Equação 1).

A base deste modelo assume que, na condição de estado estacionário, seja no plano horizontal ou no plano vertical, a concentração dos contaminantes segue a distribuição

estatística de Gauss onde o comprimento da pluma é determinado pelos coeficientes de dispersão. Estes são influenciados pelas classes de estabilidade de Pasquill e tempo de viagem a partir da fonte. A distribuição normal da pluma é modificada a grandes distâncias devido aos efeitos de reflexão turbulenta provocados pela superfície da Terra e pela ação da camada limite, quando a altura de mistura está baixa. (HOLMES e MORAWSKA, 2006).

A Equação 4 apresenta uma função gaussiana.

$$f(x) = \frac{1}{\sigma_x \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\bar{x})^2}{2\sigma_x^2}}$$

Equação 4– Distribuição Gaussiana

Fonte: [http://pt.wikipedia.org/wiki/Distribui%C3%A7%C3%A3o\\_normal](http://pt.wikipedia.org/wiki/Distribui%C3%A7%C3%A3o_normal)

Onde  $\sigma_x$  é o desvio padrão da amostra; e  $\bar{x}$ , a média da amostra.

Segundo Holmes e Morawska (2006), a maioria dos modelos gaussianos considera somente os fenômenos de difusão e advecção dos poluentes. Alguns modelos simulam transformações químicas utilizando pós-processamento. E outros, mais avançados e recentemente desenvolvidos, incluem processos físicos como deposição e reações químicas rápidas.

Os modelos Gaussianos, ainda Holmes e Morawska (2006), não foram projetados para dispersão sob condições de pouco vento ou para avaliar a situação em locais próximos à fonte (distâncias menores que 100 m). Nessas condições, os modelos gaussianos têm mostrado, consistentemente, concentrações superestimadas (SOKHI et al., 1998).

Como as equações de pluma gaussiana consideram campos de vento homogêneos, não é recomendada a utilização em distâncias grandes o suficiente para que as condições meteorológicas mudem. Caputo et al. (2003) sugerem que as distâncias devem estar limitadas a algumas dezenas de quilômetros a partir da fonte.

Segundo Holmes e Morawska (2006), uma severa limitação desses modelos de pluma seria quanto à modelagem de particulados, já que esses modelos utilizam estado estacionário e, como tal, não são capazes de levar em conta o tempo necessário para o poluente chegar até o ponto receptor. Para solução desse problema, um modelo de dinâmica de aerossol, conjugado a um modelo de predição de formação de particulado a partir de aerossol orgânico secundário, deve ser utilizado no pós-processamento dos resultados.

Em resumo, segundo Lora (2002), para esta modelagem, são adotadas as seguintes hipóteses:

- A pluma viaja com uma velocidade constante igual à do vento e na mesma direção;
- As dimensões da pluma são descritas através dos coeficientes de dispersão;
- A emissão de contaminantes ocorre a partir de uma fonte pontual com uma taxa constante;
- Acontece reflexão total da pluma na superfície da terra, não havendo deposição nem reação na superfície;
- O contaminante analisado não se perde por desintegração, reação química ou deposição.

### 1.7. O software AERMOD

O AERMOD foi especialmente desenvolvido para suportar os programas de modelagem da agência de proteção ambiental dos Estados Unidos (USEPA) para fins de regulação e integra os mais recentes avanços na modelagem de dispersão atmosférica, incorporando conceitos como teoria da camada limite planetária e métodos avançados para tratar terrenos complexos segundo o *Air Dispersion Modelling Guideline for Ontário* (2005), substituindo o *Industrial Source Complex Model Short-Term* (ISCST3) com o objetivo de prover tratamento mais confiável e realístico.

O modelo de dispersão ISCST3 consiste em um modelo de pluma gaussiana de estado estacionário que pode ser usado para verificar concentrações de contaminantes, e fluxos de deposição a partir de uma grande variedade de fontes associadas a um complexo industrial. Este evoluiu para o ISCPRIME ao incorporar os algoritmos do PRIME (*Plume Rise Model Enhancements*) que modelam o fenômeno de *downwash* (este fenômeno será comentado no item 1.1.5) segundo USEPA (1997).

O modelo AERMOD e os modelos ISCST3/ISCPRIME possuem algumas características em comum pelo fato do primeiro se tratar de uma evolução do segundo como já informado anteriormente,. Entre essas características, segundo o *Air Dispersion Modelling Guideline for Ontário* (2005), destacam-se:

- Podem ser utilizados para modelar a emissão de contaminantes a partir de muitas fontes continuamente;
- Possibilitam taxas de emissão constantes ou variáveis de acordo com o mês, estação, hora do dia e outras opções de período;
- Verificam os efeitos aerodinâmicos de *downwash* devido às proximidades de construções em relação aos pontos de emissão;
- Permitem especificação de locais receptores em *grid* e/ou utilização de coordenadas cartesianas ou polares;
- Utilizam pré-processadores de terreno, sendo o mais acurado aquele utilizado pelo AERMOD;
- Utilizam dados horários meteorológicos para contabilizar os efeitos das condições atmosféricas na dispersão do ar poluído na área modelada;
- Produzem resultados em concentração, fluxo total de deposição, fluxo de deposição seca e/ou úmida; e
- Possuem algoritmos que modelam os efeitos de assentamento e deposição seca para partículas grandes e efeitos de precipitação via úmida para gases e partículas.

Entretanto, também segundo o *Air Dispersion Modelling Guideline for Ontario* (2005), o modelo AERMOD possui algumas diferenças fundamentais em relação aos modelos ISCST3 e ISCPRIME, que permitem que os aspectos geométricos tenham um tratamento melhorado.

O AERMOD apresenta as seguintes diferenças em relação ao ISCST3 quanto a entrada de dados:

- Necessidade de dois tipos de arquivos meteorológicos, um contendo parâmetros escalares de superfície e outro contendo parâmetros de perfil vertical;
- Utilização dos dados de elevação de terreno;
- Possui mais opções na entrada de dados para as fontes;
- Possui a opção **Urbana**, onde altera os parâmetros de dispersão devido ao efeito de ilha urbana de calor; e
- Não possui a opção de variação de taxas de emissão devido à classe de estabilidade.

Já as diferenças principais em termos de modelagem, de forma mais geral, são mais claramente mostradas com o auxílio da Tabela 8.

Cabe destacar que, como qualquer modelo, o AERMOD apresenta limitações de aplicabilidade. Segundo *Air Dispersion Modelling Guideline for Ontário* (2005), as limitações inerentes ao AERMOD indicam que este **não** deve ser utilizado nos seguintes casos:

- Distâncias de receptores maiores de 50 km; nesses casos, mudanças na estabilidade e no vento promoverão a deterioração da acurácia do modelo;
- e
- Presença de lago ou oceano, devido ao efeito de maresia (fenômeno que acontece devido a diferenças de temperatura entre a água e a terra - diferença nos Cp – calor específico) gerando uma camada limite de turbulência.

Tabela 8 – Diferenças entre o ISCST3 e o AERMOD.

ISCST3	AERMOD
Pluma é sempre gaussiana.	Quando apropriado, a pluma não é gaussiana.
Dispersão é função de seis classes de estabilidade.	Dispersão é função de parâmetros contínuos de estabilidade e altura.
Medição de turbulência não pode ser utilizada.	Medição de turbulência pode ser utilizada.
Utilização da velocidade do vento na altura da chaminé.	Cálculo da velocidade do vento ao longo da pluma.
Altura de mistura é interpolada.	Altura de mistura é calculada a partir dos dados meteorológicos.
Pluma penetra totalmente durante a inversão.	Pluma penetra parcialmente durante a inversão.
Terreno é tratado de forma simplista.	Terreno é tratado mais realisticamente.
Utilização de dispersão simples para todas as áreas urbanas.	Ajustes na dispersão em função do tamanho das áreas urbanas.

Fonte: *Air Dispersion Modelling Guideline for Ontário* (2005)

## 1.8. Modelo matemático do AERMOD

Este item tem como objetivo apresentar os cálculos utilizados pelo AERMOD para caracterização de uma pluma de poluentes em função das condições meteorológicas e do terreno, além da identificação de alguns efeitos que afastam o cálculo principal da sua idealidade.

Considera-se que, para boa utilização de uma ferramenta, deve-se compreendê-la. Apenas dessa forma, pode-se decidir se ela se aplica ao estudo de caso, quais serão suas limitações e, conseqüentemente, quais serão as implicações de sua utilização.

### 1.6.1. Tratamento Meteorológico

Os cálculos da pluma de concentração se baseiam nos parâmetros meteorológicos. Nesta seção são apresentadas as variáveis meteorológicas principais e que são utilizadas ao longo de todo o resto do trabalho.

Estas variáveis são calculadas de acordo com a situação atmosférica da região: condição de camada limite convectiva (CBL – *Convective Boundary Layer*) ou estável (SBL – *Stable Boundary Layer*).

Cabe uma breve descrição sobre CBL e SBL. O primeiro é caracterizado por um fluxo de ar intenso vertical, massa de ar quente subindo a partir do solo e substituindo a massa de ar frio situadas nas camadas superiores, criando um ambiente homogêneo caracterizado pela ausência de gradiente de temperatura em relação à altura. Já a SBL é caracterizada por uma ausência de fluxo de ar vertical resultando em um gradiente de temperatura em função da altura.

As variáveis em questão são:

- Fluxo de calor (H);
- Velocidade de fricção ( $u_*$ );
- Comprimento de Monin-Obukhov (L);
- Velocidade convectiva escalar ( $w_*$ )

Nas condições de CBL, a velocidade de fricção é calculada de acordo com Panofsky e Dutton (1984), Equação 5.

$$u_* = \frac{ku_{ref}}{\ln\left(\frac{z_{ref}}{z_0}\right) - \psi_m\left(\frac{z_{ref}}{L}\right) + \psi_m\left(\frac{z_0}{L}\right)}$$

Equação 5– Cálculo da velocidade de fricção na CBL

Na Equação 5,  $Z_{ref}$  e  $u_{ref}$  são os valores correlacionados de altura e velocidade do vento,  $k$  é a constante de von Kármán, a função  $\psi_m()$  é definida por Panofsky e Dutton (1984) para CBL e por Van Ulden e Holtslag (1985) para SBL,  $L$  é o comprimento de Monin-Obhukov e  $Z_0$  é uma medição do grau de rugosidade do terreno, cujo significado pode ser dado como a altura equivalente em metros onde a velocidade do vento se torna igual a zero.

O comprimento de Monin-Obhukov é dado por Wyngaard (1988), Equação 6, onde  $T_{ref}$  é a temperatura média ambiente. Esta variável pode ser definida como uma altura equivalente onde os fatores de empuxo térmico do ar são equivalentes à produção mecânica de turbulência. Ele caracteriza a estabilidade em que se encontra a atmosfera.

$$L = -\frac{\rho c_p T_{ref} u_*^3}{kgH}$$

Equação 6– Cálculo do comprimento de Monin-Obhukov na CBL

A partir destas informações, pode-se calcular a velocidade convectiva escalar ( $w_*$ ) através da Equação 7 (Deardorff, 1970), e a altura de mistura ( $z_i$ ).

A altura de mistura ( $z_i$ ), nas condições de CBL, é o maior valor entre as alturas de misturas mecânica ( $z_{im}$ ), calculado pela Equação 8 (Venkatram, 1980), e convectiva ( $z_{ic}$ ), esta calculada por balanço de energia de acordo com Carson (1973) e Weil e Brower (1983). Como este balanço não é um cálculo trivial, não cabe reproduzi-lo aqui, portanto, no caso de maiores detalhes, verificar os materiais referenciados anteriormente.

$$w_* = \left( \frac{gH z_{ic}}{\rho c_p T_{ref}} \right)^{1/3}$$

Equação 7– Cálculo da velocidade convectiva escalar na CBL

$$z_i = \max(z_{im}, z_{ic})$$

$$z_{im} = 2300 u_*^{3/2}$$

Equação 8– Cálculo da altura de mistura mecânica e da altura de mistura na CBL

Nas condições de SBL, a velocidade de fricção ( $u_*$ ) é calculada de acordo com a Equação 9 (Venkatram, 1980).

$$u_* = \frac{-\theta_* \rho c_p}{H}$$

Equação 9– Velocidade de fricção na SBL

O comprimento de Monin-Obhukov (Equação 10) é dado por uma adaptação da Equação 6.

$$L = \frac{T_{ref}}{kg\theta_*} u_*^2$$

Equação 10– Comprimento de Monin-Obhukov para SBL

A temperatura escalar ( $\theta_*$ ) é calculada a partir de Van Ulden e Hastlag (1985) conforme a Equação 11, onde a variável  $n$  se refere ao percentual do céu que está encoberto. Esta variável determina o grau de variação da temperatura na superfície.

$$\theta_* = 0,09(1 - 0,5n^2)$$

Equação 11– Temperatura escalar

A altura de mistura, na SBL, é igual à altura de mistura mecânica, utilizando a mesma fórmula da Equação 8, conforme se vê na Equação 12.

$$z_i = 2300u_*^{3/2}$$

Equação 12– Cálculo da altura de mistura nas condições de SBL

A partir dos dados do pré-processador meteorológico, informações apresentadas até o momento nesta seção, o AERMOD começa a caracterizar a camada limite planetária com as seguintes informações:

- Velocidade e direção do vento;

- Gradiente de temperatura potencial;
- Turbulência vertical;
- Turbulência lateral.

Os cálculos de cada um dos itens acima serão apresentados a seguir.

O perfil de velocidade do vento é calculado conforme as fórmulas da Equação 13.

$$\frac{u(z)}{u(7z_0)} = \frac{z}{7z_0} \Rightarrow z < 7z_0$$

$$u(z) = \frac{u_*}{k} \left[ \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) - \psi_m\left(\frac{z}{L}\right) + \psi_m\left(\frac{z_0}{L}\right) \right] \Rightarrow 7z_0 \leq z \leq z_i$$

$$u(z) = u(z_i) \Rightarrow z > z_i$$

Equação 13– Perfil de velocidade do vento em função da altura

Na Equação 13, a variável  $7z_0$  representa a altura aproximada até a qual o perfil é assumido como linear. A função  $\psi_m()$  é definida por Panofsky e Dutton (1984) para CBL e por Van Ulden e Holtslag (1985) para SBL.

Na CBL, a derivada da temperatura em relação à altura é igual zero. Na SBL, seguem-se as fórmulas da Equação 14.

$$\frac{\partial \theta}{\partial z} = \frac{\theta_*}{k(2)} \left[ \frac{1+5(2)}{L} \right] \Rightarrow z \leq 2$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial z} = \frac{\theta_*}{kz} \left[ \frac{1+5z}{L} \right] \Rightarrow 2 < z \leq 100$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial z} = z_{mx} \frac{\partial \theta}{\partial z} e^{\left[ \frac{z-z_{mx}}{0,44 z_{i\theta}} \right]} \Rightarrow z > 100$$

$$z_{i\theta} = \max(z_{im}, 100)$$

Equação 14– Gradiente de temperatura em função da altura

O primeiro item da Equação 14 é uma modificação do segundo item substituindo a variável  $z$  por uma constante de valor 2. No terceiro item,  $Z_{mx}$  é uma constante com o valor de 100.

A turbulência vertical é constituída pelas componentes convectiva e mecânica, conforme Equação 15.

As componentes convectivas são resultantes das forças de empuxo térmico enquanto as componentes mecânicas são resultantes das forças dos ventos.

$$\sigma_{wT}^2 = \sigma_{wc}^2 + \sigma_{wm}^2$$

Equação 15– Turbulência vertical total e suas componentes convectiva e mecânica

Na SBL, a componente convectiva é igual a zero e, portanto, a turbulência vertical total é composta apenas pela componente mecânica.

Os cálculos para esta componente estão apresentados na Equação 16.

$$\sigma_{wc}^2 = 1,6 \left( \frac{z}{z_{ic}} \right)^{2/3} w_*^2 \Rightarrow z \leq 0,1z_{ic}$$

$$\sigma_{wc}^2 = 0,35w_*^2 \Rightarrow 0,1z_{ic} < z \leq z_{ic}$$

$$\sigma_{wc}^2 = 0,35w_*^2 e^{\left[ \frac{-6(z-z_{ic})}{z_{ic}} \right]} \Rightarrow z > z_{ic}$$

Equação 16– Turbulência vertical convectiva

A turbulência vertical mecânica é constituída pelas contribuições da camada limite corrente e o residual das contribuições da camada limite do dia anterior conforme Equação 17.

$$\sigma_{wm}^2 = \sigma_{wml}^2 + \sigma_{wmr}^2$$

Equação 17– Turbulência vertical mecânica e suas componentes

Estas componentes são calculadas conforme as fórmulas da Equação 18 (Brost et al., 1982).

$$\sigma_{wml} = 1,3u_* \left(1 - \frac{z}{z_i}\right)^{1/2} \Rightarrow z < z_i$$

$$\sigma_{wml} = 0 \Rightarrow z \geq z_i$$

$$\sigma_{wmr} = 0,02u(z_i)$$

Equação 18– Cálculos das componentes da turbulência vertical mecânica

A turbulência lateral, como acontece com a vertical, é constituída pelas componentes convectiva e mecânica conforme Equação 19.

$$\sigma_{vT}^2 = \sigma_{vc}^2 + \sigma_{vm}^2$$

Equação 19– Turbulência lateral total e suas componentes convectiva e mecânica

Na SBL, a componente convectiva é igual a zero e, portanto, a turbulência lateral total é composta apenas pela componente mecânica.

A Componente Turbulência Lateral Conectiva é calculada a partir da fórmula da Equação 20.

$$\sigma_{vc}^2 = 0,35w_*^2$$

Equação 20– Turbulência lateral convectiva

A turbulência lateral mecânica é calculada pelos itens da Equação 21.

$$\sigma_{vm}^2 = \left[ \frac{\sigma_{vm}^2(z_{im}) - \sigma_{v0}^2}{z_{im}} \right] z + \sigma_{v0}^2 \Rightarrow z \leq z_{im}$$

$$\sigma_{vm}^2 = \sigma_{vm}^2(z_{im}) \Rightarrow z > z_{im}$$

$$\sigma_{vm}^2(z_{im}) = \min(\sigma_{v0}^2, 0,25)$$

$$\sigma_{v0}^2 = 3,6u_*^2$$

Equação 21– Turbulência lateral mecânica

### 1.6.2. Tratamento Topográfico

O AERMOD simula a pluma em função do terreno de acordo com uma soma ponderada entre dois estados limites: a pluma horizontal que se choca ao terreno e a pluma que acompanha a elevação do terreno. A Equação 22 apresenta a concentração geral.

$$C_T(x, y, z_r) = fC_{c,s}(x, y, z_r) + (1-f)C_{c,s}(x, y, z_p)$$

Equação 22– Modelo de dispersão com o terreno

O termo da esquerda é a concentração total, o primeiro termo da direita é a contribuição da pluma horizontal que se choca ao terreno, enquanto o segundo termo é a contribuição da pluma que acompanha o terreno. A variável  $z_p$  corresponde à altura em relação ao solo e  $z_r$  corresponde à altura em relação a coordenada zero do sistema em análise. A variável  $f$  corresponde à massa de poluente que seguirá ao primeiro estado limite enquanto o complemento  $(1-f)$  corresponde à fração que se desviará verticalmente do obstáculo. Este fator é calculado conforme Venkatram et al. (2001), na Equação 23.

$$f = 0,5(1 + \varphi_p)$$

$$\varphi_p = \frac{\int_0^{H_c} C_s(x_r, y_r, z_r) dz}{\int_0^{\infty} C_s(x_r, y_r, z_r) dz}$$

Equação 23– Fator utilizado para ponderação entre os estados limites de pluma horizontal e pluma que acompanha o terreno

Na Equação 23 e na Figura 8, o parâmetro  $H_c$  (*Critical Dividing Streamline Height*) corresponde à altura abaixo da qual, o fluxo de ar contorna o obstáculo horizontalmente, e acima da qual, o fluxo de ar contorna o obstáculo verticalmente. A Figura 8 apresenta este conceito geometricamente.

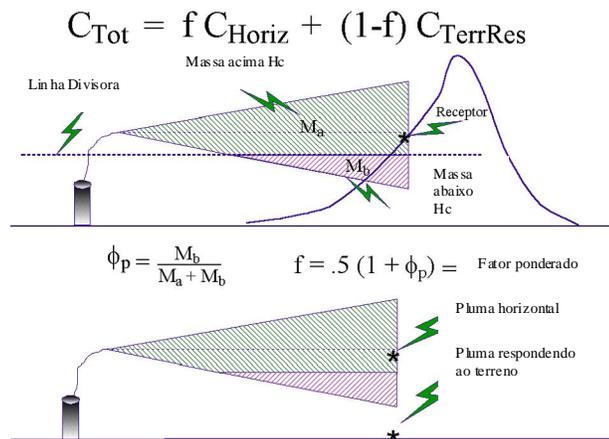


Figura 8 – Esquema explicativo da dispersão em função do terreno.

Fonte: USEPA (2004)

### 1.6.3. Cálculo da Concentração

Na SBL, durante condições estáveis, o AERMOD estima a concentração de acordo com a Equação 24 (WEIL, 1988; CIMORELLI et al, 2003).

$$C_s(x, y, z) = \frac{Q}{\sqrt{2\pi}u\sigma_{zs}} F_y \sum_{m=-\infty}^{\infty} \left( e^{-\frac{(z-h_{es}-2mz_{ieff})^2}{2\sigma_{zs}^2}} + e^{-\frac{(z+h_{es}+2mz_{ieff})^2}{2\sigma_{zs}^2}} \right)$$

Equação 24– Concentração nas condições de SBL

Onde  $z_{ieff}$  é a altura de mistura mecânica efetiva,  $\sigma_{zs}$  é a dispersão vertical total,  $F_y$  é a função de distribuição lateral,  $u$  é a velocidade efetiva do vento. A Equação 24 é aplicada no item 1.6.2 para os estados limites da pluma horizontal que se choca ao terreno e da pluma que acompanha a elevação do terreno substituindo  $Z$  por  $Z_p$  e  $Z_r$  respectivamente.

