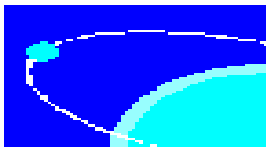


An aerial photograph of a city, likely Porto Alegre, Brazil, with a large, stylized blue ripple effect in the foreground. The ripple is centered on a small globe of the Earth, suggesting the global impact of local pollution. The city buildings are visible in the background, and a green field with a small house is in the foreground.

**TRANSPORTE DE POLUENTES NA REGIÃO DO  
POLO PETROQUÍMICO DE TRIUNFO - RS**

**ROSA MARIA PICCOLI DA CUNHA  
JUNHO DE 2002**



**CEPSRM**  
**Centro Estadual de Pesquisa em**  
**Sensoriamento Remoto e Meteorologia**

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

COMISSÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO  
RELATÓRIO DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

NOME DO CANDIDATO: Rosa Maria Piccoli da Cunha  
NÍVEL: Mestrado  
TÍTULO: Estudo do Transporte de Poluentes na Região do Polo  
Petroquímico, localizado em Triunfo - RS

MEMBROS DA COMISSÃO JULGADORA

\_\_\_\_\_  
Profa. Dra. Rita de Cássia Marques Alves - Orientadora

\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Osvaldo Luiz Leal de Moraes (UFSM)

\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Jorge Ricardo Ducati (UFRGS)

\_\_\_\_\_  
Dra. Elba C. Teixeira (FEPAM)

CANDIDATO:

\_\_\_\_\_  
Rosa Maria Piccoli da Cunha

Porto Alegre, Junho de 2002

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
CENTRO ESTADUAL DE PESQUISA EM  
SENSORIAMENTO REMOTO E METEOROLOGIA**

**Estudo do Transporte de Poluentes  
na Região do Polo Petroquímico,  
localizado em Triunfo - RS**

**Dissertação de Mestrado**

**Esp. Rosa Maria Piccoli da Cunha**

**Orientadora: Dra. Rita de Cássia Marques Alves**

**Porto Alegre, Junho de 2002**

An aerial photograph of a city, likely Triunfo, Brazil, with a large, dark, swirling vortex in the center. The vortex is a metaphor for the transport of pollutants. The city buildings are visible in the background, and the foreground shows a textured, possibly agricultural or industrial, landscape.

**TRANSPORTE DE POLUENTES NA REGIÃO DO  
POLO PETROQUÍMICO DE TRIUNFO - RS**

**ROSA MARIA PICCOLI DA CUNHA  
JUNHO DE 2002**

## ÍNDICE

Resumo.....	i
Abstract.....	ii
Agradecimentos.....	iii
Lista de tabelas.....	iv
Lista de figuras.....	v
Lista de símbolos.....	viii
<b>Capítulo I - Introdução</b>	
1.1 - Introdução .....	1
1.2 – Objetivos.....	1
1.3 - Revisão Bibliográfica.....	4
<b>Capítulo II - O Polo Petroquímico</b>	
2.1 - A região.....	8
2.2 - A Copesul.....	11
2.3 - Principais Produtos.....	12
2.4 - Petroquímicos.....	13
2.5 - Capacidade de Estocagem.....	13
2.6 - Mercado.....	14
2.7 - Energia, Água, e Vapor.....	15
2.8 - Turbina a Gás.....	15
2.9 - Tecnologia Avançada e Controle Ambiental.....	16
<b>Capítulo III - Poluentes Atmosféricos e Qualidade do Ar</b>	
3.1 - Os Poluentes Atmosféricos.....	17
3.1.1 - Material Particulado.....	19
3.1.2 - Óxido de Nitrogênio.....	21
3.1.3 - Dióxido de Enxofre.....	22
3.1.4 - Monóxido de Carbono.....	24
3.1.5 - Compostos Orgânicos Voláteis ( VOC'S ) .....	25
3.1.6 - Oxidantes Fotoquímicos.....	26
3.1.7 - Ozônio.....	27
3.2 - A Qualidade do Ar.....	29
<b>Capítulo IV - Dispersão Atmosférica</b>	
4.1 - Camada Limite Planetária.....	34
4.2 - Comportamento da Pluma.....	40
4.3 - Dispersão de Poluentes.....	45
4.4 - Estabilidade Atmosférica.....	48
4.5 - Inversão Térmica.....	49

## **Capítulo V - Modelos de Dispersão Atmosférica**

5.1 - Modelos de Dispersão.....	50
5.2 - Modelo de Pluma Gaussiana.....	51
5.3 - Modelo Matemático de Pluma Gaussiana.....	52
5.3.1 - O Modelo de Pluma Gaussiana ISCST3.....	54
5.3.2 - Aplicação do Modelo Gaussiano ISCST3.....	61
5.4 - Classe de Estabilidade.....	62

## **Capítulo VI – Metodologia e Resultados**

6.1 - Metodologia.....	65
6.2 - Resultados.....	73
6.3 - Resultados do Dia 26/05/2002.....	74
6.4 - Resultados do Dia 29/05/2002.....	81
6.5 - Resultados do Dia 13/08/2002.....	88
6.6 - Resultados do Dia 22/09/2002.....	95
6.7 - Resultados do Dia 06/10/2002.....	102
6.8 - Discussão dos Resultados.....	109

## **Capítulo VII - Conclusões**

7.1 - Conclusões e Recomendações.....	111
---------------------------------------	-----

<b>Referências Bibliográficas.....</b>	<b>113</b>
--	------------

## **Apêndices**

Apêndice A .....	117
Apêndice B .....	121
Apêndice C .....	125
Apêndice D .....	129
Apêndice E .....	133

## RESUMO

Este trabalho estuda o transporte e a dispersão de SO<sub>2</sub> (dióxido de Enxofre) e Material Particulado(PTS), emitidos pelas várias fontes da COPESUL, no Polo Petroquímico localizado em Triunfo, região metropolitana de Porto Alegre - RS, utilizando o modelo ISCST – Industrial Source Complex Term – Short Term, recomendado pela EPA para tratamento de dispersão. Neste estudo são apresentadas simulações para o período de 5 dias do ano de 2001, dias que apresentaram maiores concentrações ao nível do solo coletados no ponto receptor, sendo possível observar a dispersão da pluma de contaminantes e a localização dos máximos de concentração. Através do MNT(Modelo Numérico de Terreno), foi observado que a região analisada é relativamente plana, fazendo com que o modelo mostre resultados bem próximos a realidade, estando as fontes de emissão estudadas localizadas no centro do terreno. Os resultados indicam que os valores de NO<sub>x</sub> para o período estudado são os principais responsáveis pelo problema de poluição do ar na região, estes ultrapassaram em 2/5 dos casos o padrão secundário de 190 µg/m<sup>3</sup>. Os valores verificados foram de 198,65 µg/m<sup>3</sup> no horário de 11 horas do dia 26/09/2001, e 218,59 µg/m<sup>3</sup> no horário de 10 horas do dia 13/08/2001, estando os outros dentro dos limites exigidos pelo controle de qualidade do ar. Já para os poluentes SO<sub>2</sub> e MP os padrões primário e secundário não foram ultrapassados em nenhum dos dias selecionados. Verificou-se que na posição em que a estação de recepção foi instalada, esta estava , na maioria dos dias fora da área modelada pela pluma de dispersão. Portanto os valores medidos não se referem as fontes da COPESUL e sim são provenientes de outras fontes de emissão da região do Polo Petroquímico do Sul como as indústrias de 2ª geração.

## ABSTRACT

This work studies transportation and dispersion of SO<sub>2</sub> (Sulphur Dioxide) and Particulate-Matter(PTS), emitted by many stack sources of COPESUL, situated at Polo Petroquímico at the city of Triunfo, metropolitan region of Porto Alegre - RS, using ISCST model – Industrial Source Complex Term – Short Term, recommended by EPA – UNAMAP (Environment Protection Agency – Users Network for Applied Modeling of Air Pollution) for dispersion treatment. In this study will be shown simulations for a 5 day period in the year of 2001, wich were choosed by presenting higher ground-level concentration taken by the local sampler, and it is possible seeing plume dispersion of contaminates and high concentrations positions. We could see too, through MNT(Modelo Numérico de Terreno), that the analisys region is relatively a plain terrain, making the model shows near reality results, when the studied emission sources were located at the middle of the terrain. The results indicate that NO<sub>x</sub> values for the analised period are the mainly responsible for the air pollution problem at the region. Them surpass the secondary standard of 190 µg/m<sup>3</sup> in 2/5 of the cases. The verified values were 198,65 µg/m<sup>3</sup> at 11am of 26/09/2001, and 218,59 µg/m<sup>3</sup> at 10am of 13/08/2001, and the others were between the limits required by the air quality control. For the pollutants SO<sub>2</sub> and MP the primary and secondary standards were not surpassed in neither selected days. Considering if that the receptor station were installed, in most of the days, out of the modelled area by dispersion plume, it can be verified that at the position where it appears, the sampled values do not due to COPESUL sources, but to the other emission sources from Polo Petroquímico do Sul region like 2<sup>nd</sup> generation factories.



A todos que contribuíram de uma maneira ou de outra para a  
realização deste trabalho:  
Minha amiga Rita,  
Meu esposo e meus filhos,  
Meus educadores,  
Meus colegas e amigos,  
Obrigada.

## ABSTRACT

This present work studies transportation and dispersion of SO<sub>2</sub> (Sulphur Dioxide) and Particulate-Matter(PTS), emitted by many stack sources of COPESUL, situated at Polo Petroquímico at the city of Triunfo, metropolitan region of Porto Alegre - RS, using ISCST model – Industrial Source Complex Term – Short Term, recommended by EPA – UNAMAP (Environment Protection Agency – Users Network for Applied Modeling of Air Pollution) for dispersion treatment.

In this work, ISCST is started with meteorological sampling collected by 8<sup>th</sup> DISME's meteorological station situated at COPESUL, related data with the pollutant sources had been taken from FEPAM's library (Fundação Estadual de Proteção Ambiental). In this study will be shown simulations for a 5 day period in the year of 2001, which were chosen by presenting higher ground-level concentration taken by the local sampler.

The analysis region, the Polo Petroquímico do Sul, is located in the middle region of Rio Grande do Sul, reaching about 3.600 hectares areas from the city of Triunfo and Montenegro, distant 23 km, in a straight line, from Porto Alegre.

With this work, it is possible seeing plume dispersion of contaminants and high concentrations positions. We could see too, through MNT(Modelo Numérico de Terreno), that the analysis region is relatively a plain terrain, making the model shows near reality results, when the studied emission sources were located at the middle of the terrain.

The results indicate that NO<sub>x</sub> values for the analysed period are the mainly responsible for the air pollution problem at the region.

They surpass the secondary standard of 190 µg/m<sup>3</sup> in 2/5 of the cases. The verified values were 198,65 µg/m<sup>3</sup> at 11am of 26/09/2001, and 218,59 µg/m<sup>3</sup> at 10am of 13/08/2001, and the others were between the limits required by the air quality control.

For the pollutants SO<sub>2</sub> and MP the primary and secondary standards were not surpassed in neither selected days.

Considering if that the receptor station were installed, in most of the days, out of the modelled area by dispersion plume, it can be verified that at the position where it appears, the sampled values do not due to COPESUL sources, but to the other emission sources from Polo Petroquímico do Sul region like 2<sup>nd</sup> generation factories.



To all that contributed, by one way or other, to  
this work goes on:  
My friend Rita,  
My husband and my children,  
My educators,  
My colleagues and my ex-students.  
Thanks

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura</b>	<b>Descrição</b>
1.1	Região do Polo Petroquímico
2.1	Localização do Polo Petroquímico na região central do Rio Grande do Sul
2.2	Área de abrangência do complexo petroquímico
2.3	Foto da Copesul
2.4	O Eteno, principal produto da indústria petroquímica
2.5	Área industrial de estocagem em Triunfo e o Terminal Marítimo de Rio Grande
2.6	Turbina a gás
2.7	Monitoramento da qualidade do ar
3.1	Fontes de emissão
3.2	Chuva ácida
3.3	Poluentes atmosféricos
3.4	Formação do Ozônio Urbano
3.5	Evolução das concentrações de hidrocarbonetos, medidas em Los Angeles
3.6	Camada de Ozônio na atmosfera
3.7	Camada de Ozônio
4.1	Camada limite planetária
4.2	Estrutura da camada limite
4.3	Correntes de ar quente na CM
4.4	Percurso da pluma acima da camada estável
4.5	CLP durante o dia e a noite
4.6	Percurso da pluma considerando duas chaminés de tamanhos diferentes
4.7	Emissão instantânea de uma pluma vista de cima
4.8	Representação da concentração da chaminé
4.9	Looping
4.10	Coning
4.11	Fanning
4.12	Lofting
4.13	Fumigation
4.14	Trapping
4.15	Chuva de convecção
4.16	Radiação solar e poluentes
4.17	Temperatura e altitude
4.18	Inversão térmica
5.1	Uma pluma gaussiana com duas seções transversais
5.2	Sistema de coordenadas mostrando a distribuição gaussiana na direção horizontal e vertical
5.3	Método de múltiplas imagens usado para a reflexão da pluma simulada pelo modelo ISCST3

- 5.4 Comportamento da pluma num terreno complexo, assumido pelo modelo ISCST3
- 5.5 Curvas de Pasquill
- 6.1 Imagem sintética da região do Polo Petroquímico gerada com as bandas 3, 4 e 5 do Landsat
- 6.2 Projeção paralela da imagem
- 6.3 Projeção Perspectiva da imagem
- 6.4 Gráfico de dispersão das fontes da COPESUL
- 6.5 Localização das fontes e das estações da COPESUL
- 6.6 Gráfico da velocidade do vento do dia 26/05/2001
- 6.7 Gráfico da Temperatura do ar do dia 26/05/2001
- 6.8 Gráfico da Umidade relativa do ar do dia 26/05/2001
- 6.9 Gráfico da Direção do Vento do dia 26/05/2001
- 6.10 Gráfico de Isolinhas de concentração com fontes e estações de MP e SO<sub>2</sub>
- 6.11 Gráfico da análise dos padrões de concentração de MP e SO<sub>2</sub>
- 6.12 Gráfico da análise dos padrões de concentração de NO<sub>x</sub> e simulados de SO<sub>2</sub> e MP no dia 26/05/2001
- 6.13 Gráfico da velocidade do vento do dia 29/05/2001
- 6.14 Gráfico da Temperatura do ar do dia 29/05/2001
- 6.15 Gráfico da Umidade relativa do ar do dia 29/05/2001
- 6.16 Gráfico da Direção do Vento do dia 29/05/2001
- 6.17 Gráfico de Isolinhas de concentração com fontes e estações de MP e SO<sub>2</sub>
- 6.18 Gráfico da análise dos padrões de concentração de MP e SO<sub>2</sub>
- 6.19 Gráfico da análise dos padrões de concentração de NO<sub>x</sub> e simulados de SO<sub>2</sub> e MP no dia 29/05/2001
- 6.20 Gráfico da velocidade do vento do dia 13/08/2001
- 6.21 Gráfico da Temperatura do ar do dia 13/08/2001
- 6.22 Gráfico da Umidade relativa do ar do dia 13/08/2001
- 6.23 Gráfico da Direção do Vento do dia 13/08/2001
- 6.24 Gráfico de Isolinhas de concentração com fontes e estações de MP e SO<sub>2</sub>
- 6.25 Gráfico da análise dos padrões de concentração de MP e SO<sub>2</sub>
- 6.26 Gráfico da análise dos padrões de concentração de NO<sub>x</sub> e simulados de SO<sub>2</sub> e MP no dia 13/08/2001
- 6.27 Gráfico da velocidade do vento do dia 22/09/2001
- 6.28 Gráfico da Temperatura do ar do dia 22/09/2001
- 6.29 Gráfico da Umidade relativa do ar do dia 22/09/2001
- 6.30 Gráfico da Direção do Vento do dia 22/09/2001
- 6.31 Gráfico de Isolinhas de concentração com fontes e estações de MP e SO<sub>2</sub>
- 6.32 Gráfico da análise dos padrões de concentração de MP e SO<sub>2</sub>
- 6.33 Gráfico da análise dos padrões de concentração de NO<sub>x</sub> e simulados de SO<sub>2</sub> e MP no dia 22/09/2001
- 6.34 Gráfico da velocidade do vento do dia 06/10/2001

- 6.35** Gráfico da Temperatura do ar do dia 06/10/2001
- 6.36** Gráfico da Umidade relativa do ar do dia 06/10/2001
- 6.37** Gráfico da Direção do Vento do dia 06/10/2001
- 6.38** Gráfico de Isolinhas de concentração com fontes e estações de MP e SO<sub>2</sub>
- 6.39** Gráfico da análise dos padrões de concentração de MP e SO<sub>2</sub>
- 6.40** Gráfico da análise dos padrões de concentração de NO<sub>x</sub> e simulados de SO<sub>2</sub> e MP no dia 06/10/2001



## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela</b>	<b>Descrição</b>
<b>2.1</b>	Emissões totais das fontes instaladas na COPESUL de acordo com cada poluente
<b>3.1</b>	Principais poluentes atmosféricos
<b>3.2</b>	Padrões nacionais de qualidade do ar
<b>3.3</b>	Critérios para episódios agudos de poluição do ar
<b>5.1</b>	Classes de estabilidade de Pasquill
<b>5.2</b>	Perfil exponencial do vento relacionados com a categoria de estabilidade de Pasquill
<b>6.1</b>	Localização das fontes e estações em coordenadas UTM e da grade
<b>6.2</b>	Fontes de emissão de poluentes da COPESUL
<b>6.3</b>	Dados de concentração do dia 26/05/2001 coletados e modelados
<b>6.4</b>	Dados de concentração do dia 29/05/2001 coletados e modelados
<b>6.5</b>	Dados de concentração do dia 13/08/2001 coletados e modelados
<b>6.6</b>	Dados de concentração do dia 22/09/2001 coletados e modelados
<b>6.7</b>	Dados de concentração do dia 06/10/2001 coletados e modelados
<b>7.1</b>	Resumo dos resultados medidos e modelados

## LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Descrição
$\rho$	Densidade do ar(Kg/m <sup>2</sup> )
$\theta$	Temperatura potencial atmosférica(K)
$g$	Aceleração da gravidade(m/s <sup>2</sup> )
$u_s$	Velocidade do vento na altura da fonte(m/s)
$h_s$	Altura da fonte(m)
$p$	Perfil exponencial do vento
$c$	Valor da concentração do poluente( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )
$u$	Componente zonal da velocidade, ao longo do eixo cartesiano x, positiva para leste(m/s)
$v$	Componente meridional da velocidade, ao longo do eixo cartesiano y, positiva para norte(m/s)
$w$	Componente vertical da velocidade, ao longo do eixo cartesiano z, positiva para cima(m/s)
$x$	Coordenada cartesiana zonal(sistema de referência local), positiva para leste(m)
$y$	Coordenada cartesiana meridional(sistema de referência local), positiva para norte(m)
$z$	Coordenada cartesiana vertical(sistema de referência local), positiva para cima(m)
$\bar{u}$	Valor médio da perturbação da componente zonal do movimento em um elemento de volume(m/s)
$u'$	Valor da perturbação da componente zonal do movimento em relação ao estado básico $u_0$ (m/s)
$\bar{v}$	Valor médio da perturbação da componente meridional do movimento em um elemento de volume(m/s)
$v'$	Valor da perturbação da componente meridional do movimento em relação ao estado básico $v_0$ (m/s)
$\bar{w}$	Valor médio da perturbação da componente vertical do movimento em um elemento de volume(m/s)
$w'$	Valor da perturbação da componente vertical do movimento em relação ao estado básico $w_0$ (m/s)
$\bar{c}$	Valor médio da perturbação da concentração( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )
$c'$	Valor da perturbação da concentração( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )
$k_{xx}$	Coeficiente de difusão na direção x
$k_{yy}$	Coeficiente de difusão na direção y
$k_{zz}$	Coeficiente de difusão na direção z
$Q$	Taxa de emissão (g/s)
$\sigma$	Coeficiente de difusão turbulenta
$H_e$	Altura efetiva da chaminé(m)
$H'$	Altura de estabilização da pluma(m)

<b>Z<sub>s</sub></b>	Altura da base da chaminé em relação ao nível do mar(m)
<b>Z</b>	Altura do terreno do receptor em relação ao nível do mar(m)
<b>RHT</b>	Altura do receptor acima da altura do terreno(m)
<b>H<sub>m</sub></b>	Altura da camada de mistura(m)
<b>δ</b>	Função delta
<b>β</b>	Expoente do perfil do coeficientes de difusão na vertical

# CAPÍTULO I

## INTRODUÇÃO

### 1.1 INTRODUÇÃO

Muitos são os problemas de poluição que causam danos a saúde, a qualidade de vida e perdas ecológicas. Poluição por falta de abastecimento de água potável, assentamentos urbanos sem redes de esgotos, poluição da água de superfície nas áreas urbanas, falta de coleta de resíduos sólidos são alguns exemplos dos mais comuns.

Houve um importante avanço em relação aos problemas da poluição do ar por material particulado nas grandes cidades, assim como em relação a poluição localizada nas zonas industriais, através do controle da qualidade do ar por órgãos governamentais em parceria com instituições que buscam determinar toda e qualquer fonte que gere poluição.

A regulamentação ambiental tem forçado as indústrias a efetivamente controlarem suas emissões de poluentes registrando os dados de emissões e equipando-se de ferramentas para o controle das mesmas.

### 1.2 OBJETIVOS

O objetivo geral deste trabalho é estudar a alteração e a dispersão dos poluentes  $SO_2$ , Material Particulado e  $NO_x$ , emitidos pelas várias fontes fixas localizadas na região do Polo Petroquímico em Triunfo, no estado do Rio Grande do Sul, conforme mostra a figura 1.1. Para este estudo será utilizado o modelo ISCST3 – Industrial Source Complex Term – Short Term, recomendado pela EPA – UNAMAP (Environment Protection Agency – Users Network for Applied Modeling of Air Pollution) para tratamento da dispersão de poluentes emitidos por fontes industriais como refinarias, siderúrgicas, termelétricas, etc, admitindo várias condições topográficas e emissões variáveis.

Os objetivos específicos do estudo realizado são colocados a seguir :

- Analisar e integrar os dados de qualidade do ar do ano de 2001 provenientes da rede de monitoramento de qualidade do ar automática, associado aos dados meteorológicos, coletados pela estação do 8º DISME localizado na região de estudo, sendo analisados os dias de maior concentração dos poluentes, e dados das fontes da região da COPESUL, na aplicação da modelagem numérica.
- Realizar um levantamento dos parâmetros meteorológicos relativo ao período de amostragem da rede de monitoramento.
- Realizar um levantamento de todas as fontes pontuais contínuas localizadas próximo aos pontos de coleta de PTS e SO<sub>2</sub>.
- Verificar a influência dos parâmetros meteorológicos para a dispersão dos poluentes.
- Desenvolver um estudo da dispersão de poluentes utilizando o modelo ISCST3, com intuito de verificar o comportamento da pluma e a localização dos máximos de concentrações ao nível do solo, e comparar os resultados de concentrações obtido pelas simulações, com os dados da rede de monitoramento.
- Realizar uma análise estatística em relação aos dados obtidos e aos padrões de qualidade do ar na região em estudo.

O objetivo final é conhecer as condições meteorológicas e o comportamento dos poluentes das áreas de estudo e estimar as alterações que podem ocorrer na atmosfera relativa a dispersão dos poluentes.

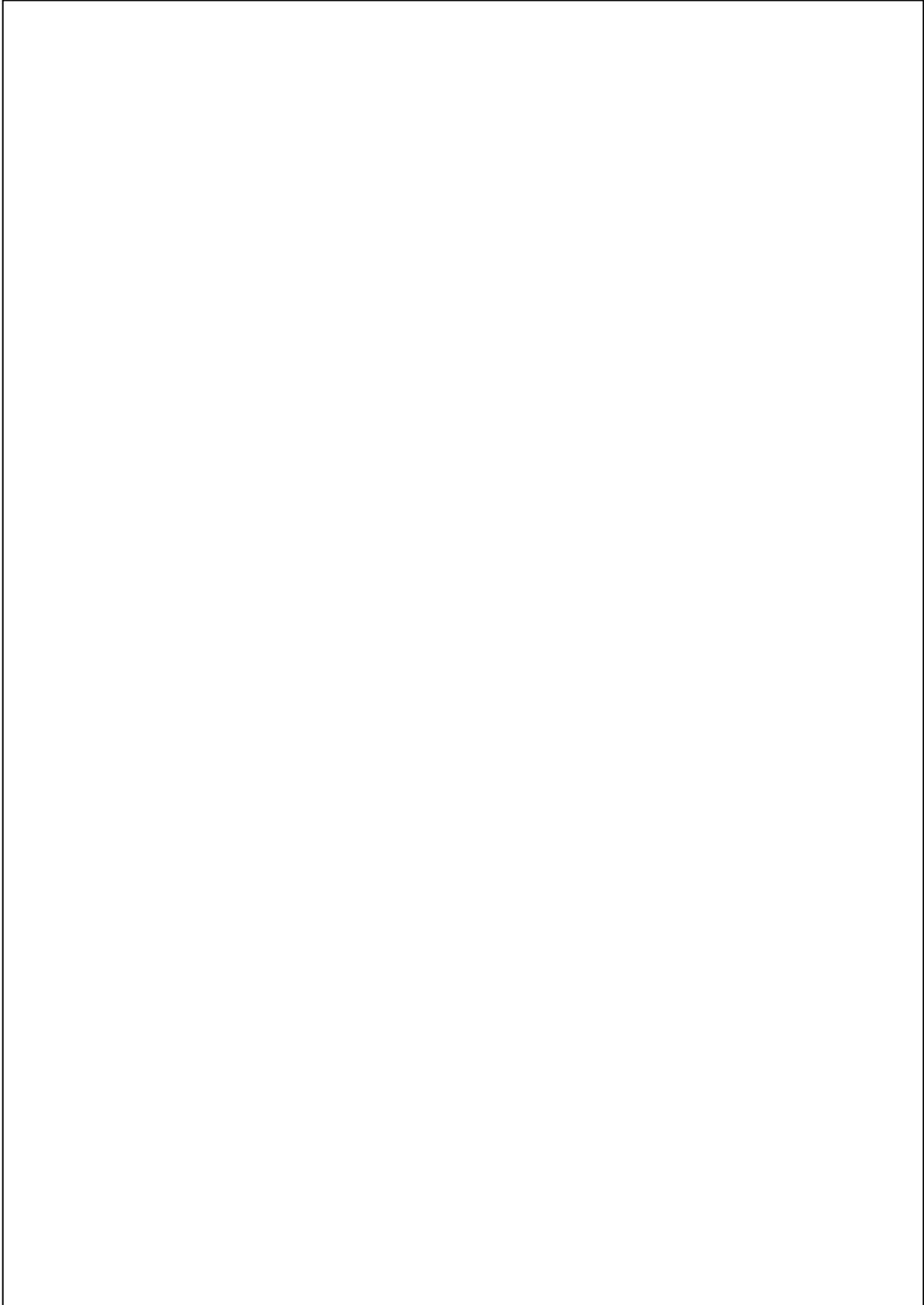


Figura 1.1 - Região do Polo Petroquímico. Fonte: EIARIMA Copesul, 1996.

### 1.3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Estudos até agora realizados sobre modelos tipo pluma Gaussiana, mostram que os mesmos podem ser utilizados facilmente.

Naik (1992) estudou a qualidade do ar relacionada a liberação de SO<sub>2</sub> (Dióxido de Enxofre) de uma usina termelétrica dentro dos limites da cidade de Ahmedabad, Índia. A dispersão de SO<sub>2</sub> foi calculada empregando um modelo de dispersão linear tipo Pluma Gaussiana. Os parâmetros meteorológicos utilizados neste estudo para inicializar o modelo de dispersão foram obtidos pelo Departamento Meteorológico da Índia para o período de 3 dias consecutivos no meio de cada mês do ano de 1983. A concentração de SO<sub>2</sub> foi calculada a uma distância de 500m em 16 direções localizadas nos limites da cidade. A qualidade do ar, em último caso, foi estimada em distâncias a favor do vento, sob condições meteorológicas desfavoráveis.

Na falta de outras fontes de emissão de poluentes, as prováveis zonas de altas concentrações de SO<sub>2</sub> sobre áreas residenciais, comerciais e industriais da cidade estão sob os padrões de qualidade do ar ambiente propostos pela EPA-UNAMAP. em 1971, durante todo o ano, exceto nos meses de abril e outubro. Sob as piores condições meteorológicas, a alta concentração estimada, ao nível do solo, alcançou 1000 µg/m<sup>3</sup> a uma distância de 1,25 Km da usina. Isto foi atribuído a altura da camada de inversão ser muito baixa e a uma alta instabilidade atmosférica.

Uma das medidas proposta para diminuir as zonas de alta concentração de poluentes é aumentar a altura das chaminés, o que resulta no funilamento das mesmas, direcionando-as a favor do vento para além dos limites da cidade, com isso atingindo-se valores de concentração ao nível do solo bem inferiores, prevenindo seus efeitos sobre o ser humano.

Kitada e Azad(1998) verificaram as características da poluição do ar na cidade de Dhaka(Bangladesh) no inverno de 1995-96, calculando a concentração média de 10 dias de SO<sub>2</sub> e NO<sub>2</sub>, utilizando difusão molecular de tubos, os autores simularam a distribuição espacial e variação temporal utilizando um modelo fotoquímico 3D Euleriano de deposição e transporte químico. Também estimaram o grau de conversão para SO<sub>2</sub> e NO<sub>2</sub>. As primeiras medidas mostram as características da distribuição espacial de SO<sub>2</sub> e NO<sub>2</sub> nesta área, evidenciando a

significativa variação espacial e a alta concentração de  $\text{SO}_2$  na zona sudeste de Dhaka, onde os maiores valores são aproximadamente 100ppb. A zona poluída, definida quando a média de concentração de  $\text{SO}_2$  é superior a 40 ppb, estendeu-se através da principal rodovia Noroeste Sudeste e também paralela ao rio Buriganga na área de Dhaka. No caso do  $\text{NO}_2$ , a maior média dos 10 dias foi de 35 ppb, e as maiores concentrações aparecem no centro da cidade e através da rodovia principal de Dhaka. Uma estimativa das emissões antropogênicas de  $\text{SO}_2$  e  $\text{NO}_2$  em Dhaka no inverno de 1995-96 foi realizada para verificar a importância para distribuição da concentrações destes poluentes, sendo que as emissões estimadas abrangendo completamente a área de aproximadamente  $1700 \text{ Km}^2$ , foram 72 e 70 ton/dia para  $\text{SO}_2$  e  $\text{NO}_x$ , respectivamente. As duas maiores fontes de emissão foram os veículos motores e chaminés. O grau de coeficientes de conversão de  $\text{SO}_2$  para  $\text{SO}_4^{2-}$ , e de  $\text{NO}_2$  para  $\text{NO}_x$  mostram larga variação espacial diurna. A média do coeficiente de reação de  $\text{SO}_2$  para  $\text{SO}_4^{2-}$  a nível do solo no inverno foi em torno de 0,3% por hora resultando em concentração de 7% no período de 24h. A média do grau de concentração de  $\text{NO}_2$  para  $\text{HNO}_3$  ao nível do solo no inverno foi em torno de  $7,3 \times 10^6$ .

Wilson (1993) descreve dois diferentes modelos de dispersão o CRSTER e o MPTER. O modelo CRSTER foi desenvolvido em 1970 sendo utilizado para fontes simples como chaminés, e o modelo MPTER foi desenvolvido depois devido a necessidade de verificação de múltiplas fontes. Os dois modelos são recomendados para fontes simples, aplicados em usinas termelétricas localizadas em locais planos ou levemente elevados. Os modelos são baseados numa versão modificada da equação de pluma gaussiana assumindo fontes de emissão contínuas e uma distribuição gaussiana para concentrações de poluentes através da pluma, ambos na direção do vento e na direção vertical. Os modelos utilizam os coeficientes de dispersão  $\sigma_y$  e  $\sigma_z$  de acordo com as curvas Pasquill e Gifford mostradas por Turner(1970).

Estes modelos não levam em conta evaporação, degeneração, cisalhamento do vento, plumas afetadas por terrenos elevados, trajetórias variáveis, fontes intermitentes, deposição, transformações químicas, comportamento negativo do rastro da pluma ou de terrenos induzidos abaixo dela.



Estes modelos não possuem acurácia para estimar as concentrações em um local específico durante certo tempo, eles tem habilidade na previsão de altas concentrações as quais ocorrem acima da rede de monitoramento de qualidade do ar, durante um longo período de registros. Empregados desta maneira, os modelos são capazes de determinar adequadamente os limites de emissões para prevenir violações dos padrões de qualidade do ar.

Park e Cho (1998), investigaram o transporte de SO<sub>2</sub> e sulfato entre a Coreia e o leste da China utilizando o STEM II (Sulfur Transport Eulerian Model II) em um período de 72 horas, sendo que nas últimas 36 horas ocorreu precipitação. Dos resultados obtidos verificaram um alto nível de concentração de SO<sub>2</sub> e Sulfato ao nível do solo nas primeiras 36 horas, diminuindo nas últimas 36 horas. A esta diminuição atribuíram o efeito da precipitação.

Beyrick et al(1998) realizaram um estudo para verificar a distribuição regional de SO<sub>2</sub> emitido por uma fonte industrial localizada na fronteira entre Alemanha e República Checa. Os dados experimentais para este trabalho foram coletados entre fevereiro e março de 1995. Eles discutiram detalhadamente a influência das condições meteorológicas em observações de concentração de SO<sub>2</sub> ao nível do solo.

Park e Kim em 1999, utilizando um método numérico para resolver a equação da continuidade, realizaram um trabalho em Kyongim (Coréia), onde simularam a dispersão de SO<sub>2</sub> para alguns dias em que observou-se alta concentração ao nível do solo. A análise estatística entre os dados observados e simulados superestimou as concentrações em um fator de 2,5 nas áreas de Seoul e Incheon. Com base nos resultados obtidos concluíram que a exatidão da taxa de emissão é um dos parâmetros mais importantes para verificar a acurácia das simulações dos campos de concentração.

Fisher et al(1994) estudaram o transporte de SO<sub>2</sub>, em áreas industriais na cidade de Ohio, e compararam dois modelos de dispersão do tipo pluma gaussiana com os valores monitorados, para verificar qual dos modelos é o mais acurado. Os modelos utilizados foram o ISCST("Industrial Source Complex Short Term") e RTDM("Rough Terrain Diffusion Model"), em ambos são considerados oito fontes de emissão, e também a elevação do terreno. Para a obtenção dos dados meteorológicos foram utilizadas duas torres micrometeorológicas de 100 e 60 m de

altura, as mesmas coletando dados de velocidade, direção do vento e temperatura do ar, em três níveis diferentes para o período de um ano (1990-1991). As fontes em geral possuíam alturas muito baixas, sendo algumas fontes localizadas em terrenos que excediam a altura das chaminés. Os autores verificaram neste estudo que o modelo ISCST melhor reproduziu os dados experimentais.

## CAPÍTULO II

### O POLO PETROQUÍMICO

#### 2.1 A REGIÃO

A região a ser analisada é a COPESUL (Companhia Petroquímica do Sul) localizada no Polo Petroquímico do Sul, na região central do Rio Grande do Sul, conforme mostra a figura 2.1, abrangendo áreas com cerca de 3.600 ha (figura 2.2) dos municípios de Triunfo e Montenegro, distante 23 km, em linha reta, de Porto Alegre.

A elevação média do terreno é de 30m e as coordenadas geográficas com latitude 29°53' S e longitude 51°23' W, referem-se aproximadamente ao centro do terreno.

A área do complexo industrial, é de propriedade da COPESUL. As fontes de emissão atmosférica existentes na COPESUL encontram-se distribuídas da seguinte maneira:

- fontes contínuas – 16 fornos e 2 caldeiras;
- fontes não contínuas – tanques e esferas.

As emissões totais anuais das fontes instaladas na COPESUL são apresentadas na tabela 2.1.

Tabela 2.1 - Emissões totais das fontes instaladas na COPESUL de acordo com cada poluente.

	Emissão(Kg/h)	Emissão(ton/ano)
Material Particulado	142,3	1.247
Dióxido de Enxofre	726	6.360
Dióxido de Nitrogênio	947	8.296
Monóxido de Carbono	117	1.025
Hidrocarbonetos	1.468	12.900
Dióxido de Carbono	187.422	1.642.000

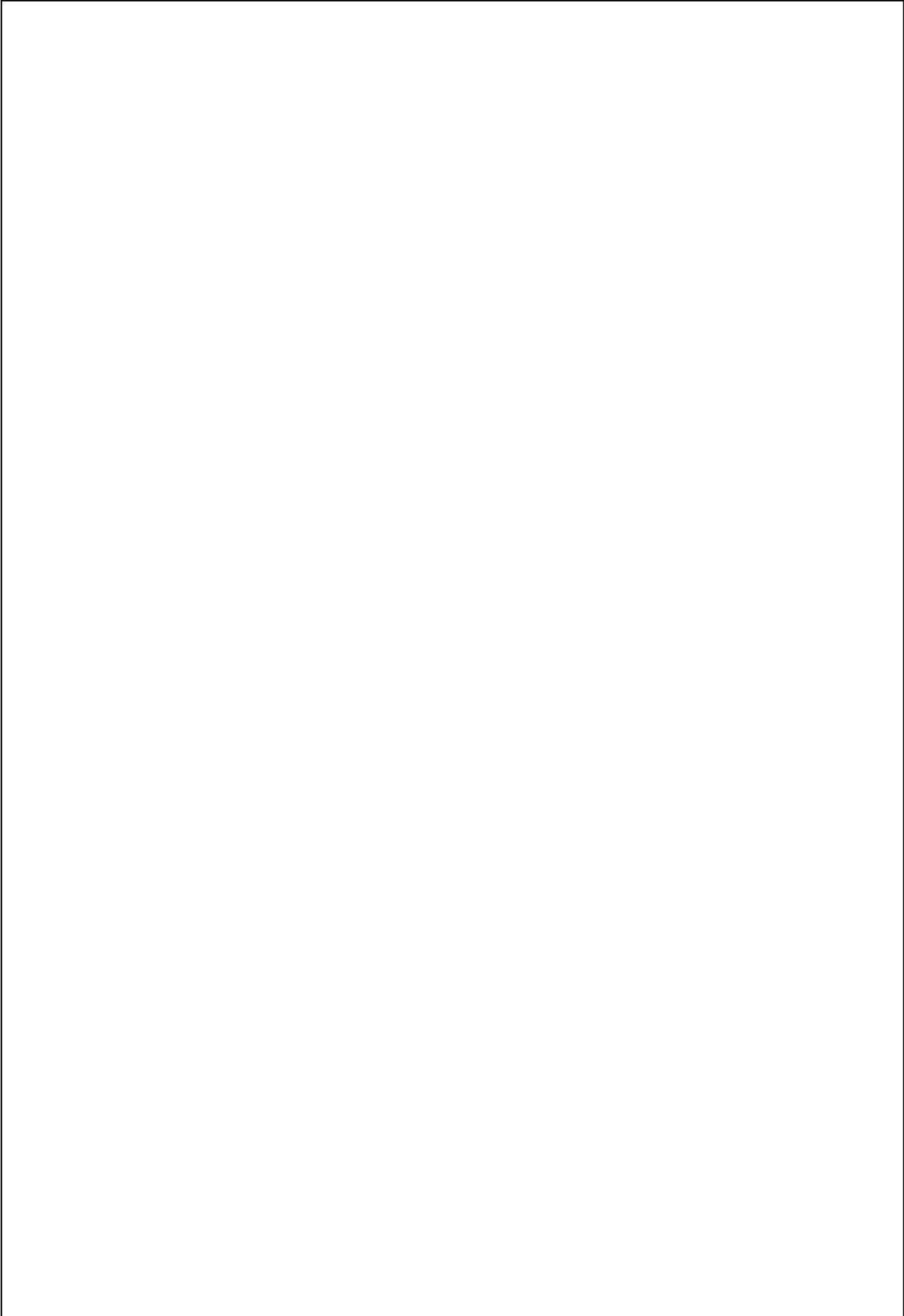


Figura 2.1 - Localização do Polo Petroquímico na região central do Rio Grande do Sul  
Fonte: EIA-RIMA Copesul, 1996.