A função de distribuição lateral é calculada conforme a Equação 25.

$$F_y = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_y} e^{-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}}$$

Equação 25– Função de distribuição lateral

Onde  $\sigma_y$  é a distribuição lateral. Há várias funções que procuram determinar esta variável. Segundo Cimorelli et al. (2004), os melhores resultados encontrados ocorrem quando a Equação 26 a seguir é utilizada.

$$\sigma_y = \frac{\sigma_{vt} x}{u \left[ 1 + 78 \frac{\sigma_{vt} x}{u z_i} \right]^{0,3}}$$

Equação 26– Distribuição lateral

Onde  $Z_i$  é a altura de mistura,  $\sigma_{vt}$  é a turbulência lateral total calculada conforme a Equação 19.

A dispersão vertical total ( $\sigma_{zs}$ ) é composta pelas componentes próxima a superfície e afastada da superfície conforme Equação 27.

$$\sigma_{zs} = \left( 1 - \frac{h_{es}}{z_i} \right) \sigma_{zgs} + \left( \frac{h_{es}}{z_i} \right) \sigma_{zes}$$

Equação 27– Dispersão vertical total

Como os cálculos destas componentes não são triviais, para maiores detalhes, ver Cimorelli et al (2004) e USEPA (2004).

A concentração na CBL é determinada pela soma da contribuição de três fontes: direta, indireta e penetrante conforme a Equação 28.

$$C_c(x, y, z) = C_d(x, y, z) + C_i(x, y, z) + C_p(x, y, z)$$

Equação 28–Concentração, nas condições de CBL, função das fontes direta, indireta e penetrante

Como na SBL, a Equação 28 é aplicada no item 1.6.2 para os estados limites da pluma horizontal que se choca ao terreno e da pluma que acompanha a elevação do terreno substituindo  $Z$  por  $Z_p$  e  $Z_r$  respectivamente

A fonte direta corresponde a parte do material emitido pela chaminé que alcança diretamente o solo. Já a fonte indireta corresponde a outra fração emitida por esta chaminé

que segue em direção ao topo da CBL e retorna ao solo; enquanto a fonte penetrante corresponde ao material restante que ultrapassa a CBL, e mais a frente, retorna ao solo. A Figura 9 exemplifica esta descrição.

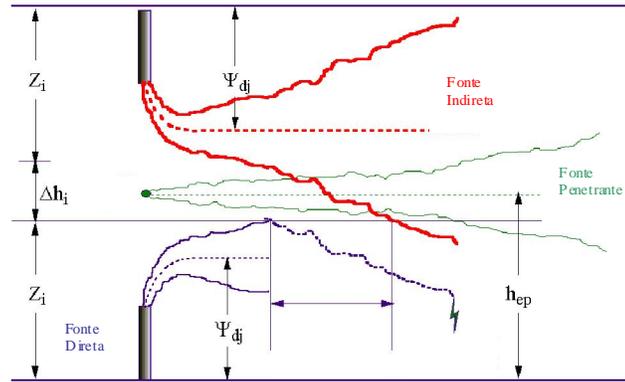


Figura 9 – Fontes direta, indireta e penetrante.

Fonte: USEPA (2004)

Segundo Weil et al. (1997), as concentrações são determinadas conforme a Equação 29, para a fonte direta, a Equação 30, para a fonte indireta e conforme a Equação 31, para a fonte penetrante.

$$C_d(x, y, z) = \frac{Qf_p}{\sqrt{2\pi u}} F_y \sum_{j=1}^2 \sum_{m=0}^{\infty} \frac{\lambda_j}{\sigma_{zj}} \left[ e^{-\frac{(z-\psi_{dj}-2mz_i)^2}{2\sigma_{zj}^2}} + e^{-\frac{(z+\psi_{dj}+2mz_i)^2}{2\sigma_{zj}^2}} \right]$$

Equação 29– Concentração nas condições de CBL para fonte direta

$$C_i(x, y, z) = \frac{Qf_p}{\sqrt{2\pi u}} F_y \sum_{j=1}^2 \sum_{m=1}^{\infty} \frac{\lambda_j}{\sigma_{zj}} \left[ e^{-\frac{(z+\psi_{rj}-2mz_i)^2}{2\sigma_{zj}^2}} + e^{-\frac{(z-\psi_{rj}+2mz_i)^2}{2\sigma_{zj}^2}} \right]$$

Equação 30– Concentração nas condições de CBL para fonte indireta

$$C_p(x, y, z) = \frac{Q(1-f_p)}{\sqrt{2\pi u \sigma_{zp}}} F_y \sum_{m=-\infty}^{\infty} \left[ e^{-\frac{(z-h_{ep}-2mz_{ieff})^2}{2\sigma_{zp}^2}} + e^{-\frac{(z+h_{ep}+2mz_{ieff})^2}{2\sigma_{zp}^2}} \right]$$

Equação 31– Concentração nas condições de CBL para fonte penetrante

Nas equações acima,  $F_y$  é calculado da mesma forma que nas condições de SBL. O parâmetro  $f_p$  corresponde a fração do material emitido que não ultrapassa a altura de mistura;  $\lambda_j$  corresponde a fração do material emitido que está em ascendência ( $j = 1$ ) e descendência ( $j = 2$ );  $\Psi_{dj}$  é a altura da pluma direta;  $\Psi_{ij}$  é a altura da pluma indireta;  $h_{ep}$  é a altura da pluma penetrante.

Como os cálculos destes parâmetros apresentados nos últimos dois parágrafos não são triviais, para maiores detalhes, ver Cimorelli et al (2004) e USEPA (2004).

#### 1.1.4. Tratamento da pluma lateral em zigue-zague

Este fenômeno é esquematizado pela Figura 10. Ele é tratado como a interpolação entre dois limites de função de distribuição lateral: o limite de pluma coerente (FyC), que considera a direção da pluma em seguir a direção do vento, e o limite de pluma randômica (FyR), que considera a probabilidade da direção da pluma de seguir qualquer rumo. A estimativa de concentração é a soma ponderada das concentrações nestes dois limites, onde a ponderação é proporcional à razão da energia horizontal do efeito randômico e à energia horizontal total (CIMORELLI et al., 2004)

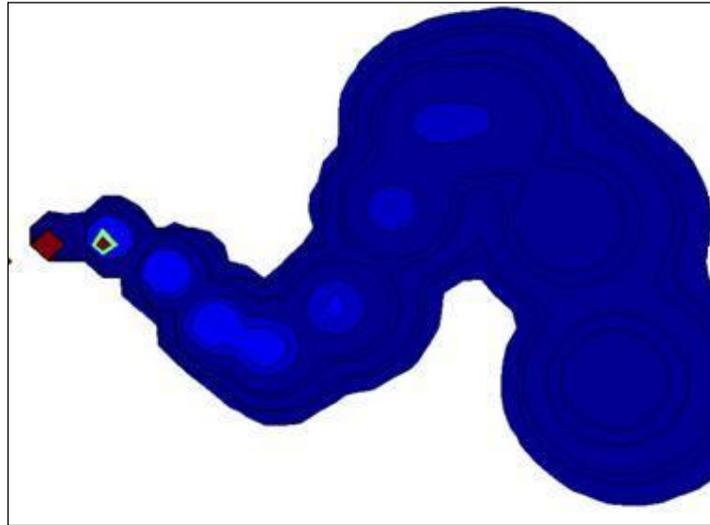


Figura 10 – Efeito da Pluma Lateral em Zigue-Zague.

Fonte: [http://www.arl.psu.edu/capabilities/fsm\\_compmech\\_atmos.html](http://www.arl.psu.edu/capabilities/fsm_compmech_atmos.html)

As equações para pluma coerente e para a pluma randômica são apresentadas nas Equação 32 e Equação 33 respectivamente.

$$F_{yC} = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_y} e^{\frac{-y^2}{2\sigma_y^2}}$$

Equação 32– Limite de pluma coerente

$$F_{yR} = \frac{1}{2\pi x_r}$$

Equação 33– Limite de pluma randômica

As concentração total é determinada pela Equação 34, onde  $C_{Ch}$  é a Equação 24 , para o caso de SBL, e as Equação 28, Equação 29, Equação 30 e Equação 31, no caso de CBL, substituindo o termo  $F_y$  pelo termo  $F_{yC}$ . O termo  $C_R$ , da mesma forma, é a Equação 24 para o caso de SBL, e as Equação 28, Equação 29, Equação 30 e Equação 31, no caso de CBL, substituindo o termo  $F_y$  pelo termo  $F_{yR}$ .

$$C_{c,s} = C_{Ch} \left( 1 - \frac{\sigma_r^2}{\sigma_h^2} \right) + C_R \left( \frac{\sigma_r^2}{\sigma_h^2} \right)$$

Equação 34– Concentração total em função da pluma coerente e da pluma randômica

Maiores detalhes de como é calculado  $\sigma_r$  e  $\sigma_h$ , ver Cimorelli et al (2004).

### 1.1.5. Efeito *downwash*

*Downwash* é o efeito de perturbação causado à pluma em função da presença de obstáculos no seu percurso. A Figura 11 é um esquemático deste fenômeno.

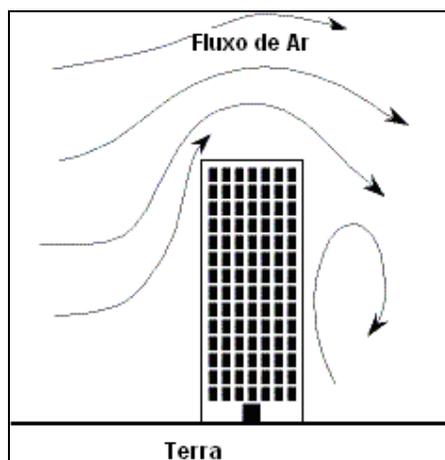


Figura 11 – Efeito Downwash.

Fonte: [http://www.apogeerockets.com/education/images/hi\\_rise\\_flow.gif](http://www.apogeerockets.com/education/images/hi_rise_flow.gif)

Segundo Cimorelli et al. (2004), o AERMOD incorpora os algoritmos do *Plume Rise Model Enhancements* (PRIME) para tratar as plumas que são afetadas pela presença de obstáculos no seu caminho. Descrições detalhadas da formulação do PRIME são encontrados em Schulman et al. (2000).

A concentração total é determinada pela soma ponderada da concentração calculada pelo PRIME, considerando os efeitos das construções, e da concentração calculada pelo AERMOD, sem considerar os efeitos das construções, como mostra a Equação 35. A Equação 36 apresenta o cálculo da ponderação, considerando as distâncias conforme relatado pelo parágrafo anterior e, especificado, por Schulman et al. (2000).

$$C_{total} = C_{prime}\gamma + (1 - \gamma)C_{AERMOD}$$

Equação 35– Concentração total em função dos cálculos do PRIME e do AERMOD

A Equação 35 diz que quanto mais próximo das construções se quiser determinar a concentração, mais próximo dos valores dados pelo PRIME a concentração total está. Analogamente, mais distante das construções, os efeitos de *downwash* desaparecem, e a concentração total é melhor aproximada pelo valor calculado pelo AERMOD.

$$\gamma = e^{-\frac{(x-\sigma_{xg})^2}{2\sigma_{xg}^2}} e^{-\frac{(y-\sigma_{yg})^2}{2\sigma_{yg}^2}} e^{-\frac{(z-\sigma_{zg})^2}{2\sigma_{zg}^2}}$$

Equação 36– Cálculo do fator ponderador para determinação da concentração total quando do efeito de *downwash*

Na Equação 36, as variáveis  $x$ ,  $y$  e  $z$  são as distâncias da construção ao receptor; enquanto  $\sigma_{xg}$ ,  $\sigma_{yg}$  e  $\sigma_{zg}$  dimensionam a perturbação formada pela construção.  $\sigma_{xg}$  é a dimensão longitudinal,  $\sigma_{yg}$  é a distância transversal a partir do centro da construção e  $\sigma_{zg}$  é a altura da construção.

### 1.1.6. Efeitos da camada urbana

Características da superfície urbana influenciam os parâmetros da camada limite em todos os horários. Entretanto, os efeitos térmicos da área urbana na estrutura da camada limite são maiores durante a noite e relativamente ausente durante o dia (Oke, 1998). Isto porque, nas áreas construídas, uma fraca camada limite convectiva se forma durante a noite quando o ar da área rural corre sobre a superfície quente da área urbana gerando uma velocidade convectiva escalar representativa. Esta é definida a partir do fluxo de calor urbano (Equação 37) e da altura da camada de mistura urbana (Equação 39).

$$H_u = \alpha \rho c_p \Delta T_{u-r} u_*$$

Equação 37– Fluxo de calor urbano

Na Equação 37,  $\alpha$  é uma variação linear entre 0 (na borda da área urbana) e 0,1 (no centro da área urbana). Usualmente, a utilização do valor médio de 0,03 apresenta bons resultados. O termo  $\Delta T_{u-r}$  usado na estimativa é baseado nos dados de Oke (1982) a partir da observação de cidades canadenses, e é avaliado segundo a Equação 38.

$$\Delta T_{u-r} = \Delta T_{\max} \left[ 0,1 \ln \left( \frac{P}{P_0} \right) + 1 \right]$$

Equação 38– Cálculo de  $\Delta T_{u-r}$

Na Equação 38,  $\Delta T_{\max}$  tem o valor 12°C e  $P_0$  é referente a uma população de 2.000.000. Esta última informação vale também para a Equação 39.

$$z_{iu} = z_{iu0} \left( \frac{P}{P_0} \right)^{1/4}$$

Equação 39– Cálculo da altura da camada de mistura urbana

Na Equação 39,  $z_{iu0}$  é a altura de mistura urbana correspondente à população  $P_0$  (2.000.000).

A velocidade convectiva escalar ( $w^*$ ) de Deardorff (1970) para o horário noturno fica adaptado conforme a Equação 40.

$$w^*_u = \left( \frac{g H_u z_{iuc}}{\rho c_p T_{ref}} \right)^{1/3}$$

Equação 40– Velocidade convectiva escalar urbana

## 1.9. Modelo OZIPR e SAPRC

Para a realização das simulações de ozônio deste trabalho, foi utilizado o modelo de trajetórias OZIPR (*Ozone Isopleth Package for Research*) em conjunto com o modelo

químico SAPRC (*Statewide Air Pollution Research Center*), por serem de domínio público, terem grande aceitação no meio acadêmico internacional, e serem modelos relativamente simples de se trabalhar. Além disso, seu mecanismo químico é extremamente detalhado priorizando o entendimento das reações fotoquímicas do meio.

O modelo de trajetórias OZIPR (Gery e Crouse, 1990) foi desenvolvido pela agência de proteção ambiental dos EUA (USEPA) para ser um suporte para a previsão de cenários de poluição urbana com as seguintes características:

- Modelo relativamente simples, unidimensional, conhecido como modelo “em caixa” ou de trajetórias, que requer dados de concentrações iniciais, emissões e parâmetros meteorológicos, com resolução temporal, sem a necessidade de uma descrição espacial destes parâmetros;
- Uso de diversos modelos químicos, inclusive aqueles com grau de complexidade e detalhamento elevado, como o modelo SAPRC;
- Mecanismos internos tipo EKMA (*Empirical Kinetic Modeling Approach*) que possibilitem calcular o nível de redução dos poluentes, a fim de se atingir os padrões de qualidade do ar;
- Realização de múltiplas simulações para diversas condições de compostos orgânicos voláteis e óxidos de nitrogênio, fornecendo um gráfico de isopletas para diferentes poluentes secundários em função destes dois precursores, sendo uma ferramenta muito útil na previsão de cenários e elaboração de estratégias de controle ambiental.

Segundo Corrêa (2003), pode-se entender o modelo como uma coluna de ar que na base engloba o ponto de estudo em questão e que se projeta para cima, até a camada de mistura da atmosfera, como se fosse uma caixa com uma tampa móvel, que é função da altura da camada de mistura ao longo do dia. Toda a caixa é considerada perfeitamente homogênea e, move-se de acordo com a trajetória do vento, mas de modo a não se expandir horizontalmente. As emissões provenientes da base da coluna são computadas, assim como as deposições secas e úmidas podem ser implementadas.

Os dados de entrada para uma simulação, são os dados da localidade em estudo:

- concentrações individuais das diferentes espécies na mistura de COVs;
- concentrações iniciais totais de NO, NO<sub>2</sub>, COVs totais, CO;
- dados meteorológicos horários de temperatura, pressão, umidade relativa e altura da camada de mistura, localização geográfica e data (para cálculo do fluxo solar actínico);

- emissões primárias;
- coeficientes de deposição seca e úmida; e
- modelo químico.

Os resultados de um simulação são as concentrações médias horárias das espécies químicas e as isopletas dos poluentes secundários para valores estabelecidos de COVs e NOx.

O modelo SAPRC (*Statewide Air Pollution Research Center*) foi desenvolvido por Carter em 1990 na Universidade de Riverside e vem sofrendo inúmeras alterações e atualizações desde então. Devido à sua estrutura, evitando uso de linguagens de programação complexas e recompilações, e ampla documentação, seu uso e modificações são muito difundidos. (CORRÊA, 2003)

O SAPRC é um modelo que engloba reações térmicas e fotoquímicas. Em geral, trabalha com cerca de 140 reações e 80 espécies. Porém, nem todas as espécies são tratadas explicitamente dentro de seu mecanismo devido aos seguintes pontos:

- a pouca importância que as referidas espécies impõem ao modelo;
- pouca informação do valor da constante de velocidade; e
- para se diminuir o tempo computacional.

Na inviabilidade de representar o modelo químico com todas as suas espécies explícitas, as constantes de velocidade foram agrupadas em dez classes. Para aquelas espécies com constantes de velocidade bem estabelecidas e de grande importância para a química da atmosfera, estas foram mantidas explícitas e isoladas. Os critérios de agrupamento são quanto a semelhança de estrutura e a reatividade (Carter, 1990). Basicamente, são empregados cinco agrupamentos de alcanos, dois grupos de alcenos e dois de aromáticos.

Sabe-se que diferentes tipos de COVs possuem diferentes velocidades de reação para a formação de ozônio e outros poluentes secundários em misturas de COV/NOx na presença de luz solar. Em geral, a reatividade dos hidrocarbonetos tende a seguir a seguinte ordem (Finlayson-Pitts e Pitts, 2000):

- Alcenos com ligações duplas internas
- Di e trimetil aromáticos, alcenos terminais
- Etileno
- Metil aromáticos
- C5 e alcanos maiores
- Alcanos C2-C5

O efeito de um dado COV para a formação do  $O_3$  irá depender, além da sua velocidade de reação e da natureza de seu mecanismo de reação, também da natureza do ar onde ele é emitido, incluindo o efeito de outros poluentes presentes e de suas concentrações.

## 2. METODOLOGIA

Este capítulo foi dividido em dois subcapítulos, onde o primeiro descreve a metodologia adotada para realizar as simulações no AERMOD; enquanto o último descreve aquela utilizada para realizar as simulações no modelo OZIPR/SAPRC.

### 2.1. Metodologia para o AERMOD

Para realização das simulações, os seguintes dados fizeram-se necessários:

- Dados meteorológicos
- Dados de terreno
- Dados das emissões

No caso dos dados meteorológicos, foram utilizadas as informações encontradas no EIA (2007), obtidas das estações meteorológicas localizadas em Sambaetiba, Macacu e na Infraero. As suas localizações são apresentadas na Tabela 9 e na Figura 12.

Tabela 9 – Localização das Estações Meteorológicas do Estudo

<b>Estação</b>	<b>Latitude</b>	<b>Longitude</b>	<b>X</b>	<b>Y</b>
Sambaetiba	-22,613016°	-42,815123°	725000mE	7498000mS
Macacu	-22,616029°	-42,931789°	712580,89mE	7497508,76mS
Infraero	-22,724906°	-42,929892°	712607,94mE	7485448,37mS

Fonte: EIA(2007)

Seria interessante a utilização de pelo menos um ano de dados, mas só havia dados nestas estações para seis meses. Por conta desta ausência de dados, o grupo que desenvolveu o EIA utilizou os dados meteorológicos do Galeão. Para o presente trabalho, preferiu-se utilizar os dados destas estações por acreditar que seriam mais reais devido a proximidade do empreendimento. Cabe ressaltar que uma das exigências da FEEMA para a execução do EIA é o tratamento de 3 anos de dados meteorológicos.

Os dados foram tratados e processados pelo *software Aermat View* que faz parte do pacote AERMOD. Como resultados, as rosas dos ventos, apresentadas na Figura 13, na

Figura 14 e na Figura 15, foram construídas pelo software WRPLOT View também integrante do pacote AERMOD, considerando a orientação de direção do vento soprando para o centro.

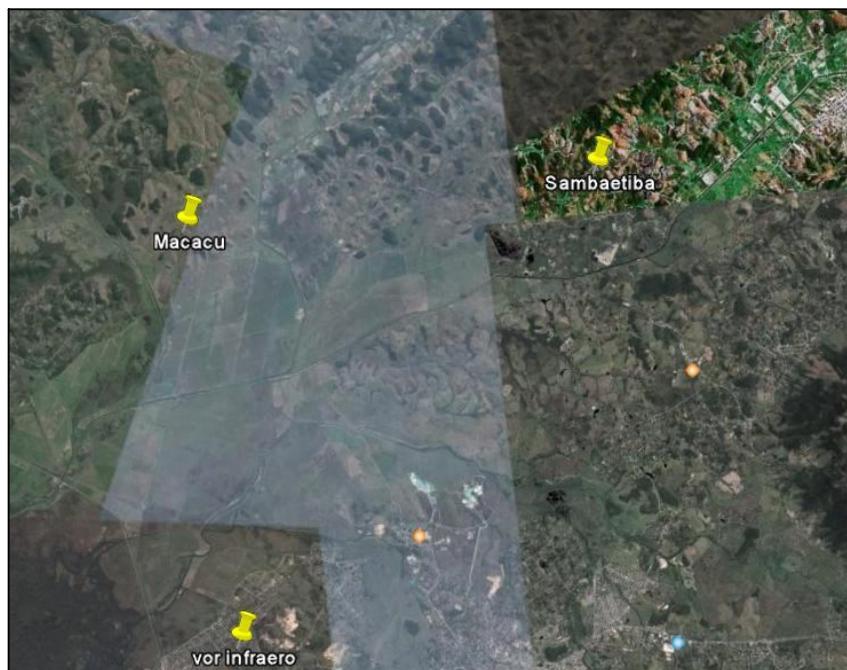


Figura 12 – Localização das Estações Meteorológicas.

Fonte: Google Earth

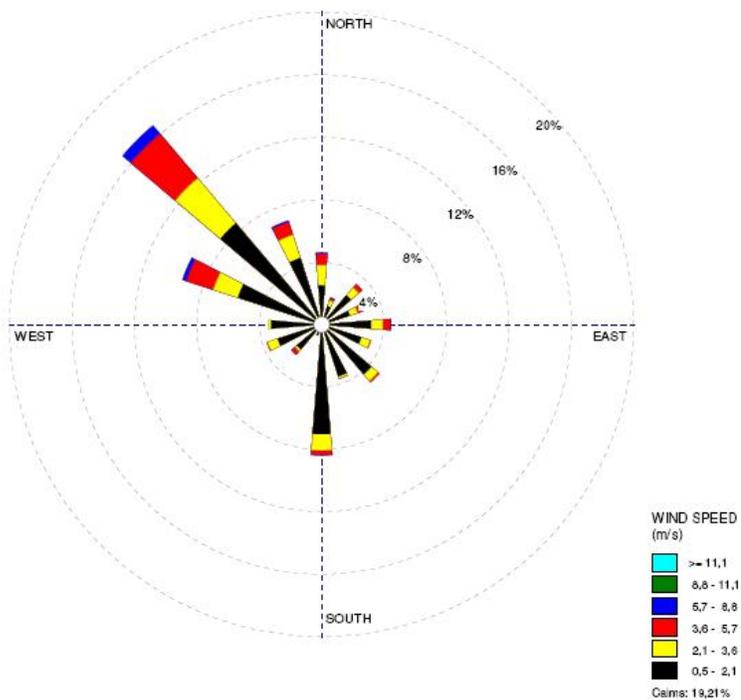


Figura 13 – Rosa dos ventos da estação meteorológica Infraero para o ano de 2007 nos meses de março a agosto

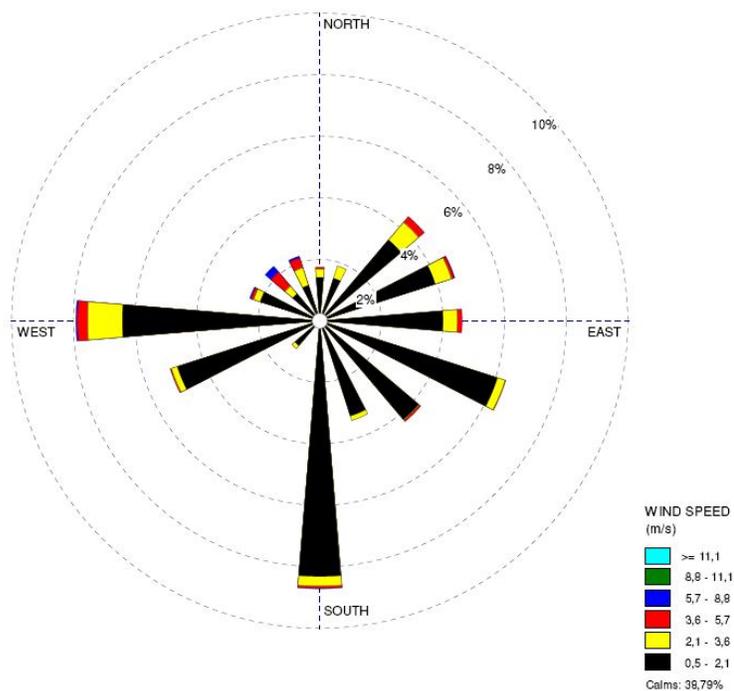


Figura 14 – Rosa dos ventos da estação meteorológica de Sambaetiba para o ano de 2007 nos meses de março a agosto

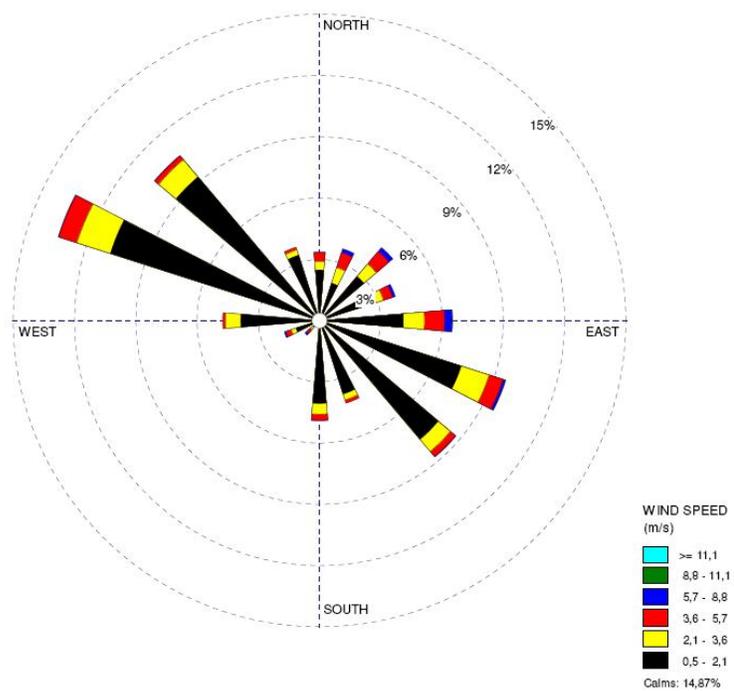


Figura 15 – Rosa dos ventos da estação meteorológica de Macacu para o ano de 2007 nos meses de março a agosto

Pelas figuras 13, 14 e 15, constata-se que as estações de Macacu e Infraero apresentam direções de ventos similares enquanto a estação de Sambaetiba apresentou componentes Sul e Oeste acentuadas não verificadas nas outras duas estações. Outra diferença é notada para a estação Infraero que possui calmarias em torno de 40%, enquanto as demais estão no patamar de 17%. Apesar dessas discrepâncias, todas apresentam características similares quanto a predominância de velocidade do vento, cerca de 50% do tempo, esta velocidade esteve entre 0,5 e 2,1 m/s.

Comparadas com as rosas do vento do EIA (2007), as discrepâncias aparecem quanto às calmarias e a estação Sambaetiba. Para o primeiro caso, essas estações apresentam lá calmarias no mínimo de 35%, portanto, acima do verificado aqui. Já para o caso, em especial, da estação Sambaetiba, no presente trabalho, aparece uma componente sul não verificada naquele estudo. Porém, em comum, ambos os trabalhos apresentam a mesma predominância de velocidade do vento.

Foram realizadas simulações com os dados dessas três estações e os resultados serão apresentados no capítulo Resultados e Discussão.

Os dados de terreno, altimetria basicamente, foram obtidos através da utilização da ferramenta *Google Earth*. Os mapas desta ferramenta estão datados, no pior caso, de 1996, diferente dos mapas do IBGE datados de 1976.

Montou-se uma malha com vinte pontos em unidades cartesianas geodésicas UTM nos eixos X e Y com espaçamento de 600 m gerando uma malha em uma área de 144 km<sup>2</sup> englobando o empreendimento. A Figura 16 apresenta a área do terreno incorporada no estudo. Apesar do espaçamento adotado não ter sido de 500 m conforme exige FEEMA e EIA (infelizmente, esta informação foi descoberta pelo autor deste trabalho após a confecção da malha de simulação), como o terreno é plano, esta diferença não influenciará no resultado.

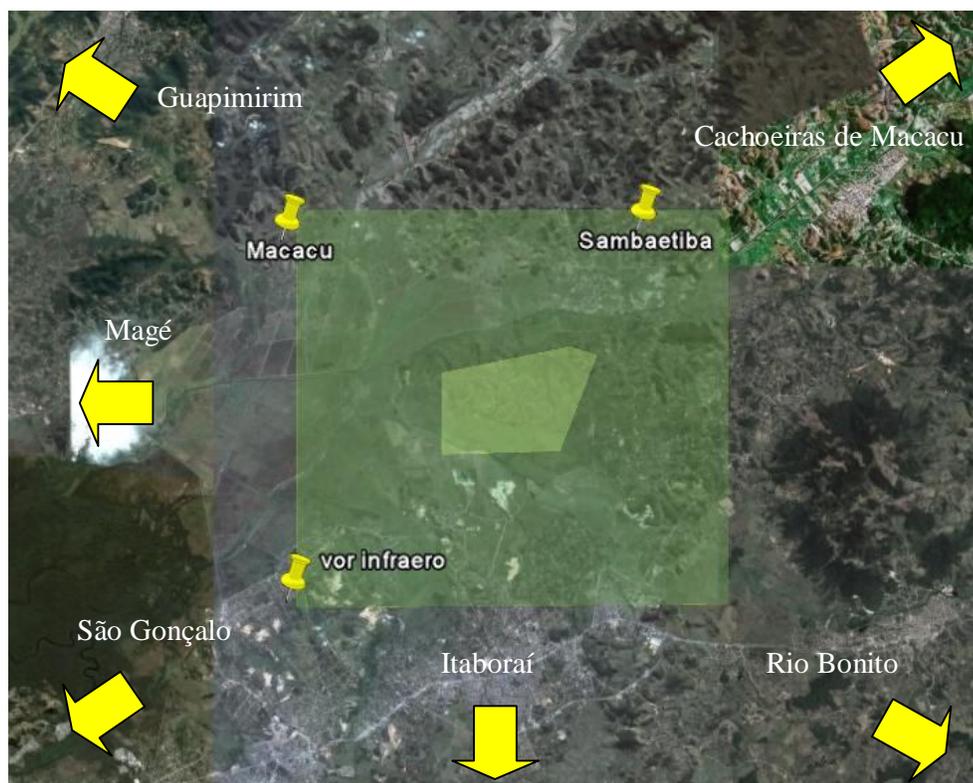


Figura 16 – Área do terreno incorporada ao estudo.

Fonte: Google Earth

Na Figura 16, o polígono central representa a área do COMPERJ e o quadrado, englobando o COMPERJ, representa a malha elaborada para simulação no AERMOD. Ainda nesta figura são apresentadas a localização das estações meteorológicas.

Nota-se, ainda na Figura 16, a existência de moradias ao sul, na verdade, Itaboraí; ao norte, ficam os parques. A leste, não aparecendo na Figura 16, ficam Cachoeiras de Macacu e Rio Bonito e, no oeste, direção Guanabara, também não aparecendo na figura, ficam Guapimirim, Magé e São Gonçalo. Cabe ressaltar que o terreno é bastante plano, o que indica que este parâmetro não deve influenciar tanto na dispersão atmosférica.

Infelizmente, o sistema de coordenadas de busca do *Google Earth* é diferente do sistema de coordenadas do software de simulação da *Lakes Environmental* que emprega o modelo AERMOD nos seus algoritmos. Para resolver o problema, uma macro em *vbscript* foi criada em Excel para conversão de unidades geodésica UTM, padrão *Lakes environmental*, para o padrão latitude/longitude utilizado no *Google Earth*. O código é fornecido no Anexo 2 no final deste trabalho. Este código foi adaptado a partir do código existente no site <http://www.rdtec.com.br/rdgeomg/localmaster.htm>. Os resultados deste código foram validados a partir de localizações conhecidas utilizando a ferramenta *Google Earth*.

Para obtenção dos dados de altimetria, cada conjunto latitude/longitude era digitado no *Google Earth* e a informação de altitude verificada visualmente na região inferior central do programa. A idéia original neste trabalho foi montar uma malha de 100 km<sup>2</sup> com espaçamento de 100 m, mas isto representaria a execução de 10.000 consultas, o que é algo inviável de ser feito manualmente e, atualmente, impossível de automatizar no *Google Earth*. Assim, definiu-se que se usariam espaçamentos de 600 m entre os pontos de análise. Vinte pontos foram necessários para cada lado da área analisada. Isto resultou em 400 consultas para uma área de 144 km<sup>2</sup>.

Há outra possível fonte de informações de terreno: o *site* da *Lakes Environmental* (<http://www.weblakes.com/lakesdem.html>), fabricante do simulador utilizado na presente dissertação, cuja licença de uso é da UERJ, aponta para uma possível fonte de dados de terreno da NASA. Este *site* da NASA possui informações de terreno de todo o planeta, apesar de ter maiores detalhes de resolução para os terrenos existentes no EUA. Infelizmente, o arquivo em formato DEM da área onde o COMPERJ será construído não foi possível de ser usado.

Cabe ressaltar que os dados de terreno utilizados pelo EIA (2007) diferem dos utilizados na presente dissertação. O EIA (2007) empregou os dados de elevação gerados pelo USGS (*United States Geological Survey*) e pelo CGIAR (*Consultative Group on International Agricultural Research*) com resolução de cerca de 90 metros.

Como a influência do terreno é pequena na dispersão da pluma (por conta da região ser uma planície) acredita-se que a menor resolução empregada na dissertação não compromete a qualidade dos resultados.

Os dados de emissão de 42 chaminés foram retirados do estudo de impacto ambiental do COMPERJ (EIA, 2007), onde considera a utilização de um óleo combustível interno, com 0% de teor em Nitrogênio e Enxofre, produzido pelo próprio COMPERJ para os seus fornos e também a utilização de um óleo combustível externo para as caldeiras, com teor de Nitrogênio (em peso) de 0,9% e teor de enxofre de 1,0%. O Anexo 1 apresenta as informações utilizadas nas simulações do presente trabalho e a Figura 17 mostra a localização dessas fontes.



Figura 17 – Localização das principais Fontes Emissoras do COMPERJ.

Fonte: Google Earth

Pelo Anexo 1, as quatro caldeiras seriam responsáveis por 68,45% das emissões de NO<sub>x</sub>, 97,83% das emissões de SO<sub>x</sub>; 61,23% de emissões material particulado, onde 41,61% seria gerado pela caldeira de recuperação; 47,78% de emissões de CO, onde 32,54%, maior contribuição da carga, seria gerado também pela última caldeira citada.

Foram simuladas as dispersões dos componentes SO<sub>x</sub>, NO<sub>x</sub>, MP e CO. Os resultados médios destas simulações, em períodos de tempo diferentes, foram comparados com os limites ambientais já apresentados na Introdução.

Cabe enumerar alguns parâmetros que foram ajustados no AERMOD para realização da simulação:

- Utilizou-se a opção de terreno de característica rural, que provém um cenário de ascensão vertical da pluma diferente de um terreno urbano, em função do tipo de cobertura do solo e conseqüentemente sua absorção e re-emissão da radiação solar; e

- Os efeitos de *Downwash* não foram considerados por não existir edificações definidas no atual estágio do empreendimento que poderiam promover o abatimento da pluma.

## 2.2. Metodologia para o OZIPR e SAPRC

Para realização das simulações para a formação de ozônio, os seguintes dados fizeram-se necessários:

- Concentração inicial dos poluentes CO, hidrocarbonetos e NOx em ppm;
- Dados das emissões horárias de CO, hidrocarbonetos e NOx em  $\text{kg h}^{-1} \text{ km}^{-2}$ ;
- Especificação dos hidrocarbonetos;
- Dados meteorológicos horários;
- Coordenadas do local de estudo, dia, hora, mês e ano do estudo, para fins do cálculo da radiação solar;
- Modelo químico que represente as reações da atmosfera estudada.

Antes de adentrar na metodologia, cabe um parágrafo sobre as bacias aéreas adotadas pela FEEMA que influenciam os valores de emissão e a concentração inicial a serem adotados.

A FEEMA(2007) divide a bacia aérea da região metropolitana do RJ de  $2.400 \text{ km}^2$  em quatro grandes bacias aéreas, conforme Figura 18 e os quatro parágrafos seguintes.

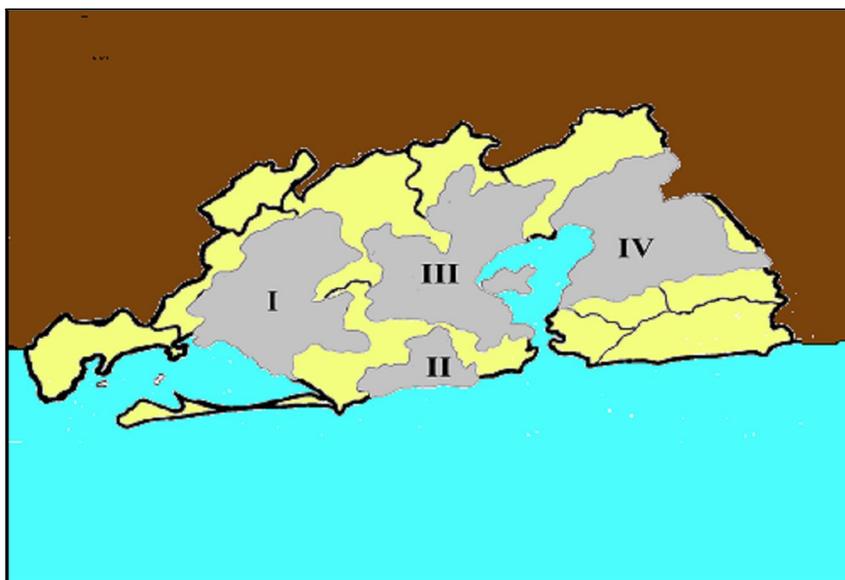


Figura 18 – Bacias Aéreas da Região Metropolitana do RJ.

Fonte: FEEMA(2007)

Bacia Aérea I - com uma área de 730 km<sup>2</sup>, compreende os distritos de Itaguaí e Coroa Grande, no município de Itaguaí; os municípios de Seropédica, Queimados e Japerí e as regiões administrativas de Santa Cruz e Campo Grande, no município do Rio de Janeiro.

Bacia Aérea II - com uma área de cerca de 140 km<sup>2</sup>, envolve as regiões administrativas de Jacarepaguá e Barra da Tijuca, no município do Rio de Janeiro.

Bacia Aérea III - ocupa uma área de cerca de 700 km<sup>2</sup>. Abrange os municípios de Nova Iguaçu, Belford Roxo e Mesquita; os distritos de Nilópolis e Olinda, no município de Nilópolis; os distritos de São João de Meriti, Coelho da Rocha e São Mateus, no município de São João de Meriti; os distritos de Duque de Caxias, Xerém, Campos Elíseos e Imbariê, no município de Duque de Caxias; os distritos de Guia de Pacobaíba, Inhomirim e Suruí, no município de Magé e as regiões administrativas de Portuária, Centro, Rio Comprido, Botafogo, São Cristóvão, Tijuca, Vila Isabel, Ramos, Penha, Méier, Engenho Novo, Irajá, Madureira, Bangu, Ilha do Governador, Anchieta e Santa Tereza, no município de Rio de Janeiro.

Bacia Aérea IV - com área de cerca de 830 km<sup>2</sup>, abrange parte do Município de Niterói, além dos municípios de São Gonçalo, Itaboraí, Magé e Tanguá.

Foram realizadas simulações considerando o impacto do COMPERJ para a região metropolitana como um todo.

Para a especiação dos hidrocarbonetos, utilizou-se os dados de Corrêa (2003) para a região metropolitana do RJ (Tabela 10) e as amostragens e análises cromatográficas realizadas pelo próprio orientador desta dissertação no entorno da REDUC, o que foi extrapolado como sendo o COMPERJ. A especiação de ambos locais seguiu a metodologia TO-15 da Agência Ambiental dos EUA (USEPA), que consiste basicamente na amostragem do ar por botijões de aço inox eletropolido e análises por cromatografia de fase gasosa com detecção por espectrometria de massas e ionização na chama. A descrição dos grupos de COVs é apresentada no Anexo 3.

Para a especiação da Tabela 11, foi feita a análise da escala de reatividade incremental de COVs para o pior cenário de ozônio, de acordo com o que estipula a metodologia proposta na documentação da versão mais recente do modelo de trajetórias OZIPR (TONNESEN, 2000).

Nesta metodologia, para determinação da escala de reatividade incremental de COVs, deve-se fazer um acréscimo e um decréscimo de 0,2% dos COVs totais em cada COV representativo existente na especiação. Ao acréscimo é dado o nome de reatividade

incremental positiva (IR+); e ao decréscimo, reatividade incremental negativa.(IR-). Seus valores são obtidos de acordo com as Equação 41 e Equação 42.