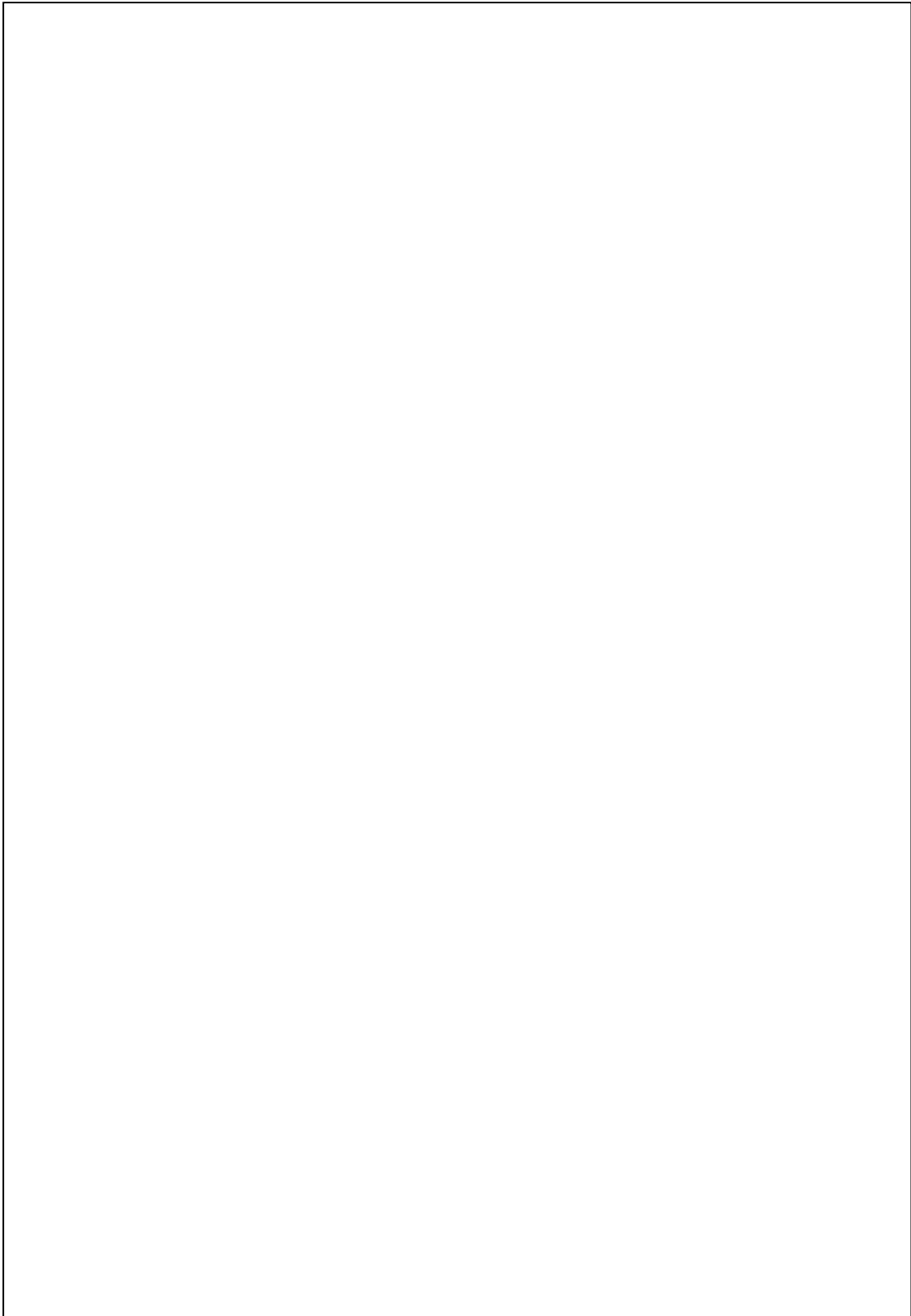


Figura 2.2 - Área de abrangência do Complexo Petroquímico  
Fonte: EIA-RIMA Copesul, 1996.

## 2.2 A COPESUL



Figura 2.3 - Foto da COPESUL  
Fonte: COPESUL,2001

A empresa COPESUL vista na figura 2.3, processa nafta (resíduo da destilação do petróleo) principalmente, além de condensado e GLP(gás liquefeito) para gerar os produtos básicos que alimentam as indústrias de 2ª geração da cadeia petroquímica.

A indústria petroquímica é a fonte da maior parte dos artigos de consumo disponíveis no mundo moderno. O plástico, em todas as suas variações, é petroquímica. Tecidos e fibras sintéticas, como a microfibras, são produzidos com matérias-primas petroquímicas. A química fina, base para medicamentos e insumos agrícolas, também vem da petroquímica.

Embora seja um dos setores industriais mais recentes da história da humanidade, a petroquímica desenvolveu-se rapidamente, tanto em termos tecnológicos como de ocupação de mercado. Seu aparecimento data do final do século 19, quando uma resina, a baquelite, foi desenvolvida para substituir o marfim na produção de bolas de bilhar. Sua origem está também na Primeira Guerra Mundial, quando cientistas das nações em conflito começaram a pesquisar um substituto para a borracha natural. Mais tarde, por volta de 1930, foi desenvolvida a tecnologia que possibilitou pela primeira vez a produção de polietileno, resina termoplástica empregada na fabricação de embalagens para alimentos, brinquedos, utilidades domésticas e muitos outros produtos.

Derivada do petróleo, a petroquímica substituiu com vantagens uma série de matérias-primas utilizadas pelo homem há milhares de anos, como vidro, madeira, algodão, celulose e metais. Ao substituir matérias-primas de origem animal, como couro, lã e marfim, possibilita o acesso a bens de consumo pela população de baixa renda. Além disso, a petroquímica ensejou o surgimento de novas demandas, como os produtos descartáveis, artigos para o lazer e os novíssimos eletro-eletrônicos. Na área médica, por exemplo, as aplicações são inúmeras e revolucionárias: próteses plásticas, bolsas de sangue, material descartável, artigos cirúrgicos, entre outros.

### 2.3 PRINCIPAIS PRODUTOS

Classificada como central de grande porte, a Copesul produz cerca de 40% do eteno consumido no Brasil, mostrada na figura 2.4, com capacidade instalada de 1,135 milhão de ton/ano. Além de eteno, seu principal produto, a empresa produz propeno, butadieno, benzeno, tolueno, xilenos, MTBE, buteno-1, propano e outros, totalizando 3 milhões de toneladas anuais de petroquímicos. Mais de 80% são consumidos no Pólo Petroquímico do Sul. O restante é vendido para outros estados do país ou exportado.



Figura 2.4 - O eteno, principal produto da indústria petroquímica - Fonte: COPESUL,2001.

## 2.4 PETROQUÍMICOS

A Copesul possui capacidade instalada para processar 3,7 milhões de ton/ano de nafta, com flexibilidade para utilizar GLP e/ou condensado leve. A nafta é um hidrocarboneto na forma líquida derivado do petróleo, bastante semelhante à gasolina. A Petrobras/Refinaria Alberto Pasqualini (Refap), de Canoas (RS), é a fornecedora exclusiva de nafta para a Copesul, levada por tubovia subterrânea até o Pólo Petroquímico do Sul. Como a Refap não possui capacidade de produção suficiente, uma parte da nafta chega ao Estado pelo terminal marítimo da Petrobras no Litoral Norte. O parque de tancagem da Copesul junto à Petrobras/Tedut, no município de Osório garante a manutenção de estoques estratégicos. A transferência da nafta até a Refap também ocorre por tubovia subterrânea.

## 2.5 CAPACIDADE DE ESTOCAGEM

A área industrial de estocagem da COPESUL em Triunfo tem capacidade para mais de 100mil m<sup>3</sup> e no Terminal Marítimo de Rio Grande pode armazenar 43mil m<sup>3</sup> e sua maior capacidade é no Terminal de Osório com condições de armazenar 170 mil m<sup>3</sup>, os dois últimos são , mostrados na figura 2.5.





## **2.6 MERCADO**

A Copesul é uma empresa de classe mundial que se caracteriza no mercado por disponibilizar aos clientes a garantia de fornecimento confiável. Com faturamento anual médio de US\$ 1,3 bilhão.

Os negócios com eteno e propeno respondem por 70% do faturamento da Copesul e concentram-se no Pólo Petroquímico do Sul, onde localizam-se as plantas industriais de seus principais clientes para estes produtos: OPP Petroquímica, Ipiranga Petroquímica, Petroquímica Triunfo, DSM Elastômeros e Innova. O butadieno, que responde por 4% do faturamento da empresa, é fornecido à Petroflex, também instalada no Pólo do Sul, e a clientes da Argentina, Estados Unidos e países da Europa.

O benzeno, os solventes (tolueno, xilenos, C9, refinado C6C8) e o aditivo para gasolina MTBE atendem a um perfil variado de mercado, que compreende a indústria química, de tintas, calçadista e de combustíveis. Os negócios da Copesul envolvendo estes produtos respondem por um faturamento médio anual de US\$ 350 milhões, atendendo a clientes de grande e médio portes localizados no Brasil, Mercosul, Estados Unidos, Europa e Ásia

## **2.7 ENERGIA, ÁGUA E VAPOR**

A Copesul produz internamente, em sua central de utilidades, a energia elétrica, a água tratada e o vapor que consome nos processos industriais e nas áreas administrativas. A empresa também fornece vapor e água desmineralizada para todas as indústrias de 2ª geração do Pólo Petroquímico do Sul.

A estação de tratamento de água da Copesul trata, hoje, 2,5 mil m<sup>3</sup>/hora de água captada no rio Caí, que corre próximo à empresa, mas tem capacidade para 6,3 mil m<sup>3</sup>/hora. Uma parte da água é clarificada, para abastecer os processos industriais e os estoques estratégicos de combate a incêndios. Outra parte transforma-se em água potável, para consumo humano. A água desmineralizada é empregada na geração de todo o vapor consumido na Copesul e nas indústrias de 2ª geração do Pólo.

A Copesul produz e fornece o vapor empregado no processo produtivo de todas as empresas do Pólo Petroquímico. O vapor de super alta pressão é

empregado na geração de energia elétrica e no processo de craqueamento da nafta. Os vapores de média e baixa pressão são utilizados para aquecer diversos processos operacionais e acionar bombas e compressores.

A Copesul sempre foi auto-suficiente na geração de energia elétrica. Hoje a empresa opera com gás natural, carvão e óleo combustível.

- Demanda de energia: 57MW
- Capacidade instalada de geração: 74MW
- Matriz energética: 60%: gás natural e óleo combustível; 40%: carvão
- Consumo de gás natural: 220 mil m<sup>3</sup>/dia
- Consumo de carvão: 200 mil toneladas/ano
- Consumo de óleo combustível: 52 mil toneladas/ano

## 2.8 TURBINA A GÁS

A Copesul foi a primeira empresa gaúcha a utilizar gás natural para produzir energia, a partir de junho de 2000, e é também o maior consumidor industrial do Rio Grande do Sul. A empresa investiu US\$ 1,5 milhão na implantação de uma turbina a gás de alta tecnologia, com capacidade de 38MW, que oferece vantagens ambientais e de economia energética. Ao queimar o gás, na turbina a gás mostrada na figura 2.6, o equipamento gera gases com temperatura superior a 500°C que, em vez de serem emitidos para a atmosfera, são reaproveitados para pré-aquecer a água que será transformada em vapor na Planta 2.



Figura 2.6 - Turbina a gás.  
Fonte: COPESUL,2001.

## 2.9 TECNOLOGIA AVANÇADA E CONTROLE AMBIENTAL

Localizada em Triunfo, município do Rio Grande do Sul, a Copesul adota as mais avançadas tecnologias de produção petroquímica e de controle ambiental, visando o desenvolvimento sustentável de seu negócio e do país. Certificada pela ISO 9002 e pela ISO 14001, é reconhecida como empresa de classe mundial, que busca continuamente avançar em seus padrões de qualidade para atender às demandas dos clientes; manter-se competitiva no mercado internacional; garantir a segurança operacional, a saúde das pessoas e a proteção ao meio ambiente, com monitoramento da qualidade do ar, através de uma unidade móvel (figura 2.7), e participar da vida da comunidade.



Figura 2.7 - Monitoramento da qualidade do ar.  
Fonte: COPESUL,2001.

## CAPÍTULO III

### POLUENTES ATMOSFÉRICOS E QUALIDADE DO AR

#### 3.1 Os POLUENTES ATMOSFÉRICOS

A poluição atmosférica distingue-se de outros tipos de poluição porque uma vez emitido para atmosfera ocorre um processo irreversível deste poluente. Numa zona urbana, a exposição da população aos poluentes atmosféricos é um parâmetro difícil de avaliar, dada a multiplicidade de micro-ambientes frequentados diariamente pelos cidadãos e a variabilidade das concentrações de poluentes no ambiente exterior e interior dos edifícios (Cerqueira,2001).

Os poluentes atmosféricos classificam-se em dois grandes grupos: poluentes primários e poluentes secundários. Os poluentes primários são emitidos diretamente pelas fontes e são exemplo o Monóxido de Carbono, o Dióxido de Enxofre,  $\text{NO}_x$  e outros. Estes poluentes podem, na baixa atmosfera, sofrer transformações e reações fotoquímicas dando origem a poluentes denominados secundários. Dado que a formação de poluentes secundários, tais como o Ozônio, necessita-se de um certo tempo, e ocorrem à medida que as massas de ar se deslocam, com isso é normal que concentrações elevadas destes poluentes atinjam áreas mais afastadas das fontes de emissão que os poluentes primários(Lyons e Scott,1990 e Seinfeld,1986).

Os poluentes primários, depois de emitidos para a atmosfera passam a estar submetidos a processos complexos de transporte, mistura e transformação química, que dão origem a uma distribuição variável das suas concentrações na atmosfera, tanto no espaço como no tempo. Basicamente, a distribuição das concentrações de poluentes na atmosfera dependem das condições de emissão e das condições meteorológicas, podendo alguns poluentes ser transportados a grandes distâncias antes de atingirem o nível do solo(Elsom,1989).

Os efeitos da exposição dos receptores dependem essencialmente das concentrações dos poluentes e do tempo de exposição podendo, por exemplo, exposições prolongadas a concentrações baixas de poluentes atmosféricos serem mais nocivas do que exposições de curta duração a concentrações elevadas. Existem, ainda fatores de sensibilidade nos indivíduos que determinam a maior ou menor severidade dos efeitos, tais como, idade, estado nutricional, condição física

ou mesmo predisposições genéticas, o que torna necessária a avaliação para diferentes grupos de risco. Os poluentes atmosféricos podem ser particularmente nocivos para crianças, idosos, grávidas e indivíduos que sofram de problemas respiratórios e cardíacos.

No que diz respeito as quantidades inaladas e ao tempo de exposição, podem distinguir-se dois tipos de efeitos: agudos e crônicos. Para cada uma das categorias a resposta fisiológica dos seres vivos varia entre o simples desconforto e o aparecimento de doenças que por vezes podem conduzir à morte. Exposições prolongadas a pequenas quantidades inaladas provocam efeitos crônicos e exposições de curta duração a doses elevadas provocam intoxicações agudas. Também a exposição em simultâneo a um conjunto de poluentes, pode evidenciar os seus efeitos e aumentar as dificuldades de avaliação dos mesmos (Cerqueira,2001).

Quando se determina a concentração ao nível do solo de um certo poluente na atmosfera, mede-se o grau de exposição dos receptores como resultado final do processo de lançamento deste poluente na atmosfera, desde suas fontes de emissão, suas interações físicas (diluição) e químicas (reações) na atmosfera (Seinfeld,1986).

O esquema abaixo mostra a sequência do processo de emissão de poluentes.



Portanto o sistema pode ser visualizado como ilustra a figura 3.1:

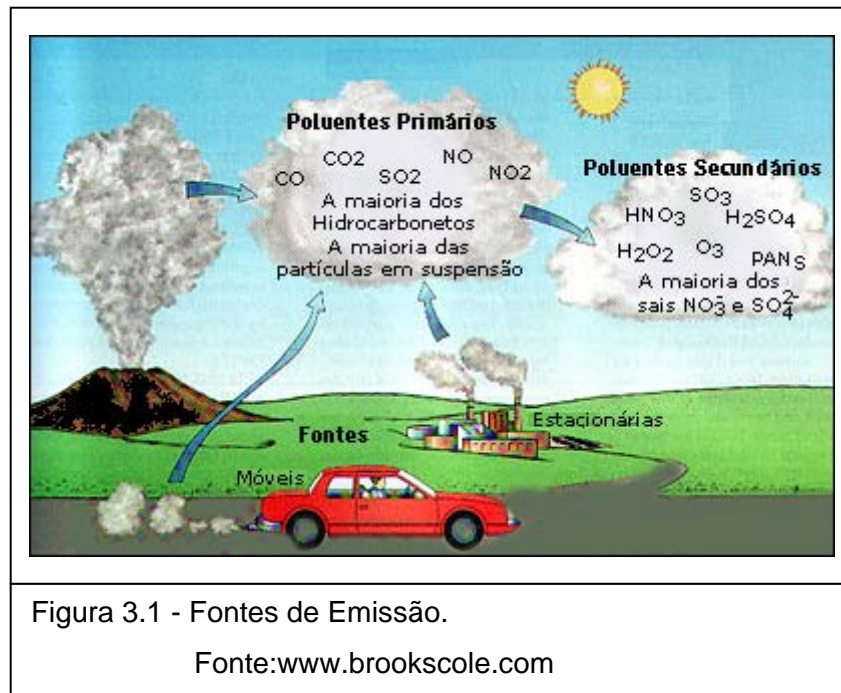


Figura 3.1 - Fontes de Emissão.

Fonte:www.brookscoble.com

Os principais poluentes e mais comumente medidos são os que servem como indicadores de qualidade do ar, tais como Dióxido de Enxofre (SO<sub>2</sub>), Material Particulado (MP), Monóxido de Carbono (CO), Ozônio (O<sub>3</sub>), hidrocarbonetos totais e Óxido de Nitrogênio (NO<sub>x</sub>). Suas características básicas estão descritas nos próximos itens:

### 3.1.1 MATERIAL PARTICULADO

As partículas presentes na atmosfera são provenientes de fontes naturais, como vulcões, aerossóis marinhos e a ação do vento sobre o solo, entre outras de caráter antropogênico, tais como a queima de combustíveis fósseis, processos industriais e tráfego rodoviário.

As partículas presentes na atmosfera são normalmente designadas pelo método através do qual são medidas. Nos últimos anos foi dedicada especial atenção aos efeitos das partículas e, portanto, as medições tradicionais de Partículas Totais em Suspensão (PTS) têm sido substituídas pela medição da fração PM<sub>10</sub> (partículas com um diâmetro aerodinâmico inferior a 10 µm), dado serem estas as partículas que representam um maior risco para a saúde (Elsom, 1989).

O material particulado ou aerossol atmosférico é constituído pelas partículas sólidas e líquidas em suspensão na atmosfera. As partículas inaláveis (PM10) são definidas como partículas com diâmetro aerodinâmico menor que 10  $\mu\text{m}$ , estas dividem-se em partículas grossas inaláveis com diâmetro aerodinâmico entre 2 e 10  $\mu\text{m}$  e as partículas finas com diâmetro aerodinâmico menor que 2  $\mu\text{m}$  (Elsom, 1989).

Estudos recentes têm demonstrado a existência de correlações entre as variações dos níveis diários de PM10, produzidas por diversas fontes e os efeitos nocivos à saúde humana. Em muitas cidades as PM10 são o poluente que causam maiores preocupações, estando a sua ação relacionada com todos os tipos de problemas de saúde, desde a irritação nasal, tosse, até à bronquite, asma e mesmo a morte (Cerqueira, 2001).

A fração mais fina das PM10 (0,5  $\mu\text{m}$  a 1,0  $\mu\text{m}$ ) pode ter efeitos muito graves para a saúde, uma vez que este tipo de partícula pode penetrar profundamente nos pulmões e atingir os alvéolos pulmonares, provocando dificuldades respiratórias e por vezes danos permanentes (Elsom, 1989).

As partículas com diâmetro inferior a 1  $\mu\text{m}$ , podem permanecer em suspensão na atmosfera durante semanas e serem transportadas ao longo de centenas ou milhares de quilômetros, enquanto que partículas maiores que 2,5  $\mu\text{m}$ , são removidas no período de algumas horas por precipitação e sedimentação. As dimensões das partículas finas, principalmente das partículas emitidas pelos veículos a diesel, são da ordem de grandeza do comprimento de onda da luz visível podendo, por este motivo, reduzir sensivelmente a visibilidade.

A capacidade do material particulado em aumentar os efeitos fisiológicos dos gases presentes no ar é um dos aspectos mais importantes a ser considerado. Os efeitos de uma mistura de material particulado e Dióxido de Enxofre, por exemplo, são mais acentuados do que os provocados na presença individualizada de cada um deles. Além disso, pequenas partículas podem absorver o Dióxido de Enxofre do ar e, com água (umidade do ar) formam partículas contendo ácido, o que irrita o sistema respiratório e pode danificar as células que protegem o sistema.

### 3.1.2 ÓXIDOS DE NITROGÊNIO

Os compostos do Nitrogênio mais importantes como poluentes atmosféricos são o monóxido de Nitrogênio (NO) e o dióxido de Nitrogênio (NO<sub>2</sub>).

Os óxidos de Nitrogênio (NO<sub>x</sub>) formados naturalmente provêm de transformações microbianas nos solos e de descargas elétricas na atmosfera. Os NO<sub>x</sub> de origem antropogênica são essencialmente resultantes da queima de combustíveis a altas temperaturas, quer em instalações industriais, quer nos veículos automotivos. Na maior parte das situações, o NO emitido para a atmosfera é posteriormente transformado em NO<sub>2</sub> por oxidação fotoquímica (Shi e Harrison,1997).

O NO<sub>2</sub> é um gás acastanhado facilmente detectável pelo odor, muito corrosivo e um forte agente oxidante. O NO é um gás incolor, insípido, inodoro e pouco tóxico. Os NO<sub>x</sub> emitidos para a atmosfera podem transformar-se em poluentes secundários, tais como o ácido nitroso, o ácido nítrico e os respectivos sais, contribuindo, com o SO<sub>2</sub> para a ocorrência de chuvas ácidas. Em algumas zonas, os NO<sub>x</sub> são ainda precursores importantes da formação de partículas. Conjuntamente com os compostos orgânicos voláteis e na presença de radiação solar, os óxidos de Nitrogênio são ainda responsáveis pela formação de oxidantes fotoquímicos, dos quais se destaca o ozônio(Cerqueira,2001).

O NO<sub>2</sub> é entre os óxidos de Nitrogênio, o mais importante em termos de proteção da saúde humana. Consoante a sua concentração no ar e a duração da exposição, o NO<sub>2</sub> pode provocar lesões, reversíveis ou irreversíveis, nos brônquios e nos alvéolos pulmonares, em especial em indivíduos com doenças pulmonares, podendo também aumentar a reatividade a alergênicos de origem natural. Em doses elevadas pode provocar edema pulmonar e, em concentrações mais fracas, bronquite crônica e efisemas. O NO não é considerado um poluente perigoso para as concentrações normalmente presentes na atmosfera(Cerqueira,2001).

Os NO<sub>x</sub> têm igualmente efeitos negativos sobre a vegetação quando presentes em concentrações elevadas, tais como danos nos tecidos das folhas e redução do seu crescimento. Estes efeitos são ainda mais acentuados quando o dióxido de Nitrogênio e o Dióxido de Enxofre estão presentes simultaneamente na atmosfera. Apresenta ainda, papel fundamental na formação dos oxidantes fotoquímicos.



### 3.1.3 DIÓXIDO DE ENXOFRE

O Enxofre libertado na queima de combustíveis combina-se com o oxigênio do ar e dá origem ao  $\text{SO}_2$  (Dióxido de Enxofre) que, após oxidação, pode ser transformado em Trióxido de Enxofre. Na presença da umidade do ar este composto dá origem ao Ácido Sulfúrico e respectivos sais, contribuindo, deste modo, para a formação de chuvas ácidas, responsáveis pela acidificação das águas e dos solos, como mostra a figura 3.2 e pela ocorrência de lesões nas plantas(CGA,2001).

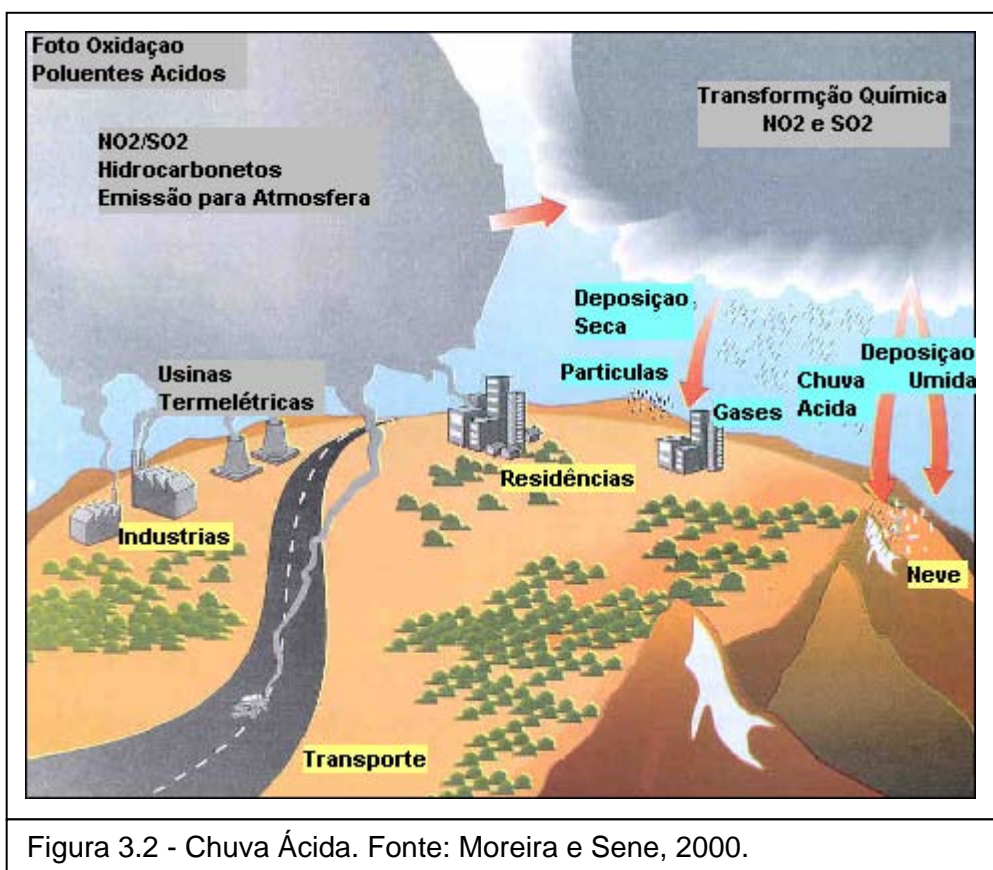


Figura 3.2 - Chuva Ácida. Fonte: Moreira e Sene, 2000.

O Dióxido de Enxofre ( $\text{SO}_2$ ) é um gás incolor, muito solúvel na água, que pode ocorrer naturalmente na atmosfera, principalmente devido as atividades vulcânicas.

O  $\text{SO}_2$  de origem antropogênica, é um poluente primário. Resulta essencialmente da queima de combustíveis fósseis, nomeadamente no setor da

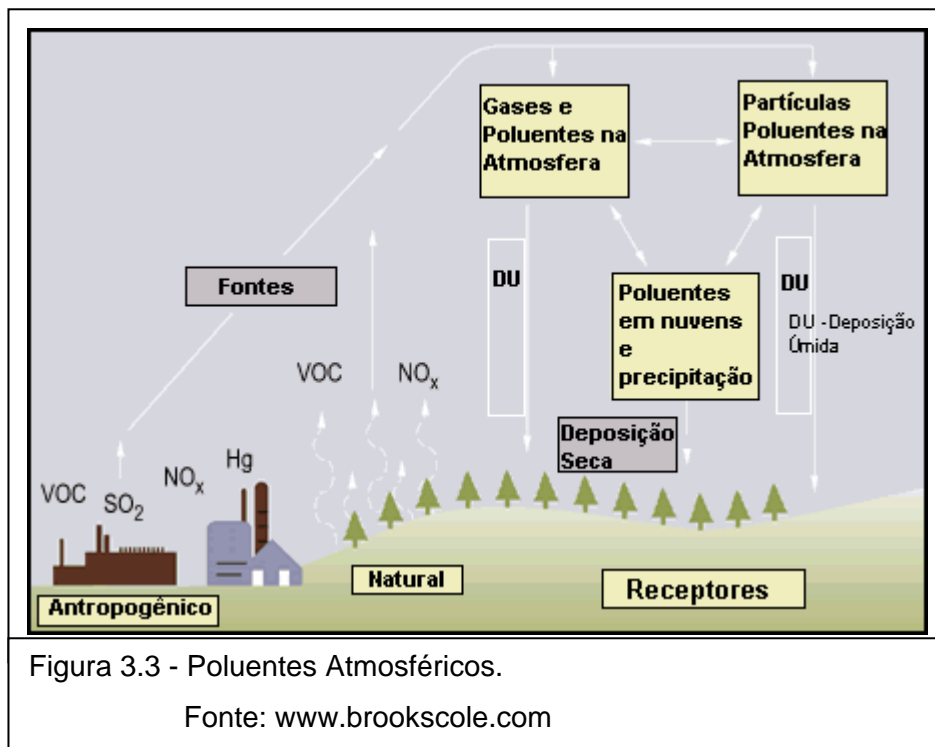
produção de energia, e de diversos processos industriais, podendo também ser emitido em pequenas quantidades, por exemplo em veículos a diesel.

O  $\text{SO}_2$  é um gás irritante para as mucosas dos olhos e vias respiratórias, podendo ter, em concentrações elevadas, efeitos agudos e crônicos na saúde humana, especialmente ao nível do aparelho respiratório. O dióxido de enxofre pode igualmente agravar os problemas cardiovasculares devido ao seu impacto na função respiratória. A presença simultânea na atmosfera de dióxido de enxofre e partículas pode evidenciar ou agravar os efeitos de doenças respiratórias crônicas ou aumentar o risco de doenças respiratórias agudas(Seinfeld,1986).

Concentrações elevadas de  $\text{SO}_2$  podem provocar alterações nos processos metabólicos das plantas, das quais se destacam a redução da taxa de crescimento e da taxa fotossintética, especialmente quando combinadas com determinadas condições adversas como as baixas temperaturas. Entre outros efeitos mais facilmente observáveis, destacam-se o aparecimento de necroses, bem como o aumento da sensibilidade ao gelo e aos parasitas. A sensibilidade dos diferentes tipos de plantas é muito variável, sendo os líquenes os mais susceptíveis.

A deposição seca e úmida do  $\text{SO}_2$  e de aerossóis sulfurados sobre as edificações e materiais de construção provocam a sua corrosão e aceleram os processos naturais de envelhecimento e de degradação(Alves,1996).

A figura 3.3 mostra esquematicamente a poluição atmosférica a partir das fontes com emissões de  $\text{SO}_2$  e  $\text{NO}_x$ .



### 3.1.4 MONÓXIDO DE CARBONO

Os efeitos da exposição dos seres humanos ao Monóxido de Carbono são associados à capacidade de transporte de Oxigênio pelo sangue. O Monóxido de Carbono(CO) compete como o Oxigênio na combinação com a hemoglobina do sangue, uma vez que a afinidade da hemoglobina pelo Monóxido de Carbono é cerca de 210 vezes maior do que pelo Oxigênio. Quando uma molécula de hemoglobina recebe uma molécula de Monóxido de Carbono forma-se a carboxihemoglobina, que diminui a capacidade do sangue de transportar Oxigênio aos tecidos do corpo.

Os sintomas da exposição ao Monóxido de Carbono dependem da quantidade de hemoglobina combinada com Monóxido de Carbono. Tem sido demonstrado experimentalmente que baixos níveis de carboxihemoglobina já podem causar diminuição na capacidade de estimar intervalos de tempo e podem diminuir os reflexos e a acuidade visual da pessoa exposta(Cerqueira,2001).

O efeito da intoxicação por CO é semelhante ao da anemia ou hipoxia. A maior parte das exposições a baixas concentrações de CO produz efeitos sobre o

sistema nervoso central. Uma possível explicação para isso é a redução do suprimento de Oxigênio para o cérebro.

Acima de 1000 ppm o CO é altamente tóxico, podendo ser responsável por ataques cardíacos e elevada taxa de mortalidade, especialmente em áreas metropolitanas, onde o CO é abundante. Em condições de exposição aguda, pode originar a morte.

Recém-nascidos e crianças em gestação também são afetados pelo CO. Os níveis encontrados em ambientes de cidades altamente poluídas estão associados com menor peso de recém-nascidos e aumento da taxa de mortalidade de crianças(Cerqueira,2001).

A principal razão para o controle das emissões de CO está na proteção da saúde das crianças em gestação, dos recém-nascidos, dos idosos e enfermos.

### **3.1.5 COMPOSTOS ORGÂNICOS VOLÁTEIS (VOC's)**

Constituem um dos precursores do oxidante fotoquímico Ozônio. Os Compostos Orgânicos Voláteis(VOC) tem sido definidos pela EPA como “qualquer composto de carbono, excluindo-se o monóxido de carbono, dióxido de carbono, carbonetos ou carbonatos metálicos e o carbonato de amônio, que participe de reações químicas na atmosfera”. Existem diversos compostos considerados “desprezíveis quanto a reatividade atmosférica” e, portanto, também fora da definição dos VOC. Tais compostos são: metano, etano, cloreto de metileno, metilclorofórmio, muitos clorofluorcarbonos e certas classes de perfluorcarbonos. No futuro, compostos adicionais poderão ser incluídos nesta lista de isenção (Zanetti, 1990).

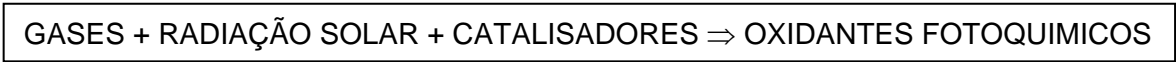
O termo “Compostos Orgânicos Totais” (TOC) indica todos os VOC e os demais compostos isentos de reatividade química na atmosfera, incluindo: metano, etano, clorofluorcarbonos, poluentes atmosféricos tóxicos e perigosos, aldeídos e compostos semi-voláteis. Muitos compostos orgânicos são também poluentes atmosféricos perigosos (Zanetti, 1990).

Os efeitos sobre a saúde humana por hidrocarbonetos têm sido notado em exposições ocupacionais ao chumbo tetra-metila, ao benzeno, etc. Vapores de hidrocarbonetos podem causar efeitos sobre a saúde. A inalação do aldeído fórmico pode causar irritação das vias respiratórias. O aldeído fórmico é o principal

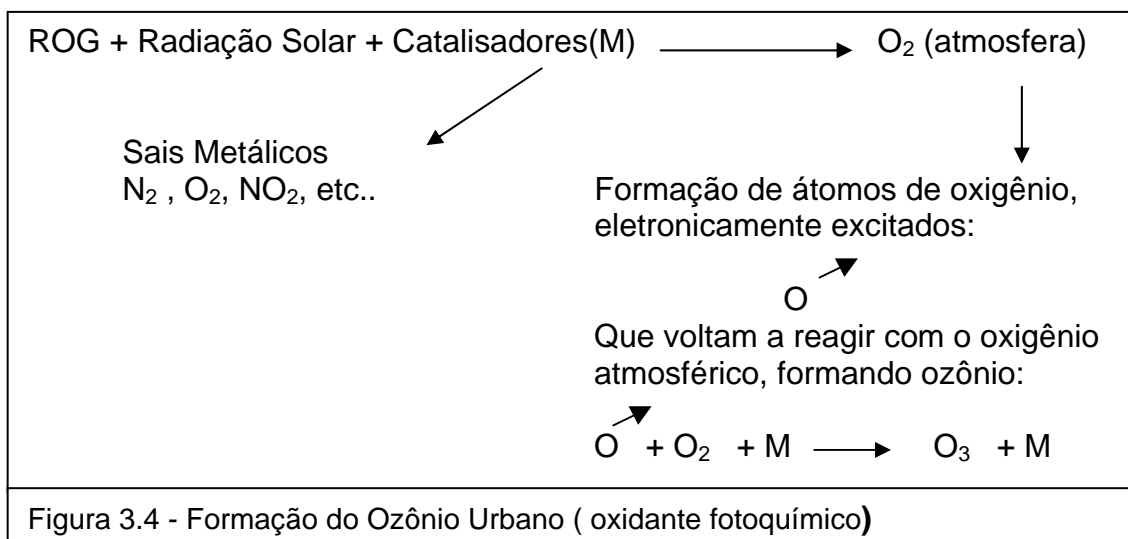
contribuidor para a irritação ocular e do sistema respiratório causada pelo smog fotoquímico .

### 3.1.6 OXIDANTES FOTOQUIMICOS

“Oxidantes Fotoquímicos” é a denominação dada à mistura de poluentes secundários formados pela reação dos hidrocarbonetos e óxidos de Nitrogênio na presença da luz solar. O principal representante desta mistura é o gás Ozônio (O<sub>3</sub>), por isso mesmo utilizado como parâmetro indicador da presença dos oxidantes fotoquímicos, que também têm em sua composição quantidades pequenas de compostos oxigenados derivados de hidrocarbonetos:



A radiação ultravioleta do sol sobre a atmosfera contendo hidrocarbonetos reativos (ROG – "Reactive Oxidant Gases") e óxidos de Nitrogênio produz a oxidação do NO em NO<sub>2</sub>, a oxidação dos hidrocarbonetos reativos e a formação de O<sub>3</sub>, entre outros. A figura 3.4 sintetiza o processo de formação de Ozônio (Zanetti, 1990).