Tabela 10 – Especificação de hidrocarbonetos para a região metropolitana do RJ por Corrêa (2003) no entorno da Av. Presidente Vargas em dezembro de 2002

<b>GRUPOS</b>	<b>ppmC totais</b>	<b>Fração</b>	<b>Nº médio C</b>
ALK1	0,016	0,0105	2,000
ALK2	0,001	0,0004	3,000
ALK3	0,048	0,0312	4,127
ALK4	0,239	0,1541	5,361
ALK5	0,064	0,0410	7,732
OLE1	0,046	0,0296	4,000
OLE2	0,024	0,0154	4,685
ARO1	0,325	0,2098	7,277
ARO2	0,585	0,3773	8,198
RCHO	0,014	0,0087	4,000
BALD	0,000	0,0000	7,000
MEK	0,000	0,0000	4,000
PROD2	0,009	0,0057	3,000
TERP	0,005	0,0031	10,000
CH4	0,000	0,0000	1,000
CO	0,000	0,0000	1,000
HCHO	0,051	0,0328	1,000
CCHO	0,020	0,0126	2,000
CCO-OOH	0,000	0,0000	2,000
ETHENE	0,018	0,0118	2,000
ETOH	0,036	0,0235	2,000
GLY	0,000	0,0000	2,000
ACET	0,051	0,0327	3,000
ACRO	0,000	0,0000	3,000
MGLY	0,000	0,0000	3,000
BACL	0,000	0,0000	4,000
METHACRO	0,000	0,0000	4,000
MVK	0,000	0,0000	4,000
ISOPRENE	0,000	0,0000	5,000
PHEN	0,000	0,0000	6,000
CRES	0,000	0,0000	7,000

Tabela 11 – Especificação de hidrocarbonetos no entorno da REDUC em junho de 2007

GRUPOS	ppmC totais	Fração	Nº médio C
ALK1	0,058	0,0042	1,070
ALK2	0,019	0,0014	3,209
ALK3	0,086	0,0062	4,439
ALK4	0,195	0,0141	5,703
ALK5	0,302	0,0219	8,745
OLE1	0,244	0,0177	4,540
OLE2	0,441	0,0319	5,151
ARO1	0,762	0,0552	7,413
ARO2	0,762	0,0552	8,280
RCHO	0,170	0,0123	5,621
BALD	0,030	0,0021	7,000
MEK	0,045	0,0032	4,000
PROD2	0,053	0,0039	3,691
TERP	0,000	0,0000	10,000
CH4	10,339	0,7488	1,000
CO	0,000	0,0000	1,000
HCHO	0,093	0,0067	1,000
CCHO	0,087	0,0063	2,000
CCO-OOH	0,000	0,0000	2,000
ETHENE	0,000	0,0000	2,000
ETOH	0,037	0,0026	2,000
GLY	0,000	0,0000	2,000
ACET	0,071	0,0051	3,000
ACRO	0,015	0,0011	3,000
MGLY	0,000	0,0000	3,000
BACL	0,000	0,0000	4,000
METHACRO	0,000	0,0000	4,000
MVK	0,000	0,0000	4,000
ISOPRENE	0,000	0,0000	5,000
PHEN	0,000	0,0000	6,000
CRES	0,000	0,0000	7,000

$$IR_+ = \frac{[O_3]^{inc} - [O_3]^{base}}{0.002x[COVs]^{base}}$$

Equação 41– Cálculo da reatividade incremental positiva

$$IR- = \frac{[O_3]^{inc} - [O_3]^{base}}{0.002x[COVs]^{base}}$$

Equação 42– Cálculo da reatividade incremental negativa

Esta alteração na concentração de determinado COV promove alteração na especiação dos COVs e por consequência, alteração nos resultados de concentração de ozônio.

Com os valores de IR+ e IR-, calcula-se a média aritmética, obtendo-se o valor de IR. Com esta informação, pode-se criar um *ranking* com os COVs mais representativos para geração de ozônio dentro de uma dada especiação.

Os dados meteorológicos utilizados foram de Corrêa (2003) para a região metropolitana do RJ como também os valores de concentração inicial dos poluentes conforme Tabela 12 e Tabela 13. Os dados médios de temperatura e umidade relativa das estações do estudo EIA (2007), Tabela 14, também foram utilizados em comparação aos dados de Corrêa (2003).

Tabela 12 – Concentração inicial de poluentes

<b>Poluentes</b>	<b>Corrêa (2003)</b>
NOx	0,18 ppm
CO	1,77 ppm
COV	1,44 ppm

Tabela 13 – Temperatura, umidade relativa e altura de mistura

<b>Hora</b>	<b>Temp. °C</b>	<b>Umidade Relativa</b>	<b>Altura de Mistura (m)</b>
6:00	26,6	77,5	600
7:00	27,8	72,6	700
8:00	29,0	66,9	700

<b>Hora</b>	<b>Temp. °C</b>	<b>Umidade Relativa</b>	<b>Altura de Mistura (m)</b>
9:00	29,9	61,9	880
10:00	30,7	58,4	1243
11:00	31,4	55,4	1600
12:00	31,8	54,0	1710
13:00	31,9	53,4	1816
14:00	31,7	54,5	1902
15:00	31,1	55,9	1666
16:00	30,2	59,4	890
17:00	29,0	63,8	790
18:00	28,1	69,9	715

Tabela 14 – Média das Temperatura e umidade relativa das estações do EIA (2007)

<b>Hora</b>	<b>Temp. °C</b>	<b>Umidade Relativa</b>
6:00	23,4	78,1
7:00	23,5	80,5
8:00	23,7	82,6
9:00	24,0	83,0
10:00	24,2	82,0
11:00	24,5	80,7
12:00	23,9	80,4

<b>Hora</b>	<b>Temp. °C</b>	<b>Umidade Relativa</b>
13:00	23,7	80,5
14:00	24,0	81,0
15:00	22,7	82,2
16:00	22,4	84,5
17:00	21,7	87,3
18:00	20,6	89,7

Percebe-se que as estações do EIA (2007) registraram temperaturas médias menores e umidades relativas maiores comparadas aos dados de Corrêa (2003).

Os dados de emissão utilizados para NOx e CO foram retirados do EIA (2007), o que corresponde respectivamente aos valores de 480 e 103,2 g s<sup>-1</sup>. Quando referenciados a região metropolitana do RJ passam para os valores de 1,44 e 0,311 kg h<sup>-1</sup> km<sup>-2</sup>. Detalhes desses cálculos, ver Anexo 5.

Para o caso de emissão de hidrocarbonetos em uma refinaria, foi utilizado um fator de emissão encontrado em Lora (2002) de 1 (kg de COV).(t de óleo cru processado)<sup>-1</sup>. A memória de cálculo a seguir apresenta como foi encontrado o valor de emissão do COMPERJ de 8182 t de COV ano<sup>-1</sup>.

$$\begin{aligned}
 & \text{COMPERJ} = 150.000 \text{ barril dia}^{-1} \\
 & 1 \text{ barril} = 158,98 \text{ l} \\
 & \text{densidade de Marlin} = 19,6^\circ\text{API} \\
 & ^\circ\text{API} = 141,5/d - 131,5 \\
 & d = 141,5 / (^\circ\text{API} + 131,5) = 0,94 \text{ g cm}^{-3} = 0,94 \text{ kg l}^{-1} \\
 & 150,000 \text{ barril dia}^{-1} * 158,98 \text{ l barril}^{-1} * 0,94 \text{ kg l}^{-1} = 22416 \text{ t de petróleo dia}^{-1} = \\
 & 8.181.905,7 \text{ t de petróleo ano}^{-1} \\
 & 8.181.905,7 \text{ t de petróleo.ano}^{-1} * 1(\text{kg de COV}).(\text{t de petróleo})^{-1} = 8.181.905,7 \text{ kg} \\
 & \text{de COV ano}^{-1} = \mathbf{8.182 \text{ t de COV ano}^{-1}}
 \end{aligned}$$

O valor de 8182 t de COV ano<sup>-1</sup>, corresponde a 0,78 kg h<sup>-1</sup> km<sup>-2</sup> quando referenciado a região metropolitana do RJ.

Além da contribuição do COMPERJ, os dados inventariados por FEEMA (2007) foram utilizados na simulação de ozônio. Como FEEMA (2007) não apresenta as emissões móveis nem totais para a bacia aérea IV, resolveu-se adotar como a caixa do sistema a região metropolitana do RJ como um todo. Maiores detalhes sobre os cálculos da Tabela 15, ver Anexo 5.

Tabela 15 – Dados inventariados de emissão

<b>Fonte de Informação\Poluente</b>	<b>NOx</b>	<b>CO</b>	<b>COV</b>
FEEMA (2007) para região metropolitana do RJ	90.500 t ano <sup>-1</sup> (8,61 kg h <sup>-1</sup> km <sup>-2</sup> )	321.000 t ano <sup>-1</sup> (30,54 kg h <sup>-1</sup> km <sup>-2</sup> )	79.300 t ano <sup>-1</sup> (7,54 kg h <sup>-1</sup> km <sup>-2</sup> )

Diante dos resultados de ozônio encontrados, uma análise de sensibilidade será utilizada diminuindo os valores de emissão de NOx e COVs, individualmente, em 5, 10, 20 e 30% como emprego de isopletras de ozônio para fundamentar a análise.

### **3. RESULTADOS E DISCUSSÃO**

Nas seções a seguir são apresentados os resultados obtidos através da simulação no AERMOD para os poluentes NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub>, MP (material particulado) e CO, segundo as taxas de emissão, topografia e meteorologia descritas na Metodologia e a interpretação desses resultados junto aos limites legislados.

Cabe ressaltar que os valores a serem apresentados para os poluentes listados apenas consideram a contribuição das emissões das chaminés do COMPERJ na região de estudo. Estas emissões irão aumentar os valores dos poluentes vindos das vizinhanças, das emissões locais (antrópicas e naturais), e dos futuros empreendimentos que irão se instalar no complexo. Portanto, estas simulações não contemplam outras fontes que não sejam o COMPERJ.

Os resultados com a simulação de ozônio utilizando o OZIPR e o SAPRC também são apresentados aqui na última seção deste capítulo. No caso desta simulação, cenários considerando todas as emissões atualmente presentes na região foram contempladas de maneira genérica.

#### **3.1. Óxidos de Nitrogênio - NO<sub>x</sub>**

As Figura 19, Figura 20 e Figura 21 apresentam as médias de concentração dos poluentes em  $\mu\text{g m}^{-3}$  no período de 1 h para possibilitar comparações com os limites legislados. Já a partir da Tabela 16, pode-se inferir sobre o limite legislado anual.

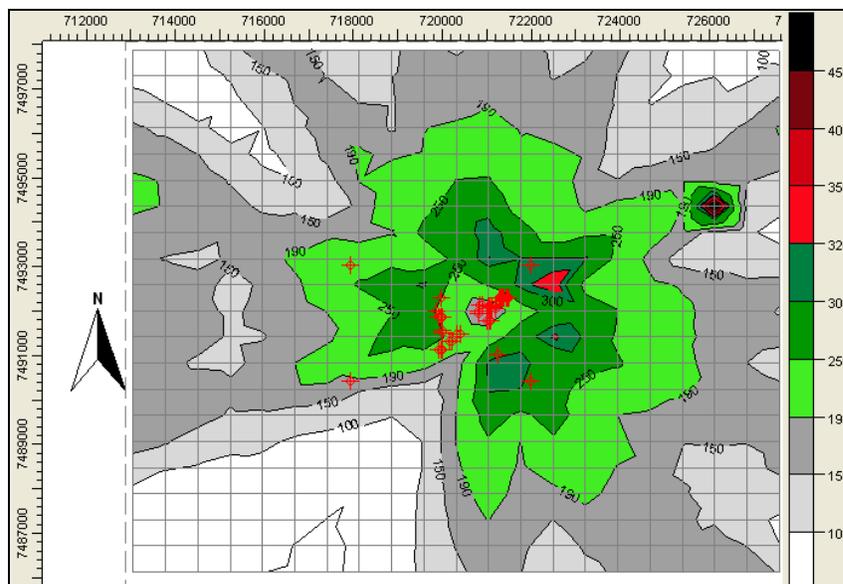


Figura 19 – Concentração média ( $\mu\text{g m}^{-3}$ ) em 1 h de NO<sub>x</sub> usando os dados meteorológicos da estação de Macacu.

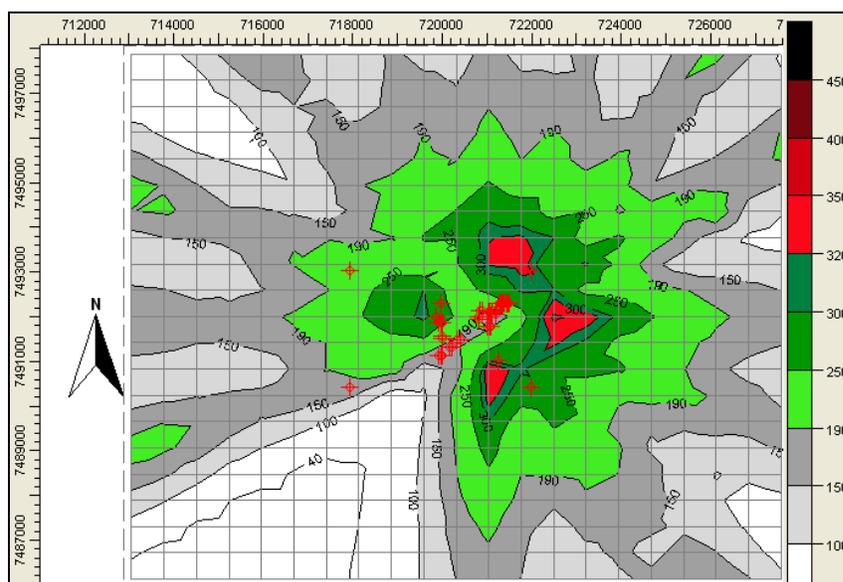


Figura 20 – Concentração média ( $\mu\text{g m}^{-3}$ ) em 1h de NO<sub>x</sub> usando os dados da estação Meteorológica de Sambaetiba

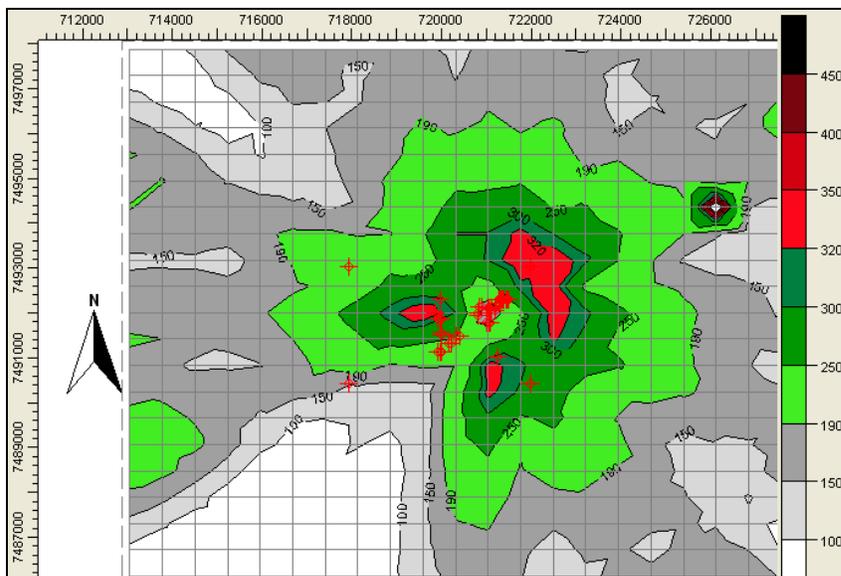


Figura 21 – Concentração média ( $\mu\text{g m}^{-3}$ ) em 1h de NOx utilizando dados da estação meteorológica Infraero

Nas Figura 19, Figura 20 e Figura 21, as cruzetas em vermelho representam os pontos de emissão, ou seja, as localizações das chaminés.

Na Figura 19, a maior concentração média horária seria encontrada nas coordenadas (726131, 7494343) no valor de  $539 \mu\text{g m}^{-3}$  a 1:00h do dia 17/05. Na Figura 20, nas coordenadas (722502, 7491993) o valor máximo de  $357 \mu\text{g m}^{-3}$  seria encontrado às 10:00h do dia 15/04. Na Figura 21, nas coordenadas (726131, 7494343) às 7:00h do dia 17/07 ocorreria o valor de  $538 \mu\text{g m}^{-3}$ . Estas informações são um extrato do relatório gerado pelo AERMOD que se encontra resumido no Anexo 6 com as 10 maiores médias horárias ocorridas no período.

Pelas Figura 19, Figura 20 e Figura 21, percebe-se que o padrão primário ( $320 \mu\text{g m}^{-3}$  na média horária) é violado a partir do vermelho, enquanto o padrão secundário ( $190 \mu\text{g m}^{-3}$  na média horária) é violado a partir do verde. Caso se deseje ser mais restritivo utilizando o limite da EPA ( $100 \mu\text{g m}^{-3}$  na média horária), este é violado a partir do cinza e extrapola a área do estudo de  $144 \text{ km}^2$ .

Os resultados das Figura 19, Figura 20 e Figura 21 são similares apesar da discrepância da rosa dos ventos das estações.

Apesar do exposto nos parágrafos anteriores, os níveis de concentração de NOx estão bem abaixo dos limites de criticidade de atenção, alerta, emergência ou crítico

determinados pela resolução CONAMA nº 03 de 1990 (respectivamente 1130, 2260, 3000 e 3750  $\mu\text{g m}^{-3}$ ).

Os valores apresentados aqui diferem do EIA (2007) que verificou o máximo de 300  $\mu\text{g m}^{-3}$ , o que não violaria o padrão primário.

A Tabela 16 apresenta os maiores resultados obtidos para as concentrações médias.

Tabela 16 – Concentrações máximas obtidas de NOx por estação

<b>Período de Média/ Estação</b>	<b>Macacu (<math>\mu\text{g m}^{-3}</math>)</b>	<b>Sambaetiba (<math>\mu\text{g m}^{-3}</math>)</b>	<b>Infraero (<math>\mu\text{g m}^{-3}</math>)</b>
1h	539	358	538
2h	306	248	357
3h	314	240	231
4h	265	232	275
6h	177	218	212
8h	149	156	152
12h	101	132	131
24h	66	85	82
1 mês	25	31	35
6 meses	21	29	28

Nota: Em vermelho, violação do padrão primário; em verde, violação do padrão secundário; e, em cinza, violação do padrão EPA.

Pelo que se observa na Tabela 16, para o período de média mais longo, o valor máximo resultante na área do estudo é de 29  $\mu\text{g m}^{-3}$ , bem abaixo do limite de 100  $\mu\text{g m}^{-3}$  de média aritmética anual para padrão primário e secundário. Apesar dos valores diferentes do EIA (2007), para o caso de média aritmética anual, ambos os resultados não violam o estabelecido em lei.

Outro fato importante sobre a Tabela 16 foi verificado quanto a localização dos valores máximos obtidos. Eles ocorreram ou no flare ou no centro do empreendimento, para regiões pequenas, corroborando para o fato que os gráficos são ferramentas mais importantes para conclusões.

Ainda sobre a Tabela 16, percebe-se que os valores de NOx caem com o aumento do período de média. Isto era esperado, pois o resultado ali apresentado significa dizer a pior média de um período consecutivo. Explicando por exemplos, o valor de 1h exibe o pior conjunto de dados ocorridos nos 6 meses de estudo, a pior 1h em termos de dispersão. Assim como os resultados de 8h são as 8h consecutivas no período de 6 meses que apresentaram a pior dispersão. Este parágrafo é válido para as simulações que seguem.

### 3.2. Óxidos de Enxofre – SOx

As Figura 22, Figura 23 e Figura 24 apresentam as médias de concentração dos poluentes em  $\mu\text{g m}^{-3}$  no período de 24h para comparar com os valores legislados de 24h (365  $\mu\text{g m}^{-3}$  para padrão primário e 100  $\mu\text{g m}^{-3}$  para padrão secundário). Já com informação da Tabela 17, pode-se fazer comparações com o valor legislado anual e especulações com períodos menores de 24h. Cabe lembrar que as cruzetas em vermelho representam as localizações das chaminés.