A figura 3.5 permite avaliar a interação entre os gases componentes ( $\text{NO}_x$ , Hidrocarbonetos Reativos) de uma situação de *smog* (com formação de  $\text{O}_3$ ), intensamente pesquisada na Califórnia.

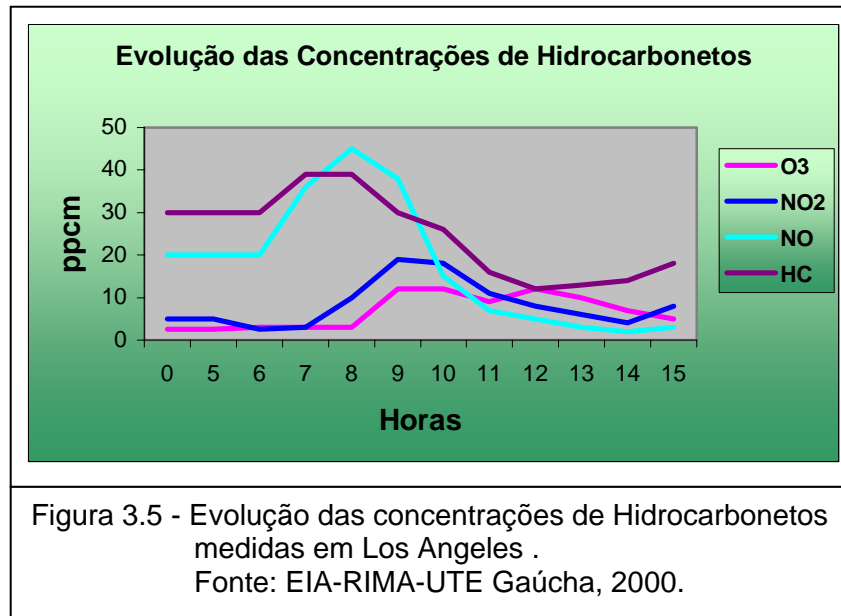


Figura 3.5 - Evolução das concentrações de Hidrocarbonetos medidas em Los Angeles .  
Fonte: EIA-RIMA-UTE Gaúcha, 2000.

Nesta figura, as concentrações de NO e HC começam a crescer a partir das 06:00 da manhã, pela circulação dos veículos. Nota-se que, pouco depois do começo da radiação solar produz-se a oxidação (Zanetti, 1990).

### 3.1.7 Ozônio

O Ozônio ( $\text{O}_3$ ) é o mais importante dos oxidantes fotoquímicos. Existe em grande quantidade na estratosfera, onde tem um papel essencial ao limitar a quantidade de radiação solar ultravioleta que atinge a superfície terrestre. Nos níveis mais baixos da atmosfera - troposfera - é um poluente secundário nocivo para a saúde. A figura 3.6 mostra a camada de Ozônio na atmosfera em 12 de dezembro de 2000.

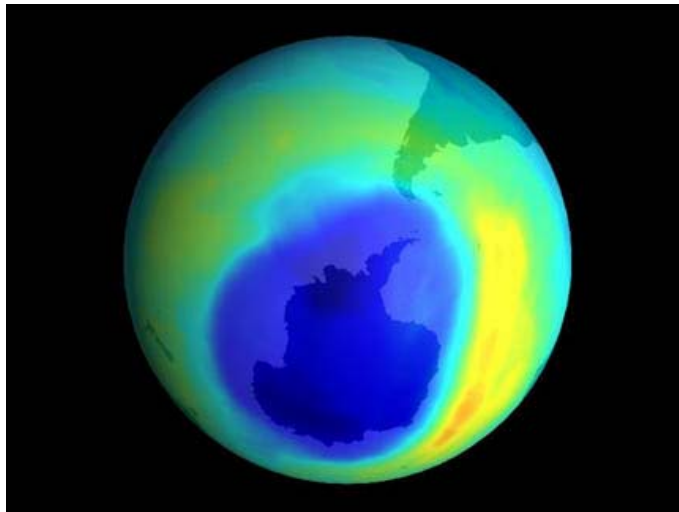


Figura 3.6 - Camada de Ozônio na atmosfera.

Fonte: [www.nasa.gov/science](http://www.nasa.gov/science)

O Ozônio troposférico é resultante de um conjunto de reações fotoquímicas complexas envolvendo compostos orgânicos voláteis (VOCs), Óxidos de Nitrogênio, Oxigênio e radiação solar, sendo um dos principais constituintes do nevoeiro fotoquímico.

O Ozônio, assim como outros oxidantes fotoquímicos, penetra profundamente nas vias respiratórias, afetando os brônquios e os alvéolos pulmonares. A sua ação faz-se sentir, mesmo para concentrações baixas e para exposições de curta duração, principalmente em crianças. Manifesta-se inicialmente por irritações nos olhos, nariz e garganta, seguindo-se tosse e dor de cabeça.

O Ozônio tem também um efeito nocivo para a vegetação e para as culturas, provocando manchas significativas nas folhas, reduções de crescimento a partir de certas concentrações e períodos de exposição, e completa destruição de culturas mais sensíveis (Boelter e Davidson, 1997).

Este poluente provoca também a degradação de alguns materiais, tais como a borracha dos limpadores pára-brisas dos automóveis que em atmosferas urbanas poluídas perdem a flexibilidade e quebram facilmente.

A figura 3.7 ilustra a destruição da camada de Ozônio com a penetração dos raios Ultra Violeta na atmosfera prejudicando os seres vivos.

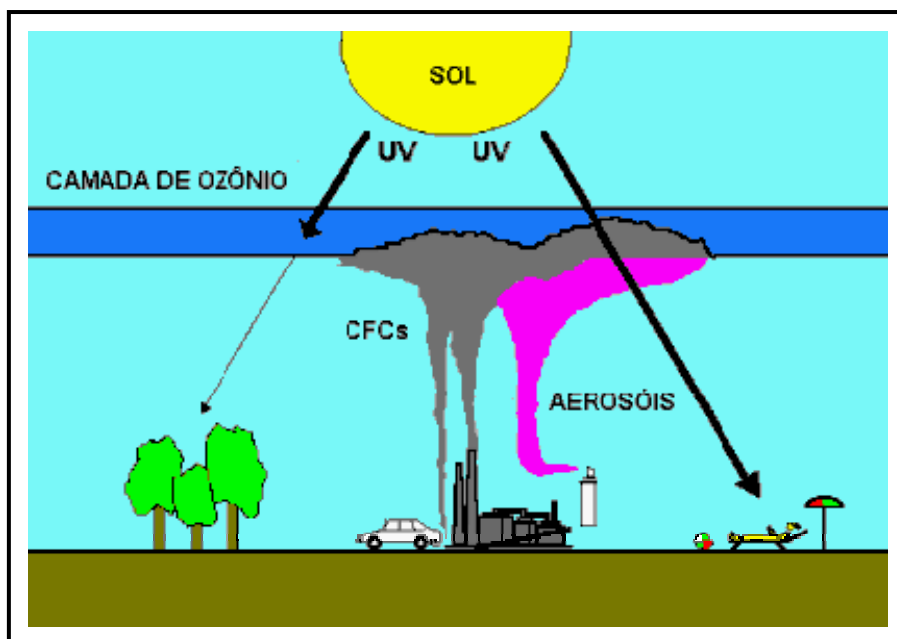


Figura 3.7 - Camada de Ozônio.

Fonte: [www.al.noaa.gov](http://www.al.noaa.gov)

### 3.2 A QUALIDADE DO AR

A qualidade do ar de uma região é influenciada diretamente pelos níveis de poluição atmosférica, os quais estão vinculados a um complexo sistema de fontes emissoras estacionárias (indústrias, queima de lixo, emissões naturais, etc.) e móveis (veículos automotores, aviões, trens, etc.). A magnitude do lançamento dessas emissões, seu transporte e diluição na atmosfera, determinam o estado atual da qualidade do ar atmosférico.

Um poluente pode ser definido como qualquer substância que esteja no ar, em concentrações altas o suficiente para produzirem efeitos mensuráveis e danosos em seres humanos, animais, plantas ou materiais. O poluente pode ser tanto de origem antropogênica, como proveniente de emissões naturais devido à decomposição microbiana e de erupções vulcânicas, entre outras fontes (CGA, 2001).

É considerado poluente atmosférico qualquer forma de matéria ou energia com intensidade e em quantidade, concentração, tempo ou característica 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.

Segundo Lyons e Scott(1990) e Seinfeld(1986) as substâncias usualmente consideradas poluentes do ar podem ser classificadas como segue:

- Material Particulado/Partículas em Suspensão: mistura de compostos no estado sólido ou líquido;
- Compostos de enxofre: óxidos ( $\text{SO}_2$ ,  $\text{SO}_3$ ), gás sulfídrico ( $\text{H}_2\text{S}$ ), sulfatos ( $\text{SO}_4^{-2}$ );
- Monóxidos de carbono;
- Compostos de nitrogênio ( $\text{NO}$ ,  $\text{NO}_2$ ), amônia ( $\text{NH}_3$ ), ácido nítrico ( $\text{HNO}_3$ );
- Compostos halogenados: ácido clorídrico ( $\text{HCl}$ ), ácido fluorídrico ( $\text{HF}$ ), cloretos, fluoretos;
- Compostos orgânicos: hidrocarbonetos, álcoois, aldeídos, cetonas, ácidos orgânicos.

Na tabela 3.1 verificamos os principais poluentes atmosféricos gerados por diversos tipos de fontes antropogênicas e naturais de poluição do ar.

A resolução CONAMA nº 3 de 28/06/90, com base no PRONAR, estabelece em nível nacional os padrões de qualidade do ar em termos de Partículas Totais em Suspensão (PTS), Fumaça, Partículas Inaláveis (PI ou  $\text{PM}_{10}$ ), Dióxido de Enxofre ( $\text{SO}_2$ ), Monóxido de Carbono ( $\text{CO}$ ), Ozônio ( $\text{O}_3$ ) e Dióxido de Nitrogênio ( $\text{NO}_2$ ), todos indicadores de qualidade do ar consagrados universalmente, em função da sua maior frequência de ocorrência e aos efeitos adversos que causam no homem e no meio ambiente(CONAMA,2001)(FEEMA,1992).

Tabela 3.1- Principais poluentes atmosféricos

<b>Fontes</b>	<b>Poluentes</b>
Combustão	Material Particulado
	Óxidos de enxofre, monóxido de carbono, óxidos de nitrogênio, hidrocarbonetos
Processos Industriais	Material Particulado
	Óxidos de enxofre, gás sulfídrico, mercaptanas, fluoretos, ácido clorídrico, óxidos de nitrogênio, hidrocarbonetos...
Queima de Resíduos Sólidos	Material Particulado
	Óxidos de enxofre, ácido clorídrico, óxidos de nitrogênio, hidrocarbonetos
Veículos Automotores, Motocicletas, Locomotivas, Aviões	Material Particulado
	Monóxido de carbono, óxidos de enxofre, óxidos de nitrogênio, hidrocarbonetos, aldeídos, ácidos orgânicos...
Naturais	Material Particulado
	Dióxido de enxofre, gás sulfídrico, monóxido de carbono, óxidos de nitrogênio, hidrocarbonetos...
Reações Químicas na Atmosfera	Ozônio, aldeídos, ácidos orgânicos, nitratos orgânicos...

Na tabela 3.2 verificamos os padrões nacionais primários e secundários de qualidade do ar fixados na resolução CONAMA nº 3 de 28/06/90. Os valores de concentração máxima não devem ser excedidos mais de uma vez por ano. A mesma resolução estabeleceu os critérios para episódios agudos de poluição do ar descritos na tabela 3.3(CETESB,1994).

Tabela 3.2 - Padrões Nacionais de Qualidade do Ar  
Resolução CONAMA nº 3 de 28/06/90

Poluentes	Padrão Primário		Padrão Secundário		Tempo de Amostragem	
	Unidade	µg/m <sup>3</sup>	Obs.	µg/m <sup>3</sup>	Obs.	Obs.
Partículas totais em suspensão	240		* C	150	C	24 horas
	80		**	60		anual
Dióxido de enxofre	365		* C	100	C	24 horas
	80		***	40		anual
Monóxido de carbono	40.000		* C	40.000	C	1 hora
	(35ppm)			10.000	C	8 horas
	10.000(9ppm)		## C			
Ozônio	160		# C	160	C	1 hora
Fumaça	150		C	100	C	24 horas
	60			40		anual
Partículas inaláveis	150		* C	150	C	24 horas
	50		***	50		anual
Dióxido de nitrogênio	320		#	190		1 hora
	100		***	100		anual

**Observações:**  
# concentração máxima em 1 hora  
## concentração máxima em 8 horas  
\* concentração máxima diária  
\*\* concentração média geométrica anual  
\*\*\* concentração média aritmética anual  
@ Apenas este parâmetro pode ser excedido mais de uma vez ao ano  
C Este parâmetro não deve ser excedido mais do que uma vez por ano

Tabela 3.3 - Critérios para episódios agudos de poluição do ar

Parâmetros	Níveis		
	Atenção	Alerta	Emergência
Dióxido de enxôfre ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) - 24 horas	800	1600	2100
Partículas totais em Suspensão ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) - 24 horas	375	625	875
Monóxido de Carbono (ppm) - 8 horas	15	30	40
Ozônio ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) - 1 hora	200	800	1000
Partículas Inaláveis ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) - 24 horas	250	420	500
Dióxido de Nitrogênio ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) - 1 hora	1130	2260	3000

Além destes, existem outros poluentes atmosféricos classificados como perigosos, em razão de seu elevado potencial toxicológico. A legislação dos Estados Unidos registra mais de 300 substâncias tóxicas que, se lançadas na atmosfera, seus responsáveis devem informar a população as quantidades anualmente emitidas.

Constituem exemplos destes poluentes perigosos: chumbo, benzeno, tolueno, xileno, materiais orgânicos policíclicos, cromo, cádmio, etc. Em geral, estas substâncias não são abundantes na atmosfera onde exista desenvolvimento humano, mas podem estar mais ou menos presentes em áreas próximas de tipologias implantadas de processos produtivos e em consequência da densidade da frota circulante de veículos automotores, em uma determinada região.

As emissões de poluentes atmosféricos pelas fontes estacionárias e móveis de uma área ou região, associadas às características topográficas e meteorológicas, determinam os níveis de qualidade do ar da mesma área ou região o que, em consequência, determina os possíveis efeitos adversos da poluição do ar sobre os receptores, que podem ser o homem, os animais, as plantas e os materiais em geral (Cerqueira, 2001).

## CAPÍTULO IV

### DISPERSÃO ATMOSFÉRICA

#### 4.1 CAMADA LIMITE PLANETÁRIA

A atmosfera é um dos locais utilizados pelas mais variadas fontes industriais para lançar seus poluentes. A natureza também contribui com emissões, por meio das erupções vulcânicas, do spray marinho e dos incêndios florestais. No entanto, é nas cidades e nos aglomerados industriais que o conhecimento das condições meteorológicas desempenham um papel decisivo na adoção de medidas necessárias para diminuir a poluição.

O transporte de poluentes como o  $\text{SO}_2$ , sobre longas distâncias na atmosfera depende fortemente da espessura da camada limite planetária (CLP) e da existência de redemoinhos ou vórtices turbulentos capazes de transportar o poluente ao longo da vertical na atmosfera (Smith e Hunt, 1978).

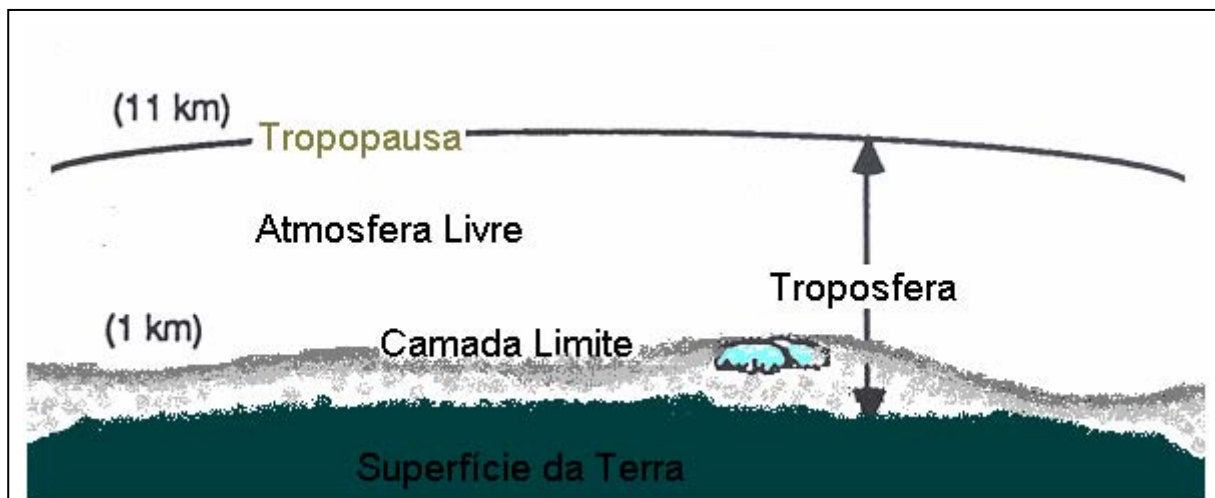


Figura 4.1 - Camada Limite Planetária. Fonte: Stull, 1988.

A **camada limite planetária (CLP)**, mostrada na figura 4.1, é definida como a região da atmosfera que é diretamente afetada pela superfície do solo sofrendo transformações numa escala de tempo inferior a uma hora. Como a camada limite planetária está em contato com a superfície do solo nela se encontram a maior parte das fontes naturais e antropogênicas de gases e material particulado, nela os

poluentes lançados sofrem as primeiras transformações fotoquímicas e são transportados pelo vento e pela turbulência (Alves, 1996).

A estrutura da camada limite planetária pode ser visualizada através da figura 4.2 sendo descrita a seguir.

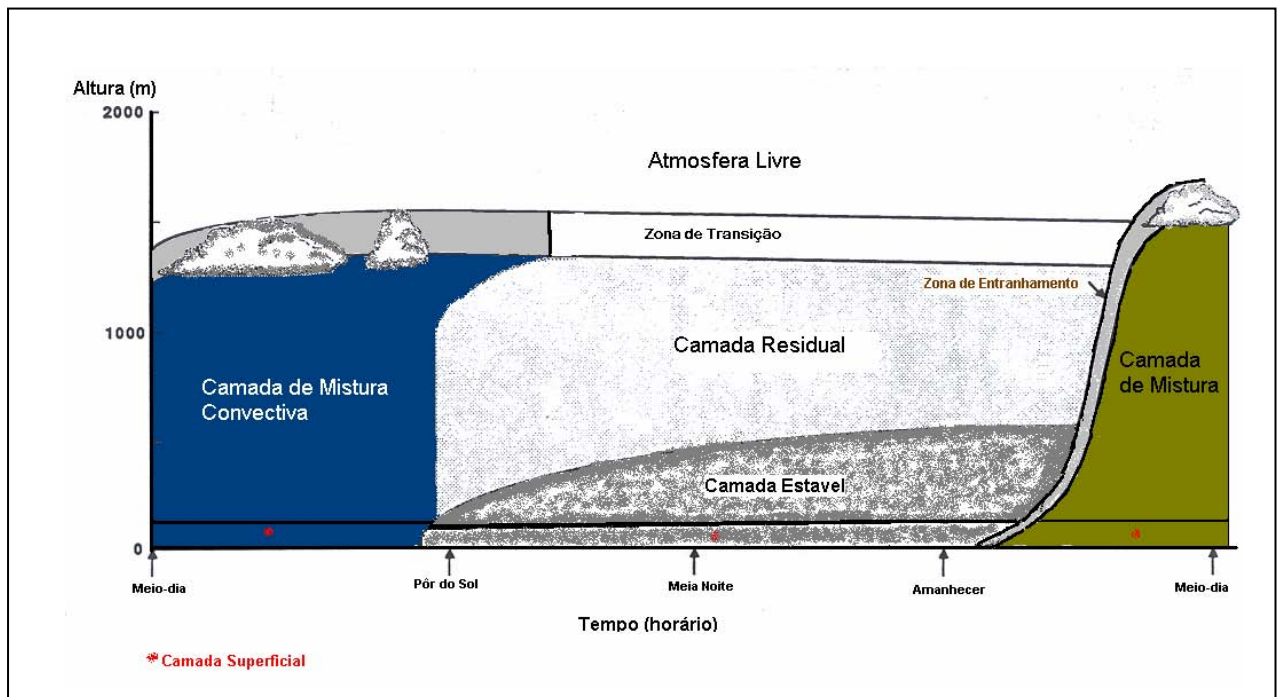
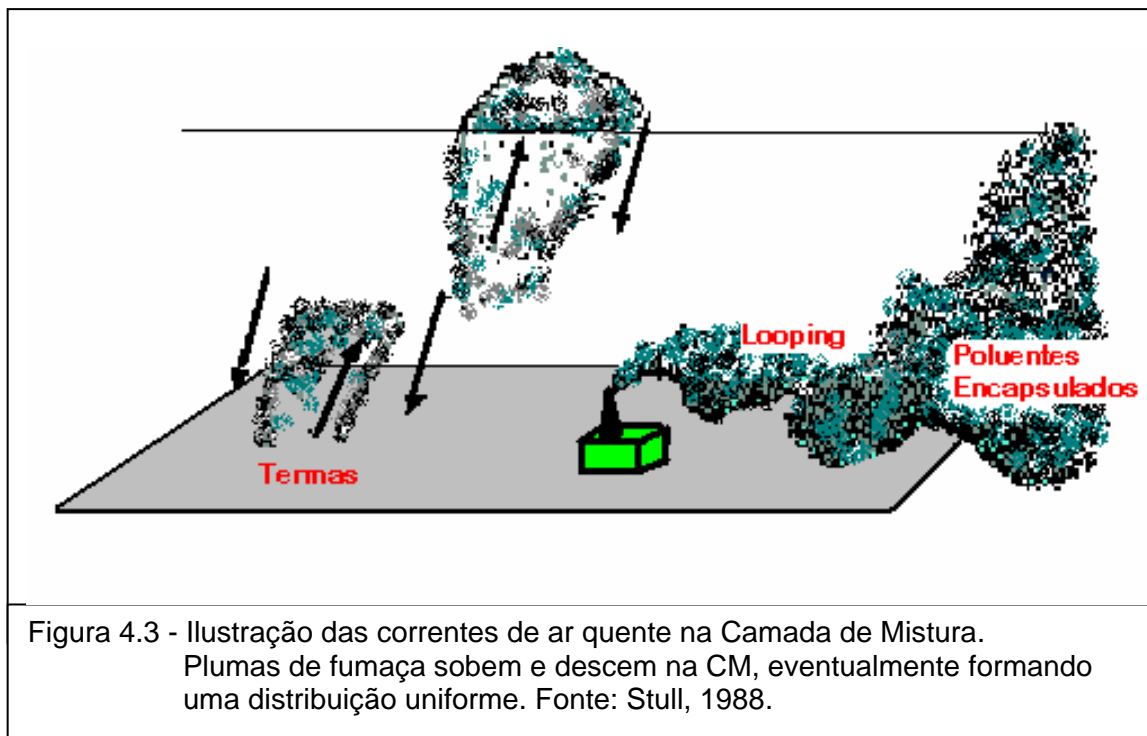


Figura 4.2 - Estrutura da Camada limite. Fonte: adaptada de Stull, 1988.

A **camada limite superficial (CS)** (figura 4.1) é a camada da Terra compreendida entre a superfície e aproximadamente 10% da altura da CLP. Esta camada horizontal é caracterizada pela existência de intensa turbulência devido principalmente a proximidade com a superfície do solo e é caracterizado por intenso gradiente vertical de temperatura, umidade e razão de mistura.

A **camada de mistura (CM) ou camada de mistura convectiva** (figura 4.2) é caracterizada pela não existência de gradientes verticais intensos de temperatura, estes são quase nulos. É uma camada instável, se apresentando no ciclo diurno. A figura 4.3 mostra as correntes de ar ou termas elevando-se do chão numa situação instável, encontradas na camada limite convectiva pois nela se verifica a mistura

turbulenta de origem térmica ou convecção térmica e a de origem mecânica, o cisalhamento vertical do vento.



Aproximadamente meia hora após o nascer do Sol, a camada de mistura começa a se desenvolver em espessura, devido principalmente a radiação solar, atingindo sua máxima espessura no final da tarde.

A camada de mistura limita a dispersão dos poluentes lançados na atmosfera influenciando no comportamento da pluma.

Quando o aquecimento da camada de mistura é muito intenso, a pluma é transportada rapidamente para o solo devido a existência de grandes turbilhões.

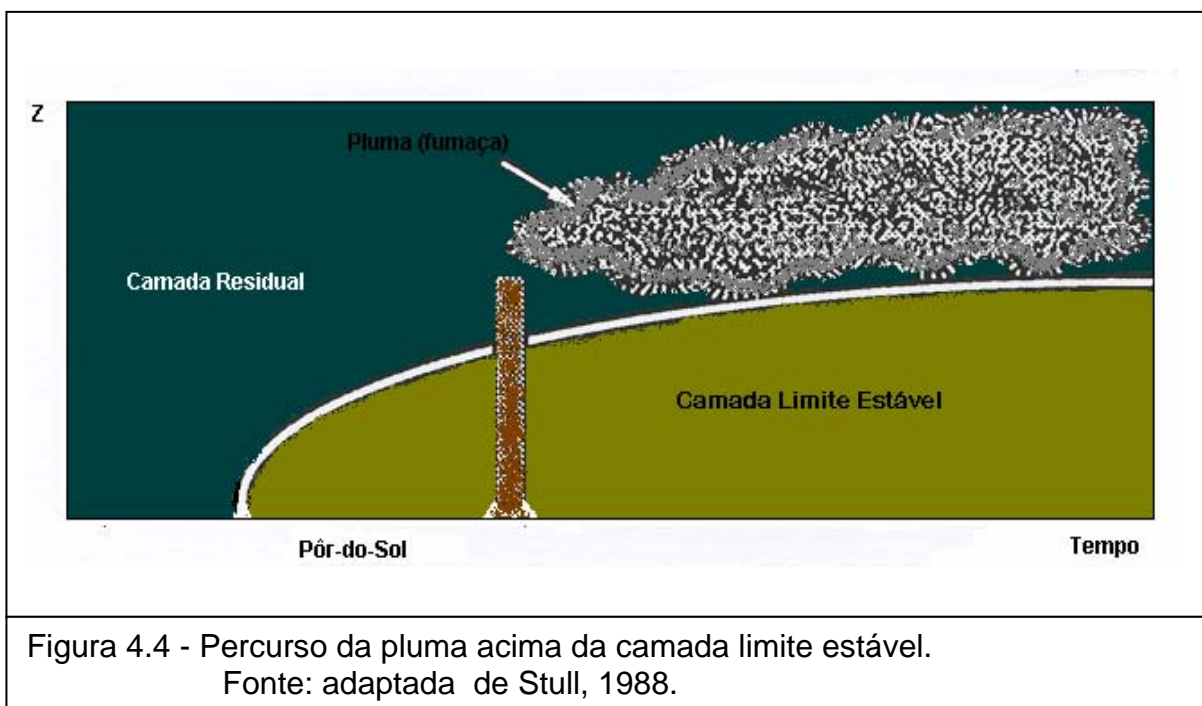
No final do dia é gerada a **camada de mistura residual (CR)** quando a superfície já não é mais aquecida pelo Sol, onde a turbulência de origem térmica perde a sua fonte de energia e dissipa-se.

Meia hora antes do pôr do Sol com a diminuição da turbulência térmica o ar próximo a superfície começa a se resfriar, diminuindo a produção térmica e em compensação aumentando a produção mecânica. A camada de ar resultante é chamada de camada residual porque inicialmente as variáveis meteorológicas e de concentração são as mesmas da camada de mistura recentemente decaída.

A **camada limite estável (CE)** se desenvolve no ciclo noturno. A região em contato com a superfície passa a se resfriar.

Durante a transição da camada limite instável para estável que ocorre próximo ao pôr do sol, os turbilhões tornam-se pequenos próximos a superfície, sendo que o responsável por esta redução dos vórtices turbulentos é o estabelecimento de um gradiente de temperatura vertical estável, que gera uma camada de inversão.

A noite, a atmosfera é marcada pela restrição aos movimentos turbulentos, de origem térmica, que ocorrem devido ao resfriamento radiativo da superfície e conseqüentemente do ar junto a ela, acima observa-se uma camada de transição onde os gradientes são aproximadamente nulos, conforme mostrado na figura 4.4.



No período noturno, com a camada limite planetária no estado estável, a dispersão de contaminantes é uma função direta da altura da chaminé (figura 4.6). Em regiões elevadas da camada limite estável, alturas da ordem de 150 metros ou mais, o poluente sofre uma pequena mistura vertical, ou seja, a expansão vertical da pluma é bastante reduzida. Ela pode percorrer várias dezenas de quilômetros sem sofrer qualquer dispersão vertical apreciável (Alves, 1996).

No caso estável os turbilhões são bastante reduzidos e o campo turbulento em camadas elevadas pode ser bastante homogêneo. Desta maneira no caso



noturno, as chaminés elevadas impedem as regiões vizinhas à fonte de serem atingidas pela poluição. Portanto plumas elevadas podem viajar grandes distâncias e atingir regiões remotas com um nível de concentração bem elevado. Após o nascer do sol a camada de inversão começa a aparecer, esta é lentamente recolocada por uma camada limite neutra ou instável (Alves, 1996).

A figura 4.5 mostra as inversões de camada na camada limite planetária durante o dia e a noite. O eixo x identifica a temperatura potencial( $\theta$ ) e o eixo Z a altura. Durante o dia na Camada Limite Superficial(CLS) em um certo instante t a temperatura potencial ( $\theta$ ) decai com o aumento de altitude, até uma certa altura, no caso 100m então permanece sem alteração ou constante, na Camada de Mistura(CM) até altura de 1000m ou 1Km onde então temos a inversão, a temperatura potencial começa a crescer na Camada de Entranhamento(CE). Durante a noite acontece o contrário na Camada Limite Superficial(CLS) em um certo instante t a temperatura potencial ( $\theta$ ) aumenta com o aumento de altitude, até uma certa altura, neste caso bem pequena, então permanece sem alteração ou constante, na Camada de Mistura(CM) até altura de 100m a 200m onde então temos a inversão, a temperatura potencial começa novamente a crescer na Camada de Entranhamento(CE).

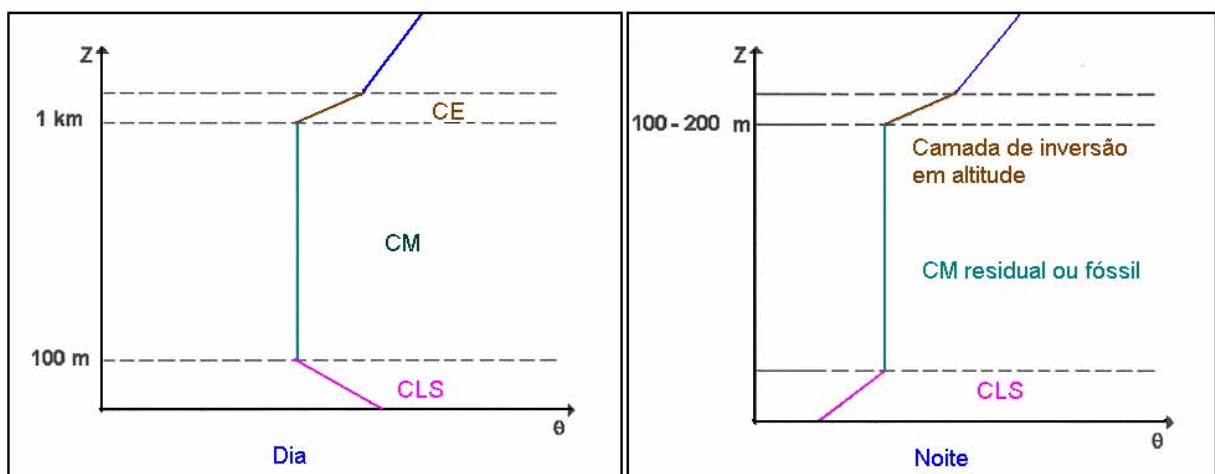


Figura 4.5 - Camada Limite Planetária durante o dia e a noite. Fonte: Alves, 1996.

Observamos na figura 4.6 o percurso de uma pluma considerando duas chaminés de tamanhos diferentes. Nesta figura, F1 e F2 são o tempo de viagem da pluma até sua deposição no nível do solo.

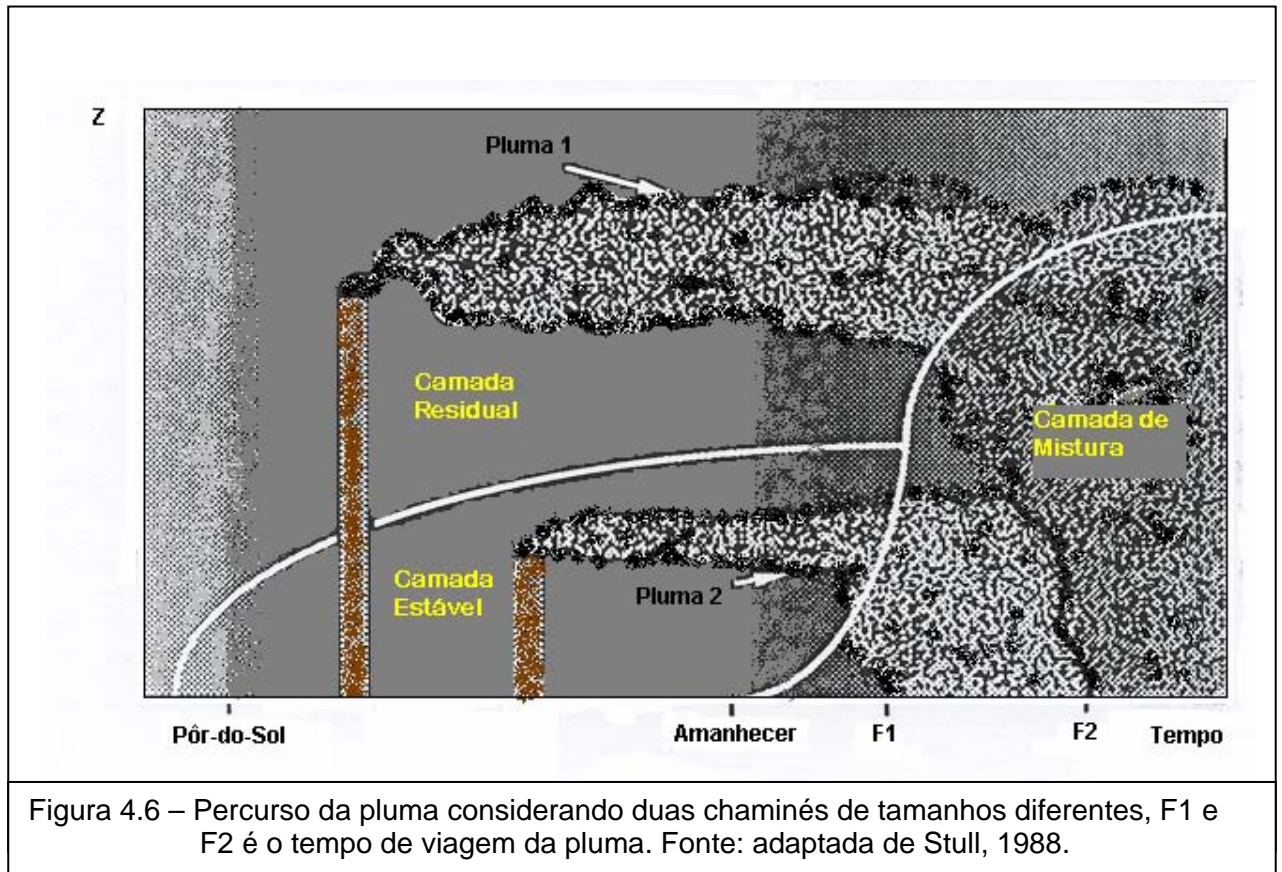


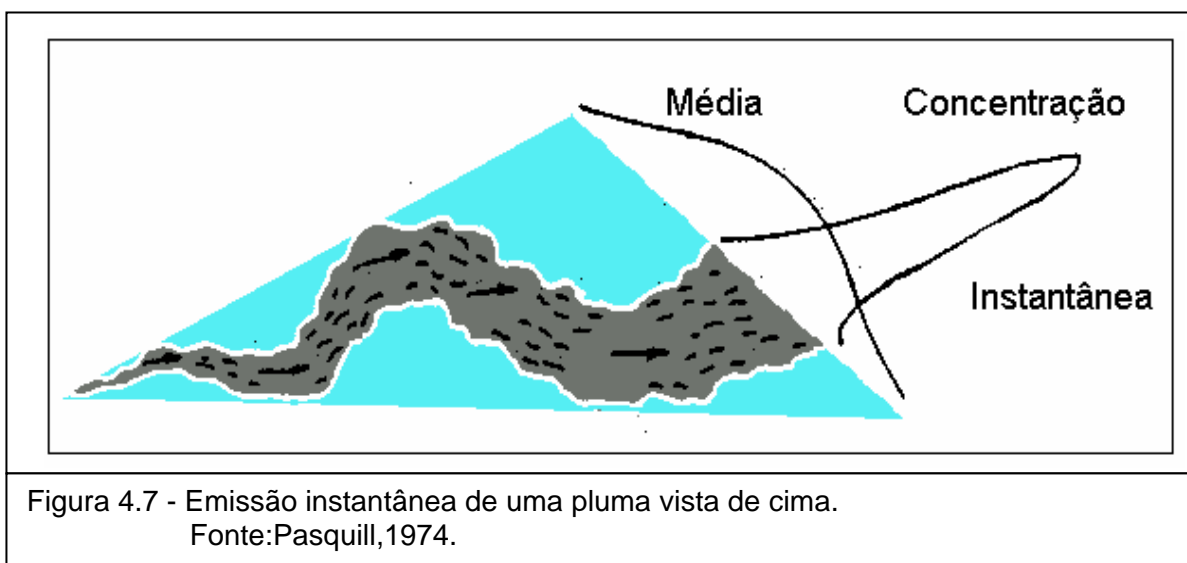
Figura 4.6 – Percurso da pluma considerando duas chaminés de tamanhos diferentes, F1 e F2 é o tempo de viagem da pluma. Fonte: adaptada de Stull, 1988.

A **camada neutra (CN)** é característica de dias cobertos por nuvens e ventos fortes, podendo ser observado durante o período diurno ou noturno. Nesta condição de atmosfera neutra a pluma de poluentes apresenta-se em forma de cone, com um eixo horizontal bem definido. No caso convectivo a fumaça atinge a superfície em distâncias próximas a fonte, enquanto em condições neutras, onde ocorre a igualdade na dimensão dos turbilhões nas três direções espaciais, o poluente percorre uma longa distância até atingir o solo.