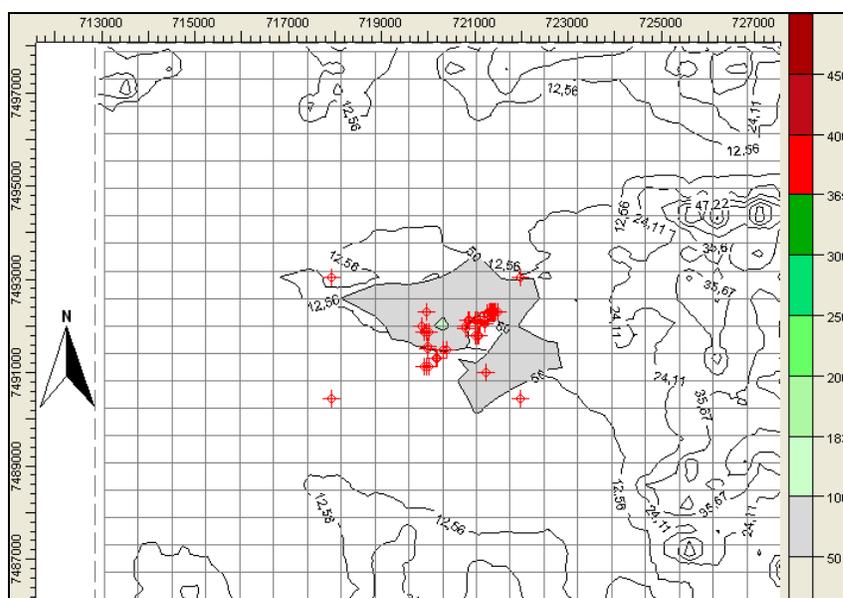


Figura 22 – Concentração média ( $\mu\text{g m}^{-3}$ ) no período de 24 horas de SOx com dados da estação Macacu

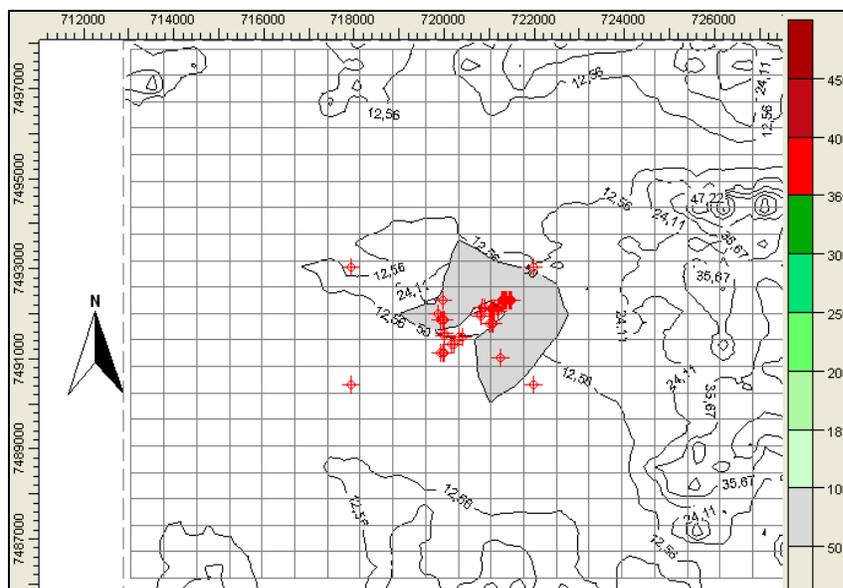


Figura 23 – Concentração média ( $\mu\text{g m}^{-3}$ ) no período de 24 horas de SOx com dados da estação Sambaetiba

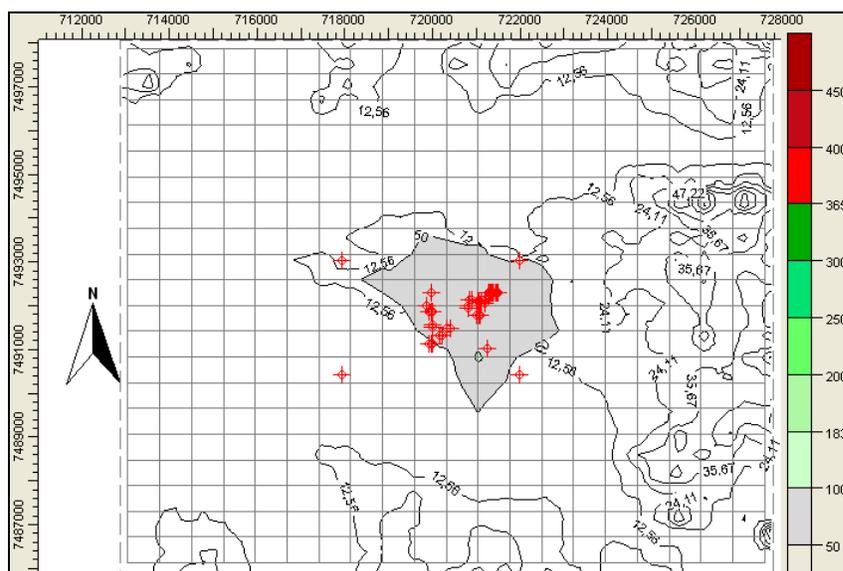


Figura 24 – Concentração média ( $\mu\text{g m}^{-3}$ ) no período de 24 horas de SOx com dados da estação Infraero

Na Figura 22, a maior concentração média horária seria encontrada nas coordenadas (720325, 7491993) no valor de  $117 \mu\text{g m}^{-3}$  às 24:00h do dia 07/04. Na Figura 23, nas coordenadas (721051, 7490818) o valor máximo de  $71 \mu\text{g m}^{-3}$  seria encontrado às 24:00h do dia 18/03. Na Figura 24, nas coordenadas (721051, 7490818) às 24:00h do dia 12/04 ocorreria o valor de  $109 \mu\text{g m}^{-3}$ . Cabe lembrar que estas informações são um extrato do

relatório gerado pelo AERMOD que se encontra resumido no Anexo 6, para o caso do SO<sub>x</sub>, com as 10 maiores médias ocorridas em um período de 24 horas.

As Figura 22, Figura 23 e Figura 24 apresentam uma área insignificante onde o padrão secundário de 100  $\mu\text{g m}^{-3}$  é infringido. Esta área é representada pelo tom de verde mais claro. As emissões não alcançam nem a metade do padrão primário de 365  $\mu\text{g m}^{-3}$ .

A compilação dos resultados das Figura 22, Figura 23 e Figura 24 chegam a mesma conclusão apesar das condições meteorológicas diferentes das estações.

Tabela 17 – Concentrações máximas obtidas de SO<sub>x</sub> por estação

<b>Período de Média/ Estação</b>	<b>Macacu (<math>\mu\text{g m}^{-3}</math>)</b>	<b>Sambaetiba (<math>\mu\text{g m}^{-3}</math>)</b>	<b>Infraero (<math>\mu\text{g m}^{-3}</math>)</b>
1h	407	416	401
2h	352	321	355
3h	323	312	337
4h	316	272	300
6h	296	212	274
8h	216	172	221
12h	167	141	158
24h	117	71	109
1 mês	30	30	35
6 meses	23	28	28

Nota: Em vermelho, violação do padrão primário; em verde, violação do padrão secundário.

A Tabela 17 apresenta um valor máximo observado de 28  $\mu\text{g m}^{-3}$  de concentração média de SO<sub>x</sub> para o período de 6 meses. Este valor está bem abaixo dos limites primários e secundários anuais impostos para esse poluente, respectivamente de 80 e 40  $\mu\text{g m}^{-3}$ .

Caso os limites primários e secundários fossem aplicados para períodos menores de 24h, pela Tabela 17, percebe-se que o limite primário seria violado na média horária enquanto o limite secundário seria violado em todos os períodos.

Os valores apresentados aqui são próximos ao do EIA (2007) que verificou um máximo de  $95,2 \mu\text{g m}^{-3}$ , no período de 24 horas, o que, para o caso deles, não violaria o padrão secundário em nenhuma localidade, apesar de estar bem próximo do limite.

Os bons resultados aqui observados se deve ao fato do COMPERJ planejar utilizar um óleo combustível dessulfurado. A utilização de outro óleo combustível invalidaria as simulações aqui realizadas.

### 3.3. Material Particulado – MP

A Tabela 18 apresenta as médias máximas de concentração de material particulado em  $\mu\text{g m}^{-3}$  para diversos períodos para as estações de Macacu, Sambaetiba e Infraero.

Tabela 18 – Concentrações máximas obtidas de MP por estação

<b>Período de Média/ Estação</b>	<b>Macacu (<math>\mu\text{g m}^{-3}</math>)</b>	<b>Sambaetiba (<math>\mu\text{g m}^{-3}</math>)</b>	<b>Infraero (<math>\mu\text{g m}^{-3}</math>)</b>
1h	44	21	44
2h	24	20	28
3h	25	13	18
4h	21	14	21
6h	13	12	17
8h	11	9	12
12h	8	7	8
24h	5	6	5

<b>Período de Média/ Estação</b>	<b>Macacu (<math>\mu\text{g m}^{-3}</math>)</b>	<b>Sambaetiba (<math>\mu\text{g m}^{-3}</math>)</b>	<b>Infraero (<math>\mu\text{g m}^{-3}</math>)</b>
1 mês	2	2	2
6 meses	1	2	2

Pela Tabela 18 , no período de 24h, observa-se que os valores máximos de  $5 \mu\text{g m}^{-3}$ ,  $6 \mu\text{g m}^{-3}$  e  $5 \mu\text{g m}^{-3}$  , respectivamente Macacu, Sambaetiba e Infraero são irrelevantes perante os valores máximos de 240 e  $150 \mu\text{g m}^{-3}$ , definidos para os limites primários e secundários de PTS, e de  $150 \mu\text{g m}^{-3}$  definido como limite primário e secundários de PM10. Sendo esta afirmativa também verdadeira para qualquer outro período que se desejar analisar.

Comparando-se os valores do período de 6 meses com a média anual limite definida pelo CONAMA de  $50 \mu\text{g m}^{-3}$  para PM10, e  $80 \mu\text{g m}^{-3}$  e  $60 \mu\text{g m}^{-3}$ , respectivamente media anual limites primário e secundário, para PTS, nota-se que, também, dificilmente serão violadas.

Os valores apresentados aqui são similares a EIA (2007) que verificou o máximo de  $3,4 \mu\text{g m}^{-3}$ , no período de 24 horas, o que não violaria nem o padrão secundário.

### 3.4. Monóxido de Carbono – CO

A Tabela 19 apresenta as médias máximas de concentração de monóxido de carbono em microgramas por metro cúbico nos diversos períodos com os dados das estações Macacu, Sambaetiba e Infraero.

Tabela 19 – Concentrações máximas obtidas de CO por estação

<b>Período de Média/ Estação</b>	<b>Macacu (<math>\mu\text{g m}^{-3}</math>)</b>	<b>Sambaetiba (<math>\mu\text{g m}^{-3}</math>)</b>	<b>Infraero (<math>\mu\text{g m}^{-3}</math>)</b>
1h	180	88	180
2h	103	87	124
3h	105	61	83

<b>Período de Média/ Estação</b>	<b>Macacu (<math>\mu\text{g m}^{-3}</math>)</b>	<b>Sambaetiba (<math>\mu\text{g m}^{-3}</math>)</b>	<b>Infraero (<math>\mu\text{g m}^{-3}</math>)</b>
4h	90	59	98
6h	54	54	71
8h	46	43	54
12h	30	30	41
24h	18	27	22
1 mês	7	8	8
6 meses	5	7	6

Na Tabela 19, para o período de média horária máxima, o maior valor foi de  $180 \mu\text{g m}^{-3}$ , ordens de grandeza bem abaixo dos exigidos pelos padrões primários e secundários de  $40.000 \mu\text{g m}^{-3}$ .

Ainda na Tabela 19, para o período de 8h, o valor máximo verificado foi de  $54 \mu\text{g m}^{-3}$ , como também verificado para concentração média horária, ele se encontra ordens de grandeza bem abaixo dos exigidos pelos padrões primários e secundários de  $10.000 \mu\text{g m}^{-3}$ .

Os valores apresentados aqui são similares em ordem de grandeza quando comparados a EIA (2007) que verificou o máximo de  $104 \mu\text{g m}^{-3}$ , na média horária, e  $36,7 \mu\text{g m}^{-3}$  no período de 8 horas.

### **3.5. Ozônio**

Os resultados da simulação com ozônio para vários cenários utilizando o OZIPR/SAPRC são apresentados na Tabela 20.

Cabe uma breve apresentação dessa tabela para melhor compreender as legendas criadas para montar os cenários:

- Na coluna Especificação, aponta-se a especificação de hidrocarbonetos utilizadas, aquela apresentada anteriormente na Tabela 10 ou na Tabela 11.

- A coluna Emissões apresenta os dados inventariados de emissão utilizados, já apresentados na Tabela 15, mais as contribuições do COMPERJ. Detalhes desses valores, verificar o Anexo 5.
- Na coluna ozônio são apresentados os resultados simulados com os dados meteorológicos de Corrêa (2003) e EIA (2007).

Tabela 20 – Resultados das simulações com ozônio para o COMPERJ.

<b>Caso</b>	<b>Especiação</b>	<b>Emissões</b>	<b>Ozônio (ppb)*</b>
<b>Caso Base</b>	RJ – Corrêa	RJ – Corrêa	56,61
<b>Cenário 1 A</b>	REDUC	RJ – FEEMA	50 / 48
<b>Cenário 2 A</b>	REDUC	COMPERJ	67,8 / 62
<b>Cenário 3 A</b>	REDUC	COMPERJ + (RJ - FEEMA)	47,8 / 45
<b>Cenário 1 B</b>	RJ - Corrêa	RJ – FEEMA	204 / 166
<b>Cenário 2 B</b>	RJ – Corrêa	COMPERJ	217 / 199
<b>Cenário 3 B</b>	RJ – Corrêa	COMPERJ + RJ – FEEMA	187 / 155

Nota: Em vermelho, estudos de casos que proporcionaram violações nas emissões de ozônio.

\* Resultados para dados meteorológicos de Corrêa(2003)/ EIA(2007)

O “caso Base” foi simulado para reproduzir os resultados criados por Corrêa (2003) para a região metropolitana do RJ e averiguar a consistência do modelo utilizado.

Antes de uma análise mais complexa, conclui-se que a utilização de dados meteorológicos de temperatura e umidade relativa de Corrêa (2003) e EIA(2007) levam a número próximos e a comportamentos similares.

Observa-se que os piores resultados acontecem para os cenários 1B, 2B e 3B ultrapassando os limites estabelecidos para o ozônio do CONAMA 03/90, cerca de 81 ppbv. Nestes cenários, considerou-se a concentração inicial dos poluentes e a especiação de

hidrocarbonetos igual ao da Av. Presidente Vargas, pode-se dizer que são cenários onde a especiação de hidrocarbonetos está tendenciado para uma poluição tipicamente mais veicular.

A diferença de resultados entre os dois grupos de cenário, A e B, deve-se a especiação utilizada: enquanto o primeiro grupo possui mais metano, menos reativo na química de ozônio, a segunda especiação possui um grupo representativo de aromáticos na sua composição. Isto justificaria os altos valores, cerca de 200ppb, encontrados para este grupo de simulações.

Já o grupo de cenário B possui valores quatro vezes maiores que o caso Original por conta das diferenças nas emissões. Menores no cenário B.

Os casos que utilizaram a especiação da REDUC apresentaram baixa formação de ozônio, o que é justificável pelo fato do metano ser o hidrocarboneto mais presente nas análises (ver Tabela 11) e este ser pouco reativo para formação de ozônio. A REDUC, portanto, pode ser um caso distinto para tentar caracterizar o COMPERJ, já que o metano deve ser oriundo dos processos de compressão e tratamento de gás natural utilizados naquela unidade para envio desta matéria-prima para diversos pontos do país, processos estes que estarão ausentes no COMPERJ.

Os inventários de emissões da bacia aérea da região metropolitana e do COMPERJ, quando analisados independentemente apresentam valores de formação de ozônio levemente superiores do que quando estes inventários são somados. Os gráficos de sensibilidade (Gráfico 1 e Gráfico 2) e os gráficos de isopletas (Gráfico 3 e Gráfico 4) podem auxiliar nesta explicação.

Normalmente para relações COV/NOx maiores que 5,5 (nos presentes casos são de 7,5), considera-se que o ambiente é controlado por COVs e, para alterar a formação de ozônio, deve-se mexer nas emissões de NOx.

Analisando os Gráfico 1 e Gráfico 2 de sensibilidade, conclui-se que uma diminuição na emissão de NOx acaba gerando mais ozônio enquanto uma diminuição na emissão de COVs promove uma diminuição na formação de ozônio.

No gráfico de isopleta do cenário 2A (Gráfico 3) com especiação da REDUC, a concentração inicial de poluentes é apresentada com um círculo sólido preto. Conclui-se que a partir desta posição, um aumento nas emissões de NOx ou diminuição nas emissões de COV promovem menor formação de ozônio. Isto explicaria por que quando os inventários são somados há diminuição na formação de ozônio: Como as emissões do COMPERJ são maiores em NOx, sobe-se na curva encontrando isopletas com menor formação de ozônio.

Pelo gráfico de isopleta do cenário 2B (Gráfico 4), partindo do círculo sólido preto que representa a concentração inicial de poluentes, um aumento ou diminuição de NOx acabam gerando o mesmo resultado: diminuição de formação de ozônio. Mas esta diminuição deve ter uma amplitude significativa para ser realmente efetiva na formação de ozônio. Já no caso dos COVs, uma breve diminuição de suas emissões seria bem mais efetiva na diminuição da formação de ozônio.

Diante dos últimos parágrafos, constata-se que a ação mais efetiva, independente de cenários, seria a diminuição nas emissões de hidrocarbonetos, divergindo do observado para relações de COV/NOx similares aos casos apresentados. Dentre os hidrocarbonetos a serem focados, a análise incremental é uma ferramenta importante.

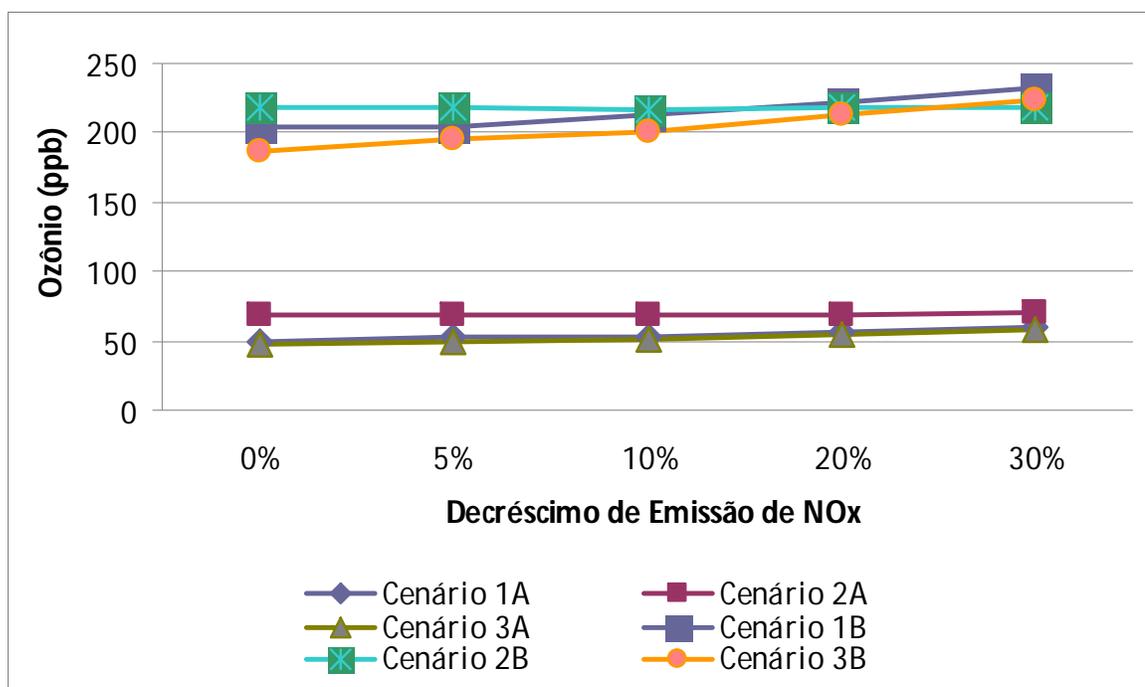


Gráfico 1 – Impacto na formação de ozônio com o decréscimo de emissão de NOx

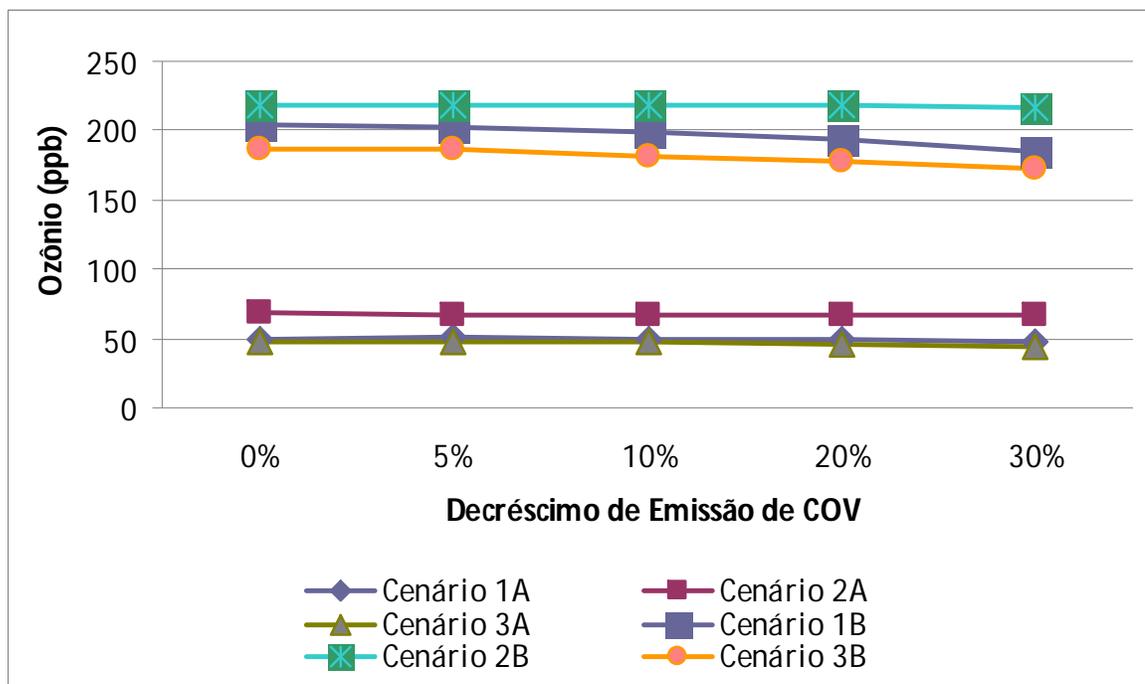


Gráfico 2 – Impacto na formação de ozônio com o decréscimo de emissão de COV

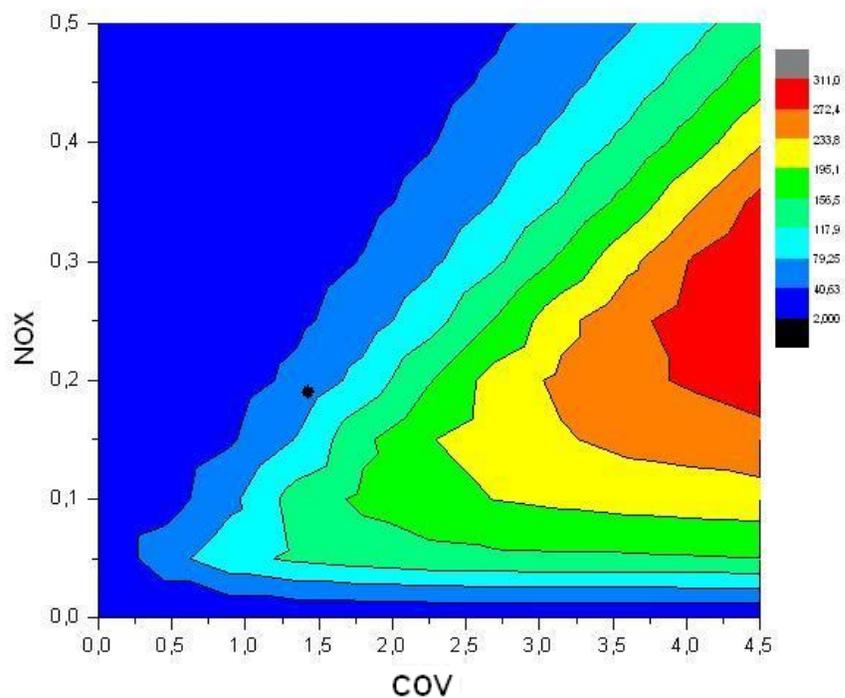


Gráfico 3 – Isopleta de Ozônio para especificação REDUC – Cenário 2A.