## 4.2 COMPORTAMENTO DA PLUMA

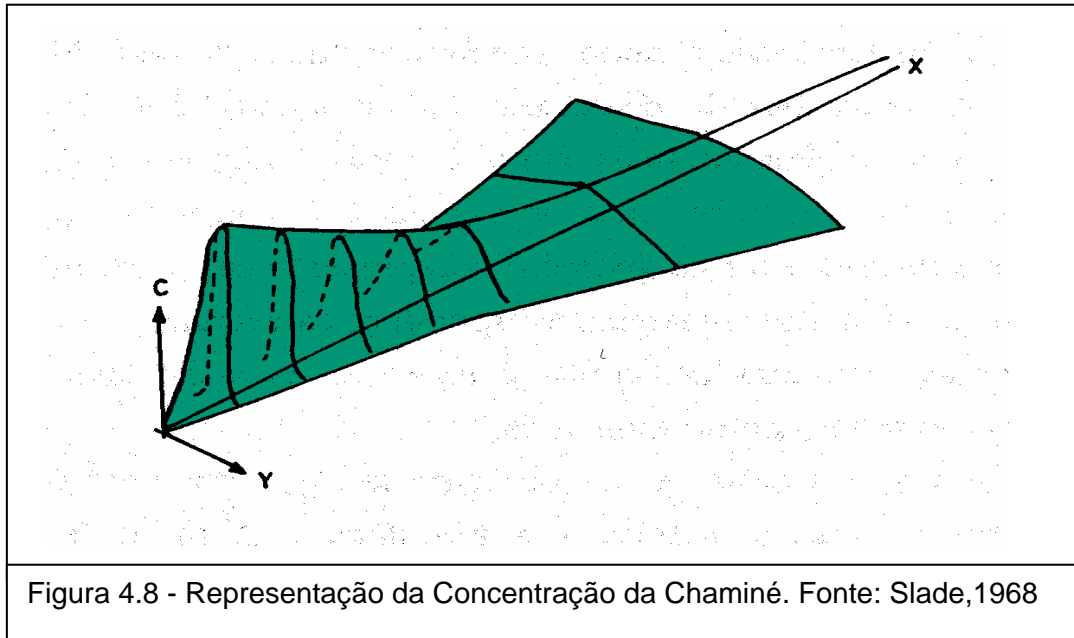
A concentração dos poluentes na atmosfera depende parcialmente da natureza das fontes. As emissões de chaminés são consideradas fontes pontuais contínuas o que permite um tratamento mais simples, pois a dispersão dos poluentes é influenciada somente pelas condições meteorológicas e a configuração do terreno.

A concentração de um poluente lançado por uma fonte pontual contínua varia conforme a distância à fonte e a turbulência atmosférica. A turbulência causa irregularidades na distribuição instantânea da pluma, resultando em flutuações na concentração. Como a fonte continua a emitir, a pluma apresenta então uma forma diferente, expandindo-se lateralmente e verticalmente como pode ser visto na figura 4.7.



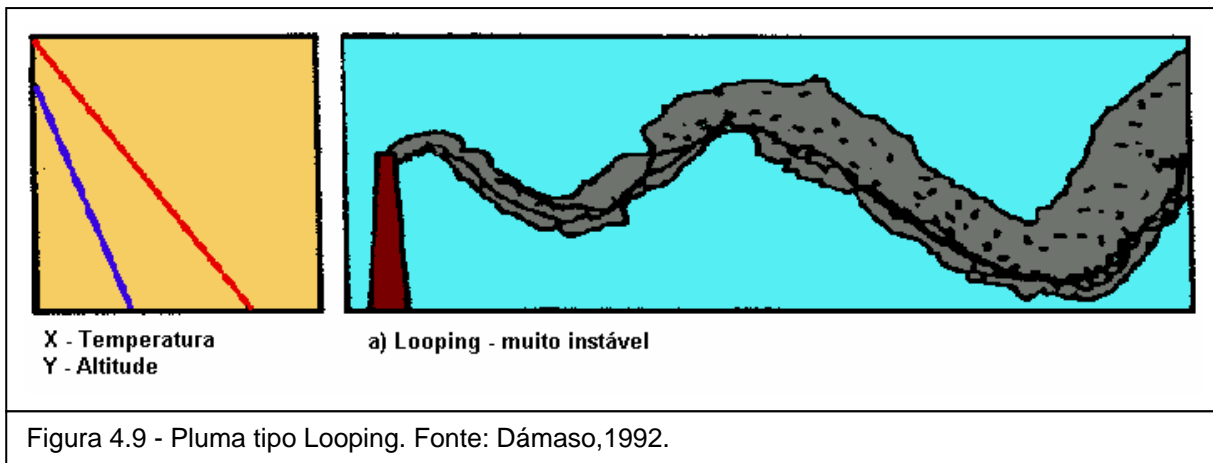
As concentrações observadas na pluma para períodos longos apresentam valores consideravelmente mais baixos do que os observados durante curtos intervalos de tempo. A taxa de diminuição da concentração no eixo central varia com a estabilidade atmosférica, tendendo a ser maior em condições instáveis e menor nas estáveis.

A representação típica da concentração de uma chaminé é mostrada na figura 4.8. A concentração é zero próximo à base da chaminé, para depois crescer rapidamente até atingir um valor máximo a alguma distância da fonte, decrescendo em seguida(Slade,1968).

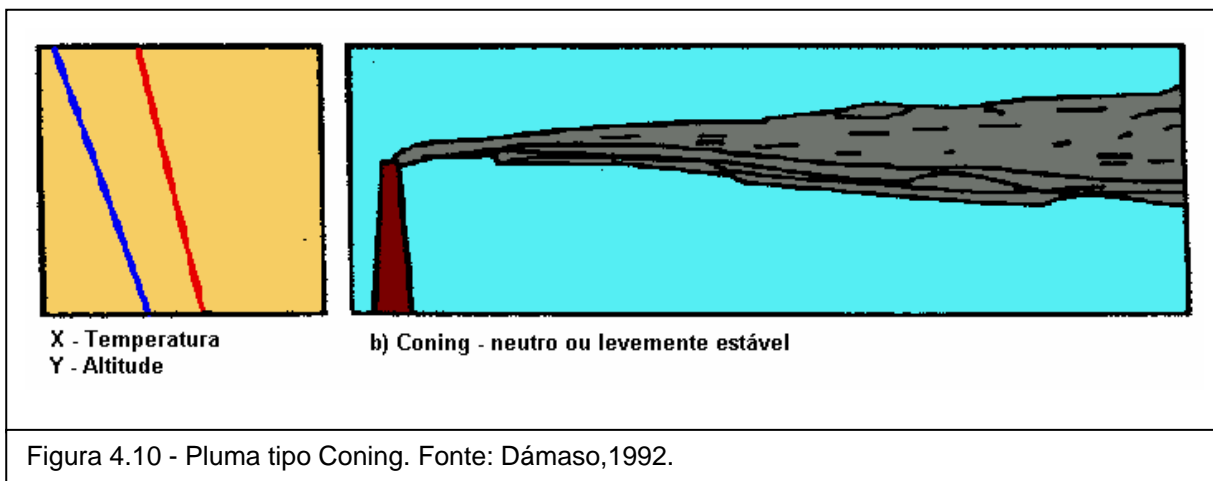


A partir de inúmeros experimentos de difusão realizados sob as mais diversas condições atmosféricas, é possível descrever o comportamento da pluma. As plumas emitidas das chaminés comportam-se de uma maneira variada, dependendo entre outros fatores das condições de operação da fonte, da hora do dia e as condições locais do tempo. A descrição das diversas formas da pluma são apresentadas a seguir, sendo a linha azul nas figuras 4.9 a 4.14, correspondente ao gradiente de temperatura adiabático seco(Dámaso,1992).

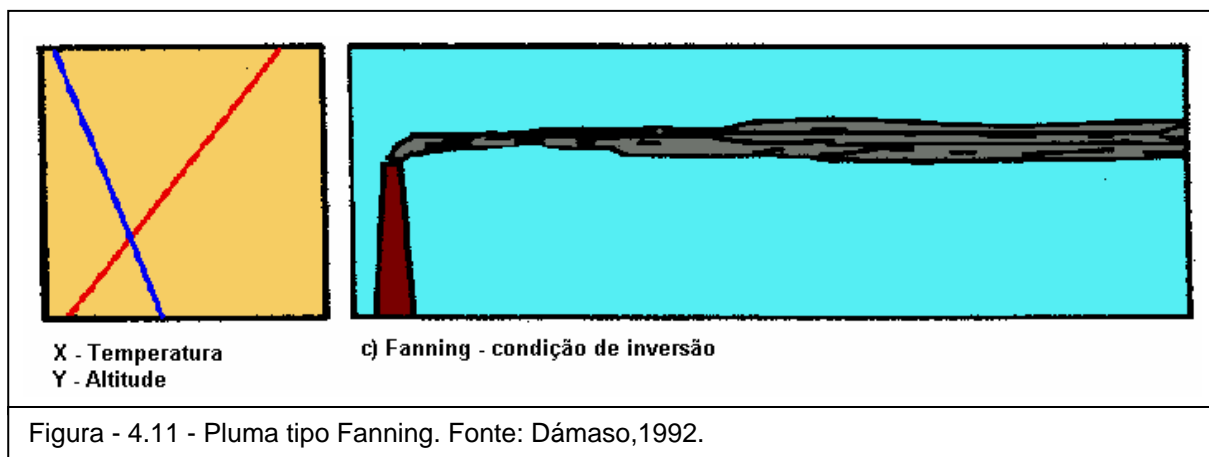
As figuras 4.9 a 4.14 mostram a configuração da pluma e em seguida é feita a descrição da mesma, e são adaptadas de Dámaso(1992).



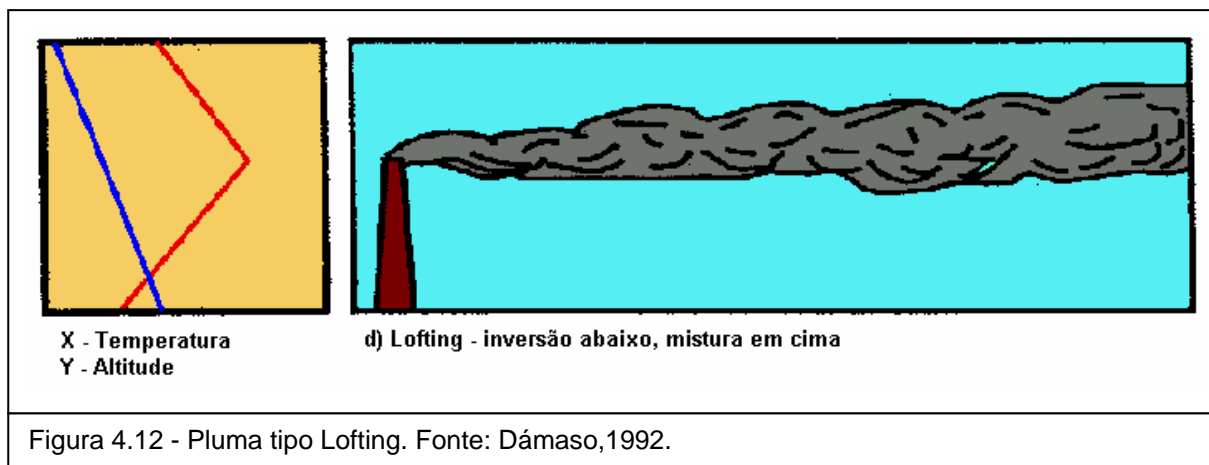
a) Looping - pluma de aparência irregular com movimentos sinuosos, típica de uma atmosfera com céu claro ou parcialmente nublado, sujeita a intenso aquecimento solar. Está associada a ventos fracos e intensa turbulência térmica, ocorrendo com gradiente adiabático ou superadiabático. Tem como característica uma rápida dispersão, podendo produzir esporadicamente altas concentrações ao nível do solo próximo a chaminé.



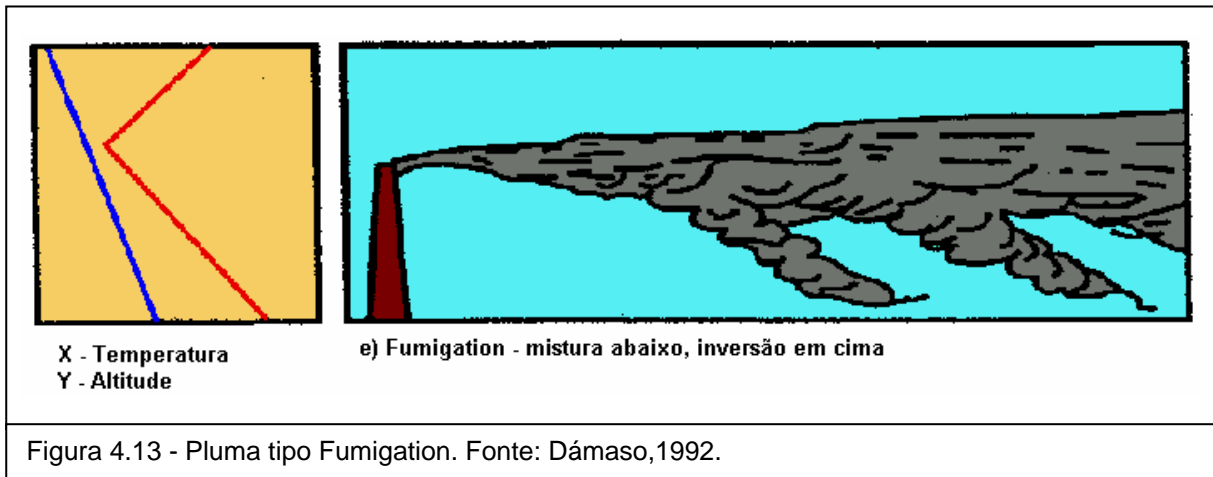
b) Coning - pluma em forma de cone, característica de atmosfera neutra durante o dia ou noite com céu claro, ventos moderados a fortes devido principalmente à turbulência mecânica, apresentando gradiente entre o adiabático e o isotérmico. A dispersão é mais lenta do que no caso de "looping" com grande probabilidade de contato da pluma com o solo a longa distância da chaminé.



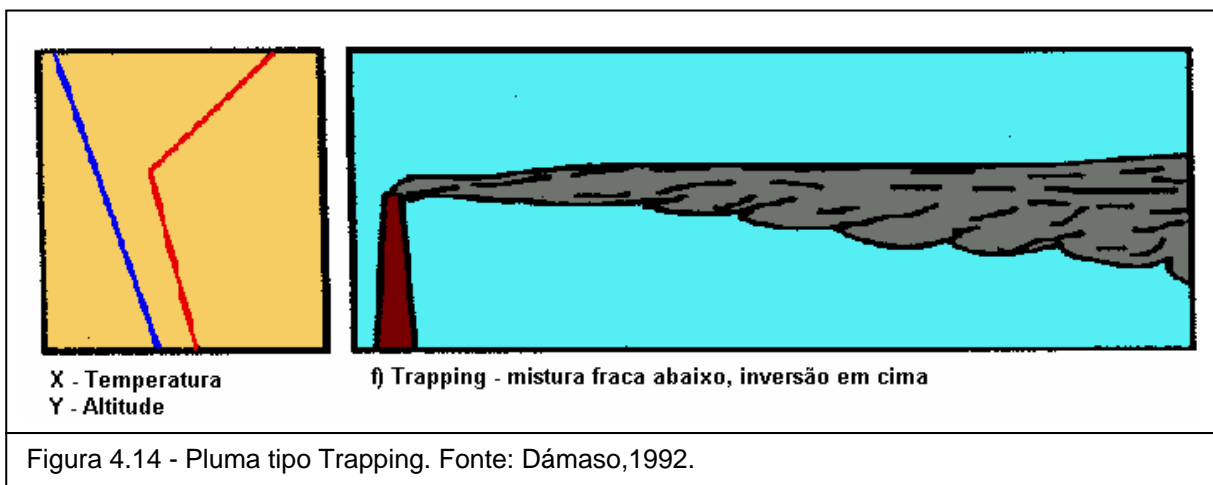
c) Fanning - pluma de aparência estreita apresentando pequena ou nenhuma difusão na vertical. A dispersão é lenta, apresentando valores altos de concentração no interior da pluma; pequena probabilidade de contato com o solo exceto em casos de chaminés baixas ou de terreno irregular. Representa o comportamento em uma atmosfera estável associada a isoterma, podendo ocorrer à noite e nas primeiras horas da manhã associada a uma inversão, favorecida por ventos fracos e céu claro.



d) Lofting - pluma de aparência achatada na parte inferior e com topo difuso. Esta condição ocorre próximo ao pôr do sol devido a mudança do gradiente para a condição de inversão, podendo durar algumas horas ou persistir durante à noite. Acima da chaminé observa-se gradiente adiabático seco, ventos moderados e considerável turbulência; o gradiente inverte na parte inferior, onde ventos fracos e pequena turbulência são observados. Se os poluentes são lançados acima desta inversão, a probabilidade de contato com o solo é pequena.



e) Fumigation - pluma de aparência achatada na parte superior e em forma de "looping" na parte inferior. Esta condição ocorre nas primeiras horas da manhã com ventos fracos à moderados, devido a dissipação da camada de inversão formada durante a noite, causando alta concentração dos poluentes ao nível do solo.



f) Trapping - pluma em forma de cone com topo bem definido, característica de uma condição de inversão frontal ou de subsidência, com ventos fracos à moderados acima e fracos abaixo, associados à turbulência moderada na camada inferior.

### 4.3 DISPERSÃO DE POLUENTES

As emissões de poluentes podem ser divididas em dois tipos básicos, tais como liberações descontínuas de poluentes que são geralmente chamadas de "puff", e liberações contínuas conhecidas como "plumas". As plumas são geralmente tratadas como uma sequência de puffs separados por um intervalo de tempo muito pequeno. A mistura de um puff ou pluma de contaminantes com a atmosfera, é tipicamente conhecida como dispersão. A dispersão de poluentes é função basicamente da velocidade do vento, estabilidade atmosférica, e temperatura do ar (Elsevier Science Inc., 1995).

Os poluentes lançados para a atmosfera por fontes naturais ou antropogênicas sofrem a influência de dois componentes do movimento atmosférico: o vento médio que transporta os poluentes de um ponto ao outro e os movimentos turbulentos que dispersam os poluentes da posição média, no sentido horizontal e vertical. Estes movimentos básicos do vento são afetados pela rugosidade da superfície e pelos gradientes de temperatura (Stern, 1984).

Turbulência é o movimento irregular do vento, caracterizado pela oscilação da velocidade e controlado por redemoinhos verticais e horizontais. Basicamente, redemoinhos são giros irregulares superpostos na direção predominante do vento. Dois tipos gerais de redemoinhos são importantes para dispersão:

A Turbulência Mecânica acontece quando redemoinhos se movimentam com a passagem do vento sobre superfícies rugosas na terra.

A diluição de um contaminante aerotransportado é uma função direta da velocidade do vento. Simplesmente, uma pluma contínua irá diluir três vezes mais rápido em um vento de 6m/s do que em um vento a 2m/s.

A Turbulência Térmica é causada quando parcelas de ar elevam-se de uma superfície aquecida e encontram a atmosfera, que está se movendo mais lentamente que as demais parcelas. Este efeito é também conhecido com "turbulência de convecção".

A turbulência térmica é o resultado das correntes de convecção geradas pelo aquecimento à superfície, devido a radiação solar ou a passagem de uma massa de ar fria sobre uma superfície relativamente mais quente, conforme figura 4.15. Como a radiação solar que alcança a superfície varia com a época do ano, hora do dia,



altitude, topografia e condições do tempo, este movimento vertical é extremamente variável.

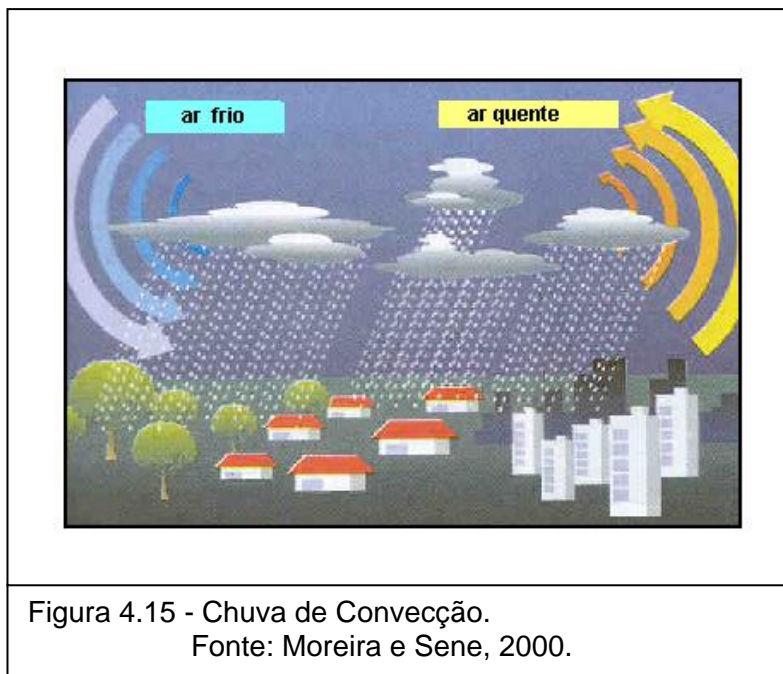


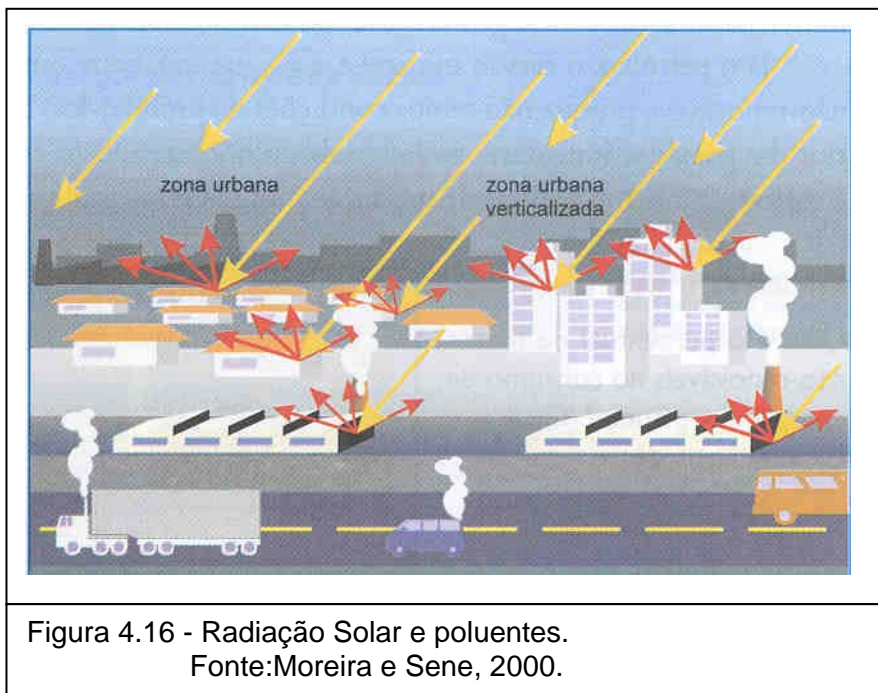
Figura 4.15 - Chuva de Convecção.  
Fonte: Moreira e Sene, 2000.

Ao lado da turbulência, a estabilidade atmosférica está relacionada com a elevação do terreno e o perfil da temperatura vertical que depende em sua maior quantidade da energia irradiada (radiação solar, figura 4.16) da superfície terrestre. Desta forma, qualquer medida da estabilidade deve ser realizada considerando-se a radiação solar e a velocidade do vento na superfície.

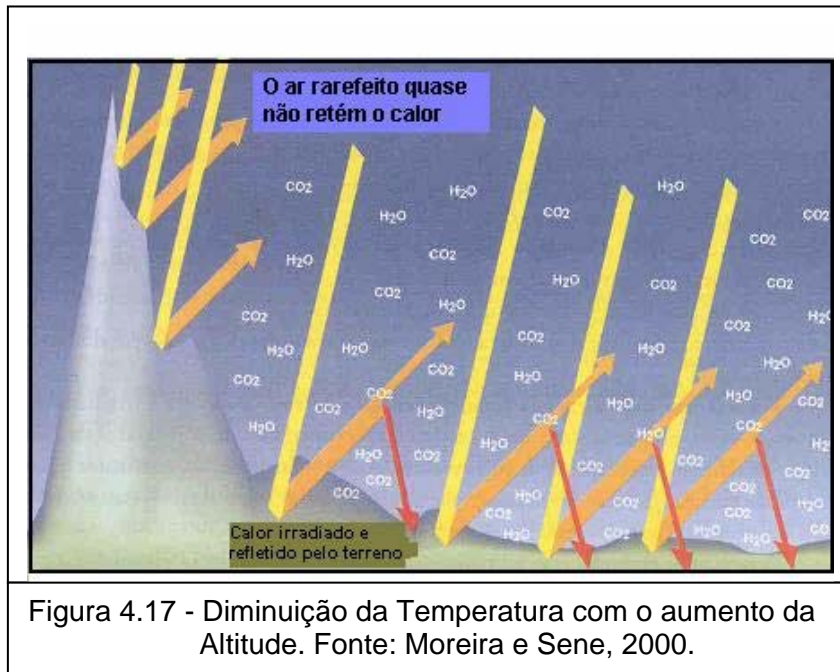
Em qualquer local, a distribuição vertical de temperatura em função da altura apresenta a cada dia variações em relação às condições médias. A partir do conhecimento desta distribuição é possível determinar o gradiente vertical da temperatura, isto é, a taxa de diminuição da temperatura com a altura.

Junto com a altitude, a rugosidade do terreno tem um efeito significativo nos perfis da velocidade do vento nos primeiros 500m da atmosfera. Os efeitos de turbulência e atrito de uma superfície rugosa reduzem a inclinação da velocidade do vento vertical. Assim, em geral, a velocidade do vento não aumenta de intensidade em relação à altitude sobre uma área urbana quando comparada ao que acontece sobre uma área rural. As características da diluição sobre áreas rurais e urbanas frequentemente diferem significativamente.

Nas avenidas e em torno dos edifícios de uma cidade o vento apresenta características diferentes daquelas encontradas nas zonas rurais devido a superfície irregular e desigual. A rugosidade da superfície urbana gera turbulência mecânica, resultado do movimento forçado do ar ao desviar-se de um obstáculo. A separação do fluxo entre edifícios gera concentrações mais altas de poluentes ao redor deles(figura 4.16), devido ao efeito denominado "downwash" que não permitem a elevação da pluma.



A relação entre processos térmicos e mecânicos com o ar é, em geral, o processo mais importante de dispersão relacionado com aerotransporte de contaminantes. De qualquer forma, a eficiência dessa relação dispersiva depende se o tamanho do redemoinho for parecido com o "puff" daquele poluente. Por exemplo, um "puff" encontrado em um redemoinho turbulento tendo dimensões parecidas vai distorcer e dispersar muito mais rápido que um encontrado em um redemoinho muito maior ou muito menor.



A figura 4.17 mostra a diminuição da temperatura com o aumento da altitude, porque o ar rarefeito das altitudes elevadas não consegue reter o calor irradiado e devolvido pelo solo. Algumas moléculas que compõem a atmosfera, como as de gás carbônico e de água, são as maiores responsáveis pela retenção do calor.

#### 4.4 ESTABILIDADE ATMOSFÉRICA

A estabilidade atmosférica é classificada da seguinte maneira:

*Estabilidade Atmosférica Neutra* - Quando não existe troca de calor no ambiente, isto é, o movimento vertical é nulo, não existindo forçantes em qualquer direção.

*Estabilidade Atmosférica Instável* - Quando a temperatura vertical diminui mais rapidamente com o aumento da altitude, então a atmosfera é dita estar instável. O movimento vertical é acentuado sob essas condições. Em relação a dispersão, essas condições são as mais favoráveis porque o grau de mistura vertical é maior em uma atmosfera instável.

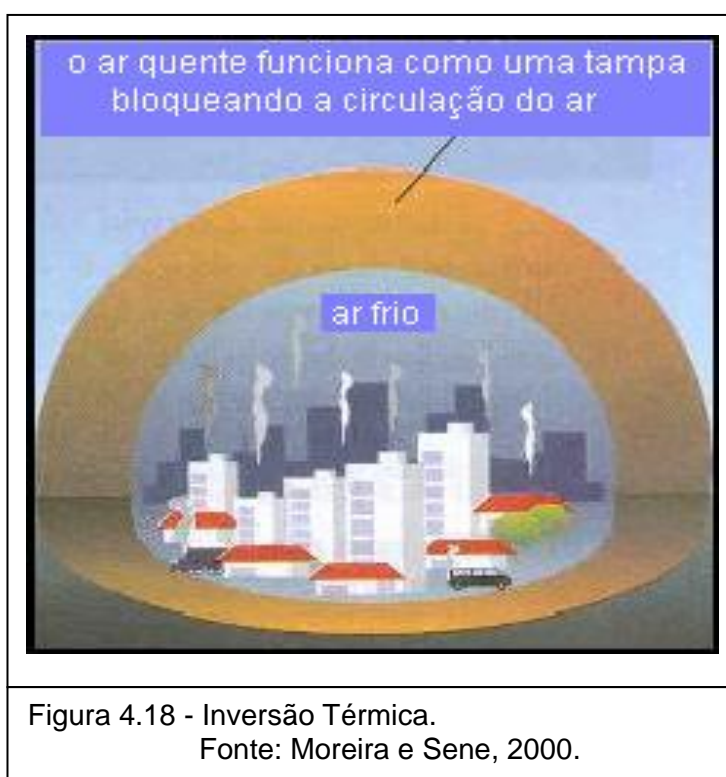
*Estabilidade Atmosférica Estável* - Condição onde a temperatura não diminui rapidamente com o aumento da altitude. O movimento vertical é parcialmente limitado sob essas condições. Em um caso extremo de estabilidade atmosférica, a

inversão de temperatura impede movimento vertical, resultando em uma inversão próxima a superfície. Esta condição é considerada desfavorável para dispersão.

#### 4.5 INVERSÃO TÉRMICA

A inversão térmica existe quando uma camada morna de ar cobre uma camada mais fria como mostra a figura 4.18. Inversões podem se formar ao nível do solo ou na atmosfera superior. Porque uma camada de inversão limita a mistura vertical de contaminantes, sua elevação é freqüentemente chamada "teto" ou altura da mistura.

A inversão térmica depende da estabilidade atmosférica na camada onde ela é observada. Se a inversão é encontrada muito próxima à superfície, a altura da camada de mistura será pequena e os poluentes ficarão confinados a uma região próxima do solo. Essa situação associada a ventos fracos pode causar episódios críticos de poluição atmosférica.



## CAPÍTULO V

### MODELOS DE DISPERSÃO ATMOSFÉRICA

#### 5.1 MODELOS DE DISPERSÃO

Modelo de dispersão é a descrição matemática dos processos de difusão turbulenta e transporte que ocorrem na atmosfera. A relação entre a emissão do poluente e a concentração medida em um ponto receptor específico é uma função das condições meteorológicas e da relação espacial entre a fonte e o receptor. Deste modo, os dados de entrada necessários para os modelos incluem os parâmetros meteorológicos, de fonte e de receptor (Hanna et al., 1982).

A utilização de uma determinada classe de modelo depende da complexidade do problema. Os modelos gaussianos são empregados na estimativa do impacto de poluentes não reativos, os numéricos para os poluentes reativos, como no caso da fonte ser uma área urbana. Quando o entendimento físico e químico do processo é incompleto, o modelo estatístico é o mais apropriado. Em situações complexas e para uma área limitada o modelo físico é o recomendado (Kerr, 1983).

Os dados de entrada necessários para a utilização dos modelos de dispersão incluem dados meteorológicos e outros dados importantes que afetam a dispersão (Damaso, 1992). A seguir é relacionada uma breve descrição de alguns parâmetros utilizados para inicializar os modelos de dispersão:

a) A temperatura e a velocidade de saída dos gases. Nas chaminés menores a força ascendente é relativamente baixa e a temperatura de exaustão pode não superar a do ar ambiente. Em consequência, o maior efeito dessas fontes é sentido ao lado das mesmas. As emissões que provêm de instalações industriais com fontes de alturas mais elevadas, possuem temperaturas mais altas e são portanto induzidas a ascender mais rapidamente, com efeito sendo sentido a distâncias maiores.

b) A altura das chaminés: o uso de chaminés elevadas contribui para uma dispersão dos poluentes sobre áreas mais intensas. Com aplicação de modelos matemáticos é necessário que se tenha um bom conhecimento das relações entre a

intensidade da fonte, altura da chaminé e as concentrações dos contaminantes ao nível do solo. As chaminés de alturas mais elevadas são muito usadas em plantas de geração de energia.

c) A topografia: suas características são importantes devido ao efeito que podem causar sobre a dispersão dos poluentes, principalmente em fontes pontuais(chaminés).

Em geral, os pontos receptores discretos correspondem a localização dos pontos de monitoramento da qualidade do ar.

## **5.2 MODELO DE PLUMA GAUSSIANA**

Este modelo considera que a dispersão de uma pluma lançada ao ar pontualmente se dá de modo tal que a concentração dos componentes da pluma em função da posição relativa a fonte tem comportamento Gaussiano. Isto pode ser visto empiricamente observando-se emissões de plumas por chaminés sob condições atmosféricas favoráveis – ainda que a fumaça sofra um meandramento, como é comum acontecer, uma fotografia de exposição prolongada, por exemplo, revelará seu comportamento Gaussiano ao longo do tempo(Kerr, 1983).

O método Gaussiano pode ser aplicado em situações onde as velocidades do vento (horizontal ou vertical) apresentam uma distribuição Gaussiana ou Normal em um intervalo de tempo selecionado, geralmente uma hora.

O modelo de dispersão utilizado neste trabalho é o ISCST3 - "Industrial Source Complex-Short Term", desenvolvido pela EPA("U.S. Environmental Protection Agency"). É um modelo tipo pluma gaussiana que pode ser utilizado para calcular a concentração e/ou deposição de poluentes. O ISCST3 permite uma variedade de simulações (Tutorial do ISCST3).

Algumas de suas opções são:

- Permite a inclusão de fontes do tipo ponto, área, volume.
- Os fatores de emissão das fontes podem ser tratados como constantes ou variando por hora, mês, estação do ano ou um outro período de variação. Pode também ser específico para cada fonte simples ou para um grupo de fontes.

- Utiliza dados meteorológicos obtidos em tempo real para calcular as condições que afetam a distribuição de poluentes na atmosfera.
- A localização dos pontos receptores pode ser especificada por grades e/ou receptores discretos em um sistema de coordenadas cartesianas ou polares.
- Efeitos aerodinâmicos devidos à presença de edifícios próximos às fontes podem ser considerados.
- Contém algoritmos para a modelagem de deposição de partículas grandes e de gases e partículas por deposição úmida e seca.
- Há incorporação de um algoritmo para terrenos complexos, o COMPLEX1.

### 5.3 MODELO MATEMÁTICO DE PLUMA GAUSSIANA - EQUAÇÃO DE DIFUSÃO-ADVECÇÃO

A equação diferencial que tem sido ponto de partida na maioria dos tratamentos matemáticos de difusão de poluentes é uma generalização da clássica equação de condução de calor em um sólido e é, essencialmente, uma afirmação da conservação de material suspenso. Chamando a concentração local de  $c$  (unidades de massa por unidades de volume do fluido) e assumido o fluido incompressível, a equação da continuidade pode ser escrita como (Seinfeld, 1986):

$$\frac{dc}{dt} = 0$$

$$\frac{\partial c}{\partial t} = - \left( \frac{\partial}{\partial x}(uc) + \frac{\partial}{\partial y}(vc) + \frac{\partial}{\partial z}(wc) \right)$$

Equação 5.1

Onde:

c - é o valor da concentração do poluentes  
 u - é a velocidade horizontal do vento  
 v - é a velocidade meridional do vento  
 w - é a velocidade vertical do vento  
 t - tempo  
 x,y e z - coordenadas de posição

Supondo que as variáveis podem ser decompostas em uma parte média e outra parte fluante, isto é:

$$\begin{aligned} u &= \bar{u} + u' \\ v &= \bar{v} + v' \\ w &= \bar{w} + w' \\ c &= \bar{c} + c' \end{aligned}$$

A equação 5.1 , após aplicação da média de Reynolds torna-se:

$$\frac{\partial \bar{c}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{c}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{c}}{\partial y} + \bar{w} \frac{\partial \bar{c}}{\partial z} = - \left[ \frac{\partial}{\partial x} (\overline{u'c'}) + \frac{\partial}{\partial y} (\overline{v'c'}) + \frac{\partial}{\partial z} (\overline{w'c'}) \right] \quad \text{Equação 5.2}$$

Os fluxos turbulentos podem ser parametrizados através de um fechamento de 1ª ordem , como segue:

$$\overline{u'c'} = -K_{xx} \frac{\partial \bar{c}}{\partial x}$$

$$\overline{v'c'} = -K_{yy} \frac{\partial \bar{c}}{\partial y}$$

$$\overline{w'c'} = -K_{zz} \frac{\partial \bar{c}}{\partial z}$$

Agora, substituindo os fluxos turbulentos parametrizados na equação 5.2 temos:

$$\frac{d\bar{c}}{dt} = - \frac{\partial}{\partial x} \left( K_{xx} \frac{\partial \bar{c}}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left( K_{yy} \frac{\partial \bar{c}}{\partial y} \right) - \frac{\partial}{\partial z} \left( K_{zz} \frac{\partial \bar{c}}{\partial z} \right) \quad \text{Equação 5.3}$$



Onde  $K_{xx}$ ,  $K_{yy}$  e  $K_{zz}$  são os coeficientes de difusão nas direções x,y e z.

A equação 5.3 permite considerar diferentes difusividades nas distintas direções, isto é, o processo de difusão não é necessariamente isotrópico. Ela também permite considerar as variações espaciais destas difusividades.

### 5.3.1 O MODELO DE PLUMA GAUSSIANA ISCST3

O modelo de pluma gaussiana considera  $K_{xx} = K_{yy} = K_{zz}$  e independentes de x,y e z. A difusão turbulenta segue a lei de Fick, sendo que esta define uma relação entre a concentração e o fluxo. Em uma dimensão a lei de Fick da difusão turbulenta é dada pela seguinte forma:

$$\boxed{\frac{d\bar{c}}{dt} = -K \frac{\partial^2 \bar{c}}{\partial X^2}} \quad \text{Equação 5.4}$$

A equação da difusão, considerando um caso de transporte pode ser escrita como:

$$\boxed{\frac{\partial \bar{c}}{\partial t} + u \frac{\partial \bar{c}}{\partial x} = -K \frac{\partial^2 \bar{c}}{\partial x^2}} \quad \text{Equação 5.5}$$

Onde o 1º termo representa a variação temporal em uma determinada posição fixa no espaço, e o 2º representa  $c$  advectado com uma velocidade  $u$ .