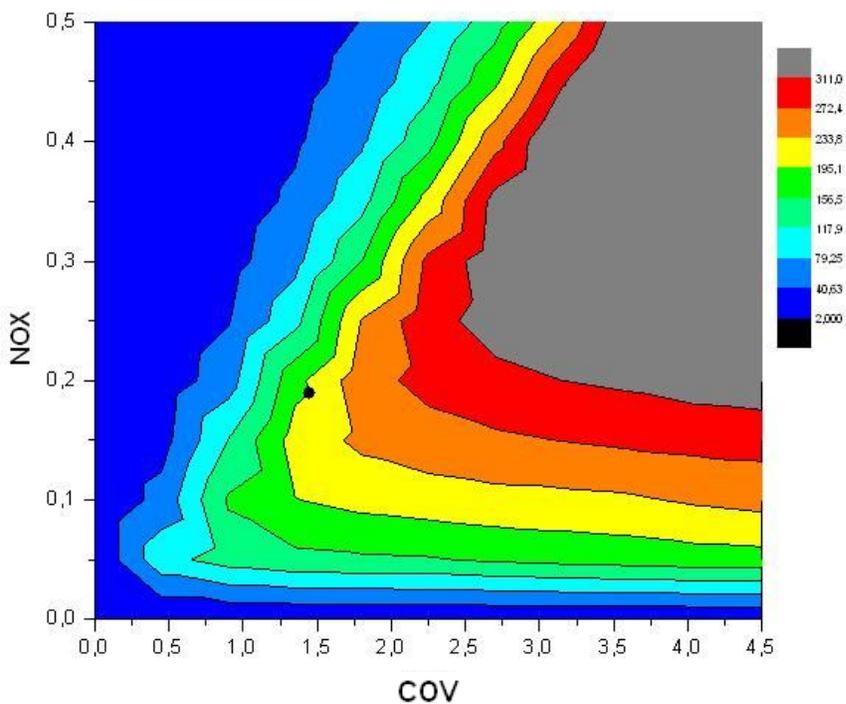


Gráfico 4 – Isopleta de Ozônio para especiação de Corrêa (2003) – Cenário 2B

A partir do cenário 2A, onde se verificou a maior formação de ozônio utilizando a especiação da REDUC, determinou-se quais os COVs mais importantes na formação do ozônio através da técnica de reatividade incremental. O Gráfico 5 apresenta os COVs mais significativos na especiação da REDUC em ordem decrescente. As siglas são elucidadas no Anexo 4.

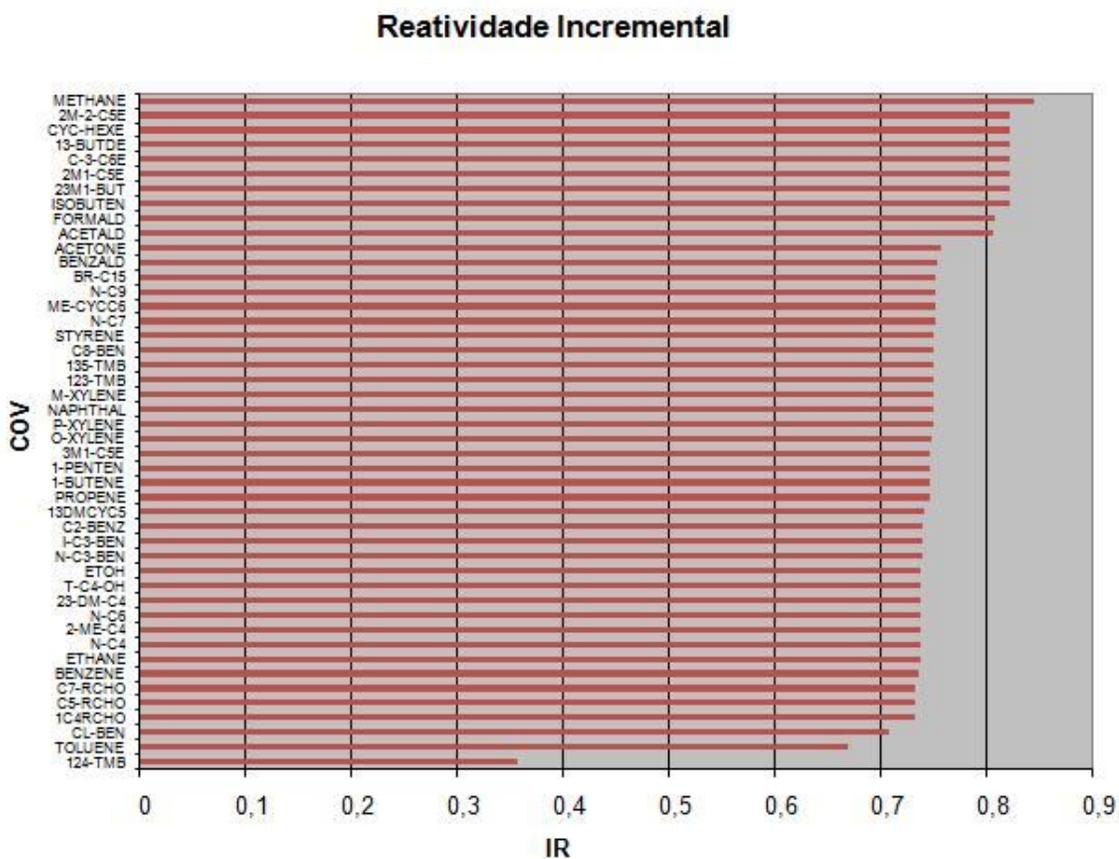


Gráfico 5 – Reatividade Incremental de COVs para o Cenário 2A.

De acordo com o apresentado no Gráfico 5, os COVs analisados na reatividade incremental para o cenário 2A apresentam de certa forma o mesmo peso na química de formação de ozônio.

Fazendo um corte para os 10 (dez) mais reativos do Gráfico 5, pode-se fazer uma análise de quais componentes seriam os mais interessantes de serem monitorados e controlados. Os COVs nesta análise seriam: o metano, o 2-metil-2-penteno, o ciclo-hexeno, o 1-3-butadieno, o cis-3-hexeno, o 2-metil-1-penteno, o 2,3-dimetil-1-buteno, o isobuteno, o formaldeído e o acetaldeído.

Aplicando a escala de reatividade de Finlayson-Pitts e Pitts (2000) sobre os COVs do parágrafo anterior, conclui-se que os hidrocarbonetos que merecem maior atenção seriam: o 2-3-dimetil-1-buteno, o cis-3-hexeno, o 2-metil-2-penteno, o 2-metil-1-penteno e o isobuteno.

O metano não é muito reativo, mas aparece no gráfico como sendo o mais importante dos hidrocarbonetos. Isto se deve ao fato da sua quantidade ser significativa e diluir a participação percentual dos demais na especiação. Uma diminuição na sua quantidade,

promove um aumento relativo dos demais hidrocarbonetos na especiação e, portanto, aumento na capacidade de geração de ozônio. A presença do metano poderia explicar o fato de apesar da química atmosférica ser controlada por COVs na região (relação COV/NOx maior que 5,5), a formação de ozônio ser sensível a formação de hidrocarbonetos: Na verdade, se retirar o metano, a relação COV/NOx fica menor que 5,5 sendo a química atmosférica controlada pelos NOx, sendo, portanto, a formação de ozônio sensível a presença de hidrocarbonetos conforme prega a literatura.

## 4. CONCLUSÕES

Os simuladores de dispersão são ferramentas complexas que estão em constante evolução e são altamente dependentes da tecnologia computacional existente e de banco de dados meteorológico para sua validação.

A carência de informações exatas em empreendimentos que ainda não existem faz com que, apesar das simplificações, os modelos gaussianos apresentem valores sempre próximos ou maiores do que os valores reais, sendo, portanto, conservativos, úteis e empregáveis para casos de regulação.

O AERMOD incorpora todas as evoluções ocorridas desde 1970 sobre modelagem de fenômenos de dispersão de poluentes, sendo o estado da arte neste tipo de ferramenta não fluidodinâmica.

O AERMOD pode ser uma ferramenta importante na previsão de problemas, cujas soluções podem ser obtidas ainda durante a fase de projeto básico de um empreendimento, de forma a minimizar os efeitos das emissões atmosféricas e, principalmente, evitar as suas conseqüências. Este tipo de ferramenta também pode ser utilizado rapidamente avaliar o impacto de modificações e *revamps* de projeto.

Além disso, pode ser utilizado durante a operação de uma unidade fabril junto com uma rede de monitoramento para avaliar o quanto daquela medição é devido à empresa.

As informações da rede de monitoramento e a previsão preventiva do AERMOD permitem que qualquer empresa possa tomar ações para evitar que o padrão secundário apresentado pela resolução CONAMA nº03 de 28/06/90 jamais seja ultrapassado, para alguns componentes.

De acordo com as simulações do AERMOD realizadas, para o COMPERJ, o poluente NO<sub>x</sub> é o mais crítico e viola os padrões primários e secundários de emissão. Sendo, portanto, o parâmetro que deverá ter um acompanhamento mais próximo pelas estações meteorológicas. Sugere-se, também, que, se possível, preveja-se uma revisão do projeto das unidades fabris do COMPERJ a fim de diminuir a quantidade ou, pelo menos, a concentração destas emissões.

O poluente SO<sub>x</sub> é o mais dependente do combustível empregado e, caso se adote um combustível com maior teor de enxofre daquele adotado por este trabalho, cuja fonte de informação foi o EIA (2007), as simulações devem ser refeitas.

Nos casos do monóxido de carbono e do material particulado, a sua emissão é função da forma que a unidade é operada. Cabe a empresa investir em treinamento do seu grupo de operação para que os valores dessas emissões sejam mantidos nos dados teóricos usados para a execução das simulações aqui realizadas.

A Tabela 21 apresenta um comparativo entre os valores máximos obtidos pelo presente trabalho e o estudo de impacto ambiental (EIA, 2007).

Tabela 21 – Comparativo de resultados com EIA (2007)

	<b>NOx (1h)</b> ( $\mu\text{g m}^{-3}$ )	<b>SOx (24h)</b> ( $\mu\text{g m}^{-3}$ )	<b>MP (24h)</b> ( $\mu\text{g m}^{-3}$ )	<b>CO (1h)</b> ( $\mu\text{g m}^{-3}$ )	<b>CO (8h)</b> ( $\mu\text{g m}^{-3}$ )
<b>EIA (2007)</b>	301	95,2	3,4	103,9	36,7
<b>Trabalho</b>	539	117	6	180	54
<b>Limites</b> <b>(1º/2º)</b>	320/190	365/100	150	40.000	10.000

Segundo as simulações de ozônio, atenção especial deve ser dada aos hidrocarbonetos já que diminuição na formação de NOx promovem aumento de geração de ozônio. Utilizando a especiação da REDUC, os valores máximos ficaram próximos dos limites, mas não os ultrapassando. Já nos casos onde se utilizou a especiação de Corrêa (2003), a partir de dados da Av. Presidente Vargas no Centro do RJ, obteve-se valores máximos de ozônio bem acima dos limites legais. Importante ressaltar que ao empregar os dados da REDUC, considera-se que a área metropolitana do RJ é basicamente industrial enquanto que ao utilizar os dados da Av. Presidente Vargas, considera-se uma área mais afetada por poluição veicular. Ao se empregar estes dois limites de casos, verifica-se o quão díspares se tornam os resultados numéricos de formação de ozônio, mas que qualitativamente apresentam a mesma indicação de solução: controlar a emissão de hidrocarbonetos.

Para novos trabalhos, pode-se sugerir a execução de melhorias e atualizações. No AERMOD, as melhorias devem ser feitas quanto à utilização de dados meteorológicos de uma estação específica a ser colocada na área central aonde vai ser construído o COMPERJ com um período de coleta de dados de três anos como exige a FEEMA, atual INEA. Já as atualizações, devem ser realizadas quando da entrada em funcionamento do COMPERJ com a medição real de vazão dos poluentes presentes nas emissões dos gases das diversas chaminés

presentes no empreendimento. As simulações com ozônio devem ser atualizadas com a especificação real de hidrocarbonetos, o que só estará disponível com a entrada em funcionamento do COMPERJ.

Diante dos novos resultados simulados, caberia uma comparação com os resultados do presente trabalho e, também, com os resultados de medição *on-line* desses poluentes através do uso de analisadores específicos (cromatógrafos, analisadores de infravermelho e quimiluminiscência) conforme exige a legislação.

Outras sugestões de trabalho seriam o acompanhamento da atualização do inventário de emissões da região metropolitana do RJ disponibilizado pela FEEMA/INEA e seu impacto na formação de ozônio; como também atualização do AERMOD para cada nova instalação com fontes emissoras estacionárias que vierem a se localizar no complexo de Itaboraí.

Cabe ressaltar a maior dificuldade na realização do presente trabalho: obter os dados para realização das simulações. No item 2.1, foi narrada a dificuldade nesta tarefa e as soluções adotadas para contornar o problema dessa ausência de informação. Esta tarefa seria mais hercúlea ainda, caso não houvesse os dados de projeto e os dados meteorológicos do EIA/RIMA. Isto exigiria utilizar fatores de emissão teóricos para uma refinaria apresentados no item 1.2.1, simplificar a simulação para uma única emissão global e utilizar dados meteorológicos que estivessem disponíveis no estado do Rio de Janeiro. Estas simplificações, com certeza, afastariam ainda mais os resultados da realidade.

Os resultados das simulações de dispersão atmosférica gerados aqui pelo AERMOD diferem dos apresentados pelo EIA/RIMA, por este ter utilizado os dados meteorológicos disponíveis da estação do aeroporto do Galeão, isto justificado pelo fato de possibilitar atender a exigência da FEEMA (INEA) de no mínimo três anos de dados; enquanto no presente trabalho, o autor optou por utilizar os poucos dados (seis meses) de estações que estão mais próximas do empreendimento. Somado a isso, a utilização de uma malha de simulação menos fechada proporcionaria mais um fator para ampliar as diferenças nos resultados. Mesmo com essas diferenças nos valores de entrada, os resultados encontrados não foram tão discrepantes do EIA/RIMA.

Por fim, espero que este trabalho fomente e contribua para estudos de impacto ambiental de novos empreendimentos ou daqueles já existentes a serem executados pelo Programa de Pós-graduação em Química Ambiental da Universidade do Estado do Rio de Janeiro seguindo e aprimorando a metodologia aqui adotada, principalmente, descobrindo e catalogando novas fontes de dados quanto a fatores de emissão para os diversos processos

fabris. Além disso, a aquisição de equipamentos portáteis de medição meteorológica ajudaria os trabalhos do grupo a serem independentes de outras fontes.

## 5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Air Dispersion Modelling Guideline for Ontario; version 1.0; 2005; PIBS#5165e; “Guidance for demonstrating compliance with the air dispersion modeling requirements set out in Ontario Regulation 419/05 air pollution – local air quality”.
- Baird, C.; 2002; “Química Ambiental; ed. Bookman; 622 pg.
- BEN – Balanço Energético Nacional, 2008, disponível em [http://www.epe.gov.br/Estudos/Paginas/Plano%20Decenal%20de%20Energia%20%E2%80%93%20PDE/Estudos\\_8.aspx](http://www.epe.gov.br/Estudos/Paginas/Plano%20Decenal%20de%20Energia%20%E2%80%93%20PDE/Estudos_8.aspx); Acessado em 11/02/2009.
- Brost, R. A.; Wyngaard, J. C.; Lenschow, D. H.; 1982; “Marine stratocumulus layers. Part II: Turbulence budgets”; J. Atmos. Sci.; 39; 818-836.
- Caputo, M.; Gimenez, M.; Schlamp, M.; 2003; “Intercomparison of atmospheric dispersion models”; Atmospheric Environment; 37; 2435-2449.
- Carter, W. P. L.; 1990; “A detailed mechanism for the gas-phases atmospheric reactions of organic compounds”; Atmospheric Environment; 24 A; 481-518.
- Carson, D.J.; 1973; “The development of a dry inversion-capped convectively unstable boundary layer”; Quart. J. Roy. Meteor. Soc.; 99; 450-467.
- Cheremisinof, N. P.; 2002; “Handbook of air pollution prevention and control”; Butterworth-Heinemann; Elsevier Science; 562 p.
- Cimorelli, A. J.; Venkatram, A.; Weil, J.C.; Paine, R. J.; Wilson, R.B.; Lee, R. F.; Peter, W.D.; 2003; “AERMOD description of model formulation”; U.S. Environmental Protection Agency, EPA Rep. 454/R-03-002d, 85 f.
- Cimorelli, A. J.; Perry, S.G.; Venkatram, A.; Weil, J. C.; Paine, R. J.; Wilson, R.B.; Lee, R.F.; Peters, W.D.; Brode, R.W.; 2004; “AERMOD: A dispersion Model for Industrial Source Applications. Part I: General Model Formulation and Boundary Layer Characterization”; Journal of Applied Meteorology; 44; 682-693.
- Corrêa, S. M.; 2003; “Qualidade do ar da cidade do Rio de Janeiro: Sinergia entre simulação e monitoramento”; Universidade Federal do Rio de Janeiro; Instituto de Química; 174 pg.
- Deardorff, J. W.; 1970; “Convective velocity and temperature scales for the unstable boundary layer for Rayleigh convection”; Journal of Atmosphere Science; 27; 1211-1213.

- EIA (Estudo de Impacto Ambiental); “Complexo petroquímico do Rio de Janeiro”; 2007; Disponível para consulta no INEA (Antiga FEEMA);
- Finlayson-Pitts, B. J; Pitts, J. N.; 2000; “Chemistry of the Upper and Lower Atmosphere”; San Diego: Academic Press.
- FEEMA; 2007; “Relatório Anual de Qualidade do Ar”; Disponível em [http://www.feema.rj.gov.br/Relatorio\\_2007.pdf](http://www.feema.rj.gov.br/Relatorio_2007.pdf); Acessado em 01 de abril de 2009
- Gery, M. W.; Crouse, R. R.; 1990; “User’s Guide for Executing OZIPR”; U.S.Environmental Protection Agency; Research Triangle Park, N. C., EPA-9D2196NASA, 1990.
- Holmes, N. S.; Morawska, L.; 2006, “A review of dispersion modeling and its application to the dispersion of particles: An overview of different dispersion models available”; Atmospheric Environment; 40; 5902-5928.
- Kesarkar, A.P.; Dalvi, M.; Kaginalkar, A., Ohja, A.; 2007; “Coupling of the weather research and forecasting model with AERMOD for pollutant dispersion modeling. A case study for PM10 dispersion over Pune, India”; Atmospheric Environment; 41; 1976-1988.
- INEA; 2009; Informações disponíveis em <http://www.inea.rj.gov.br>; Acessado em 6 de novembro de 2009.
- Lora, E. E. S.; 2002; Prevenção e Controle da Poluição nos Setores Energético, Industrial e de Transporte; Ed Interciência; 862p
- Mehdizadeh, F.; Rifai; H. S.; 2004; “Modelling point source plumes at high altitudes using a modified Gaussian model”, Atmosphere Environment; 38; 821-831.
- Oke, T.R.; 1982; “The energetic basis of the urban heat island”; Quart. J. Roy. Meteor. Soc.; 108; 1-24.
- Oke, T.R.; 1998; “An algorithmic scheme to estimate hourly heat island magnitude”; American Meteorology Society; 80-83.
- Panofsky, H.A.; Dutton, J.A.; 1984; “Atmospheric turbulence: Models and methods for engineering applications.”; Johan Wiley and Sons; 417 pg.
- RIMA (Relatório de Impacto Ambiental); “Complexo petroquímico do Rio de Janeiro”; 2007; Disponível em <http://www.feema.rj.gov.br/RIMAS/RIMA%20COMPERJ.pdf>; Acessado em 21 de novembro de 2007.
- Schulman, L.L.; Strimaitis, D.G.; Scire, J.S.; 2000; “Development and evaluation of the PRIME plume rise and building downwash model”; Journal Air Waste Management Association; 50; 378-390.

- Sokhi, R.S.; Fisher, B.; Lester, A.; McCrae, I.; Bualert, S.; Sootonstit, N.; 1998; “Modeling of air quality around roads. In: Proceedings of the 5<sup>th</sup> international conference on harmonization with atmospheric dispersion modeling for regulatory purposes”, Greece.
- Souto González, J.A.; Bello Bugallo, P.M.; Casares Long, J.J.; 2004; “Evaluation of air pollution modeling tools as environmental engineering courseware”; Water Science and Technology; 49; N°8; 57-64.
- Shreve, R. N.; Brink, J. A., 1977; *Indústrias de processos químicos*; Editora Guanabara Koogan S.A; 717 p; 4<sup>a</sup> edição.
- Tonnesen, G. S; 2000; “User’s Guide for Executing OZIPR Version 2.0.”; Carolina do Norte;USEPA.
- United States Environmental Protection Agency (USEPA); 1997; “Addendum to ISC3 user’s guide – The prime plume rise and building downwash model”
- United States Environmental Protection Agency (USEPA); 2003; “Ozone: Good up bad nearby”. Disponível em <http://www.epa.gov/air/oaqps/gooduphigh/ozone.pdf>. Acessado em 07 de abril de 2009
- United States Environmental Protection Agency (USEPA); 2004; “Description of model formulation”
- Van Ulden, A. P.; Hostlag; A. A. M.; 1985; “Estimating of atmospheric boundary layer parameters for diffusion applications”; J. Climate Appl. Meteor.; 24; 1196-1207.
- Venkatram, A.; 1980; “Estimating the Monin-Obukhov length in the stable boundary layer for dispersion calculations”; Boundary-layer Meteorology; 19; 481-485.
- Venkatram, A.; Brode, R.; Cimorelli, A.; Lee, R.; Paine, R.; Perry, S.; Peters, W.; Weil, J.; Wilson, R.; 2001; “A complex terrain dispersion model for regulatory applications”; Atmosphere Environment; 35; 4211-4221.
- Weil, J.C.; Brower, R.P.; 1983; “Estimating convective boundary layer parameters for diffusion applications”; Maryland Power Plant Siting Program; Maryland Department of Natural Resources; Rep. PPSP-MD-48; 45p.
- Weil, J.C.; Venkatram, A.; Wyngaard, J.C.;1988; “Plume rise. Lectures in air pollution modeling”; American Meteorology Society;119-162.
- Weil, J.C.; Corio, L. A.; Brower, R.P.; 1997; “A PDF dispersion model for buoyant plumes in the convective boundary layer”; Journal of Applied Meteorology; 36; 982-1003.
- WHO (World Health Organization Regional Office for Europe), 2000, “Chapter 5.5 Carbon Monoxide”. Disponível em

[http://www.euro.who.int/document/aiq/5\\_5carbonmonoxide.pdf](http://www.euro.who.int/document/aiq/5_5carbonmonoxide.pdf). Acessado em 6 de novembro de 2009.

WHO (World Health Organization Regional Office for Europe), 2000, “Chapter 7.1 Nitrogen Dioxide”. Disponível em [www.euro.who.int/document/aiq/7\\_1nitrogendioxide.pdf](http://www.euro.who.int/document/aiq/7_1nitrogendioxide.pdf). Acessado em 6 de novembro de 2009.

WHO (World Health Organization Regional Office for Europe), 2005, “Air Quality Guidelines Update 2005”. Disponível em [http://whqlibdoc.who.int/euro/2006/9289021926\\_eng.pdf](http://whqlibdoc.who.int/euro/2006/9289021926_eng.pdf). Acessado em 6 de novembro de 2009.

Wyngaard, J.C.; 1988; “Structure of the PBL. Lectures on air pollution modeling”; American Meteorology Society; 9-57.

Zhou, Y.; Levy, J.I.; Hammitt, J.K.; Evans, J.S.; 2003; “Estimating population exposure to power plant emissions using CALPUFF: A case study in Beijing, China”; Atmosphere Environment; 37; 815-826.

## **6. ANEXO 1**

FOITE	Coord. UTM		altur	diam	temp	IOX			SOX			MP			CO		
	X	Y				m	m	°C	g/s	% do total	mg/hm³	g/s	% do total	mg/hm³	g/s	% do total	mg/hm³
FORNO DEST ATM A	717955	7493030	70	1,54	205	2,09	0,43%	211,23	0,02	0,00%	1,82	0,35	1,32%	35,13	0,54	0,52%	54,55
FORNO DEST ATM B	721985	7493030	70	1,54	205	2,09	0,43%	211,23	0,02	0,00%	1,82	0,35	1,32%	35,13	0,54	0,52%	54,55
FORNO VACUO A	717955	7490418	70	1,26	185	1,45	0,30%	211,23	0,01	0,00%	1,82	0,24	0,91%	35,13	0,37	0,36%	54,55
FORNO VACUO B	721985	7490418	70	1,26	185	1,45	0,30%	211,23	0,01	0,00%	1,82	0,24	0,91%	35,13	0,37	0,36%	54,55
FORNO COQUE 1	720000	7491550	70	2,09	310	6,14	1,28%	362,11	0,29	0,05%	17,11	0,22	0,83%	13,03	2,44	2,36%	144,05
FORNO COQUE 2	720000	7491500	70	2,09	310	6,14	1,28%	362,11	0,29	0,05%	17,11	0,22	0,83%	13,03	2,44	2,36%	144,05
FORNO HDT NAFTA 1	720022	7491123	60	0,32	263	0,11	0,02%	214,34	0	0,00%	1,82	0,02	0,08%	35,13	0,03	0,03%	54,55
FORNO HDT NAFTA 2	719942	7491123	60	0,8	263	0,64	0,13%	214,34	0,01	0,00%	1,82	0,1	0,38%	35,13	0,16	0,15%	54,55
FORNO HDT NAFTA 3	719982	7491123	60	0,74	263	0,54	0,11%	214,34	0	0,00%	1,82	0,09	0,34%	35,13	0,14	0,14%	54,55
FORNO HCC 1	719942	7491858	70	1,02	282	1,01	0,21%	214,34	0,01	0,00%	1,82	0,17	0,64%	35,13	0,26	0,25%	54,55
FORNO HCC 2	719982	7491858	70	1,23	282	1,45	0,30%	214,34	0,01	0,00%	1,82	0,24	0,91%	35,13	0,37	0,36%	54,55
FORNO HCC 3	720022	7491858	70	1,99	282	3,81	0,79%	214,34	0,03	0,01%	1,82	0,62	2,34%	35,13	0,97	0,94%	54,55
FORNO HDT MD	719982	7491981	70	0,84	263	0,7	0,15%	214,34	0,01	0,00%	1,82	0,12	0,45%	35,13	0,18	0,17%	54,55
FORNO HDT QUEROS	719982	7492278	60	0,73	386	0,43	0,09%	214,34	0	0,00%	1,82	0,07	0,26%	35,13	0,11	0,11%	54,55
FORNO FCC	721276	7492276	70	1,42	350	1,72	0,36%	214,34	0,01	0,00%	1,82	0,26	1,06%	35,13	0,44	0,43%	54,55
CALDEIRA RECUP.	721276	7492193	100	3	200	84,59	17,60%	576	2,94	0,55%	20,02	11	41,61%	75	33,59	32,54%	228,75
FORNO SC	721320	7492300	70	2	158	7,97	1,66%	362,28	0,38	0,07%	17,11	0,29	1,10%	13,03	3,17	3,07%	144,05
FORNO SC 2-A	721350	7492300	100	2,8	265	11,25	2,34%	362,34	0,53	0,10%	17,11	0,4	1,51%	13,03	4,47	4,33%	144,05
FORNO SC 2-B	721380	7492300	100	2,8	265	11,25	2,34%	362,34	0,53	0,10%	17,11	0,4	1,51%	13,03	4,47	4,33%	144,05
FORNO SC 3	721410	7492300	100	2,8	265	12,23	2,54%	362,09	0,58	0,11%	17,11	0,44	1,66%	13,03	4,86	4,71%	144,05
FORNO SC4	721440	7492300	100	2,8	265	10,54	2,19%	362,13	0,5	0,09%	17,11	0,38	1,44%	13,03	4,19	4,06%	144,05
FORNO SC 5-A	721470	7492300	100	2,8	265	9,65	2,01%	362,01	0,46	0,09%	17,11	0,35	1,32%	13,03	3,84	3,72%	144,05
FORNO SC 5-B	721500	7492300	100	2,8	265	9,65	2,01%	362,01	0,46	0,09%	17,11	0,35	1,32%	13,03	3,84	3,72%	144,05
FORNO CCR 1 preaq	721034	7492103	70	0,86	310	0,54	0,11%	190,22	0,05	0,01%	17,11	0,04	0,15%	13,03	0,41	0,40%	144,05
FORNO CCR 2 interaq	721034	7492103	70	1,07	310	0,84	0,17%	190,58	0,08	0,01%	17,11	0,06	0,23%	13,03	0,63	0,61%	144,05
FORNO CCR 3 interaq	721034	7492103	60	0,78	310	0,44	0,09%	189,99	0,04	0,01%	17,11	0,03	0,11%	13,03	0,34	0,33%	144,05
FORNO CCR 4 interaq	721034	7492103	60	0,68	310	0,34	0,07%	189,64	0,03	0,01%	17,11	0,02	0,08%	13,03	0,26	0,25%	144,05
FORNO CCR 5 referv	721069	7492103	70	0,81	310	0,64	0,12%	1441,54	0,04	0,01%	17,11	0,03	0,11%	13,03	0,36	0,35%	144,05
FORNO BT	721120	7492070	70	1,75	175	3,64	0,76%	214,34	0,03	0,01%	1,82	0,6	2,27%	35,13	0,93	0,90%	54,55
FORNO XILENO 1A	720825	7491945	100	2,88	175	9,88	2,06%	214,34	0,08	0,01%	1,82	1,62	6,12%	35,13	2,51	2,43%	54,55
FORNO XILENO 2	720825	7491995	60	0,77	350	0,51	0,11%	214,34	0	0,00%	1,82	0,08	0,30%	35,13	0,13	0,13%	54,55
FORNO ISOME 1	721220	7492042	70	0,99	175	1,17	0,24%	214,34	0,01	0,00%	1,82	0,19	0,72%	35,13	0,3	0,29%	54,55
FORNO ISOME 2	721220	7492092	70	1,5	175	2,68	0,56%	214,34	0,02	0,00%	1,82	0,44	1,66%	35,13	0,68	0,66%	54,55
FORNO TRANS 1	720860	7492110	60	0,81	350	1,01	0,21%	386,92	0	0,00%	1,82	0,09	0,34%	35,13	0,14	0,14%	54,55
FORNO TRANS 2	720910	7492110	70	0,92	175	1,01	0,21%	214,34	0,01	0,00%	1,82	0,17	0,64%	35,13	0,26	0,25%	54,55
FORNO UGH AQUEC.	720220	7491302	60	0	0	0	0,00%	0	0	0,00%	17,11	0	0,00%	13,03	0	0,00%	144,05
FORNO UGH REF.	720220	7491302	60	3,2	180	9,43	1,96%	361,98	0,45	0,08%	17,11	0,34	1,28%	13,03	3,75	3,63%	144,05
FORNO UGH REF.	720175	7491302	60	3,2	180	9,43	1,96%	361,98	0,45	0,08%	17,11	0,34	1,28%	13,03	3,75	3,63%	144,05
CALDEIRA 1	721017	7491777	100	4,73	180	81,47	16,95%	848,29	174,6	32,61%	1818,18	1,73	6,54%	18,03	5,24	5,08%	54,55
CALDEIRA 2	721064	7491777	100	4,73	180	81,47	16,95%	848,29	174,6	32,61%	1818,18	1,73	6,54%	18,03	5,24	5,08%	54,55
CALDEIRA 3	721111	7491777	100	4,73	180	81,47	16,95%	848,29	174,6	32,61%	1818,18	1,73	6,54%	18,03	5,24	5,08%	54,55
FORNO PTA 1	721250	7491000	70	1,22	197	1,68	0,35%	214,34	0,01	0,00%	1,82	0,27	1,02%	35,13	0,43	0,42%	54,55
FORNO PTA 2	721250	7491000	70	70	173	2,97	0,62%	214,34	0	0,00%	0,03	0	0,00%	0,49	0,76	0,74%	54,55
URE 1	720422	7491482	0	1	0	0,05	0,01%	197,02	1,62	0,30%	6092,38	0	0,00%	13,03	0,04	0,04%	144,05
URE 2	720325	7491482	60	1	350	0,05	0,01%	197,02	1,62	0,30%	6092,38	0	0,00%	13,03	0,04	0,04%	144,05
<b>Total</b>						<b>480,6</b>	<b>100,00%</b>	<b>14575,9</b>	<b>535,5</b>	<b>100,00%</b>	<b>17988,4</b>	<b>26,5</b>	<b>100,00%</b>	<b>1114,9</b>	<b>103,2</b>	<b>100,00%</b>	<b>4329,5</b>

**7. ANEXO 2**

```

'Ellipsoide (WGS84)
'var sm_a = 6378137.0
Const sm_a = 6378160
Const sm_b = 6356752.314
Const sm_eccSquared = 0.00669437999013
Const pi = 3.14159265358979
Const UTMScaleFactor = 0.9996

Public Function DegToRad(deg)
    DegToRad = (deg / 180 * pi)
End Function

Public Function RadToDeg(rad)
    RadToDeg = (rad / pi * 180)
End Function

Public Function ArcLengthOfMeridian(phi As Variant) As Variant

    Dim alpha, beta, gamma, delta, epsilon, N As Variant
    Dim result As Variant

    N = (sm_a - sm_b) / (sm_a + sm_b)

    alpha = ((sm_a + sm_b) / 2) _
        * (1 + (N ^ 2 / 4) + (N ^ 4 / 64))

    beta = (-3 * N / 2) + (9 * N ^ 3 / 16) _
        + (-3 * Math.pow(N, 5) / 32)

    gamma = (15 * N ^ 2 / 16) _
        + (-15 * N ^ 4 / 32)

    delta = (-35 * N ^ 3 / 48) _
        + (105 * N ^ 5 / 256)

    epsilon = (315 * N ^ 4 / 512)

    result = alpha _
        * (phi + (beta * Sin(2 * phi)) _
            + (gamma * Sin(4 * phi)) _
            + (delta * Sin(6 * phi)) _
            + (epsilon * Sin(8 * phi)))

    ArcLengthOfMeridian = result
End Function

Public Function UTMCentralMeridian(zone) As Variant

    Dim cmeridian As Variant

    cmeridian = DegToRad(-183 + (zone * 6))

    UTMCentralMeridian = cmeridian
End Function

```

Public Function FootpointLatitude(y) As Variant

Dim y\_, alpha\_, beta\_, gamma\_, delta\_, epsilon\_, N As Variant

Dim result As Variant

$$N = (sm\_a - sm\_b) / (sm\_a + sm\_b)$$

$$alpha\_ = ((sm\_a + sm\_b) / 2) \_ \\ * (1 + (N^2 / 4) + (N^4 / 64))$$

$$y\_ = y / alpha\_$$

$$beta\_ = (3 * N / 2) + (-27 * N^3 / 32) \_ \\ + (269 * N^5 / 512)$$

$$gamma\_ = (21 * N^2 / 16) \_ \\ + (-55 * N^4 / 32)$$

$$delta\_ = (151 * N^3 / 96) \_ \\ + (-417 * N^5 / 128)$$

$$epsilon\_ = (1097 * N^4 / 512)$$

$$result = y\_ + (beta\_ * Sin(2 * y\_)) \_ \\ + (gamma\_ * Sin(4 * y\_)) \_ \\ + (delta\_ * Sin(6 * y\_)) \_ \\ + (epsilon\_ * Sin(8 * y\_))$$

FootpointLatitude = result

End Function

Public Function MapLatLonToXY(phi, lambda, lambda0, xy0, xy1) As String

Dim N, nu2, ep2, t, t2, l As Variant

Dim l3coef, l4coef, l5coef, l6coef, l7coef, l8coef As Variant

Dim tmp As Variant

$$ep2 = (sm\_a^2 - sm\_b^2) / sm\_b^2$$

$$nu2 = ep2 * Cos(phi)^2$$

$$N = sm\_a^2 / (sm\_b * (1 + nu2)^{0.5})$$

$$t = Tan(phi)$$

$$t2 = t * t$$

$$tmp = (t2 * t2 * t2) - t ^ 6$$

$$l = \text{lambda} - \text{lambda}0$$

$$l3\text{coef} = 1 - t2 + \text{nu}2$$

$$l4\text{coef} = 5 - t2 + 9 * \text{nu}2 + 4 * (\text{nu}2 * \text{nu}2)$$

$$l5\text{coef} = 5 - 18 * t2 + (t2 * t2) + 14 * \text{nu}2 - 58 * t2 * \text{nu}2$$

$$l6\text{coef} = 61 - 58 * t2 + (t2 * t2) + 270 * \text{nu}2 - 330 * t2 * \text{nu}2$$

$$l7\text{coef} = 61 - 479 * t2 + 179 * (t2 * t2) - (t2 * t2 * t2)$$

$$l8\text{coef} = 1385 - 3111 * t2 + 543 * (t2 * t2) - (t2 * t2 * t2)$$

$$xy0 = N * \text{Cos}(\text{phi}) * 1 + (N / 6 * \text{Cos}(\text{phi}) ^ 3 * l3\text{coef} * 1 ^ 3) + (N / 120 * \text{Cos}(\text{phi}) ^ 5 * l5\text{coef} * 1 ^ 5) + (N / 5040 * \text{Cos}(\text{phi}) ^ 7 * l7\text{coef} * 1 ^ 7)$$

$$xy1 = \text{ArcLengthOfMeridian}(\text{phi}) + (t / 2 * N * \text{Cos}(\text{phi}) ^ 2 * 1 ^ 2) + (t / 24 * N * \text{Cos}(\text{phi}) ^ 4 * l4\text{coef} * 1 ^ 4) + (t / 720 * N * \text{Cos}(\text{phi}) ^ 6 * l6\text{coef} * 1 ^ 6) + (t / 40320 * N * \text{Cos}(\text{phi}) ^ 8 * l8\text{coef} * 1 ^ 8)$$

$$\text{MapLatLonToXY} = xy0 \& ";" \& xy1$$

End Function

Public Function MapXYToLatLon(x, y, lambda0, philambda0, philambda1)  
 Dim phif, Nf, Nfpow, nuf2, ep2, tf, tf2, tf4, cf As Variant  
 Dim x1frac, x2frac, x3frac, x4frac, x5frac, x6frac, x7frac, x8frac As Variant  
 Dim x2poly, x3poly, x4poly, x5poly, x6poly, x7poly, x8poly As Variant

$$\text{phif} = \text{FootpointLatitude}(y)$$

$$\text{ep2} = (\text{sm}_a ^ 2 - \text{sm}_b ^ 2) / \text{sm}_b ^ 2$$

$$\text{cf} = \text{Cos}(\text{phif})$$

$$\text{nuf2} = \text{ep2} * \text{cf} ^ 2$$

$$Nf = sm\_a ^ 2 / (sm\_b * (1 + nuf2) ^ 0.5)$$

$$Nfpow = Nf$$

$$tf = \text{Tan}(\text{phif})$$

$$tf2 = tf * tf$$

$$tf4 = tf2 * tf2$$

$$x1frac = 1 / (Nfpow * cf)$$

$$Nfpow = Nfpow * Nf \text{ 'now equals } Nf^{**2}$$

$$x2frac = tf / (2 * Nfpow)$$

$$Nfpow = Nfpow * Nf \text{ 'now equals } Nf^{**3}$$

$$x3frac = 1 / (6 * Nfpow * cf)$$

$$Nfpow = Nfpow * Nf \text{ 'now equals } Nf^{**4}$$

$$x4frac = tf / (24 * Nfpow)$$

$$Nfpow = Nfpow * Nf \text{ 'now equals } Nf^{**5}$$

$$x5frac = 1 / (120 * Nfpow * cf)$$

$$Nfpow = Nfpow * Nf \text{ 'now equals } Nf^{**6}$$

$$x6frac = tf / (720 * Nfpow)$$

$$Nfpow = Nfpow * Nf \text{ 'now equals } Nf^{**7}$$

$$x7frac = 1 / (5040 * Nfpow * cf)$$

$$Nfpow = Nfpow * Nf \text{ 'now equals } Nf^{**8}$$

$$x8frac = tf / (40320 * Nfpow)$$

$$x2poly = -1 - nuf2$$

$$x3poly = -1 - 2 * tf2 - nuf2$$

$$x4poly = 5 + 3 * tf2 + 6 * nuf2 - 6 * tf2 * nuf2 -$$

$$- 3 * (nuf2 * nuf2) - 9 * tf2 * (nuf2 * nuf2)$$

$$x5poly = 5 + 28 * tf2 + 24 * tf4 + 6 * nuf2 + 8 * tf2 * nuf2$$

$$x6poly = -61 - 90 * tf2 - 45 * tf4 - 107 * nuf2 -$$

$$+ 162 * tf2 * nuf2$$

$$x7poly = -61 - 662 * tf2 - 1320 * tf4 - 720 * (tf4 * tf2)$$

$$x8poly = 1385 + 3633 * tf2 + 4095 * tf4 + 1575 * (tf4 * tf2)$$

$$\text{philambda0} = \text{phif} + x2frac * x2poly * (x * x) -$$

$$+ x4frac * x4poly * x ^ 4 -$$

$$+ x6frac * x6poly * x ^ 6 -$$

$$+ x8frac * x8poly * x ^ 8$$

$$\text{philambda1} = \text{lambda0} + x1frac * x -$$

$$+ x3frac * x3poly * x ^ 3 -$$

```

+ x5frac * x5poly * x ^ 5 _
+ x7frac * x7poly * x ^ 7

```

End Function

Public Function LatLonToUTMXY(lat, lon, zone, xy0, xy1)

Call MapLatLonToXY(lat, lon, UTMCentralMeridian(zone), xy0, xy1)

/\* Adjust easting and northing for UTM system. \*/

xy0 = xy0 \* UTMScaleFactor + 500000#

xy1 = xy1 \* UTMScaleFactor

If (xy1 < 0#) Then

xy1 = xy1 + 10000000#

End If

LatLonToUTMXY = zone

End Function

Public Function UTMXYToLatLon(x, y, zone, southhemi, latlon0, latlon1)

Dim cmeridian As Variant

x = x - 500000 'x -=500000

x = x / UTMScaleFactor 'x /= x UTMScaleFactor

'If in southern hemisphere, adjust y accordingly.