Para resolvermos esta equação é necessário especificar algumas condições de contorno. Considerando uma fonte pontual de poluente, as condições são as seguintes:

- A concentração vai a zero em todos os pontos, quando o tempo depois do abandono do poluente aproxima-se do infinito,  $c \rightarrow 0$  quando  $t \rightarrow \infty$ ,  $(-\infty < x < +\infty)$ ;

- $c \rightarrow 0$  quando  $t \rightarrow \infty$  (exceto quando  $x = 0$ ), sendo  $x = 0$  a posição da fonte;
- $\int_{-\infty}^{+\infty} \bar{c} dx = Q$ , onde  $Q$  é a intensidade da fonte, que é a emissão total de  $\bar{c}$  da fonte localizada em  $x = 0$ .

A solução para a equação 5.4, considerando uma fonte pontual instantânea  $Q$  é:

$$\bar{c} = \frac{Q}{(4kt)^{1/2}} \exp\left(-\frac{x^2}{4kt}\right) \quad \text{Equação 5.6}$$

Esta equação aplica-se a uma atmosfera na qual  $\bar{u}$  é constante,  $v = w = 0$  e para o caso em que as coordenadas movem-se com o vento médio  $u$ .

A equação pode ser estendida para três dimensões, fornecendo:

$$\bar{c} = \frac{Q}{(4kt)^{3/2}} \exp\left(-\frac{r^2}{4kt}\right) \quad \text{Equação 5.7}$$

Onde  $K = K_{xx} = K_{yy} = K_{zz}$ , e  $r^2 = x^2 + y^2 + z^2$ , generalizando para o caso não isotrópico, isto é,  $K_{xx} \neq K_{yy} \neq K_{zz}$ , obtemos:

$$\bar{c}(x, y, z, t) = \frac{Q}{(4\pi t)^{3/2} (K_{xx} K_{yy} K_{zz})^{1/2}} \exp\left[-\frac{1}{4t} \left( \left(\frac{x^2}{K_{xx}}\right) + \left(\frac{y^2}{K_{yy}}\right) + \left(\frac{z^2}{K_{zz}}\right) \right)\right]$$

Equação 5.8

A solução acima da equação Difusão Advecção é a utilizada pelo modelo do tipo pluma gaussiana.

Sendo  $\sigma$  o coeficiente de difusão turbulenta, substituímos a expressão abaixo na equação 5.7 , obtendo uma solução fundamental para a equação da Difusão Advecção:

$$Q = \mathcal{K}!$$

De maneira rigorosa o modelo gaussiano aplica-se apenas no limite de grandes tempos de difusão e para condições estacionárias e homogêneas. Casos em que o problema de difusão pode ser colocado na forma simples de uma equação de difusão Fikiana.

Normalmente considera-se que a fonte está em uma origem fixa e  $t$  é o tempo de viagem da pluma. Se  $\sigma^2$  é a variância da distribuição da pluma dispersando-se e ainda considerando-se que a distribuição é isotrópica,  $\sigma = \sigma_x = \sigma_y = \sigma_z$ , a fórmula gaussiana para uma fonte pontual instantânea torna-se:

$$c_{(x,y,z)} = \frac{Q}{(2\pi\sigma^2)^{3/2}} \exp\left[-\frac{r^2}{2\sigma^2}\right]$$

onde:  $r^2 = (x - \bar{ut})^2 + y^2 + z^2$

$c$  – é o valor da concentração ( $g/m^3$ )

$Q$  – representa a taxa de emissão de poluentes ( $g/s$ ).

Sabendo que na atmosfera a difusão é não isotrópica,  $\sigma_x \neq \sigma_y \neq \sigma_z$  a solução gaussiana fica então:

$$c_{(x,y,z,t)} = \frac{Q}{(2\pi)^{3/2} \sigma_x \sigma_y \sigma_z} \exp\left[-\left(\frac{(x - \bar{ut})^2}{2\sigma_x^2} + \frac{y^2}{2\sigma_y^2} + \frac{z^2}{2\sigma_z^2}\right)\right] \quad \text{Equação 5.9}$$

onde  $\bar{u}$  é a velocidade média em  $m/s$  do poluente na direção  $x$  ;

Para uma chaminé que emite o poluente continuamente, a pluma contínua pode ser aproximada como uma superposição de uma grande número de "puffs", isto é, a pluma é vista como resultado da adição de um número infinito de "puffs" médios superpostos, carregados ao longo de um eixo  $x$ , pelo vento médio  $\bar{u}$ . Sabendo-se ainda que na prática a difusão ao longo do eixo  $x$  é negligenciada, pois consideramos a homogeneidade horizontal, e o transporte é feito apenas pelo vento médio  $\bar{u}$ , a equação anterior fica então:

$$c = \frac{Q}{2\pi\sigma_y\sigma_z\bar{u}} \exp\left[-\left(\frac{y^2}{2\sigma_y^2} + \frac{z^2}{2\sigma_z^2}\right)\right] \quad \text{Equação 5.10}$$

onde  $Q$  é dado em  $g/s$ ,  $\sigma_y$  e  $\sigma_z$  são funções de  $x$  como podemos observar na figura 5.1,  $z$  é igual a altura da fonte acima do solo menos a altura efetiva da chaminé, ou seja,  $z = h - H$  ; sendo  $h$  a altura da chaminé e  $H$  a altura efetiva da chaminé.

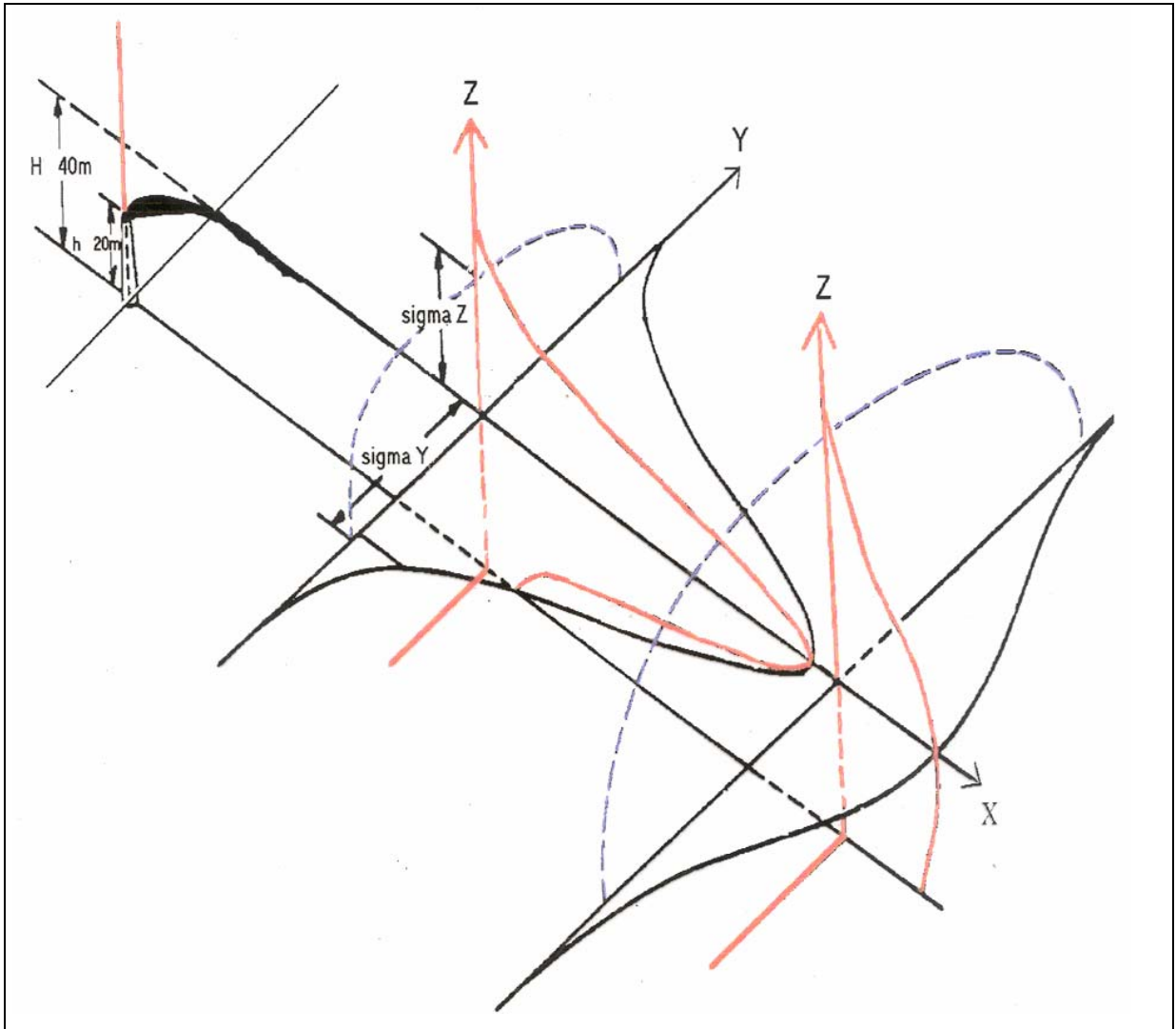


Figura 5.1 - Uma pluma gaussiana com duas seções transversais, sendo a massa total sob as curvas conservada, e onde a altura da chaminé  $h = 20\text{m}$  e a altura efetiva  $H = 40\text{m}$ . Fonte:Alves,1996.

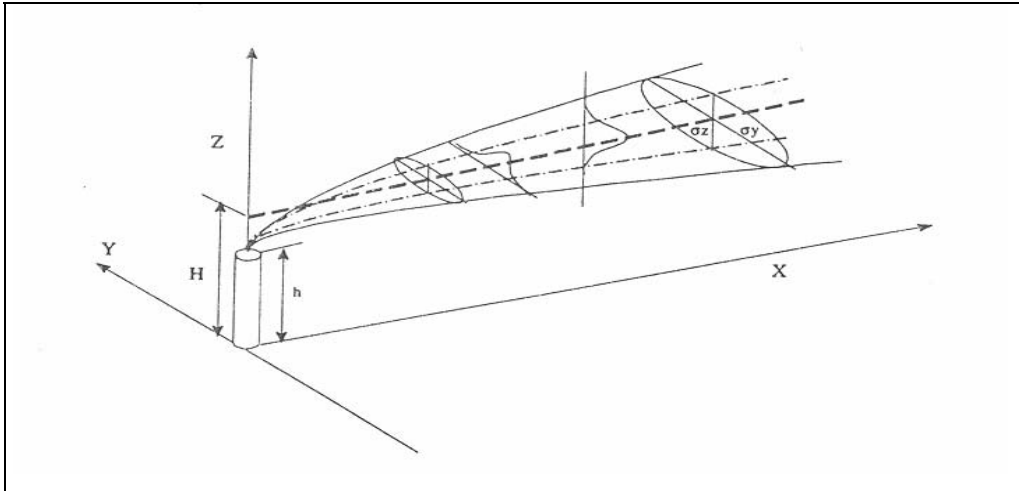


Figura 5.2 - Sistema de coordenadas mostrando a distribuição Gaussiana na direção horizontal e vertical.  
Fonte: Turner, 1994.

O modelo trata a reflexão da pluma no solo e no topo da camada de mistura através do método fonte-imagem. Esta reflexão pode também ser observada quando a altura efetiva da chaminé  $H$  excede a altura da camada de mistura  $H_m$ . Assume-se que a pluma permanece elevada e a concentração ao nível do solo é quase zero. A fim de considerar o efeito de reflexão da pluma junto ao solo, o modelo considera uma chaminé localizada em  $-H$ . Podemos observar esse tratamento através da figura 5.3. Desta forma a equação resultante é:

$$c = \frac{Q}{2\pi\sigma_y\sigma_z u} \exp\left[-\left(\frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right)\right] \left[ \exp\left(-\frac{(h-H)^2}{2\sigma_z^2}\right) + \exp\left(-\frac{(h+H)^2}{2\sigma_z^2}\right) \right]$$

Equação 5.11

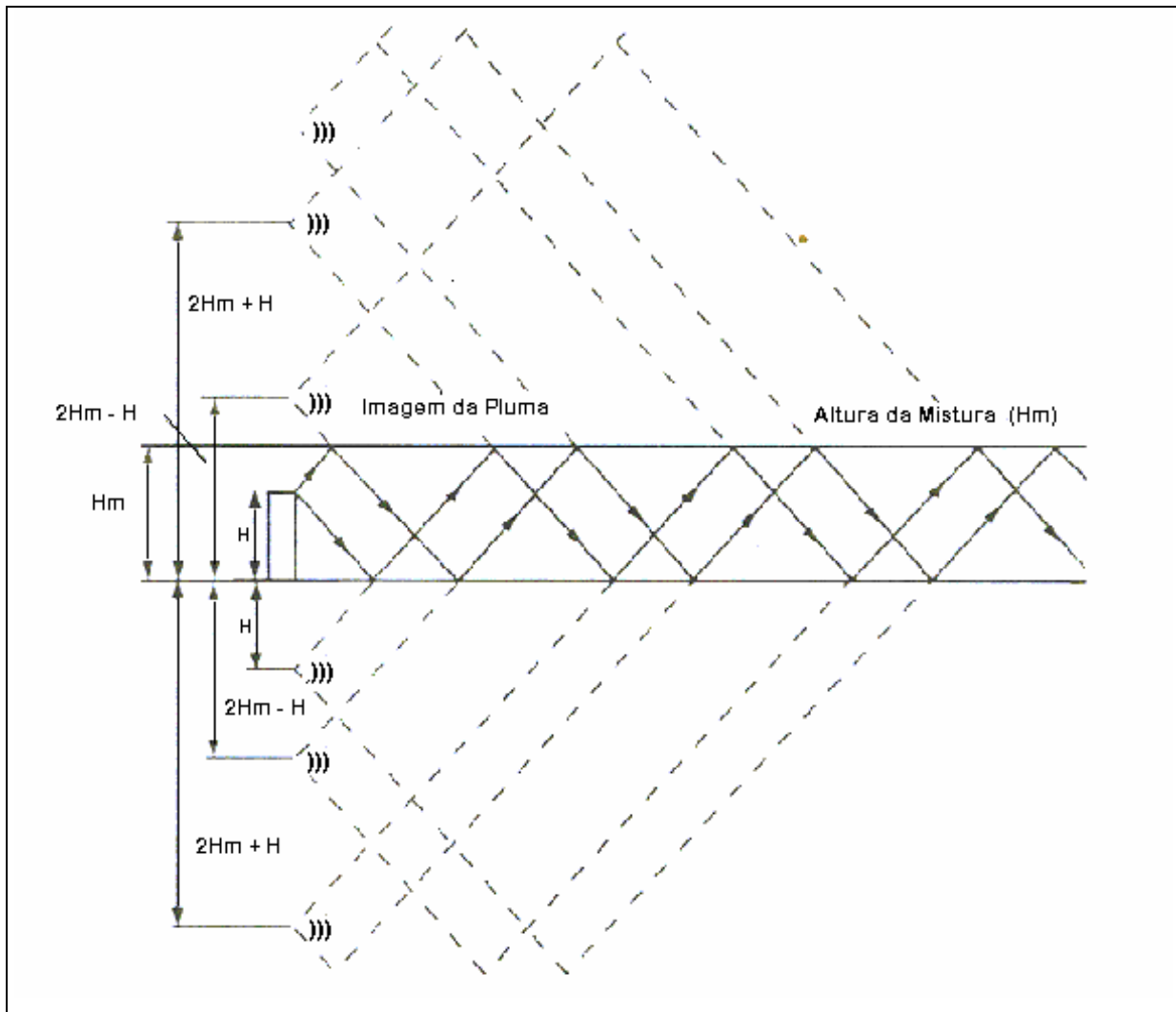


Figura 5.3 - O método de múltiplas imagens usado para a reflexão da pluma simulada pelo modelo ISCST3. Fonte: EPA, 1977.

### 5.3.2 APLICAÇÃO DO MODELO GAUSSIANO ISCST3

Este modelo foi concebido para estimar as concentrações de poluentes em terrenos de topografias simples, intermediárias e complexas, assim classificadas, na medida em que a rugosidade da superfície corresponde a diversas configurações: áreas planas, regiões montanhosas e vales.

O ISCST3 é um modelo de dispersão tipo pluma gaussiana que considera o estado estável da atmosfera. Pode ser utilizado para descrever a dispersão de poluentes de um complexo industrial com várias modalidades de fontes: área, volume e linha (Lyons, 1990).

O ISCST3 combina e aprimora vários algoritmos de modelos de dispersão, com o objetivo de considerar outras fontes de poluição e não somente emissões de chaminés isoladas, como por exemplo: emissões fugitivas, efeitos aerodinâmicos em torno das chaminés, sedimentação gravitacional e deposição seca (Alves, 1996).

O ISCST3 é projetado para calcular concentrações, ou valores de deposição seca e úmida, para períodos de tempo de 1, 2, 3, 4, 6, 8, 12 e 24 horas. Pode calcular também concentrações anuais se utilizados dados sequenciais para o período de um ano; calcula ainda as concentrações em cada ponto do receptor. Como tem tratamento para topografia pode ser aplicado tanto para terrenos planos como terrenos irregulares. A figura 5.4 mostra os ajustes feitos pelo modelo ISCST3 para considerar a topografia. A modificação do terreno é feita através da correção:

$$H' = H + Z_s - Z - RHT$$

Equação 5.12

H' - altura de estabilização da pluma  
H - altura efetiva da chaminé  
Z<sub>s</sub> - altura da base da chaminé em relação ao nível do mar  
Z - altura do terreno no receptor em relação ao nível do mar  
RHT - altura do receptor acima da altura do terreno



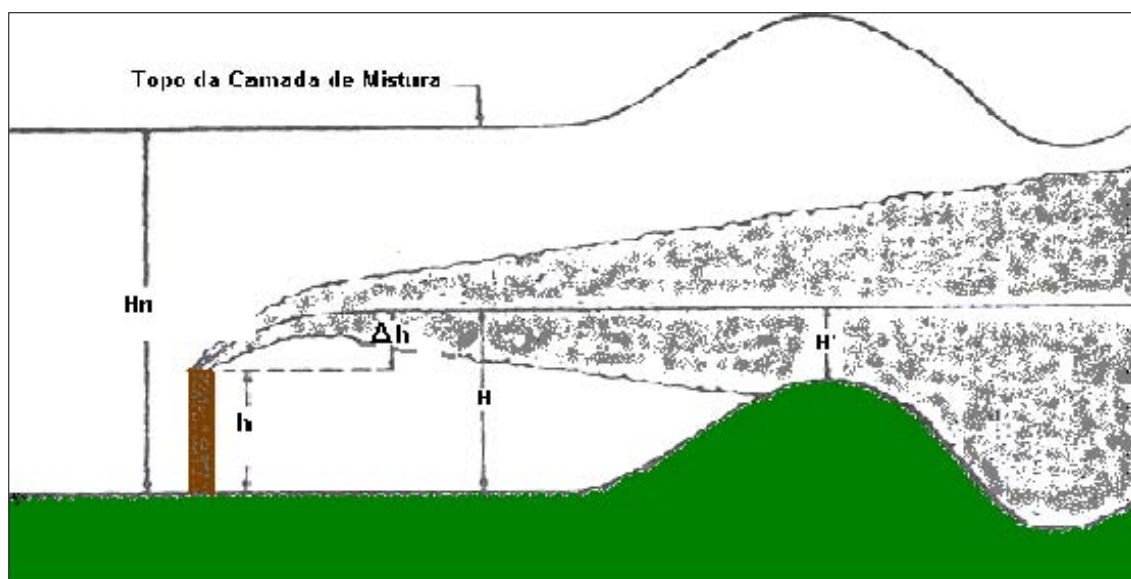


Figura 5.4 - Comportamento da pluma num terreno complexo, assumido pelo modelo ISCST3. Fonte: Alves, 1996.

#### 5.4 CLASSE DE ESTABILIDADE

Para aplicação prática dos modelos de pluma gaussiana é necessário determinar valores numéricos para os coeficientes de dispersão  $\sigma_y$  (na direção transversal ao eixo do vento,  $x$ ) e  $\sigma_z$  (na direção perpendicular ao eixo do vento,  $x$ ). Na ausência de dados de turbulência é necessário estimar os coeficientes de dispersão através de métodos empíricos; o método mais utilizado para estimar a dispersão na CLP (Camada Limite Planetária) é baseado na classificação de estabilidade de um sistema proposto por Pasquill e mais tarde modificado por Gifford (1976), conforme mostra a tabela (Seinfeld, 1986).

Tabela 5.1 - Classes de Estabilidade de Pasquill

<b>Classes</b>	<b>Representa</b>
A	Condições extremamente instáveis
B	Condições moderadamente instáveis
C	Condições fracamente instáveis
D	Condições neutras
E	Condições fracamente estáveis
F	Condições moderadamente estáveis

<b>Vento de superfície</b>	<b>Dia</b>			<b>Noite</b>	
	<b>Radiação Solar</b>			<b>Nublado</b>	
<b>Velocidade (m/s)</b>	<b>Forte</b>	<b>Moderado</b>	<b>Fraco</b>	<b>≥ 4/8</b>	<b>≤ 3/8</b>
				<b>Nuvens baixas</b>	<b>Nuvens</b>
< 2	A	A - B	B		
2 - 3	A - B	B	C	E	F
3 - 5	B	B - C	C	D	E
5 - 6	C	C - D	D	D	D
> 6	C	D	D	D	D

O sistema Pasquill-Gifford associa as características da CLP com observações meteorológicas rotineiras. Esse esquema classifica o estado turbulento da atmosfera em seis categorias diferentes que são determinadas através do vento na superfície, insolação e cobertura de nuvens. As seis classes variam de A (fortemente instável) a F (moderadamente estável) (Alves, 1996).

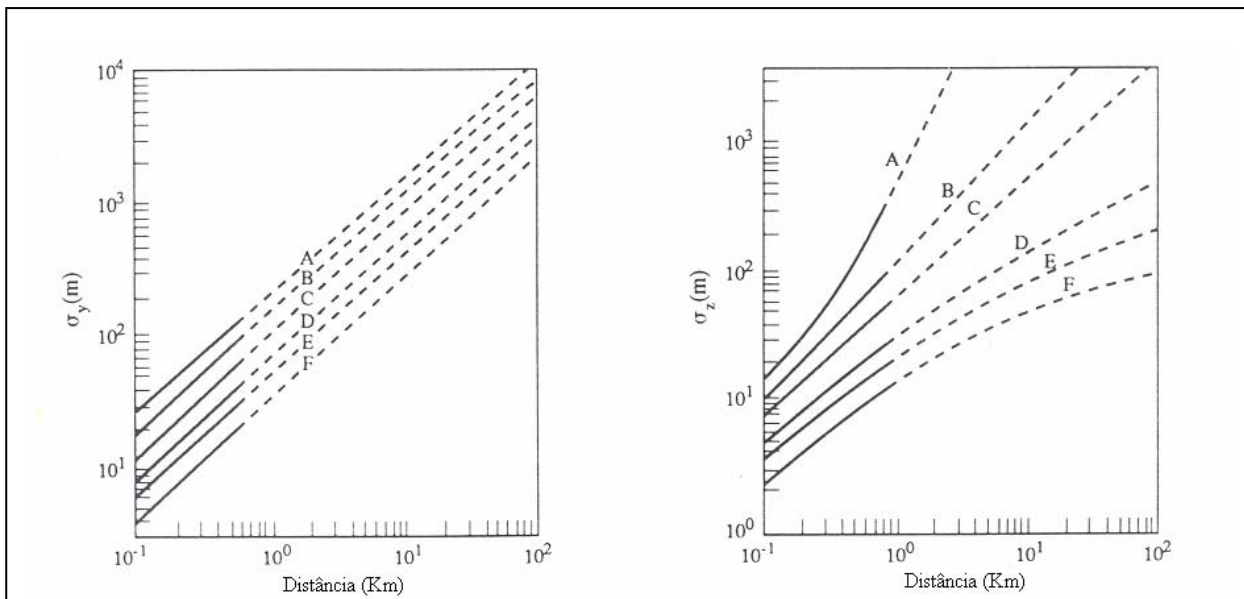


Figura 5.5 - As figuras representam as curvas de Pasquill de acordo com a variação dos  $\sigma$  em função da classes de estabilidade e da distância à fonte.  
 Fonte: Turner, 1994.

O sistema Pasquill-Gifford tenta estimar os efeitos de cisalhamento e empuxo, devido à turbulência, com os dados de variação do vento em 10m de altura e também através da radiação solar (Venkatram e Wyngaard,1988), como observados na tabela 5.1.

## CAPÍTULO VI

### METODOLOGIA E RESULTADOS

#### 6.1 METODOLOGIA

Para o estudo da dispersão de poluentes na região da COPESUL utilizou-se o modelo ISCST3 recomendado pela EPA e de fácil utilização operacional.

Na utilização do modelo é importante a definição das características da topografia da região, sendo através destas possível relacionar os efeitos que esta pode causar sobre a dispersão dos poluentes, principalmente em fontes pontuais, que é o nosso caso.

O Modelo Numérico de Terreno(MNT) é a representação matemática da distribuição espacial de uma determinada característica vinculada a uma superfície real. A superfície é em geral contínua e o fenômeno que representa pode ser variado.

Para a avaliação da topografia utilizou-se o Modelo Numérico de Terreno(MNT) , identificando as características da região do Polo Petroquímico, mostrando uma área de 10Kmx10Km a partir do centro geográfico do terreno analisado, gerando uma imagem de 20Kmx20Km.

A ferramenta utilizada para a geração do MNT é o software de geoprocessamento SPRING do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais em sua versão 3.5.

A geração do MNT foi feita a partir de um arquivo de isolinas (DXF), com os dados de altimetria do terreno, e de uma imagem do satélite Landsat de 22 de novembro de 2000, com resolução de 30 metros, recortada nas coordenadas UTM  $x_1= 442007m$  e  $x_2= 481997m$ ,  $y_1=6675010m$  e  $y_2=6715000m$ , fazendo uma área de 20Kmx20Km , cuja cena inteira faz a cobertura de uma área de 185Kmx185Km. Estas imagens são adquiridas em sete bandas espectrais, sendo que para a geração da imagem sintética no SPRING utilizamos apenas as bandas 3, 4 e 5 que são as bandas dos canais Vermelho, do IR(InfraVermelho) próximo e do IR intermediário, permitindo gerar a imagem em composição colorida. Desta maneira

conseguimos visualizar em perspectiva e em paralelo a região analisada, com todas as características reais da região.

A figura 6.1 mostra a composição das bandas 3, 4 e 5 da imagem Landsat e as figuras 6.2 e 6.3 mostram a visualização tridimensional, em perspectiva e em paralela.

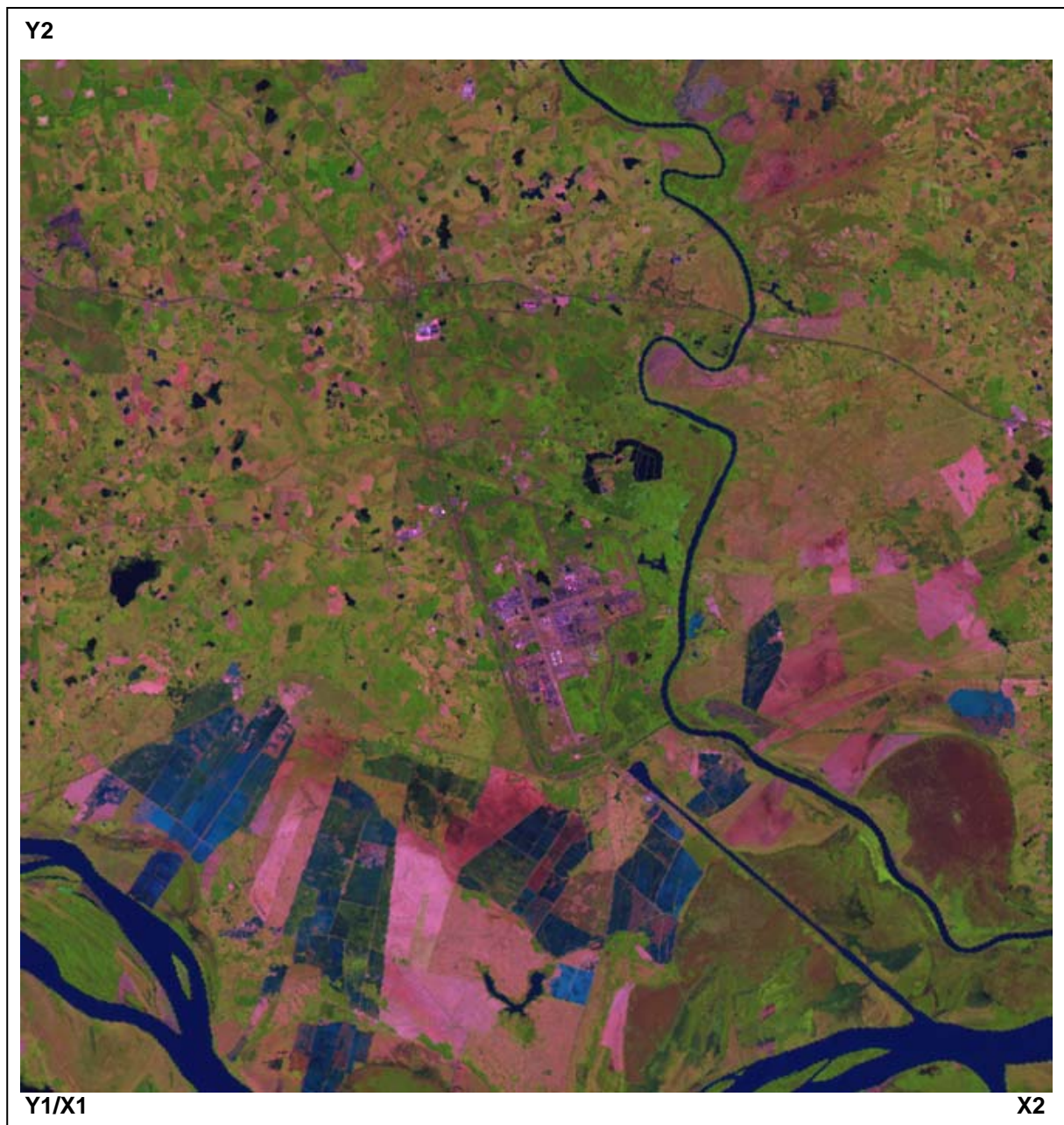


Figura 6.1 - Imagem sintética gerada com as bandas 3,4 e 5 do Landsat.  
Coordenadas UTM = X1= 442007 e X2= 481997 e  
Y1=6675010 e Y2=6715000

As figuras 6.2 e 6.3 são os produtos 3D gerados no SPRING utilizando a Imagem sintética mostrada na figura 6.1.



Figura 6.2 - Projeção Paralela da Imagem

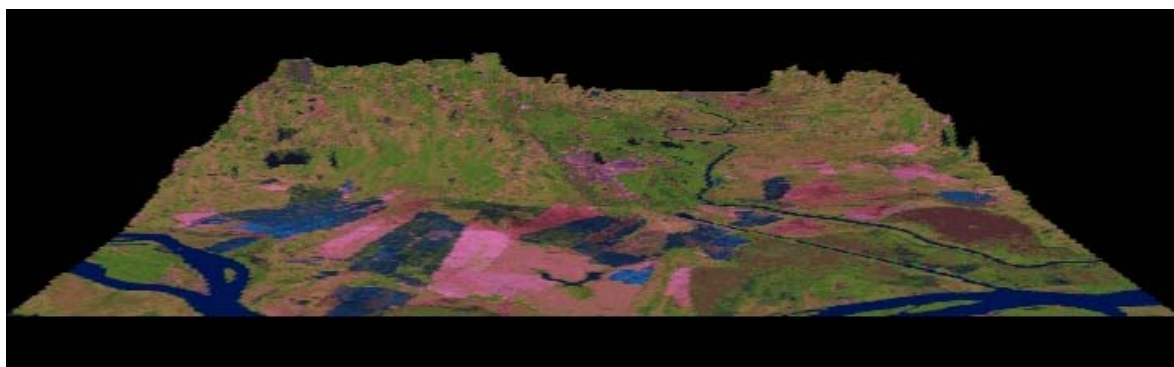


Figura 6.3 - Projeção Perspectiva da Imagem

Através destas imagens podemos verificar que a região é plana, com elevações relativamente pequenas a Leste e a Oeste, bem distantes do centro geográfico da região analisada, logo a modelagem se comporta muito bem, gerando resultados satisfatórios.

Para a utilização do Modelo ISCST3 considerou-se fontes pontuais, localizadas na região do Polo Petroquímico, onde verificamos os dados de localização das fontes e das estações receptoras em coordenadas UTM e as localizações calculadas para representação em uma grade 40Kmx40Km. A localização das fontes bem como os pontos receptores estão distribuídos conforme mostrado na tabela 6.1. Utilizou-se um sistema de coordenadas cartesianas X (leste, positivo), Y (norte, positivo) para a construção da grade, com espaçamento não uniforme e dimensão total de 40Kmx40Km, onde o modelo calcula a concentração para cada ponto de grade. O tamanho da grade foi definido em função da topografia da região e pela área que se desejava avaliar a dispersão dos poluentes.

A descrição dos dados das fontes de emissão mostradas na tabela 6.2 foram retiradas do EIA RIMA da UTE-Gaúcha. Nela visualizamos a posição de cada fonte através das coordenadas UTM definidas como x e y e a altura definida pela coordenada z. As emissões de saída de MP, SO<sub>2</sub> e NO<sub>2</sub>, altura da fonte, temperatura em graus Kelvin e velocidade de saída dos gases e diâmetro da fonte, tempo de amostragem, e região urbana ou rural são dados necessários para a inicialização do modelo ISCST3.

Para serem usados como dados de entrada no modelo foi necessário aplicar uma estatística de dispersão das fontes em relação a uma fonte definida como centro. A partir deste centro a dispersão foi aplicada, isto é, cada fonte ficou relacionada a fonte central a partir da distância em relação a esta.

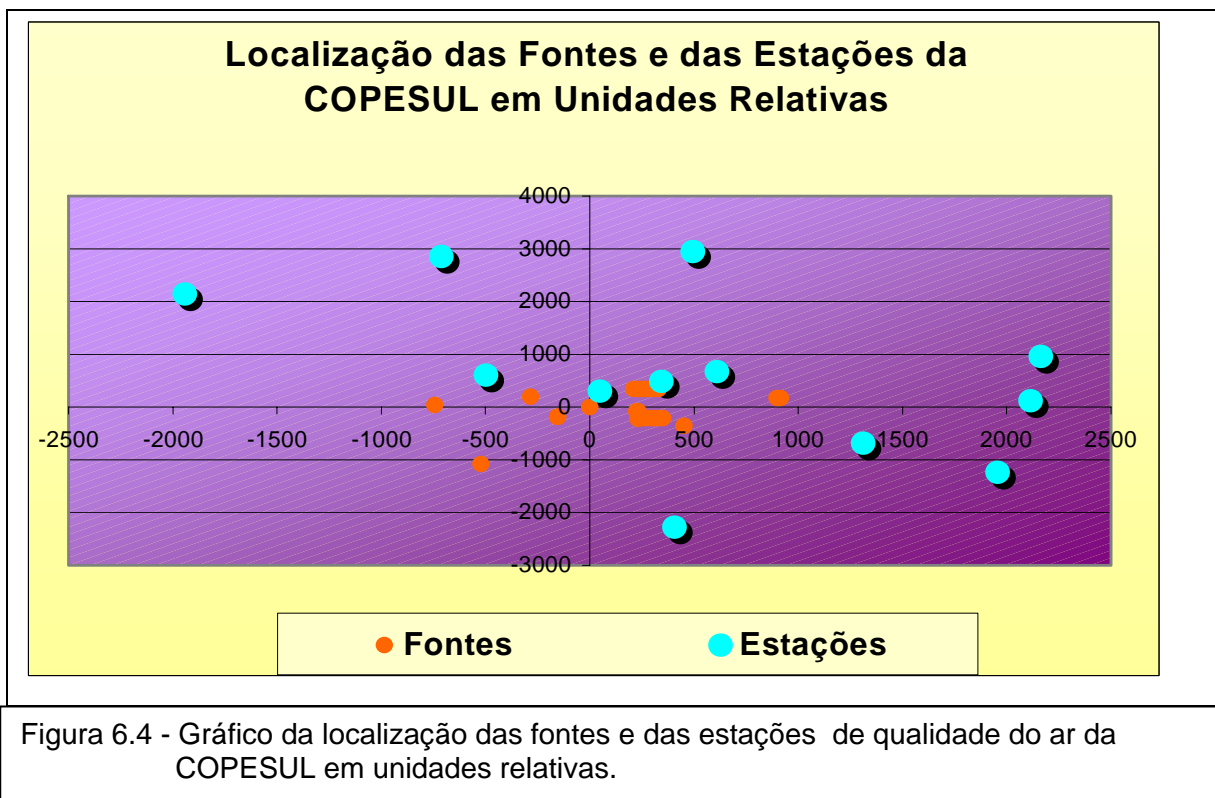
Descrição Unidade	Coord. UTM		Coord. Ret.		Estação Qual. Ar	Coord. UTM		Coord. Ret.	
	X m	Y m	X m	Y m		X m	Y m	X m	Y m
Central de Vapor - GV 02	463365	6695264	915	175	1	464407	6693858	1957,2	-1230,8
Central de Vapor - GV 03	463349	6695254	899	165	2	464564	6695213	2113,8	124
Forno de Pirólise - 11F01	462760	6694885	310	-204	3	462498	6695391	47,7	301,9
Forno de Pirólise - 11F2/3	462740	6694885	290	-204	4	461953	6695697	-497,2	607,5
Forno de Pirólise - 11F4/5	462720	6694885	270	-204	5	460506	6697231	-1944	2141,8
Forno de Pirólise - 11F6/7	462700	6694885	250	-204	6	462855	6692807	405,1	-2282,4
Forno de Pirólise - 11F8/9	462680	6694885	230	-204	7	463060	6695762	609,8	673,2
Forno de Pirólise - 11F14	462780	6694885	330	-204	8	462792	6695577	342,1	487,6
Forno de Pirólise - 11F15	462800	6694885	350	-204	10	462945	6698040	494,9	2950,5
Forno de Pirólise - 11F16	462700	6694900	250	-189	11	461738	6697943	-712,3	2854,1
Forno de Pirólise - 111F01	462660	6695425	210	336	12	463762	6694410	1311,7	-678,9
Forno de Pirólise - 111F02	462680	6695425	230	336	13	464615	6696044	2164,9	955,2
Forno de Pirólise - 111F03	462700	6695425	250	336					
Forno de Pirólise - 111F04	462720	6695425	270	336					
Forno de Pirólise - 111F05	462740	6695425	290	336					
Forno de Pirólise - 111F06	462760	6695425	310	336					
Forno de Etano - 111F07	462780	6695425	330	336					
Forno de Etano - 11F10/11	462680	6694865	230	-224					
Superaquecedores - 11F12	462675	6695004	225	-85					
Superaquecedores - 11F13	462680	6695015	230	-74					
Forno/Alquil. Tolueno - 24F01	461926	6694016	-524	-1073					
Caldeira/OXITENO	461705	6695128	-745	39					
Flare 01	462295	6694900	-155	-189					
Flare 02	462295	6694900	-155	-189					
Forno de Carga/2 Est. - 21F5	462904	6694738	454	-351					
Forno /Hidrog./Gasolina - F84	462450	6695089	0	0					
Forno/Hidrog./C9 - 25F01	462165	6695292	-285	203					

Tabela 6.1 - Localização das Fontes e Estações em coordenadas UTM e da grade



Descrição	X	Y	Emissão			Altura	Temper.	Veloc.	Diâm.
Unidade	m	m	MP(g/s)	SO <sub>2</sub> (g/s)	NO <sub>2</sub>	m	K	m/s	m
Central de Vapor - GV 02	463365	6695264	10,5	88,846	38,796	120	408	16,5	2,56
Central de Vapor - GV 03	463349	6695254	10,5	88,846	38,796	120	408	16,5	2,56
Forno de Pirólise - 11F01	462760	6694885	0,1768	0,0211	5,8403	40	449	16,81	1,6
Forno de Pirólise - 11F2/3	462740	6694885	0,1768	0,0211	5,8403	40	449	16,81	2,3
Forno de Pirólise - 11F4/5	462720	6694885	0,1768	0,0211	5,8403	40	449	16,81	2,3
Forno de Pirólise - 11F6/7	462700	6694885	0,1768	0,0211	5,8403	40	449	16,81	2,3
Forno de Pirólise - 11F8/9	462680	6694885	0,1768	0,0211	5,8403	40	449	16,81	2,3
Forno de Pirólise - 11F14	462780	6694885	0,1768	0,0211	5,8403	40	449	16,81	1,6
Forno de Pirólise - 11F15	462800	6694885	0,1768	0,0211	5,8403	40	449	16,81	1,6
Forno de Pirólise - 11F16	462700	6694900	0,1768	0,0211	5,8403	40	401	15,19	1,6
Forno de Pirólise - 111F01	462660	6695425	0,1768	0,0211	5,8403	40	420	17,3	1,6
Forno de Pirólise - 111F02	462680	6695425	0,1768	0,0211	5,8403	40	420	17,3	1,6
Forno de Pirólise - 111F03	462700	6695425	0,1768	0,0211	5,8403	40	420	17,3	1,6
Forno de Pirólise - 111F04	462720	6695425	0,1768	0,0211	5,8403	40	420	17,3	1,6
Forno de Pirólise - 111F05	462740	6695425	0,1768	0,0211	5,8403	40	420	17,3	1,6
Forno de Pirólise - 111F06	462760	6695425	0,1768	0,0211	5,8403	40	420	17,3	1,6
Forno de Etano - 111F07	462780	6695425	0,0779	0,0094	2,5755	40	420	10,2	1,4
Forno de Etano - 11F10/11	462680	6694865	0,0779	0,0094	2,5755	40	476,7	17,24	2,3
Superaquecedores - 11F12	462675	6695004	2,42	1,71	4,08	47	455,3	12,58	2,034
Superaquecedores - 11F13	462680	6695015	2,42	1,71	4,08	47	455,3	12,58	2,034
Forno/Alquil. Tolueno - 24F01	461926	6694016	0,0139	0,0114	0,3722	20	1093	4,5	1,287
Caldeira/OXITENO	461705	6695128	0,0756	0,0072	2,0189	20	473	20	0,94
Flare 01	462295	6694900	*	0,8333	0,5833	120	1273	20	1,05
Flare 02	462295	6694900	*	0,8333	0,5833	120	1273	20	1,05
Forno de Carga/2 Est. - 21F51	462904	6694738	0,0047	0,0005	0,1233	21	603	1,5	0,956
Forno /Hidrog./Gasolina - F850	462450	6695089	0,0019	0,0003	*	21	603	1,5	0,956
Forno/Hidrog./C9 - 25F01	462165	6695292	0,0047	*	0,1233	23	563	3,16	0,636

Tabela 6.2 - Fontes de Emissão de Poluentes da COPESUL.



A figura 6.4 mostra a análise estatística de dispersão da localização das fontes de emissão em torno do ponto central da região, definido como a fonte de coordenadas UTM sendo x igual a 462450m e y igual a 6695089m. O cálculo foi feito no aplicativo para Windows, a planilha eletrônica e gráfica Excel.

A figura 6.5 mostra então as fontes de emissão e as estações de qualidade do ar, com a localização exata através das coordenadas UTM.

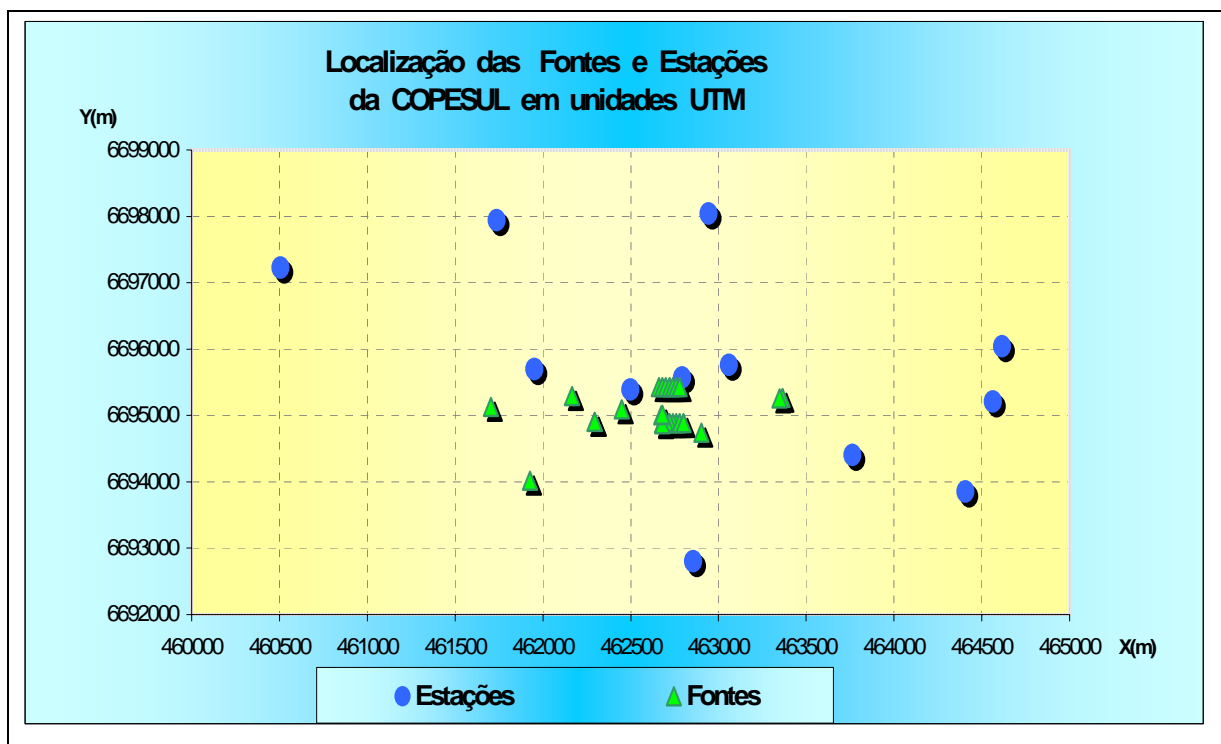


Figura 6.5 - Localização das fontes e da estação móvel de qualidade do ar da COPESUL.

Para o estudo da modelagem foram escolhidos 5 dias, de acordo com os máximos valores de concentração de poluentes coletados pela estação de qualidade do ar localizadas na região do Polo Petroquímico.

Os dados meteorológicos que foram utilizados para inicializar o modelo de dispersão atmosférica são os seguintes: temperatura do ar, velocidade e direção do vento, classe de estabilidade e altura da camada de mistura.

Para cada dia escolhido, serão mostrados os dados meteorológicos através de gráficos da velocidade do vento, temperatura do ar, direção do vento para o período de 24 horas, estes executados na planilha eletrônica Excel, para Windows.

## 6.2 RESULTADOS

Os resultados mostrados identificam o valor da concentração de SO<sub>2</sub>, MP (PTS-Partículas Totais em Suspensão) e NO<sub>x</sub> ao nível do solo para 5 dias do ano de 2001 representativos das condições meteorológicas e a localização onde foram realizadas a coleta dos dados meteorológicos.

Os gráficos mostrando os resultados foram construídos utilizando o aplicativo gráfico para Windows, Surfer em sua versão 3.2.

São apresentados os gráficos de isolinhas de concentração que representam as médias de 24 horas para SO<sub>2</sub> e MP e valores máximos de concentração para o período de 1 hora para o NO<sub>x</sub> em µg/m<sup>3</sup>.

Através destes gráficos é possível verificar a dispersão da pluma de contaminantes com seus respectivos valores de concentração. A localização das fontes de emissão nas figuras estão em vermelho e as estações onde foram feitas as medições estão em azul.

Os gráficos de isolinhas de máxima concentração horária de NO<sub>x</sub>, com as localizações das fontes e estação, encontram-se no Apêndice A, B, C, D e F para os 5 dias selecionados.

Nas tabelas 6.3, 6.4, 6.5, 6.6 e 6.7 estão definidas a localização da estação através das coordenadas UTM e as respectivas coordenadas na grade 40Kmx40Km. Na primeira coluna da tabela estão listados os poluentes, na segunda coluna o tempo de amostragem para o poluente, na terceira coluna os valores da média de 24 horas de concentração no ponto receptor(estação), para SO<sub>2</sub> e MP e os máximos de concentração para NO<sub>x</sub>, na quarta coluna os valores simulados pelo modelo no ponto receptor(estação), na quinta coluna a localização da estação na grade onde foram coletados os dados, na sexta coluna os os valores da média de 24 horas de concentração no ponto receptor(estação), para SO<sub>2</sub> e MP e os máximos de concentração para NO<sub>x</sub> e na sétima coluna a localização na grade 40Kmx40Km, onde foram registrados os valores máximos na simulação.

### 6.3 ANÁLISE DOS RESULTADOS DO DIA 26/05/2001

Os resultados a seguir descrevem as análises meteorológicas e de concentração de contaminantes resultantes do dia 26 de maio de 2001.

Os parâmetros meteorológicos utilizados para inicializar o modelo de dispersão são apresentados através dos gráficos de velocidade do vento (figura 6.6) , direção do vento (figura 6.9), temperatura do ar (figura 6.7) e umidade relativa (figura 6.8). Através dos gráficos de velocidade e direção do vento verificamos que até as 9 horas da manhã este decaiu de 0,6m/s para 0,1m/s , crescendo então até 0,9m/s, e no período da manhã a direção esteve entre os quadrantes leste e oeste, permanecendo no período da tarde nos quadrante leste e sul. Em relação a temperatura do ar(figura 6.7) esta variou de 10°C à 25°C a partir da 10 horas, significando que houve produção térmica significativa durante este dia. A umidade relativa do ar (figura 6.8), variou entre 84% e 96% durante as 24 horas deste dia.

Após a modelagem de dispersão obtivemos como resultado uma concentração máxima de MP no valor de 3,53  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  na localização (2000x2000) enquanto o valor medido na estação nº 5 (-2000x 2000) foi de 28,8  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , e o modelado 1,471  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ .

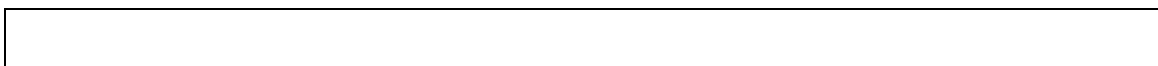
Pelo resultado obtido através da amostragem de MP, os valores medidos na estação se mostram bem inferiores aos simulados para o mesmo local, isto deve ser pelo fato de existirem outras fontes na região referentes as indústrias de 2ª geração. Através dos gráficos de isolinhas de concentração de MP (figura 6.10(a)) observa-se que a estação de qualidade do ar marcada na figura com a cor azul, esteve bem distante das isolinhas de concentrações altas.

Já o valor de  $\text{SO}_2$  medido na estação nº 5 (-2000x2000 ) foi da ordem de 8,0  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  e o modelado 8,142  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  . Estes valores se aproximam comprovando que a emissão de  $\text{SO}_2$  não é relevante, levando em consideração que o padrão primário é 395  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  conforme mostrado na figura 6.11 a qual mostra o gráfico comparativo dos padrões CONAMA com os máximos modelados e medidos. O valor de  $\text{SO}_2$  máximo modelado foi de 23,7  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  na localização (2000x2000).

O gráfico das isolinhas de concentração de SO<sub>2</sub> estão representadas através da figura 6.10(b).

Para o NO<sub>x</sub> o máximo medido na estação nº 5, na localização (-2000x2000) foi de 39,0 µg/m<sup>3</sup> na 19ª hora , enquanto o máximo de 198,65 µg/m<sup>3</sup> modelado não ultrapassa o padrão primário de 320 µg/m<sup>3</sup> , mas ultrapassa o secundário que é de 190 µg/m<sup>3</sup>, no horário de 11h, conforme verificamos no gráfico da figura 6.12. Este último se encontra acima dos limites exigidos pelo controle de qualidade do ar.

Através da tabela 6.3 é possível visualizar todos os valores medidos e modelados para SO<sub>2</sub>, MP e NO<sub>x</sub> durante o período de 24 horas do dia 26 de maio de 2001.



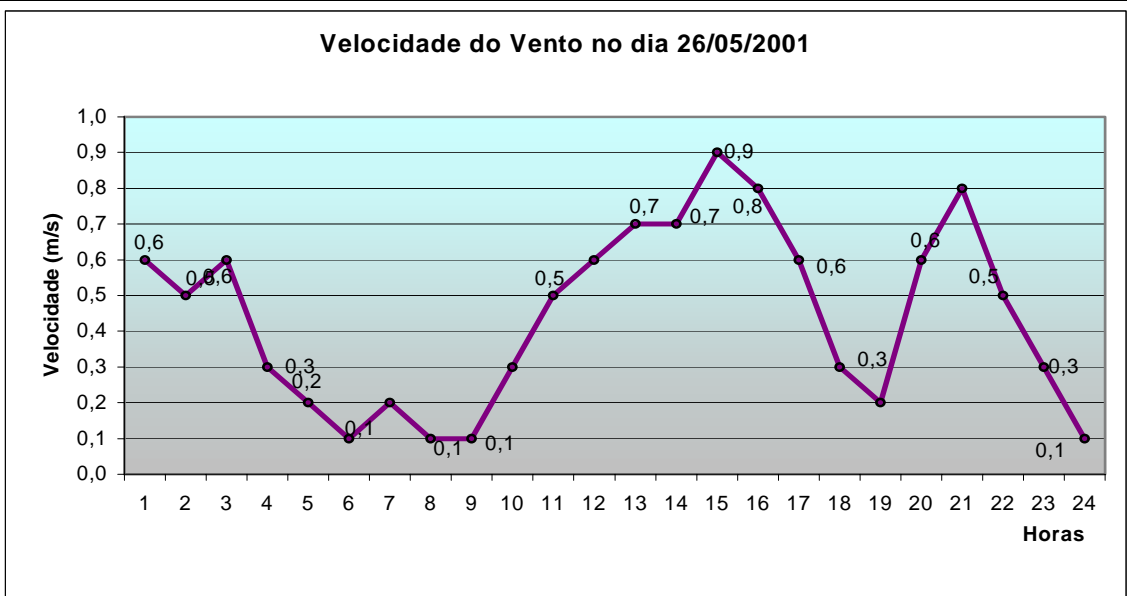


Figura 6.6 – Variação temporal da velocidade do vento para o dia 26/05/2001.

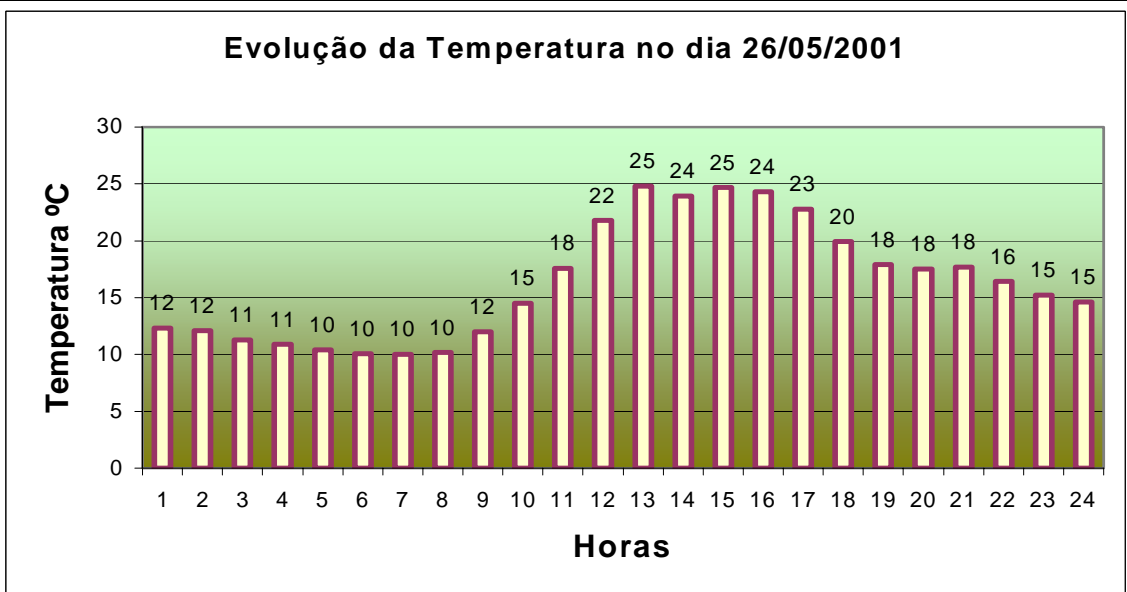


Figura 6.7 – Variação temporal da temperatura do ar para o dia 26/05/2001.

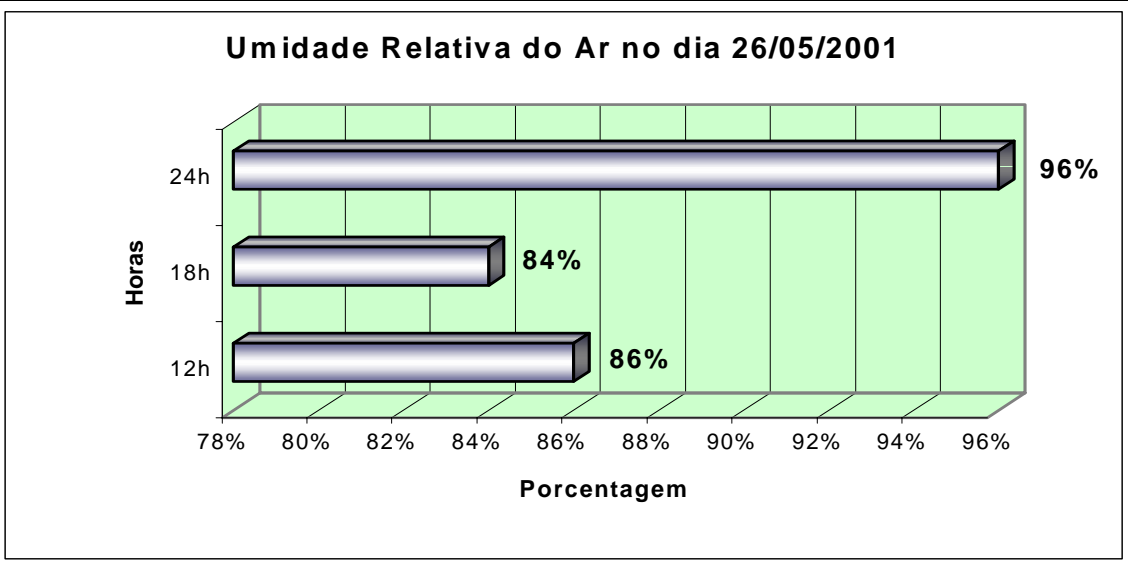


Figura 6.8 – Variação temporal da umidade relativa para o dia 26/05/2001.

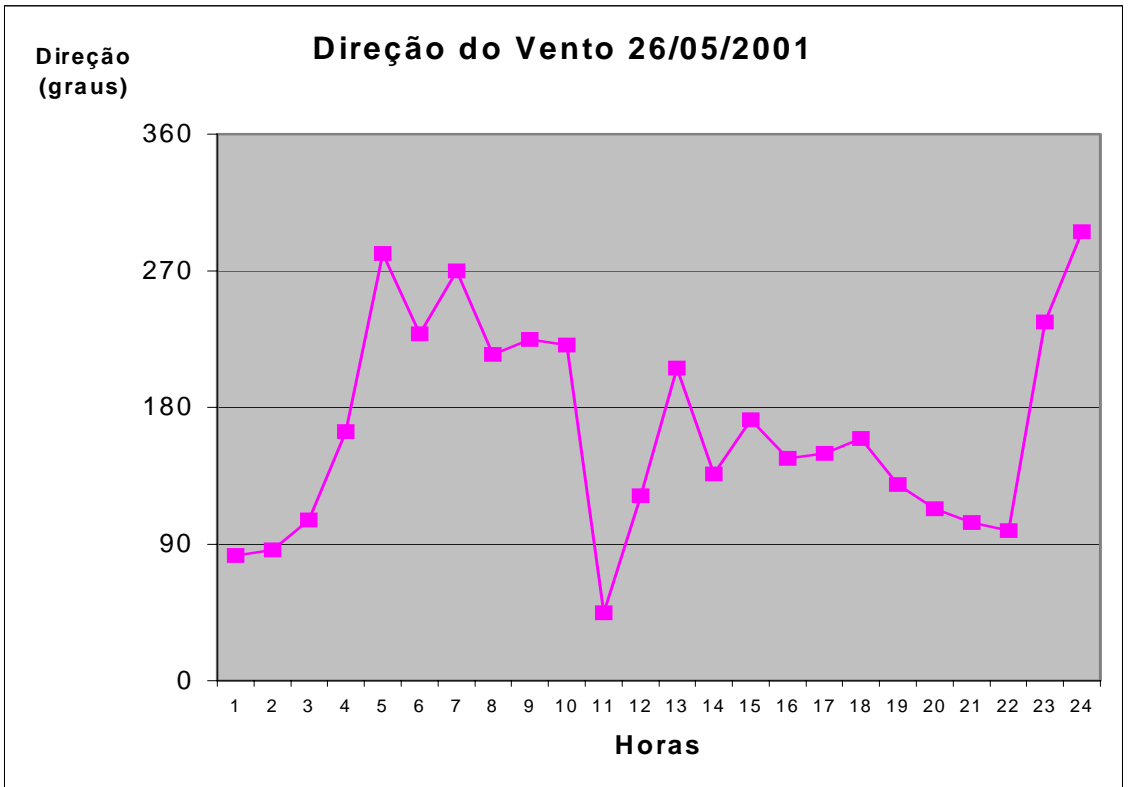


Figura 6.9 – Variação temporal da direção do vento para o dia 26/05/2001.



Tabela 6.3 - Dados do dia 26/05/2001 coletados na estação nº 5 cujas coordenadas UTM são: x = 460506 e y = 6697231 e da grade são: x = - 1944 e y = 2141

<b>POLUENTE</b>	<b>Tempo de Amostragem</b>	<b>Conc Medida Estação</b>	<b>Conc Simulada Estação</b>	<b>Localização Estação</b>	<b>Conc Máxima Simulada</b>	<b>Localização Máxima Concentração</b>
<b>MP</b>	24 h	28,8	1,471	-2000x2000	3,53	2000x2000
<b>SO<sub>2</sub></b>	24 h	8,0	8,142	-2000x2000	23,07	2000x2000
<b>NO - 01</b>	1 h	15,3	0,000	-2000x2000	34,48	-15000x-2000
<b>NO - 02</b>	1 h	18,8	0,000	-2000x2000	34,35	-15000x--1000
<b>NO - 03</b>	1 h	11,3	0,0005	-2000x2000	32,37	-15000x5000
<b>NO - 04</b>	1 h	13,8	0,019	-2000x2000	31,89	-5000x20000
<b>NO - 05</b>	1 h	11,8	0,000	-2000x2000	32,39	15000x3000
<b>NO - 06</b>	1 h	11,5	0,000	-2000x2000	16,89	20000x15000
<b>NO - 07</b>	1 h	9,5	0,000	-2000x2000	72,21	10000x-500
<b>NO - 08</b>	1 h	7,0	0,000	-2000x2000	144,07	2000x2000
<b>NO - 09</b>	1 h	18,3	0,000	-2000x2000	142,75	2000x1000
<b>NO - 10</b>	1 h	22,0	0,000	-2000x2000	146,37	1000x1000
<b>NO - 11</b>	1 h	15,8	0,000	-2000x2000	198,67	-500x-1000
<b>NO - 12</b>	1 h	14,3	110,598	-2000x2000	181,44	-500x1000
<b>NO - 13</b>	1 h	10,5	0,000	-2000x2000	153,06	500x1000
<b>NO - 14</b>	1 h	7,5	89,396	-2000x2000	185,78	-500x1000
<b>NO - 15</b>	1 h	12,3	0,205	-2000x2000	120,30	500x2000
<b>NO - 16</b>	1 h	21,5	28,655	-2000x2000	133,50	-500x2000
<b>NO - 17</b>	1 h	24,3	17,569	-2000x2000	139,15	-500x2000
<b>NO - 18</b>	1 h	25,5	1,617	-2000x2000	77,07	-3000x10000
<b>NO - 19</b>	1 h	39,0	6,849	-2000x2000	21,02	-20000x15000
<b>NO - 20</b>	1 h	35,3	0,044	-2000x2000	24,99	-10000x5000
<b>NO - 21</b>	1 h	33,3	0,00001	-2000x2000	39,99	-20000x5000
<b>NO - 22</b>	1 h	34,8	0,000	-2000x2000	35,29	-20000x3000
<b>NO - 23</b>	1 h	27,3	0,000	-2000x2000	35,93	15000x10000
<b>NO - 24</b>	1 h	22,0	0,000	-2000x2000	34,61	20000x-10000

Os gráficos a seguir representam as isolinhas de concentração de SO<sub>2</sub> e MP, e mostram os máximos de concentração dos poluentes com a identificação das posições das fontes e da estação receptora no dia analisado(figura 6.10).

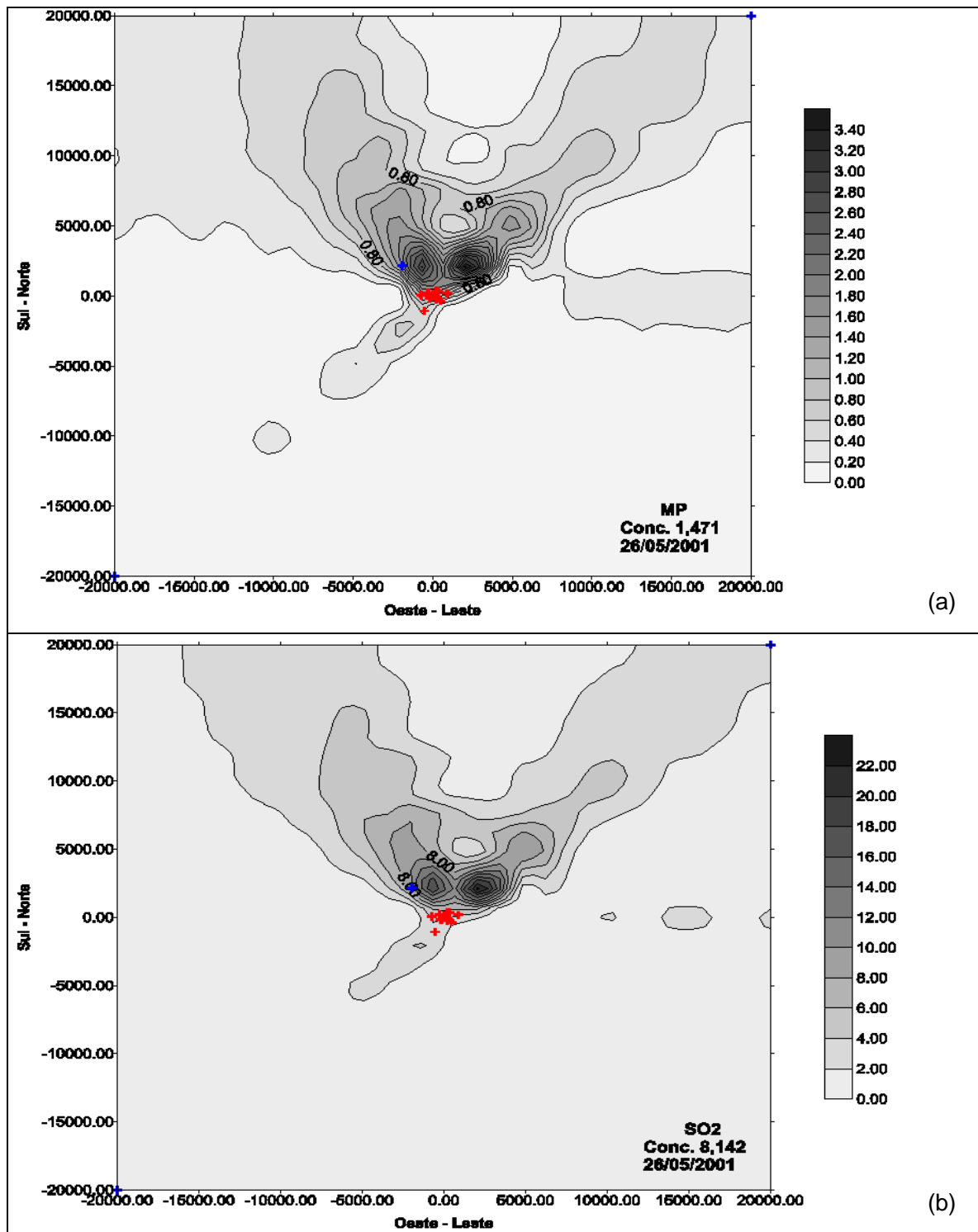


Figura 6.10 - Gráficos de Isolinhas de Concentração representativas para o período de 24 horas. Os pontos em vermelho representam as diferentes fontes de emissão localizadas junto a COPESUL, e em azul é a localização da estação de qualidade do ar para (a) MP e (b) SO<sub>2</sub>.

As figuras 6.11 e 6.12 mostram os gráficos da análise estatística de comparação entre os valores modelados e medidos com os padrões primário e secundário exigidos pela resolução CONAMA nº 3 de 28/06/1990.

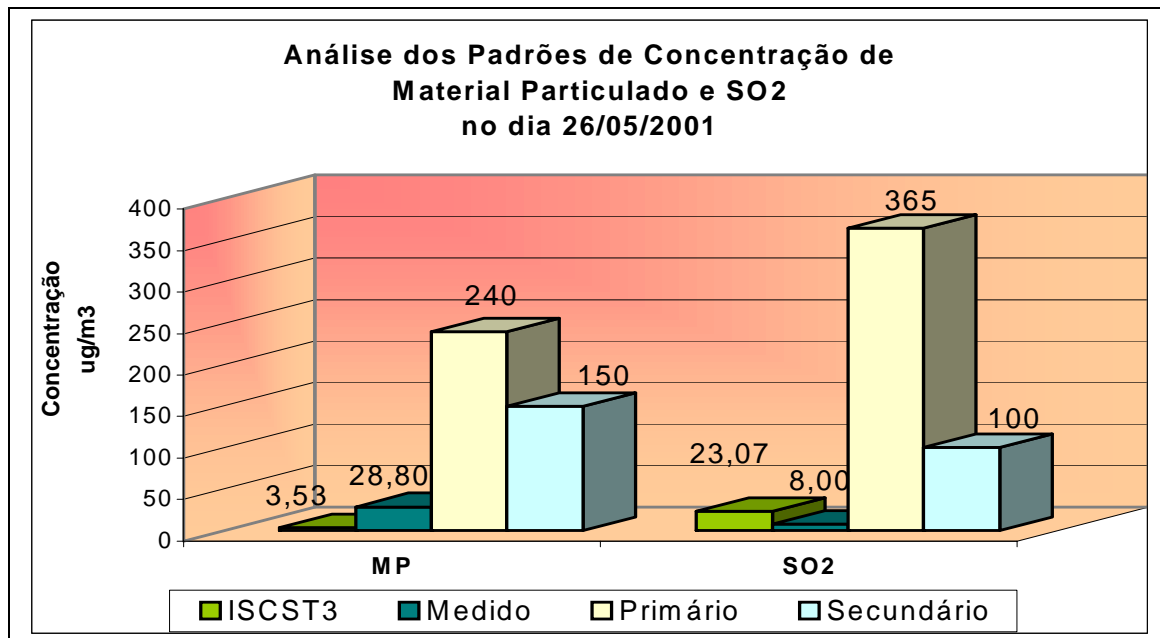


Figura 6.11- Análise estatística do SO<sub>2</sub> e MP para o dia 26/05/2001.

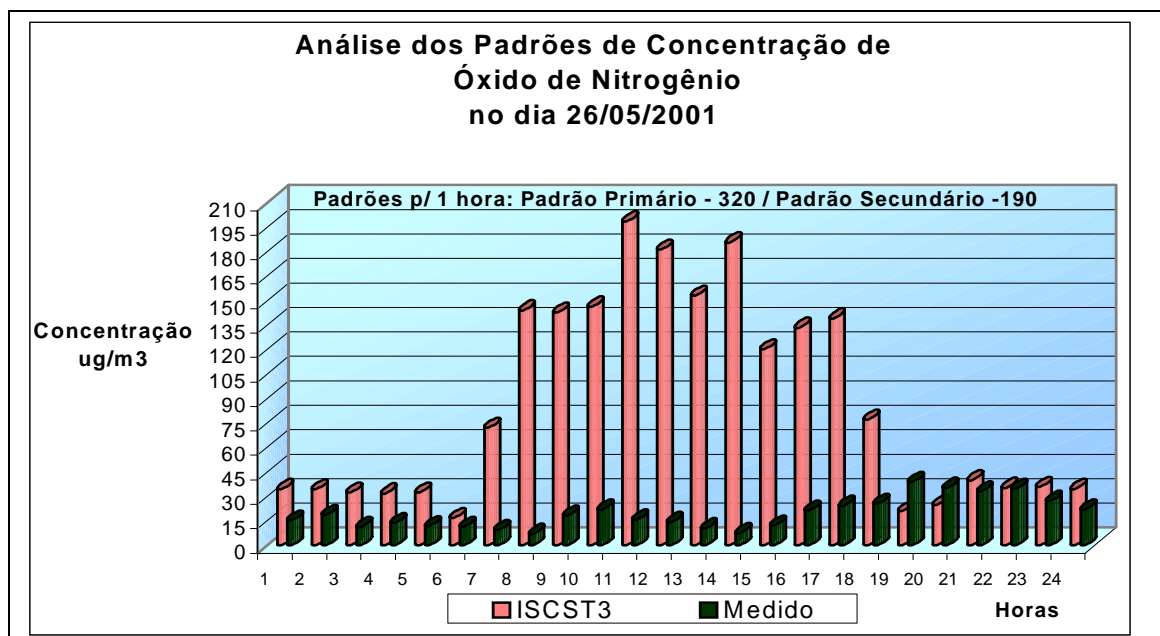


Figura 6.12 – Análise estatística do NO<sub>x</sub> para o dia 26/05/2001.

#### 6.4 ANÁLISE DOS RESULTADOS DO DIA 29/05/2001

Os resultados a seguir descrevem as análises meteorológicas e de concentração de contaminantes resultantes do dia 26 de maio de 2001.

Os parâmetros meteorológicos utilizados para inicializar o modelo de dispersão são apresentados através dos gráficos de velocidade do vento (figura 6.13) , direção do vento (figura 6.16), temperatura do ar (figura 6.14) e umidade relativa (figura 6.15). Através dos gráficos de velocidade verificamos que durante o período diurno a velocidade variou de 0,1 a 1,1m/s e no período noturno variou de 0,1 a 1,4m/s enquanto a direção do vento também teve variação em todos os quadrantes, norte sul, leste e oeste. Em relação a temperatura do ar esta variou de 15°C a 23°C sendo que no período diurno se manteve entre 18°C e 23°C. Verificamos também que a umidade relativa do ar (figura 6.15), variou entre 62% e 96% durante este dia.

Após a modelagem de dispersão obtivemos como resultado uma concentração máxima de MP no valor de 3,68  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  na localização (2000x-500) enquanto o valor medido na estação nº 5 (-2000x 2000) foi de 24,1  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , e o modelado 0,331  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ .

Pelo resultado obtido através da amostragem de MP, os valores medidos na estação se mostram bem inferiores aos simulados para o mesmo local. O mesmo fato ocorreu no dia anteriormente analisado, comprovando a contribuição das indústrias de 2ª geração para a diferença de valores observados. Através dos gráficos de isolinhas de concentração de MP (figura 6.17(a)) observa-se que a estação de qualidade do ar marcada na figura com a cor azul, esteve bem distante das isolinhas de concentrações altas.

Já o valor de  $\text{SO}_2$  medido na estação nº 5 (-2000x2000 ) foi da ordem de 8,0  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  e o modelado 1,332  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  comprovam que a emissão de  $\text{SO}_2$  não é relevante, levando em consideração que o padrão primário é 395  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  conforme mostrado na figura 6.18 a qual mostra o gráfico comparativo dos padrões CONAMA com os máximos modelados e medidos. O valor de  $\text{SO}_2$  máximo modelado foi de 22,10  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  na localização (2000x-500).

A representação das isolinhas de concentração de SO<sub>2</sub> estão representadas através da figura 6.10(b).

Para o NO<sub>x</sub> o máximo medido na estação nº 5, na localização (-2000x2000) foi de 20,3 µg/m<sup>3</sup> na 13<sup>a</sup> hora , enquanto o máximo de 168,49 µg/m<sup>3</sup> modelado não ultrapassa o padrão primário de 320 µg/m<sup>3</sup> , nem ultrapassa o secundário de 190 µg/m<sup>3</sup>, conforme verificamos no gráfico da figura 6.19. Sendo que estes valores se encontram dentro dos limites exigidos pelo controle de qualidade do ar.

Através da tabela 6.4 é possível visualizar todos os valores medidos e modelados para SO<sub>2</sub>, MP e NO<sub>x</sub> durante o período de 24 horas do dia 29 de maio de 2001.