If (southhemi) Then

y = y - 10000000 'y -= 10000000.0;

End If

y = y / UTMScaleFactor 'y /= UTMScaleFactor

cmeridian = UTMCentralMeridian(zone)

Call MapXYToLatLon(x, y, cmeridian, latlon0, latlon1)

End Function

Public Function convertToGrade(x As Variant, y As Variant, zone As Variant, southhemi As Variant) As Variant

Dim latlon0 As Variant

Dim latlon1 As Variant

Dim lat, lon As Variant

Dim lonlat As Variant

x = x - 75

y = y - 25

If ((zone < 1) Or (60 < zone)) Then

```
    MsgBox ("Zona Inválida entre com um número de 1 à 60")
    convertToGrade = False
    Exit Function
End If

Call UTMXYToLatLon(x, y, zone, southhemi, latlon0, latlon1)

lon = RadToDeg(latlon1)
lat = RadToDeg(latlon0)

lonlat = lon & ";" & lat
convertToGrade = lonlat
End Function
```

## **8. ANEXO 3**

<b>Grupos</b>	<b>Descrição</b>
ALK1	Alcanos e outros não-aromáticos com kOH < 5x10 <sup>2</sup> ppm-1.min-1
ALK2	Alcanos e outros não-aromáticos com kOH entre 5.0x10 <sup>2</sup> e 2.5x10 <sup>3</sup> ppm-1.min-1
ALK3	Alcanos e outros não-aromáticos com kOH entre 2.5x10 <sup>3</sup> e 5.0x10 <sup>3</sup> ppm-1.min-1
ALK4	Alcanos e outros não-aromáticos com kOH entre 5.0x10 <sup>3</sup> e 1x10 <sup>4</sup> ppm-1.min-1
ALK5	Alcanos e outros não-aromáticos com kOH > 1x10 <sup>4</sup> ppm-1.min-1
OLE1	Alquenos com kOH < 7x10 <sup>4</sup> ppm-1.min-1
OLE2	Alquenos com kOH > 7x10 <sup>4</sup> ppm-1.min-1
ARO1	Aromáticos com kOH < 2x10 <sup>4</sup> ppm-1.min-1
ARO2	Aromáticos com kOH > 2x10 <sup>4</sup> ppm-1.min-1
RCHO	Aldeídos > C <sub>3</sub>
BALD	Aldeídos aromáticos
MEK	Cetonas e outros não aldeídos oxigenados que reagem com OH < 5x10 <sup>-12</sup> cm <sup>3</sup> .molec-2.s-1
PROD2	Cetonas e outros não aldeídos oxigenados que reagem com OH > 5x10 <sup>-12</sup> cm <sup>3</sup> .molec-2.s-1
TERP	Terpenos
CH <sub>4</sub>	Metano
CO	Monóxido de carbono
HCHO	Formaldeído
CCHO	Acetaldeído
CCO-OOH	Acido peroxi acetico
ETHENE	Etano
ETOH	Etanol
GLY	Glioxal
ACET	Acetona
ACRO	Acroleina
MGLY	Metil-glioxal
BACL	Biacetil
METHACRO	Metacroleina
MVK	Metil-vinil-cetona
ISOPRENE	Isopreno
PHEN	Fenóis
CRES	Cresóis

**9. ANEXO 4**

<b>CÓDIGO</b>	<b>NOME</b>
123-TMB	1,2,3-Trimetil-benzeno
124-TMB	1,2,4-Trimetil-benzeno
135-TMB	1,2,5-Trimetil-benzeno
13-BUTDE	1,3-Butadieno
	1,3-Dimetil-
13DMCYC5	ciclopentano
1-BUTENE	1-Buteno
1C4RCHO	Butanal
1-PENTEN	1-Penteno
23-DM-C4	2,3-Dimetil-butano
23M1-BUT	2,3-Dimetil-1-Buteno
2M1-C5E	2-Metil-1-Penteno
2M-2-C5E	2-Metil-2-Penteno
2-ME-C4	Isopentano
3M1-C5E	3-Metil-1-Penteno
ACETALD	Acetaldeído
ACETONE	Acetona
BENZALD	Benzaldeído
BENZENE	Benzeno
BR-C15	C15 Alcanos abertos
C2-BENZ	Etilbenzeno
C-3-C6E	Cis-3-Hexeno
C5-RCHO	C5 Aldeídos
C7-RCHO	C7 Aldeídos
	Isômeros do
C8-BEN	Etilbenzeno
CL-BEN	Cloro-benzeno
CYC-HEXE	Ciclohexeno
ETHANE	Etano
ETOH	Etanol
FORMALD	Formaldeído
I-C3-BEN	Cumeno
ISOBUTEN	Isobuteno
ME-CYCC6	Metilciclohexano
METHANE	Metano
M-XYLENE	m-xileno
NAPHTHAL	naftaleno
N-C3-BEN	n-Propil-Benzeno

<b>CÓDIGO</b>	<b>NOME</b>
<b>N-C4</b>	<b>n-butano</b>
<b>N-C6</b>	<b>n-hexano</b>
<b>N-C7</b>	<b>n-heptano</b>
<b>N-C9</b>	<b>n-nonano</b>
<b>O-XYLENE</b>	<b>o-xileno</b>
<b>PROPENE</b>	<b>Propeno</b>
<b>P-XYLENE</b>	<b>p-xileno</b>
<b>STYRENE</b>	<b>estireno</b>
<b>T-C4-OH</b>	<b>álcool terc-butil</b>
<b>TOLUENE</b>	<b>Tolueno</b>

**10. ANEXO 5**

<b>FONTES TOTAIS</b>					
<b>FEEMA PARA O RJ</b>					
	g s <sup>-1</sup>	t ano <sup>-1</sup>	kg h <sup>-1</sup>	kg h <sup>-1</sup> km <sup>-2</sup>	dia e noite
NOX	90,5	90500	10331,05	4,304604	8,609209
CO	321	321000	36643,84	15,26826	30,53653
HC	79,3	79300	9052,511	3,77188	7,54376

<b>COMPERJ PARA O RJ</b>					
	g s <sup>-1</sup>	t ano <sup>-1</sup>	kg h <sup>-1</sup>	kg h <sup>-1</sup> km <sup>-2</sup>	dia e noite
NOX	480,6		1730,16	0,7209	1,4418
CO	103,2		371,52	0,1548	0,3096
HC		8182	934,0183	0,389174	0,778349

<b>COMPERJ + FEEMA para o RJ (kg h<sup>-1</sup> km<sup>-2</sup>)</b>	
NOX	10,05100852
CO	30,84612968
HC	8,322108067

**11. ANEXO 6**

**MACACU - NOX**

\*\*\* THE SUMMARY OF HIGHEST 1-HR RESULTS \*\*\*

\*\* CONC OF NOX IN MICROGRAMS/M\*\*3 \*\*

GROUP ID	DATE	AVERAGE CONC	(YYMMDDHH)	NETWORK	RECEPTOR	(XR, YR, ZELEV, ZHILL,
ZFLAG)	OF TYPE	GRID-ID				

-----

ALL HIGH 1ST HIGH VALUE IS	539.00653	ON 07051701:	AT (	726130.88,	7494343.00,	101.21,	0.00,
0.00) GC UCART1							
HIGH 2ND HIGH VALUE IS	535.56775	ON 07033021:	AT (	726130.88,	7494343.00,	101.21,	0.00,
0.00) GC UCART1							
HIGH 3RD HIGH VALUE IS	530.21637	ON 07032302:	AT (	726130.88,	7494343.00,	101.21,	0.00,
0.00) GC UCART1							
HIGH 4TH HIGH VALUE IS	465.14932	ON 07060207:	AT (	726130.88,	7494343.00,	101.21,	0.00,
0.00) GC UCART1							
HIGH 5TH HIGH VALUE IS	453.68283	ON 07032323:	AT (	726130.88,	7494343.00,	101.21,	0.00,
0.00) GC UCART1							
HIGH 6TH HIGH VALUE IS	407.56284	ON 07062820:	AT (	726130.88,	7494343.00,	101.21,	0.00,
0.00) GC UCART1							
HIGH 7TH HIGH VALUE IS	407.17902	ON 07072506:	AT (	726130.88,	7494343.00,	101.21,	0.00,
0.00) GC UCART1							
HIGH 8TH HIGH VALUE IS	407.10394	ON 07051602:	AT (	726130.88,	7494343.00,	101.21,	0.00,
0.00) GC UCART1							
HIGH 9TH HIGH VALUE IS	406.69662	ON 07041724:	AT (	726130.88,	7494343.00,	101.21,	0.00,
0.00) GC UCART1							
HIGH 10TH HIGH VALUE IS	406.62375	ON 07060819:	AT (	726130.88,	7494343.00,	101.21,	0.00,
0.00) GC UCART1							

**SAMBAETIBA - NOX**

\*\*\* THE SUMMARY OF HIGHEST 1-HR RESULTS \*\*\*

\*\* CONC OF NOX IN MICROGRAMS/M\*\*3 \*\*

GROUP ID	DATE	AVERAGE CONC	(YYMMDDHH)	NETWORK	RECEPTOR	(XR, YR, ZELEV, ZHILL,
ZFLAG)	OF TYPE	GRID-ID				

-----

ALL HIGH 1ST HIGH VALUE IS 357.49658 ON 07041510: AT ( 722502.44, 7491993.00, 20.26, 0.00,  
 0.00) GC UCART1  
 HIGH 2ND HIGH VALUE IS 348.54501 ON 07032310: AT ( 722502.44, 7491993.00, 20.26, 0.00,  
 0.00) GC UCART1  
 HIGH 3RD HIGH VALUE IS 320.52258 ON 07070311: AT ( 721051.12, 7490230.50, 5.50, 0.00,  
 0.00) GC UCART1  
 HIGH 4TH HIGH VALUE IS 313.07544 ON 07070911: AT ( 721051.12, 7490230.50, 5.50, 0.00,  
 0.00) GC UCART1  
 HIGH 5TH HIGH VALUE IS 312.41260 ON 07062211: AT ( 721051.12, 7490230.50, 5.50, 0.00,  
 0.00) GC UCART1  
 HIGH 6TH HIGH VALUE IS 310.69009 ON 07041410: AT ( 721051.12, 7490230.50, 5.50, 0.00,  
 0.00) GC UCART1  
 HIGH 7TH HIGH VALUE IS 307.08749 ON 07061411: AT ( 721051.12, 7490230.50, 5.50, 0.00,  
 0.00) GC UCART1  
 HIGH 8TH HIGH VALUE IS 304.60056 ON 07061311: AT ( 721051.12, 7490230.50, 5.50, 0.00,  
 0.00) GC UCART1  
 HIGH 9TH HIGH VALUE IS 302.51297 ON 07031810: AT ( 721051.12, 7490230.50, 5.50, 0.00,  
 0.00) GC UCART1  
 HIGH 10TH HIGH VALUE IS 299.53268 ON 07060811: AT ( 721051.12, 7490818.00, 4.05, 0.00,  
 0.00) GC UCART1

### INFRAERO - NOX

\*\*\* THE SUMMARY OF HIGHEST 1-HR RESULTS \*\*\*

\*\* CONC OF NOX IN MICROGRAMS/M\*\*3 \*\*

GROUP ID	DATE	NETWORK
AVERAGE CONC (YMMDDHH)	RECEPTOR (XR, YR, ZELEV, ZHILL, ZFLAG)	OF TYPE GRID-ID

-----

ALL HIGH 1ST HIGH VALUE IS 538.27637 ON 07071707: AT ( 726130.88, 7494343.00, 101.21, 0.00,  
 0.00) GC UCART1  
 HIGH 2ND HIGH VALUE IS 456.22498 ON 07040902: AT ( 726130.88, 7494343.00, 101.21, 0.00,  
 0.00) GC UCART1  
 HIGH 3RD HIGH VALUE IS 438.39499 ON 07062804: AT ( 726130.88, 7494343.00, 101.21, 0.00,  
 0.00) GC UCART1  
 HIGH 4TH HIGH VALUE IS 406.74091 ON 07071204: AT ( 726130.88, 7494343.00, 101.21, 0.00,  
 0.00) GC UCART1  
 HIGH 5TH HIGH VALUE IS 399.81778 ON 07042220: AT ( 726130.88, 7494343.00, 101.21, 0.00,  
 0.00) GC UCART1  
 HIGH 6TH HIGH VALUE IS 398.03738 ON 07040604: AT ( 726130.88, 7494343.00, 101.21, 0.00,  
 0.00) GC UCART1  
 HIGH 7TH HIGH VALUE IS 395.69061 ON 07021203: AT ( 726130.88, 7494343.00, 101.21, 0.00,  
 0.00) GC UCART1

0.00) GC UCART1  
HIGH 8TH HIGH VALUE IS 392.97995 ON 07051408: AT ( 726130.88, 7494343.00, 101.21, 0.00,  
0.00) GC UCART1  
HIGH 9TH HIGH VALUE IS 373.41251 ON 07021107: AT ( 726130.88, 7494343.00, 101.21, 0.00,  
0.00) GC UCART1  
HIGH 10TH HIGH VALUE IS 373.41251 ON 07031904: AT ( 726130.88, 7494343.00, 101.21, 0.00,  
0.00) GC UCART1

#### MACACU - SOX

\*\*\* THE SUMMARY OF HIGHEST 24-HR RESULTS \*\*\*

\*\* CONC OF SO2 IN MICROGRAMS/M\*\*3 \*\*

GROUP ID	DATE	NETWORK
AVERAGE CONC (YYMMDDHH)	RECEPTOR (XR, YR, ZELEV, ZHILL, ZFLAG)	OF TYPE GRID-ID

-----

ALL HIGH 1ST HIGH VALUE IS	117.18149c ON 07040724: AT ( 720325.44, 7491993.00,	23.31, 0.00,
0.00) GC UCART1		
HIGH 2ND HIGH VALUE IS	100.38824c ON 07041124: AT ( 720325.44, 7491993.00,	23.31, 0.00,
0.00) GC UCART1		
HIGH 3RD HIGH VALUE IS	82.59453c ON 07052124: AT ( 720325.44, 7491993.00,	23.31, 0.00,
0.00) GC UCART1		
HIGH 4TH HIGH VALUE IS	69.35967c ON 07053124: AT ( 720325.44, 7491993.00,	23.31, 0.00,
0.00) GC UCART1		
HIGH 5TH HIGH VALUE IS	67.08133c ON 07051124: AT ( 720325.44, 7491993.00,	23.31, 0.00,
0.00) GC UCART1		
HIGH 6TH HIGH VALUE IS	63.14199c ON 07070324: AT ( 720325.44, 7491993.00,	23.31, 0.00,
0.00) GC UCART1		
HIGH 7TH HIGH VALUE IS	55.05582c ON 07062324: AT ( 721776.81, 7491405.50,	12.88, 0.00,
0.00) GC UCART1		
HIGH 8TH HIGH VALUE IS	52.93790c ON 07051224: AT ( 721776.81, 7491405.50,	12.88, 0.00,
0.00) GC UCART1		
HIGH 9TH HIGH VALUE IS	52.29995c ON 07072024: AT ( 721776.81, 7491405.50,	12.88, 0.00,
0.00) GC UCART1		
HIGH 10TH HIGH VALUE IS	50.87784c ON 07031724: AT ( 721776.81, 7491405.50,	12.88, 0.00,
0.00) GC UCART1		

#### SAMBAETIBA - SOX

\*\*\* THE SUMMARY OF HIGHEST 24-HR RESULTS \*\*\*



0.00) GC UCART1  
 HIGH 4TH HIGH VALUE IS 83.22567c ON 07072024: AT ( 720325.44, 7492580.50, 28.54, 0.00,  
 0.00) GC UCART1  
 HIGH 5TH HIGH VALUE IS 78.38535c ON 07080124: AT ( 720325.44, 7492580.50, 28.54, 0.00,  
 0.00) GC UCART1  
 HIGH 6TH HIGH VALUE IS 75.13229c ON 07030424: AT ( 720325.44, 7492580.50, 28.54, 0.00,  
 0.00) GC UCART1  
 HIGH 7TH HIGH VALUE IS 73.72327c ON 07030524: AT ( 720325.44, 7492580.50, 28.54, 0.00,  
 0.00) GC UCART1  
 HIGH 8TH HIGH VALUE IS 72.74051c ON 07032624: AT ( 720325.44, 7492580.50, 28.54, 0.00,  
 0.00) GC UCART1  
 HIGH 9TH HIGH VALUE IS 68.77296c ON 07021824: AT ( 720325.44, 7492580.50, 28.54, 0.00,  
 0.00) GC UCART1  
 HIGH 10TH HIGH VALUE IS 68.17670c ON 07021724: AT ( 720325.44, 7492580.50, 28.54, 0.00,  
 0.00) GC UCART1

**MACACU – PM10**

\*\*\* THE SUMMARY OF HIGHEST 24-HR RESULTS \*\*\*

\*\* CONC OF PM-10 IN MICROGRAMS/M\*\*3 \*\*

GROUP ID ZFLAG)	DATE AVERAGE CONC OF TYPE GRID-ID	(YYMMDDHH)	NETWORK RECEPTOR (XR, YR, ZELEV, ZHILL,
--------------------	---	------------	--

-----  
 ALL HIGH 1ST HIGH VALUE IS 4.52988 ON 07032324: AT ( 726130.88, 7494343.00, 101.21, 0.00,  
 0.00) GC UCART1

**SAMBAETIBA – PM10**

\*\*\* THE SUMMARY OF HIGHEST 24-HR RESULTS \*\*\*

\*\* CONC OF PM-10 IN MICROGRAMS/M\*\*3 \*\*

GROUP ID ZFLAG)	DATE AVERAGE CONC OF TYPE GRID-ID	(YYMMDDHH)	NETWORK RECEPTOR (XR, YR, ZELEV, ZHILL,
--------------------	---	------------	--

-----  
 ALL HIGH 1ST HIGH VALUE IS 5.82272c ON 07060324: AT ( 726130.88, 7494343.00, 101.21, 0.00,  
 0.00) GC UCART1

**INFRAERO – PM10**

\*\*\* THE SUMMARY OF HIGHEST 24-HR RESULTS \*\*\*

\*\* CONC OF PM-10 IN MICROGRAMS/M\*\*3 \*\*

GROUP ID ZFLAG)	DATE AVERAGE CONC OF TYPE GRID-ID	(YYMMDDHH)	NETWORK RECEPTOR (XR, YR, ZELEV, ZHILL,
--------------------	---	------------	--

-----

ALL HIGH 1ST HIGH VALUE IS 4.87134c ON 07020424: AT ( 721051.12, 7492580.50, 19.95, 0.00,  
0.00) GC UCART1

**MACACU - CO**

\*\*\* THE SUMMARY OF HIGHEST 1-HR RESULTS \*\*\*

\*\* CONC OF CO IN MICROGRAMS/M\*\*3 \*\*

GROUP ID ZFLAG)	DATE AVERAGE CONC (YYMMDDHH)	NETWORK RECEPTOR (XR, YR, ZELEV, ZHILL, GRID-ID
-----		

ALL HIGH 1ST HIGH VALUE IS 180.47018 ON 07051701: AT ( 726130.88, 7494343.00, 101.21, 0.00,  
0.00) GC UCART1

\*\*\* THE SUMMARY OF HIGHEST 8-HR RESULTS \*\*\*

\*\* CONC OF CO IN MICROGRAMS/M\*\*3 \*\*

GROUP ID ZFLAG)	DATE AVERAGE CONC (YYMMDDHH)	NETWORK RECEPTOR (XR, YR, ZELEV, ZHILL, GRID-ID
-----		

ALL HIGH 1ST HIGH VALUE IS 45.84810c ON 07051708: AT ( 726130.88, 7494343.00, 101.21, 0.00,  
0.00) GC UCART1

**SAMBAETIBA - CO**

\*\*\* THE SUMMARY OF HIGHEST 1-HR RESULTS \*\*\*

\*\* CONC OF CO IN MICROGRAMS/M\*\*3 \*\*

GROUP ID ZFLAG)	DATE AVERAGE CONC (YYMMDDHH)	NETWORK RECEPTOR (XR, YR, ZELEV, ZHILL, GRID-ID
-----		

ALL HIGH 1ST HIGH VALUE IS 88.06040 ON 07072404: AT ( 726130.88, 7494343.00, 101.21, 0.00,  
0.00) GC UCART1

\*\*\* THE SUMMARY OF HIGHEST 8-HR RESULTS \*\*\*

\*\* CONC OF CO IN MICROGRAMS/M\*\*3 \*\*

GROUP ID ZFLAG)	DATE AVERAGE CONC (YYMMDDHH)	NETWORK RECEPTOR (XR, YR, ZELEV, ZHILL, GRID-ID
-----		

ALL HIGH 1ST HIGH VALUE IS 43.31998c ON 07060324: AT ( 726130.88, 7494343.00, 101.21, 0.00,  
0.00) GC UCART1

**INFRAERO - CO**

## \*\*\* THE SUMMARY OF HIGHEST 1-HR RESULTS \*\*\*

\*\* CONC OF CO IN MICROGRAMS/M\*\*3 \*\*

GROUP ID	DATE	NETWORK
ZFLAG) OF TYPE GRID-ID	AVERAGE CONC (YYMMDDHH)	RECEPTOR (XR, YR, ZELEV, ZHILL,

-----

ALL HIGH 1ST HIGH VALUE IS 180.19829 ON 07071707: AT ( 726130.88, 7494343.00, 101.21, 0.00, 0.00) GC UCART1

## \*\*\* THE SUMMARY OF HIGHEST 8-HR RESULTS \*\*\*

\*\* CONC OF CO IN MICROGRAMS/M\*\*3 \*\*

GROUP ID	DATE	NETWORK
ZFLAG) OF TYPE GRID-ID	AVERAGE CONC (YYMMDDHH)	RECEPTOR (XR, YR, ZELEV, ZHILL,

-----

ALL HIGH 1ST HIGH VALUE IS 53.73042 ON 07071208: AT ( 726130.88, 7494343.00, 101.21, 0.00, 0.00) GC UCART1

# Livros Grátis

( <http://www.livrosgratis.com.br> )

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

[Baixar livros de Literatura](#)  
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)  
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)  
[Baixar livros de Matemática](#)  
[Baixar livros de Medicina](#)  
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)  
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)  
[Baixar livros de Meteorologia](#)  
[Baixar Monografias e TCC](#)  
[Baixar livros Multidisciplinar](#)  
[Baixar livros de Música](#)  
[Baixar livros de Psicologia](#)  
[Baixar livros de Química](#)  
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)  
[Baixar livros de Serviço Social](#)  
[Baixar livros de Sociologia](#)  
[Baixar livros de Teologia](#)  
[Baixar livros de Trabalho](#)  
[Baixar livros de Turismo](#)