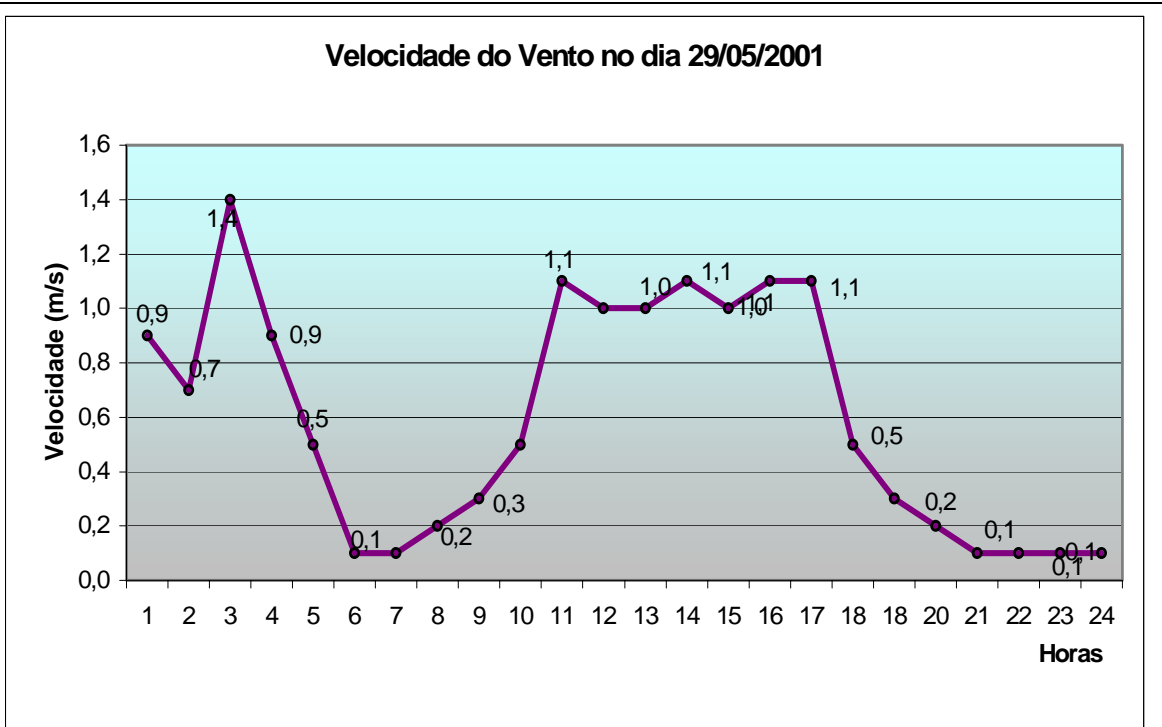


Figura 6.13 – Variação temporal da velocidade do vento para o dia 29/05/2001.

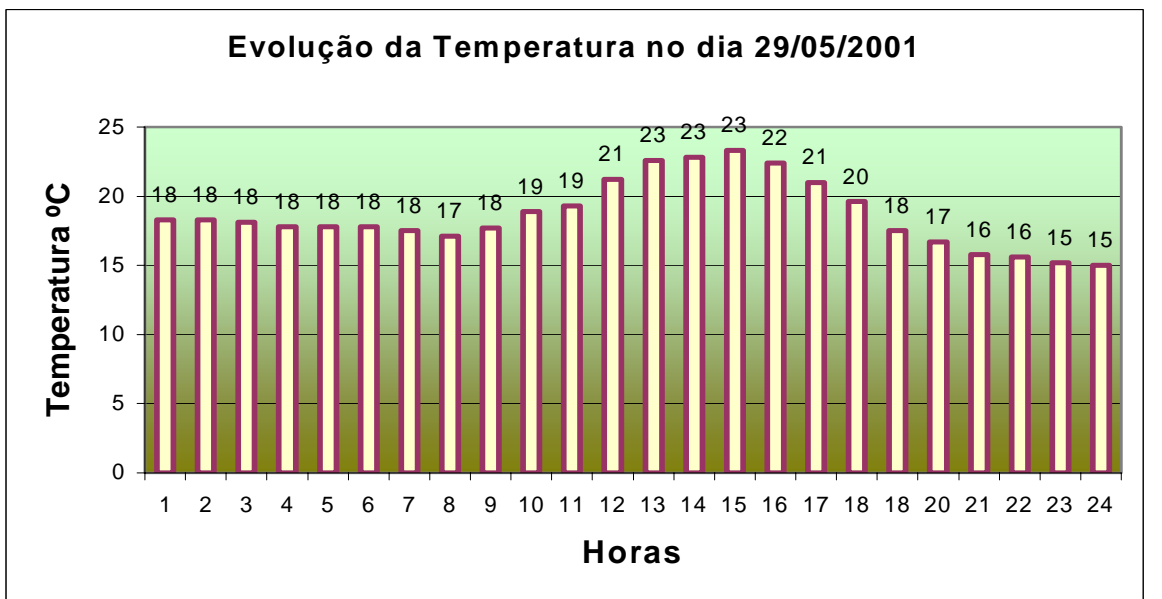


Figura 6.14 – Variação temporal da temperatura do ar para o dia 29/05/2001.

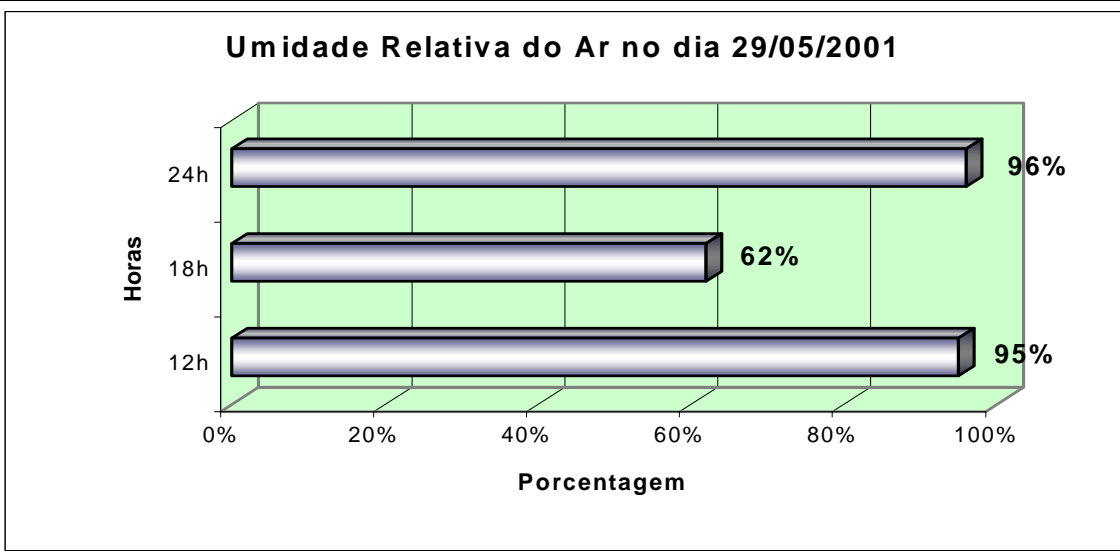


Figura 6.15 – Variação temporal da umidade relativa para o dia 29/05/2001.

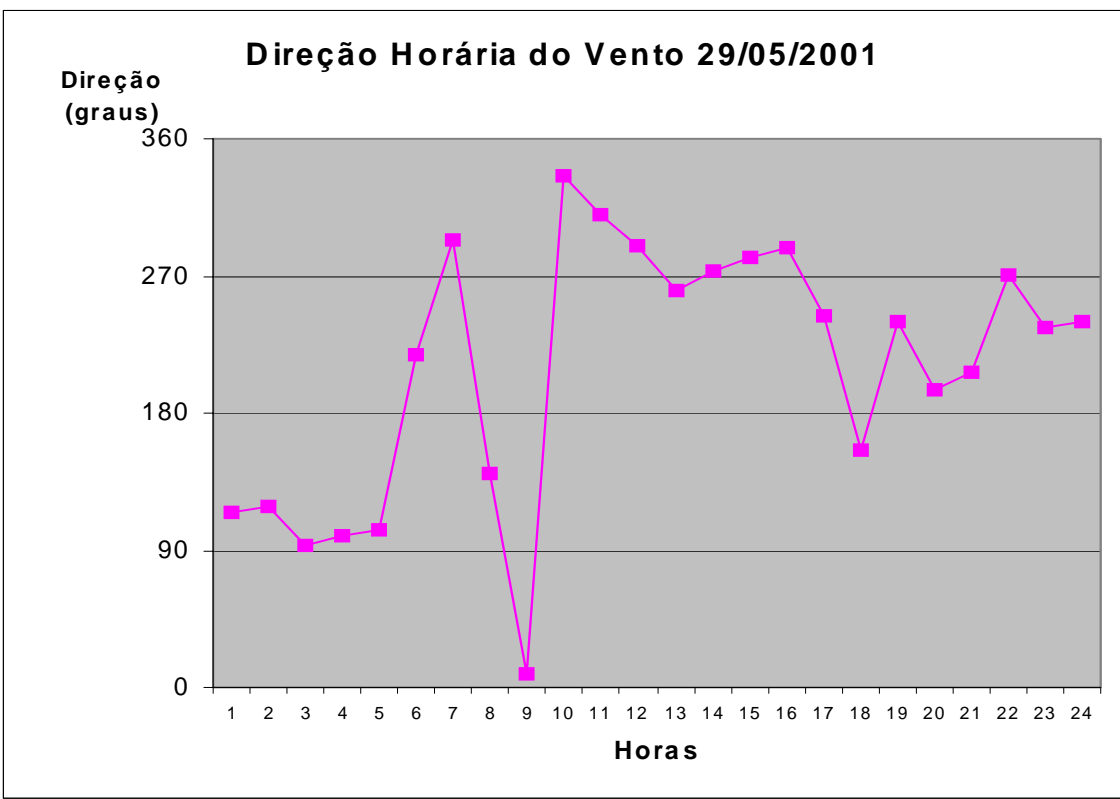


Figura 6.16 – Variação temporal da direção do vento para o dia 29/05/2001.

Tabela 6.4 - Dados do dia 29/05/2001 coletados na estação nº 5 cujas coordenadas UTM são: x = 460506 e y = 6697231 e da grade são: x = - 1944 e y = 2141

<b>POLUENTE</b>	<b>Tempo de Amostragem</b>	<b>Conc Medida Estação</b>	<b>Conc Simulada Estação</b>	<b>Localização Estação</b>	<b>Conc Máxima Simulada</b>	<b>Localização Máxima Concentração</b>
<b>MP</b>	24 h	24,1	0,331	-2000x2000	3,68	2000x-500
<b>SO<sub>2</sub></b>	24 h	8,0	1,332	-2000x2000	22,10	2000x-500
<b>NO - 01</b>	1 h	13,5	0,099	-2000x2000	41,71	-10000x5000
<b>NO - 02</b>	1 h	10,0	1,203	-2000x2000	22,55	-20000x10000
<b>NO - 03</b>	1 h	7,0	0,000	-2000x2000	67,56	-10000x1000
<b>NO - 04</b>	1 h	7,0	0,000	-2000x2000	45,52	-15000x3000
<b>NO - 05</b>	1 h	7,5	0,00003	-2000x2000	36,86	-20000x5000
<b>NO - 06</b>	1 h	8,3	0,000	-2000x2000	18,34	15000x20000
<b>NO - 07</b>	1 h	14,8	0,000	-2000x2000	94,12	5000x-2000
<b>NO - 08</b>	1 h	13,5	64,832	-2000x2000	168,49	-500x1000
<b>NO - 09</b>	1 h	10,5	0,000	-2000x2000	124,11	500x-1000
<b>NO - 10</b>	1 h	15,3	0,000	-2000x2000	129,20	1000x-1000
<b>NO - 11</b>	1 h	16,0	0,000	-2000x2000	117,79	2000x-1000
<b>NO - 12</b>	1 h	17,3	0,000	-2000x2000	144,66	2000x-500
<b>NO - 13</b>	1 h	20,3	0,000	-2000x2000	159,40	2000x500
<b>NO - 14</b>	1 h	16,3	0,000	-2000x2000	78,81	3000x-500
<b>NO - 15</b>	1 h	17,7	0,000	-2000x2000	121,67	3000x-500
<b>NO - 16</b>	1 h	15,8	0,000	-2000x2000	130,97	2000x-500
<b>NO - 17</b>	1 h	18,5	0,000	-2000x2000	138,39	2000x500
<b>NO - 18</b>	1 h	16,0	3,375	-2000x2000	97,74	-2000x5000
<b>NO - 19</b>	1 h	7,5	0,000	-2000x2000	19,82	10000x5000
<b>NO - 20</b>	1 h	10,0	0,000	-2000x2000	31,34	3000x10000
<b>NO - 21</b>	1 h	8,0	0,000	-2000x2000	31,64	10000x20000
<b>NO - 22</b>	1 h	10,3	0,000	-2000x2000	35,03	20000x-500
<b>NO - 23</b>	1 h	7,8	0,000	-2000x2000	35,02	15000x10000
<b>NO - 24</b>	1 h	7,3	0,000	-2000x2000	19,15	10000x5000

Os gráficos a seguir representam as isolinhas de concentração de SO<sub>2</sub> e MP , e mostram os máximos de concentração dos poluentes com a identificação das posições das fontes e da estação receptora no dia analisado(figura 6.17).



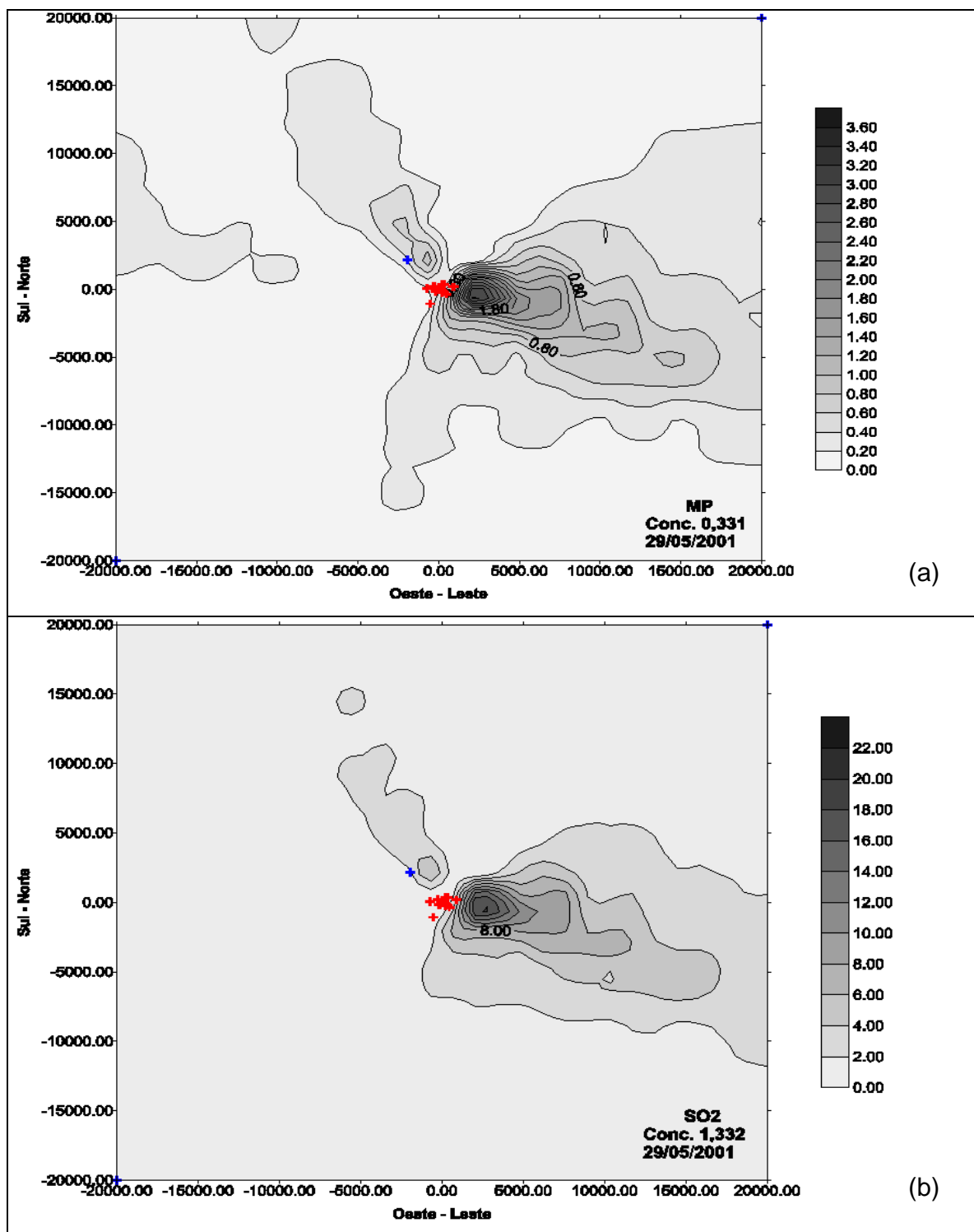


Figura 6.17 - Gráficos de Isolinhas de Concentração representativas para o período de 24 horas. Os pontos em vermelho representam as diferentes fontes de emissão localizadas junto a COPESUL, e em azul é a localização da estação de qualidade do ar para (a) MP e (b) SO<sub>2</sub>.

Os gráficos (figuras 6.18 e 6.19) mostram a análise estatística de comparação entre os valores modelados e medidos com os padrões primário e secundário exigidos pela resolução CONAMA nº 3 de 28/06/1990.

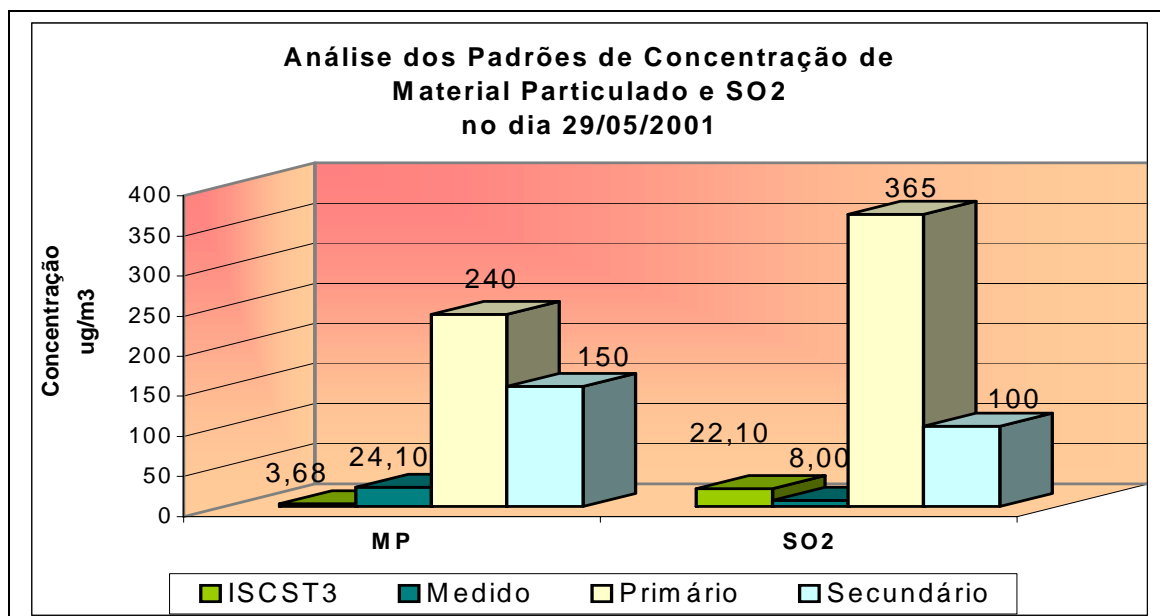


Figura 6.18 – Análise estatística do SO<sub>2</sub> e MP para o dia 29/05/2001.

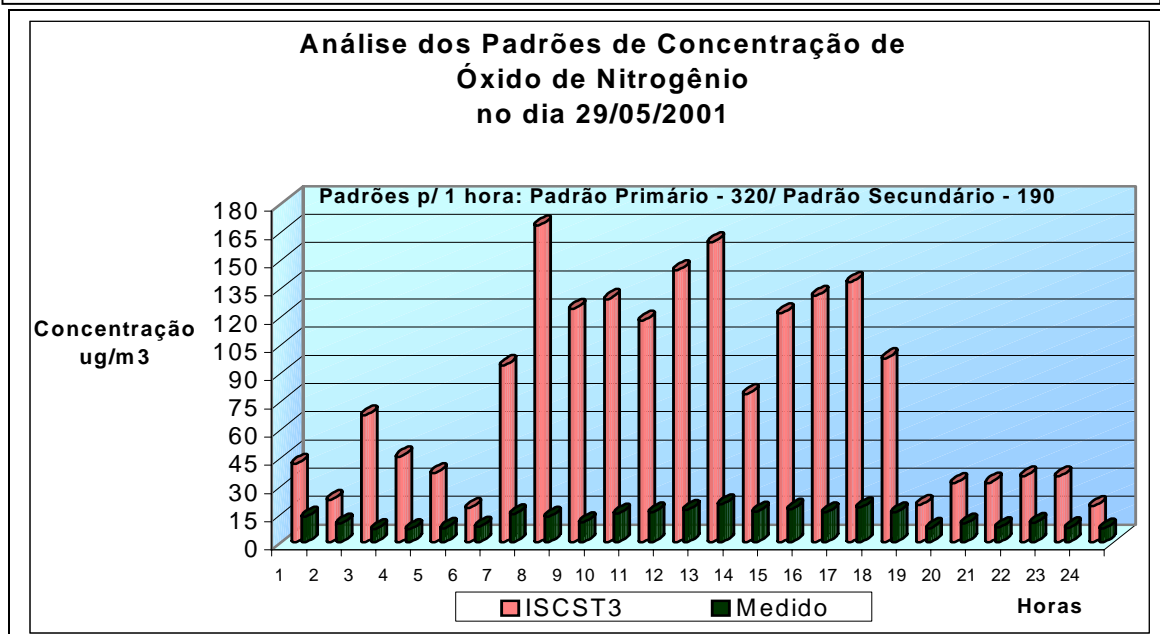


Figura 6.19 – Análise estatística do NO<sub>x</sub> para o dia 29/05/2001.

## 6.5 ANÁLISE DOS RESULTADOS DO DIA 13/08/2001

Os resultados a seguir descrevem as análises meteorológicas e de concentração de contaminantes resultantes do dia 13 de agosto de 2001.

Inicialmente são apresentados os parâmetros meteorológicos utilizados para inicializar o modelo de dispersão, estes parâmetros são: gráfico de velocidade do vento (figura 6.20), direção do vento (figura 6.23), temperatura do ar (figura 6.21) e umidade relativa (figura 6.22). Através dos dados relacionados a velocidade do vento, é possível observar que durante o período de 24 horas a velocidade do vento sofreu pouca variação na região de estudo, ficando esta entre 0,2 a 2,2m/s, sendo que as velocidades mais intensas ocorreram durante o período diurno. Em relação a direção do vento pode-se observar que durante o período de velocidade do vento intensa entre os horários das 11:00 e 17:00 horas, a direção do vento predominante foi de Nordeste, nos demais horários a direção teve variações entre os quadrantes oeste, sudoeste e sudeste. Cabe salientar que durante o período diurno compreendido entre as 11:00 e 18:00 horas, a intensidade do vento foi maior, isto pode estar associado a intensa produção térmica e mecânica ocorrida neste período. Em relação a temperatura pode-se dizer que esta teve variações significativas entre 11°C e 32°C, entre o período das 11:00 as 18:00 horas, o que justifica a produção térmica significativa. Em relação a umidade relativa pode-se dizer que esta variou entre 67% e 84% neste período.

Os resultados obtidos através da modelagem da dispersão mostram uma concentração máxima de MP no valor de 4,81  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  na localização (500x500) enquanto o valor medido na estação nº 3 (2000x 1000) foi de 53,8  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , e o modelado no ponto mais próximo a estação foi da ordem de 0,047  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ .

O resultado obtido através da amostragem de MP, é com certeza devido a emissões de outras fontes localizadas ao redor do amostrador, como as indústrias de 2º geração, ou fontes móveis, visto que as emissões de MP devido as fontes da COPESUL é considerada insignificante. Através dos gráficos de isolinhas de concentração de MP (figura 6.24(a)) observa-se que a estação de qualidade do ar,

marcada na figura com a cor azul, na maior parte do tempo encontra-se afastada da área modelada.

Já o valor de  $\text{SO}_2$  medido na estação nº 3 (2000x1000 ) foi da ordem de  $8,0 \mu\text{g}/\text{m}^3$  e o modelado  $0,326 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , o valor de  $\text{SO}_2$  máximo modelado foi de  $40,70 \mu\text{g}/\text{m}^3$  e ocorreu no ponto de grade (500 x -500). A representação das isolinhas de concentração de  $\text{SO}_2$  estão representadas através da figura 6.24 (b). A emissão de  $\text{SO}_2$  emitida pela COPESUL, também pode ser considerada insignificante, sendo o padrão primário considerado pelo CONAMA da ordem de  $395 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . A figura 6.25 ilustra uma comparação entre os valores de concentração de  $\text{SO}_2$  e MP máximos modelados, amostrados junto a estação de qualidade do ar e os padrões da legislação CONAMA.

Para o  $\text{NO}_x$  o máximo modelado na estação de qualidade do ar localizada em (2000x1000) foi de  $5,147 \mu\text{g}/\text{m}^3$  na 3ª hora, enquanto o máximo modelado foi da ordem de  $219,59 \mu\text{g}/\text{m}^3$  na 10ª hora na localização (-500x500), não ultrapassando o padrão primário permitido pela legislação CONAMA que é de  $320 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , mas ultrapassa o padrão secundário de  $190 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . No estado do Rio Grande do Sul de acordo com código estadual do meio ambiente não é permitido ultrapassar o padrão secundário. Com isso observa-se que o grande problema existente junto a COPESUL são as emissões de  $\text{NO}_x$ , visto que se considerarmos as indústrias de 2ª geração esses valores terão um aumento significativo. Conforme verificamos no gráfico da figura 6.26, os resultados obtidos pela estação de qualidade do ar observa-se que em nenhum horário foi ultrapassado os limites exigidos pelo controle de qualidade do ar.

Através da tabela 6.5, é possível visualizar todos os valores medidos e modelados para o  $\text{SO}_2$ , MP e  $\text{NO}_x$  durante o período de 24 horas do dia 13 de agosto de 2001.

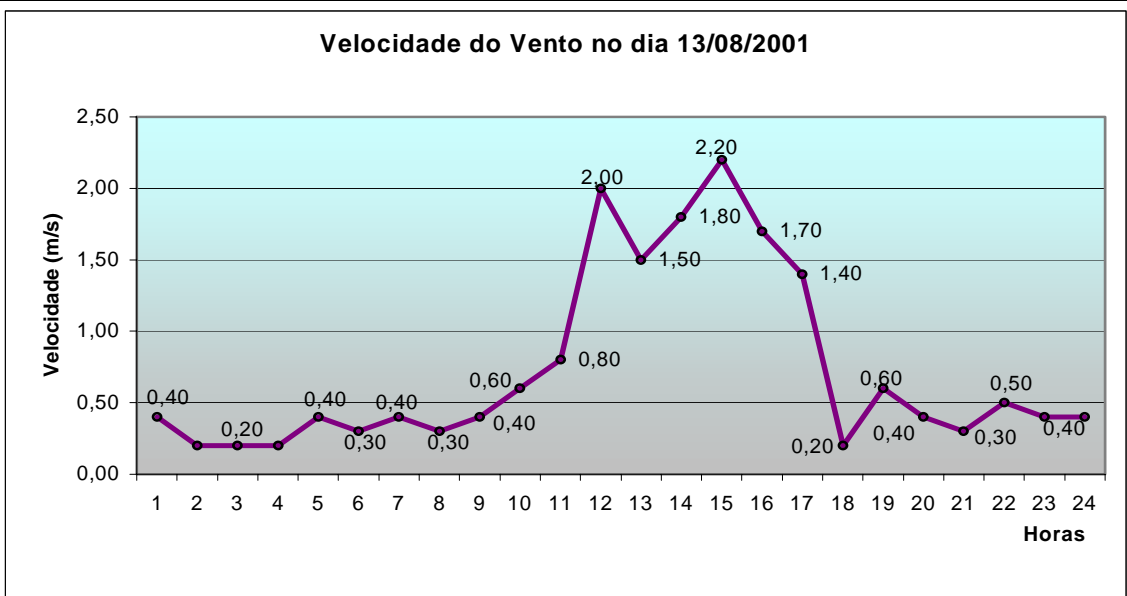


Figura 6.20 – Variação temporal da velocidade do vento para o dia 13/08/2001.

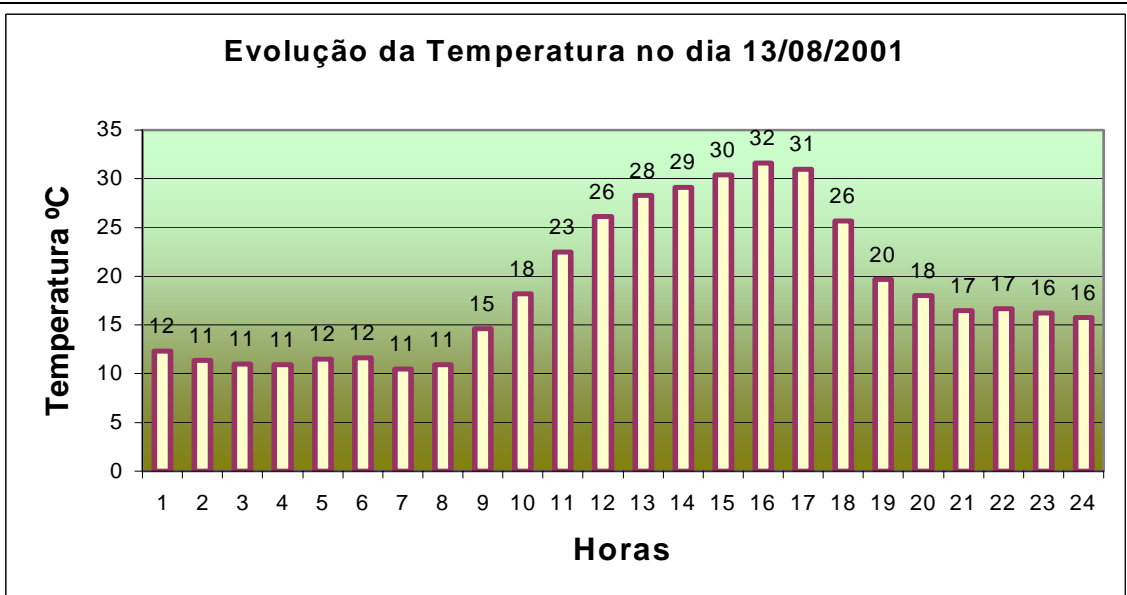


Figura 6.21 – Variação temporal da temperatura do ar para o dia 13/08/2001.

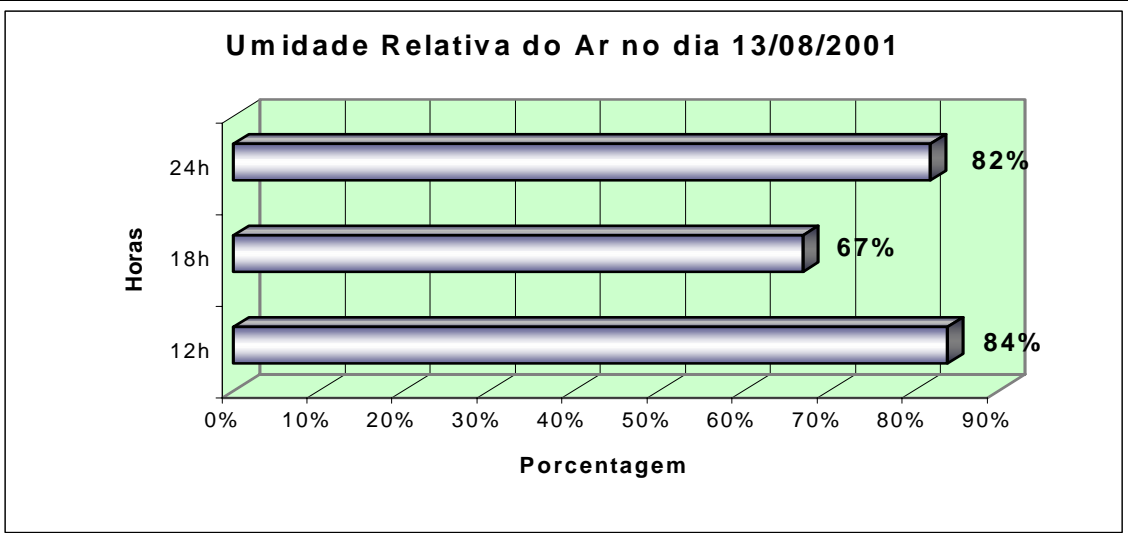


Figura 6.22 – Variação temporal da umidade relativa para o dia 13/08/2001.

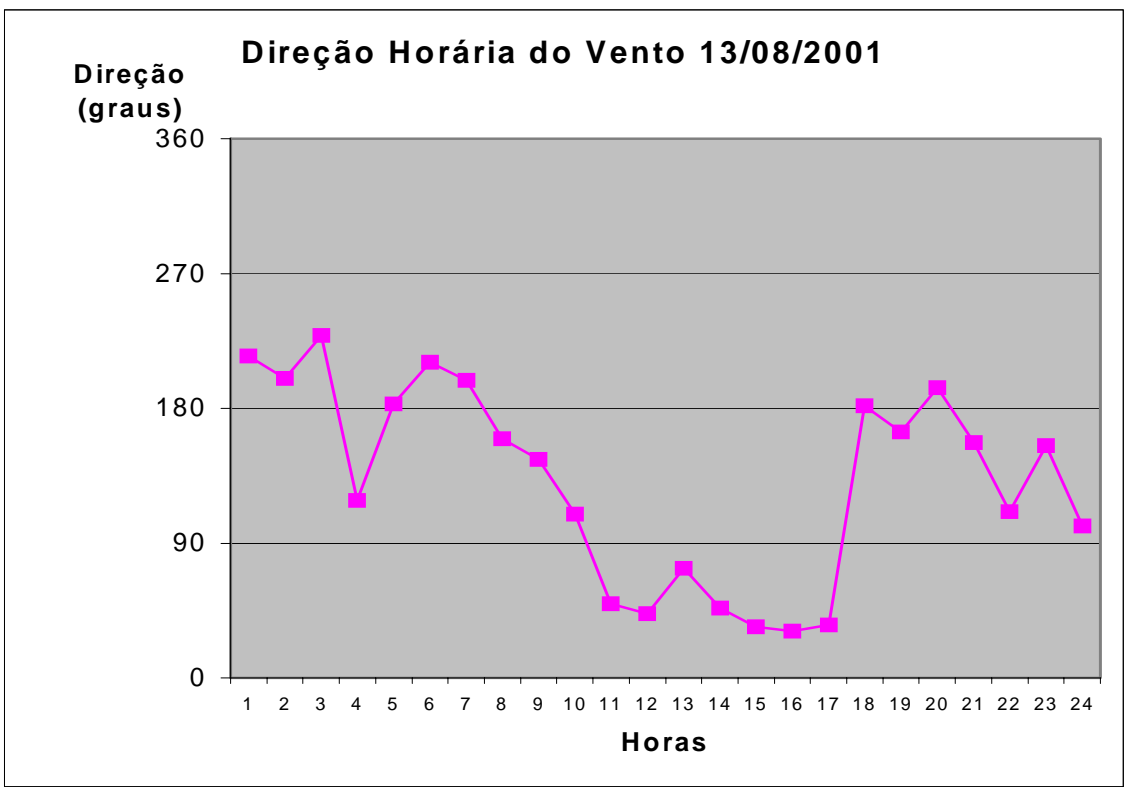


Figura 6.23 – Variação temporal da direção do vento para o dia 13/08/2001.

Tabela 6.5 - Dados do dia 13/08/2001 coletados na estação nº 3 cujas coordenadas UTM são: x = 462498 e y = 6695391 e da grade são: x = 47 e y = 301

<b>POLUENTE</b>	<b>Tempo de Amostragem</b>	<b>Conc Medida Estação</b>	<b>Conc Simulada Estação</b>	<b>Localização Estação</b>	<b>Conc Máxima Simulada</b>	<b>Localização Máxima Concentração</b>
<b>MP</b>	24 h	53,8	0,047	2000x1000	4,81	500x-500
<b>SO<sub>2</sub></b>	24 h	8,0	0,326	2000x1000	40,70	500x-500
<b>NO - 01</b>	1 h	7,0	0,018	2000x1000	33,56	15000x20000
<b>NO - 02</b>	1 h	7,0	0,00002	2000x1000	20,52	5000x15000
<b>NO - 03</b>	1 h	7,0	5,147	2000x1000	19,16	20000x15000
<b>NO - 04</b>	1 h	7,0	0,000	2000x1000	25,54	-20000x10000
<b>NO - 05</b>	1 h	7,0		2000x1000		
<b>NO - 06</b>	1 h	7,0		2000x1000		
<b>NO - 07</b>	1 h	7,0	3,454	2000x1000	174,63	500x1000
<b>NO - 08</b>	1 h	7,0	0,000	2000x1000	119,37	-500x2000
<b>NO - 09</b>	1 h	8,5		2000x1000		
<b>NO - 10</b>	1 h	11,8	0,000	2000x1000	219,59	-500x500
<b>NO - 11</b>	1 h	11,5	0,000	2000x1000	185,17	-500x-1000
<b>NO - 12</b>	1 h	12,3	0,000	2000x1000	99,26	-500x-1000
<b>NO - 13</b>	1 h	17,3	0,000	2000x1000	146,87	-1000x-500
<b>NO - 14</b>	1 h	17,5	0,000	2000x1000	106,98	-500x-1000
<b>NO - 15</b>	1 h	16,3	0,000	2000x1000	101,75	500x-500
<b>NO - 16</b>	1 h	20,3	0,000	2000x1000	105,98	500x-500
<b>NO - 17</b>	1 h	22,8	0,000	2000x1000	118,80	-500x-1000
<b>NO - 18</b>	1 h	25,8	0,000	2000x1000	108,42	500x5000
<b>NO - 19</b>	1 h	29,8	0,000	2000x1000	103,68	-1000x5000
<b>NO - 20</b>	1 h	29,0	0,000	2000x1000	32,76	5000x20000
<b>NO - 21</b>	1 h	23,3	0,000	2000x1000	18,90	-5000x15000
<b>NO - 22</b>	1 h	24,3		2000x1000		
<b>NO - 23</b>	1 h	22,3	0,000	2000x1000	26,31	-10000x20000
<b>NO - 24</b>	1 h	21,3	0,000	2000x1000	35,32	-15000x3000

Os gráficos a seguir representam as isolinhas de concentração de SO<sub>2</sub> e MP, e mostram os máximos de concentração dos poluentes com a identificação das posições das fontes e da estação receptora no dia analisado(figura 6.24).

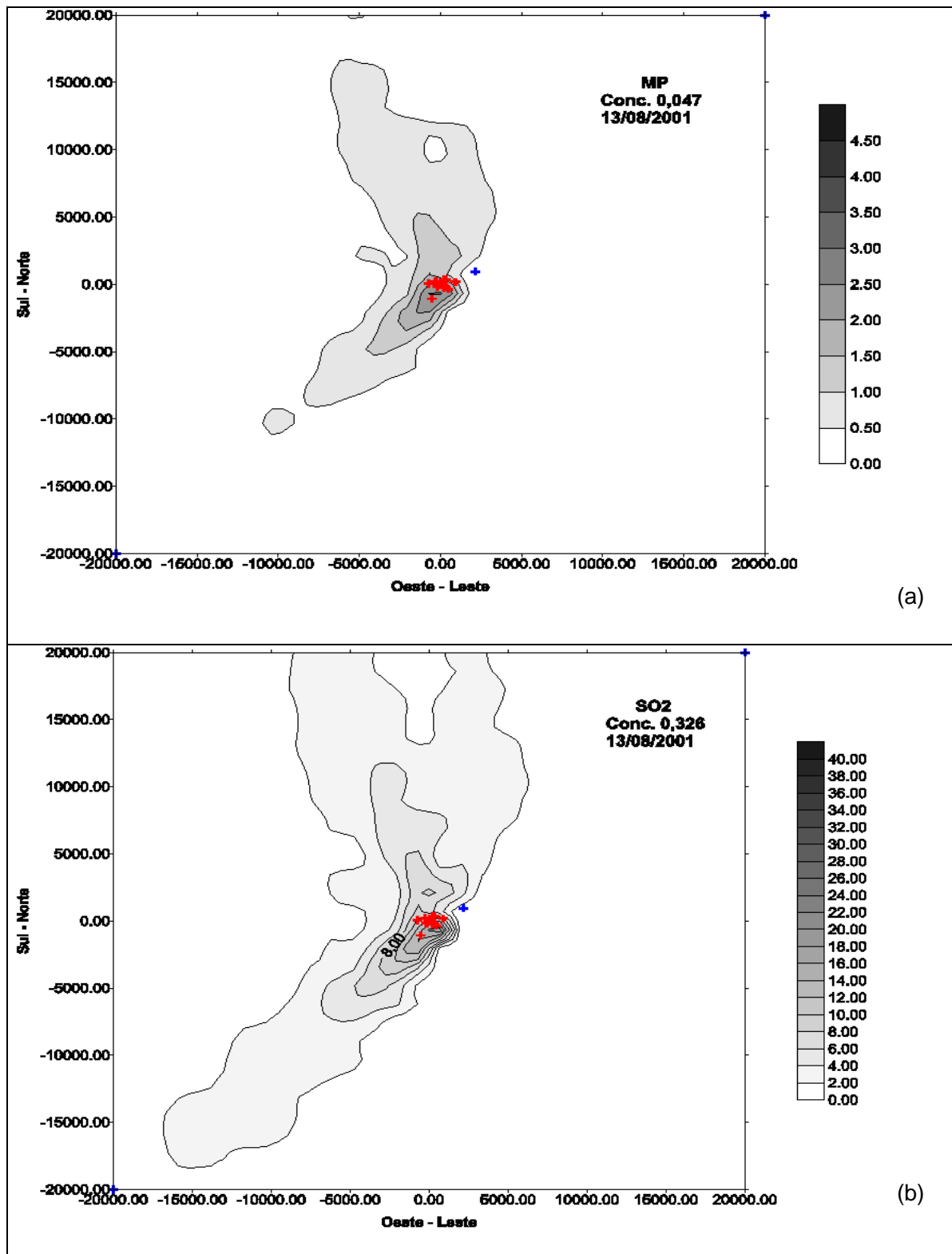


Figura 6.24 -Gráficos de Isolinhas de Concentração representativas para o período médio de 24 horas.Os pontos em vermelho representam as diferentes fontes de emissão localizadas junto a COPESUL, e em azul é a localização da estação de qualidade do ar para (a) MP e (b) SO<sub>2</sub>.



Os gráficos (figuras 6.25 e 6.26 ) mostram a análise estatística de comparação entre os valores modelados e medidos com os padrões primário e secundário exigidos pela resolução CONAMA nº 3 de 28/06/1990.

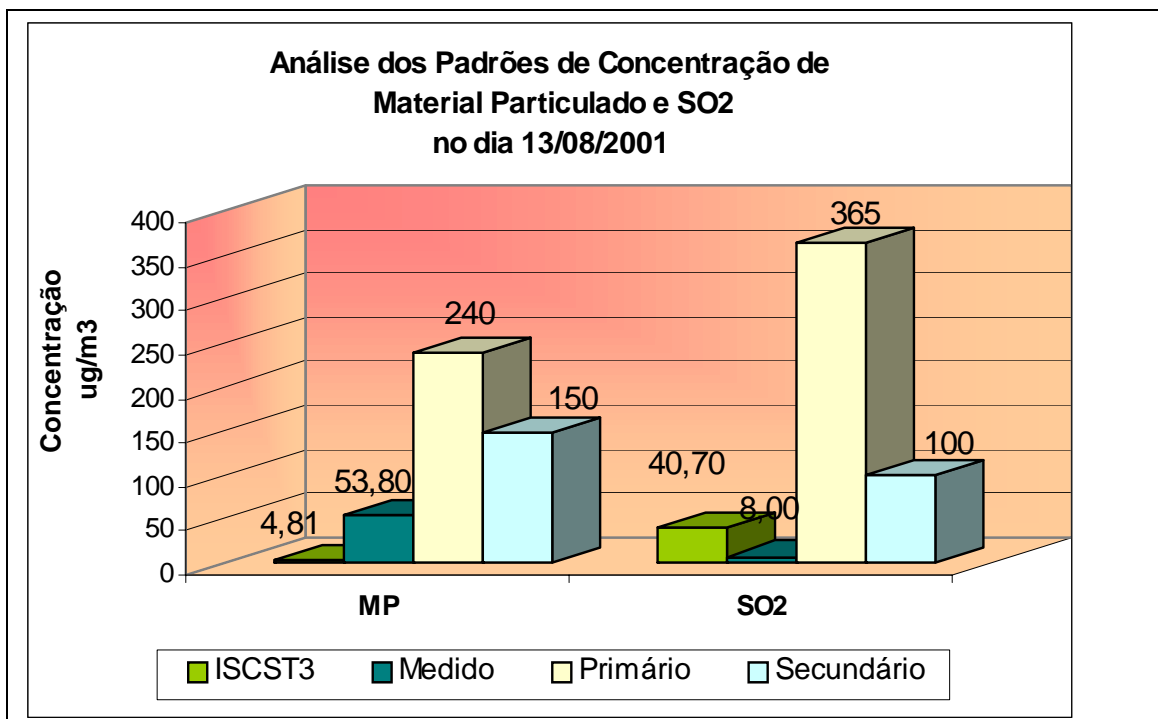


Figura 6.25 – Análise estatística do SO<sub>2</sub> e MP para o dia 13/08/2001.

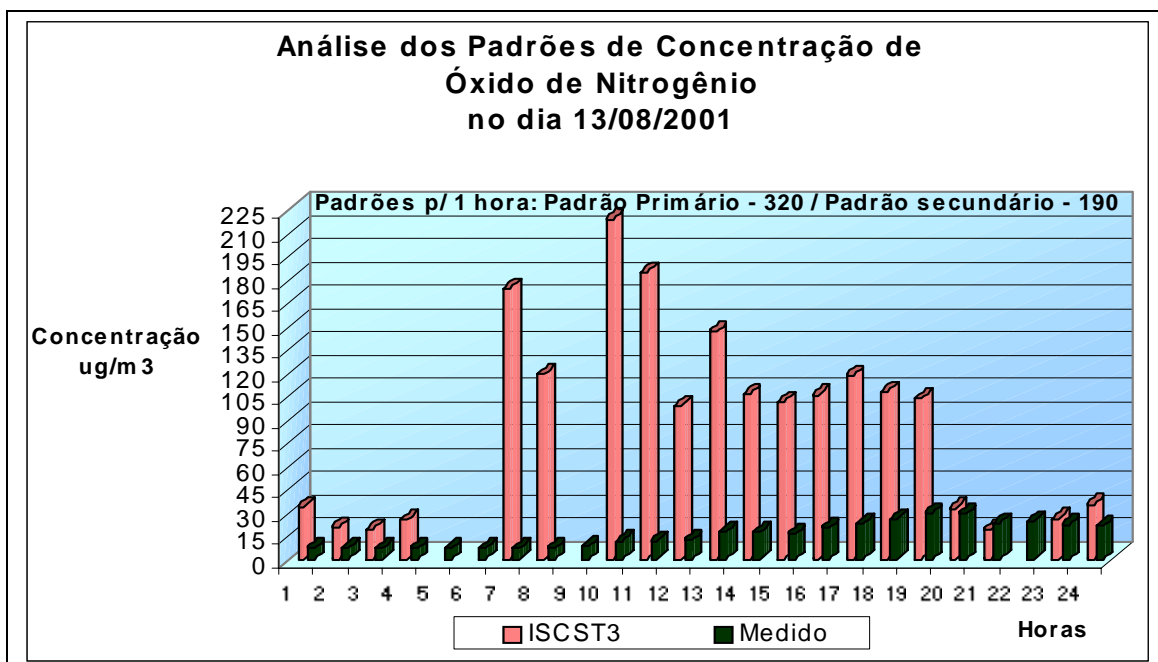


Figura 6.26 – Análise estatística do NO<sub>x</sub> para o dia 13/08/2001.

## 6.6 ANÁLISE DOS RESULTADOS DO DIA 22/09/2001

Os resultados a seguir descrevem as análises meteorológicas e de concentração de contaminantes resultantes do dia 22 de setembro de 2001.

São apresentados através de gráficos os parâmetros meteorológicos utilizados para inicialização do modelo de dispersão. Através dos gráficos de velocidade do vento (figura 6.27), direção do vento (figura 6.30), temperatura do ar (figura 6.28), umidade relativa do ar (figura 6.29), podemos analisar as características do dia. Os gráficos de velocidade do vento (figura 6.27) e de direção do vento (figura 6.30) mostram que durante o período diurno a velocidade variou de 1,7 a 2,6 m/s sendo que a direção esteve predominantemente no quadrante entre norte e leste. A temperatura do ar (figura 6.28) variou entre 15°C e 25°C, sendo que no período diurno compreendido entre 10 e 15 horas se manteve entre 23°C e 25°C, mostrando uma produção térmica significativa, enquanto a umidade relativa do ar (figura 6.29), variou entre 71% e 90%.

Os resultados obtidos através da modelagem de dispersão mostram uma concentração máxima de MP no valor de 5,44  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  na localização (-500x-1000) enquanto o valor medido na estação nº2 (2000x 500) foi de 52,2  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , e o modelado 0,00  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ .

O resultado obtido através da amostragem de MP é devido ao fato de existirem outras fontes na região. Através dos gráficos de isolinhas de concentração de MP (figura 6.31(a)) observa-se que a estação de qualidade do ar, marcada na figura com a cor azul, na maior parte do tempo encontra-se afastada da área modelada.

Já o valor de  $\text{SO}_2$  medido na estação nº 2 (2000x500) foi da ordem 8,0  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  e o valor modelado 0,00  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  comprovam que a emissão de  $\text{SO}_2$  emitida pela COPESUL é insignificante, levando em consideração que o padrão primário CONAMA é da ordem de 395  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . A representação das isolinhas de concentração de  $\text{SO}_2$  estão representadas através da figura 6.31(b). A figura 6.32 ilustra uma comparação entre os valores de concentração de  $\text{SO}_2$  e MP máximos

modelados, amostrados junto a estação de qualidade do ar e os padrões da legislação CONAMA.

Para o  $\text{NO}_x$ , o máximo medido na estação de qualidade do ar localizada em (2000x500) foi de  $16,0 \mu\text{g}/\text{m}^3$  na 3ª hora, enquanto o máximo modelado foi da ordem de  $167,99 \mu\text{g}/\text{m}^3$  na 13ª hora na localização (-500x-1000), sendo que estes valores não ultrapassam o padrão primário de  $320 \mu\text{g}/\text{m}^3$  nem o secundário que é de  $190 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , estando dentro dos limites exigidos pelo controle de qualidade do ar, conforme verificamos no gráfico da figura 6.33.

Através da tabela 6.6, é possível visualizar todos os valores medidos e modelados para  $\text{SO}_2$ , MP e  $\text{NO}_x$  durante o período de 24 horas do dia 22 de setembro de 2001.

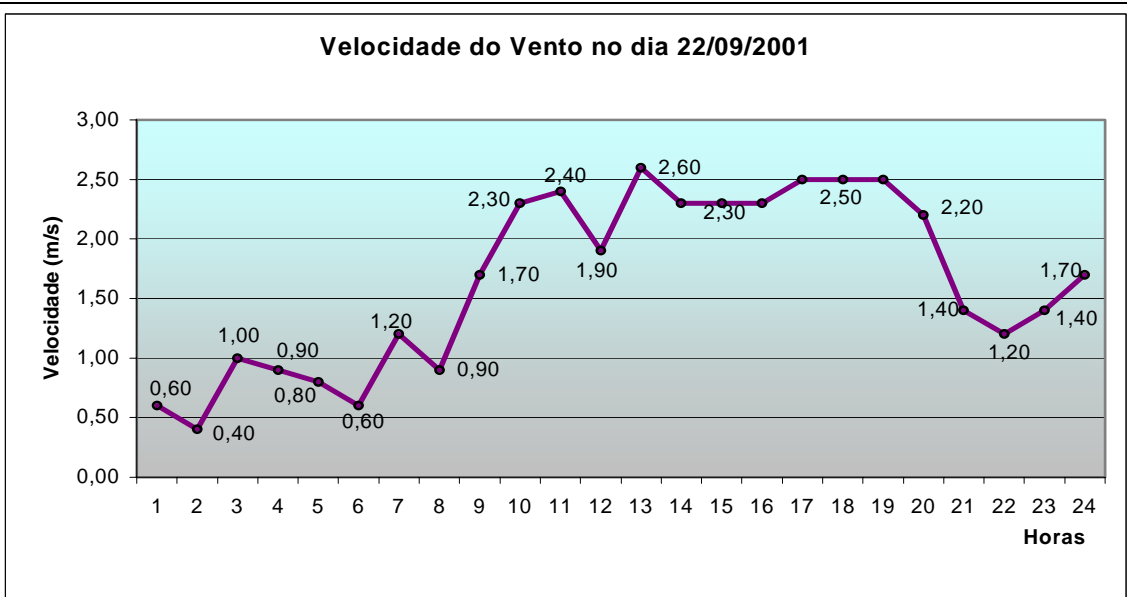


Figura 6.27 – Variação temporal da velocidade do vento para o dia 22/09/2001.

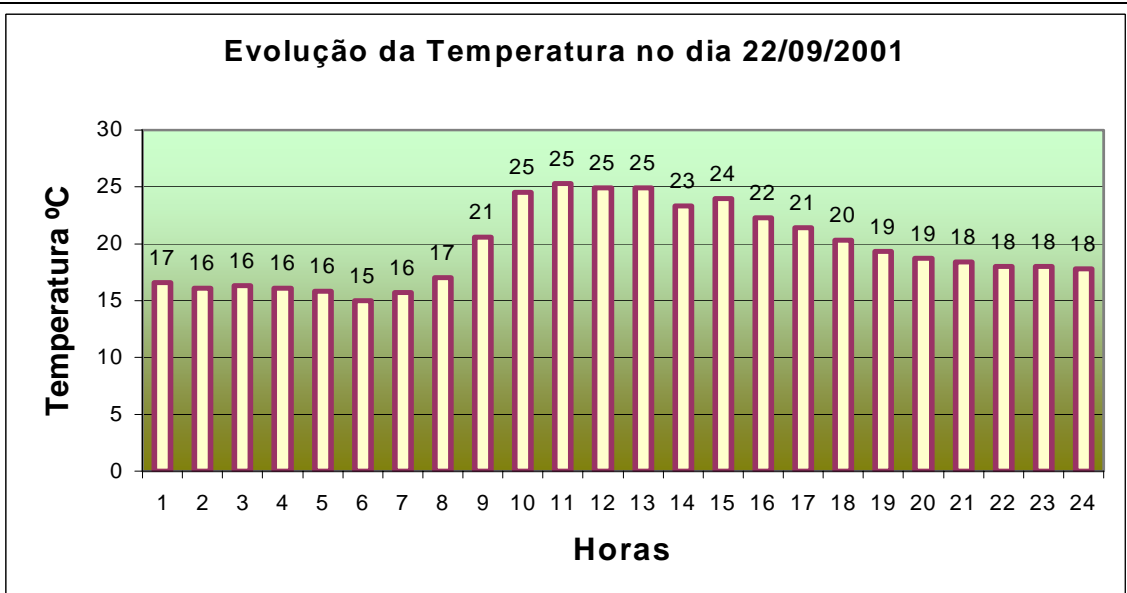


Figura 6.28 – Variação temporal da temperatura do ar para o dia 22/09/2001.

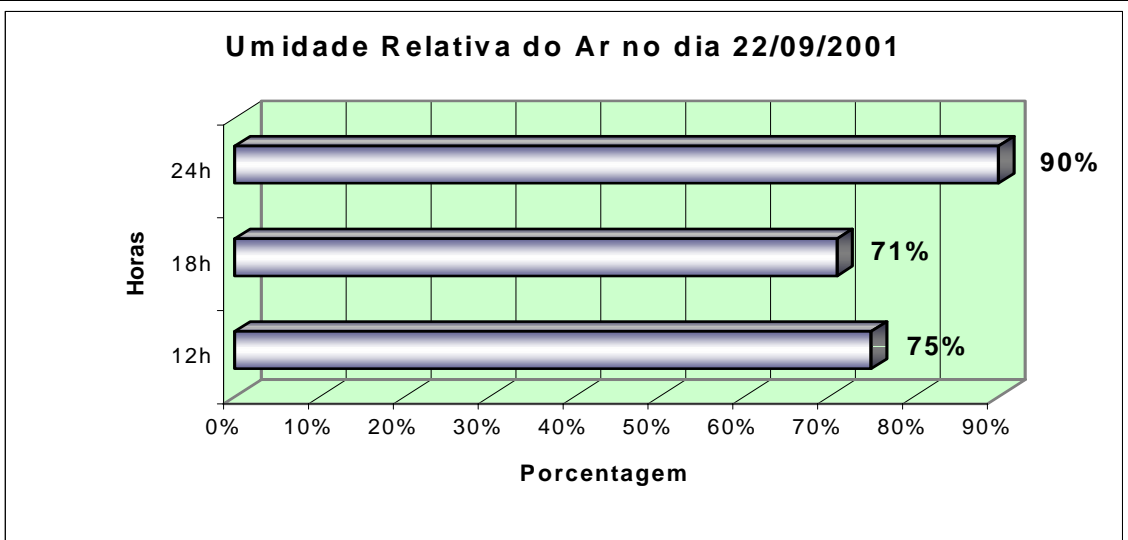


Figura 6.29 – Variação temporal da umidade relativa para o dia 22/09/2001.

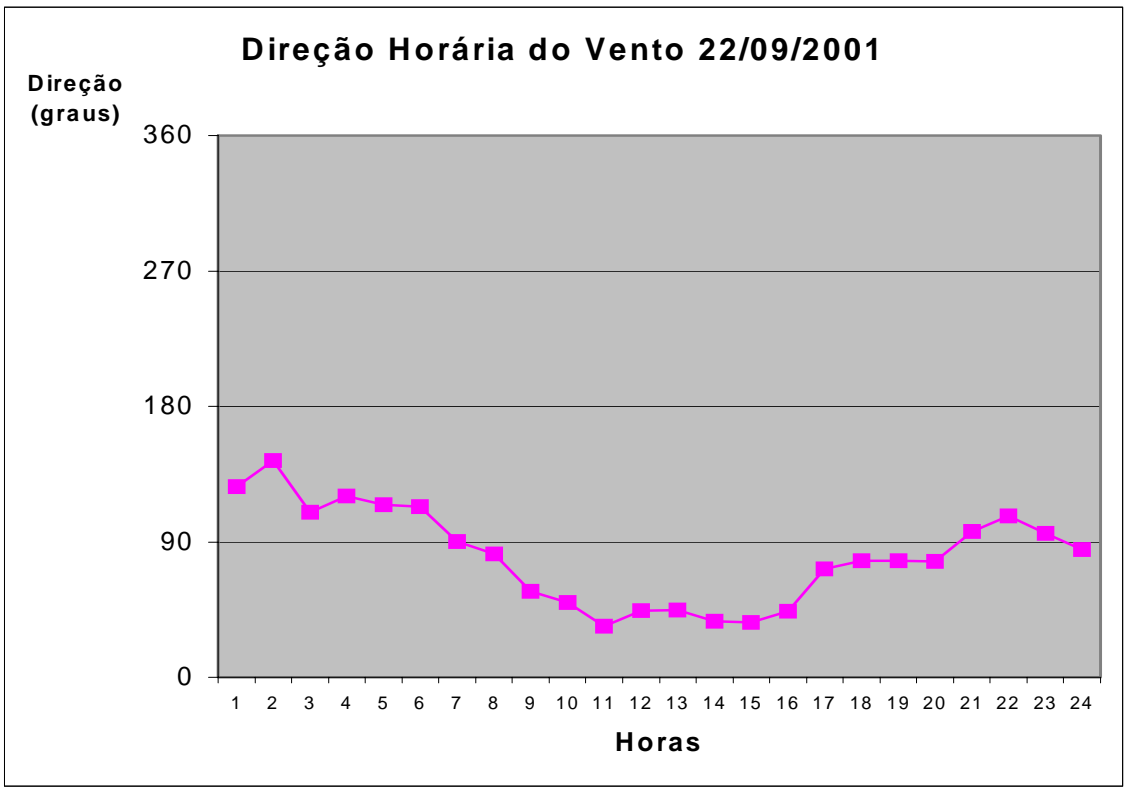


Figura 6.30 – Variação temporal da direção do vento para o dia 22/09/2001.

Tabela 6.6 - Dados do dia 22/09/2001 coletados na estação nº 2 cujas coordenadas UTM são: x = 464564 e y = 6695213 e da grade são: x = 2113 e y = 124

<b>POLUENTE</b>	<b>Tempo de Amostragem</b>	<b>Conc Medida Estação</b>	<b>Conc Simulada Estação</b>	<b>Localização Estação</b>	<b>Conc Máxima Simulada</b>	<b>Localização Máxima Concentração</b>
<b>MP</b>	24 h	52,2	0,000	2000X500	5,44	-500x-1000
<b>SO<sub>2</sub></b>	24 h	8,0	0,000	2000X500	25,53	-500x-1000
<b>NO - 01</b>	1 h	15,5	0,000	2000X500	31,17	-20000x15000
<b>NO - 02</b>	1 h	13,3	0,000	2000X500	35,40	-10000x15000
<b>NO - 03</b>	1 h	16,0	0,000	2000X500	31,41	-15000x5000
<b>NO - 04</b>	1 h	13,0	0,000	2000X500	40,88	-15000x10000
<b>NO - 05</b>	1 h	10,8	0,000	2000X500	39,42	-20000x10000
<b>NO - 06</b>	1 h	9,8	0,000	2000X500	31,34	-20000x10000
<b>NO - 07</b>	1 h	12,5	0,000	2000X500	92,84	-5000x500
<b>NO - 08</b>	1 h	11,5	0,000	2000X500		
<b>NO - 09</b>	1 h	13,0	0,000	2000X500		
<b>NO - 10</b>	1 h	9,0	0,000	2000X500	85,81	-500x-500
<b>NO - 11</b>	1 h	7,0			96,03	500x-500
<b>NO - 12</b>	1 h	7,0	0,000	2000X500	104,03	-500x-1000
<b>NO - 13</b>	1 h	7,0	0,000	2000X500	167,99	-500x-1000
<b>NO - 14</b>	1 h	7,0	0,000	2000X500	150,76	-500x-1000
<b>NO - 15</b>	1 h	7,0	0,000	2000X500	147,32	-500x-1000
<b>NO - 16</b>	1 h	7,0	0,000	2000X500	164,10	-500x-1000
<b>NO - 17</b>	1 h	7,8	0,000	2000X500	159,87	-1000x-500
<b>NO - 18</b>	1 h	8,3	0,000	2000X500	135,67	-2000x-500
<b>NO - 19</b>	1 h	7,5	0,000	2000X500	86,71	-5000x-1000
<b>NO - 20</b>	1 h	10,8	0,000	2000X500	79,97	-5000x-1000
<b>NO - 21</b>	1 h	8,8	0,000	2000X500	62,52	-15000x2000
<b>NO - 22</b>	1 h	8,3	0,000	2000X500	56,99	-15000x5000
<b>NO - 23</b>	1 h	9,3	0,000	2000X500	62,08	-10000x1000
<b>NO - 24</b>	1 h	10,0	0,000	2000X500	72,24	-10000x-1000

Os gráficos a seguir representam as isolinhas de concentração de SO<sub>2</sub> e MP, e mostram os máximos de concentração dos poluentes com a identificação das posições das fontes e da estação receptora no dia analisado(figura 6.31).

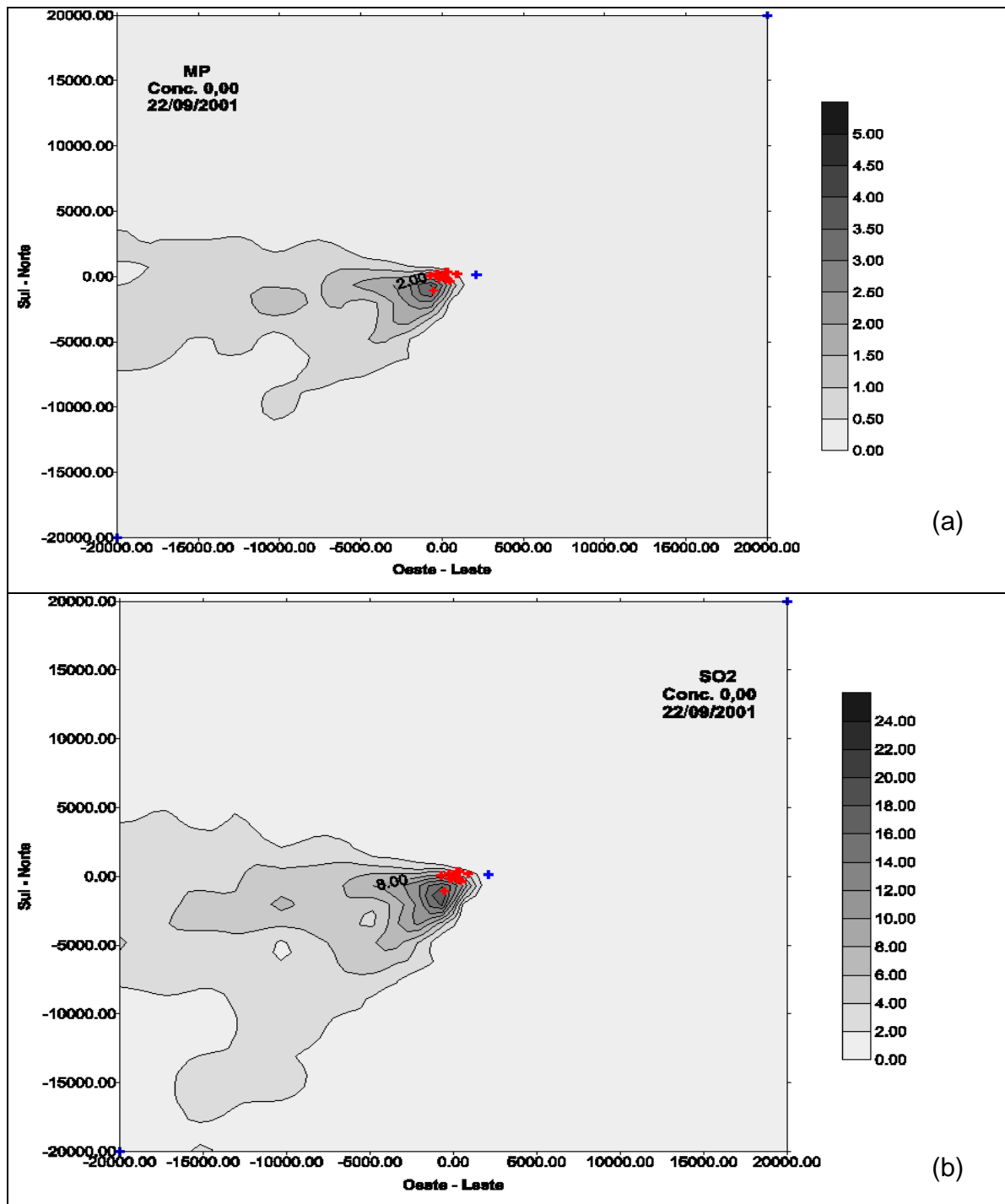


Figura 6.31 - Gráficos de Isolinhas de Concentração representativas para o período médio de 24 horas. Os pontos em vermelho representam as diferentes fontes de emissão localizadas junto a COPESUL, e em azul é a localização da estação de qualidade do ar para (a) MP e (b)SO<sub>2</sub>.

Os gráficos (figuras 6.32 e 6.33) mostram a análise estatística de comparação entre os valores modelados e medidos com os padrões primário e secundário exigidos pela resolução CONAMA nº 3 de 28/06/1990.

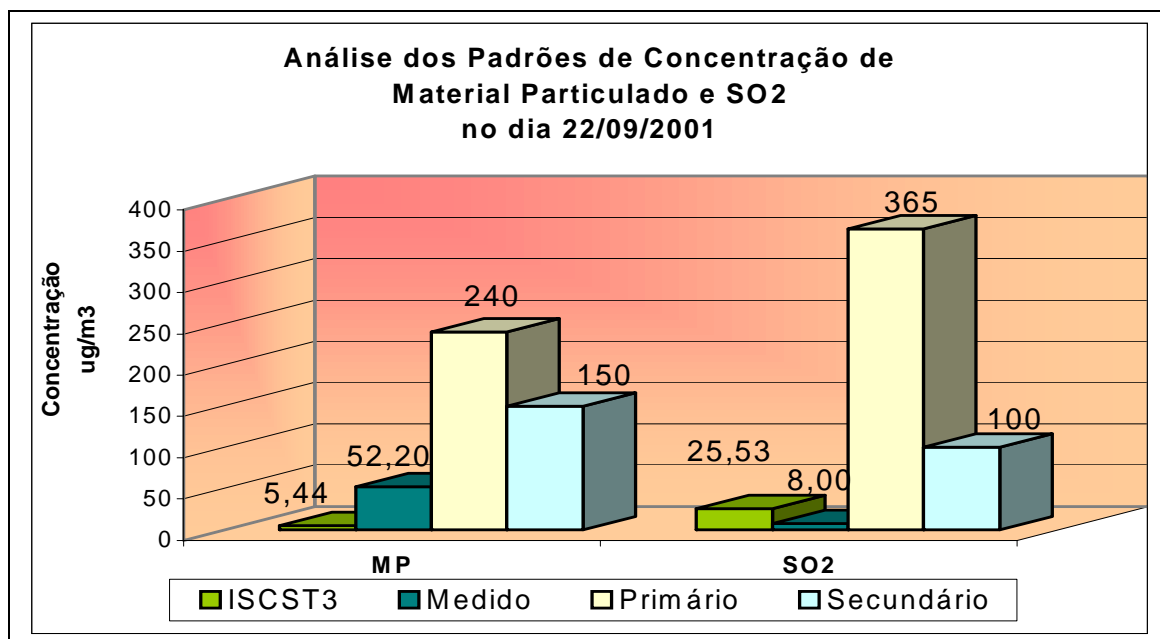


Figura 6.32 – Análise estatística do SO<sub>2</sub> e MP para o dia 22/09/2001.

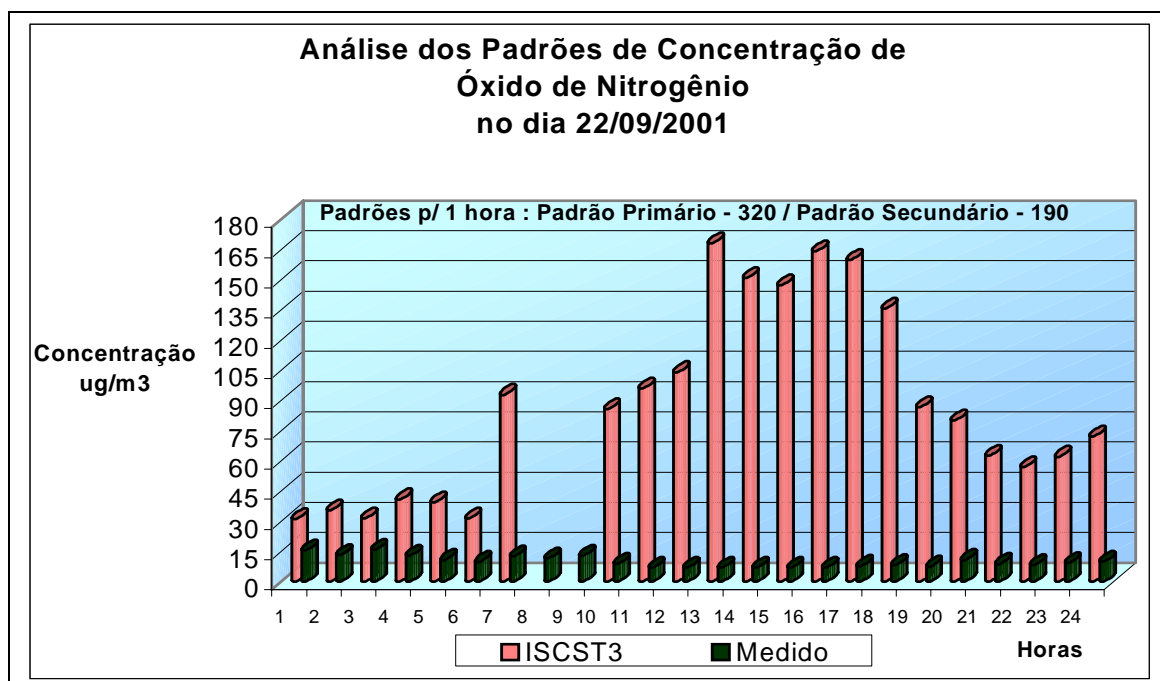


Figura 6.33 – Análise estatística do NO<sub>x</sub> para o dia 22/09/2001.



## 6.7 ANÁLISE DOS RESULTADOS DO DIA 06/10/2001

Os resultados a seguir descrevem as análises meteorológicas e de concentração de contaminantes resultantes do dia 06 de outubro de 2001.

Inicialmente são apresentados os parâmetros meteorológicos utilizados para inicializar o modelo de dispersão, estes parâmetros são: gráfico de velocidade do vento( figura 6.34), direção do vento( figura 6.37) , temperatura do ar ( figura 6.35) e umidade relativa (figura 6.36). Através dos dados relacionados a velocidade do vento, é possível observar que durante o período de 24 horas a velocidade do vento sofreu pouca variação na região de estudo, ficando esta entre 1,2 a 2,1 m/s. Em relação a direção do vento pode-se observar que durante todo o período a direção foi predominantemente leste. Em relação a temperatura pode-se dizer que esta teve variação entre 17°C e 27°C, observando-se no período da 9 horas às 18 horas variação entre 20°C e 27°C, o que justifica uma produção térmica significativa. Em relação a umidade relativa pode-se dizer que esta variou entre 75% e 92%.

Os resultados obtidos através da modelagem mostram uma concentração máxima de MP no valor de 3,64  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  na localização (-3000x500) enquanto o valor medido na estação nº 5 (-2000x 2000) foi de 14,2  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , e o modelado 0,023  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ .

O resultado obtido através da amostragem de MP, é com certeza devido a emissões de outras fontes localizadas ao redor do amostrador, como já foi observado nos outros dias escolhidos para modelagem. Através dos gráficos de isolinhas de concentração de MP (figura 6.38(a)) observa-se que a estação de qualidade do ar, marcada na figura com a cor azul, na maior parte do tempo encontra-se fora da área de maior concentração do poluente.

Já o valor de  $\text{SO}_2$  medido na estação nº 5 (-2000x2000 ) foi de 8,0  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  e o modelado 0,190  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  comprovam que a emissão de  $\text{SO}_2$  não é relevante, levando em consideração que o padrão primário é 395  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  conforme mostrado na figura 6.39, a qual mostra o gráfico comparativo dos padrões CONAMA com os máximos modelados e medidos. O valor de  $\text{SO}_2$  máximo modelado foi de 20,13

$\mu\text{g}/\text{m}^3$  na localização (-2000x500). A representação das isolinhas de concentração de  $\text{SO}_2$  estão representadas através da figura 6.38(b).

Para o  $\text{NO}_x$  o máximo modelado na estação de qualidade do ar localizada em (-2000x2000) foi  $1,1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , enquanto o máximo modelado foi da ordem de  $153,97 \mu\text{g}/\text{m}^3$  na 16ª hora na localização (-500x-500), não ultrapassando o padrão primário de  $320 \mu\text{g}/\text{m}^3$  nem o secundário de  $190 \mu\text{g}/\text{m}^3$  permitido pela legislação CONAMA, conforme verificamos no gráfico da figura 6.40, estando dentro dos limites exigidos pelo controle de qualidade do ar.

Através da tabela 6.7, é possível visualizar todos os valores medidos e modelados para o  $\text{SO}_2$ , MP e  $\text{NO}_x$  durante o período de 24 horas do dia 06 de outubro de 2001.

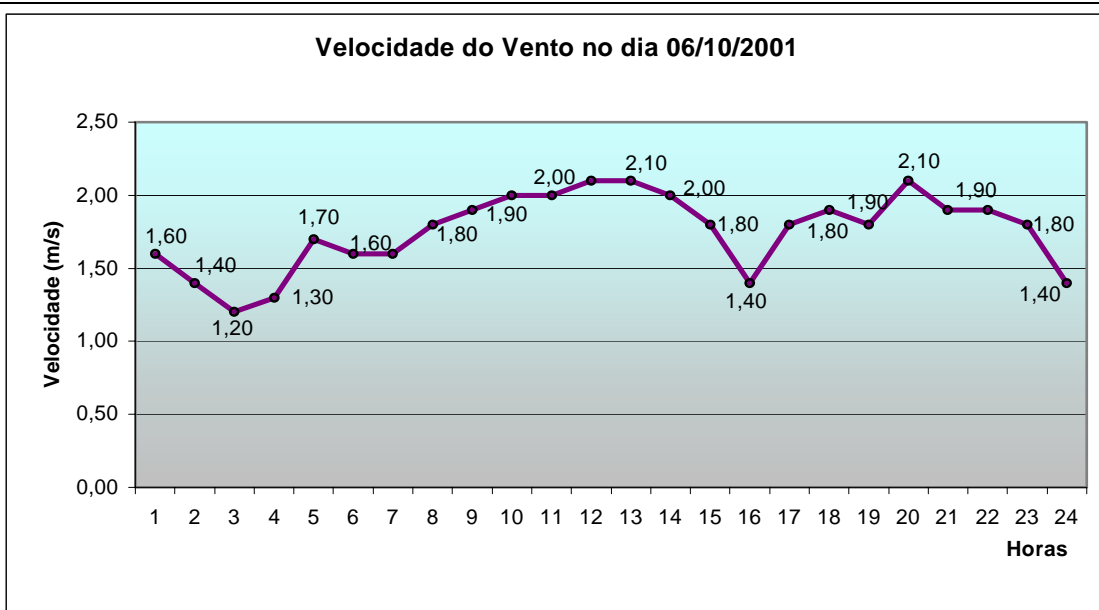


Figura 6.34 – Variação temporal da velocidade do vento para o dia 06/10/2001.

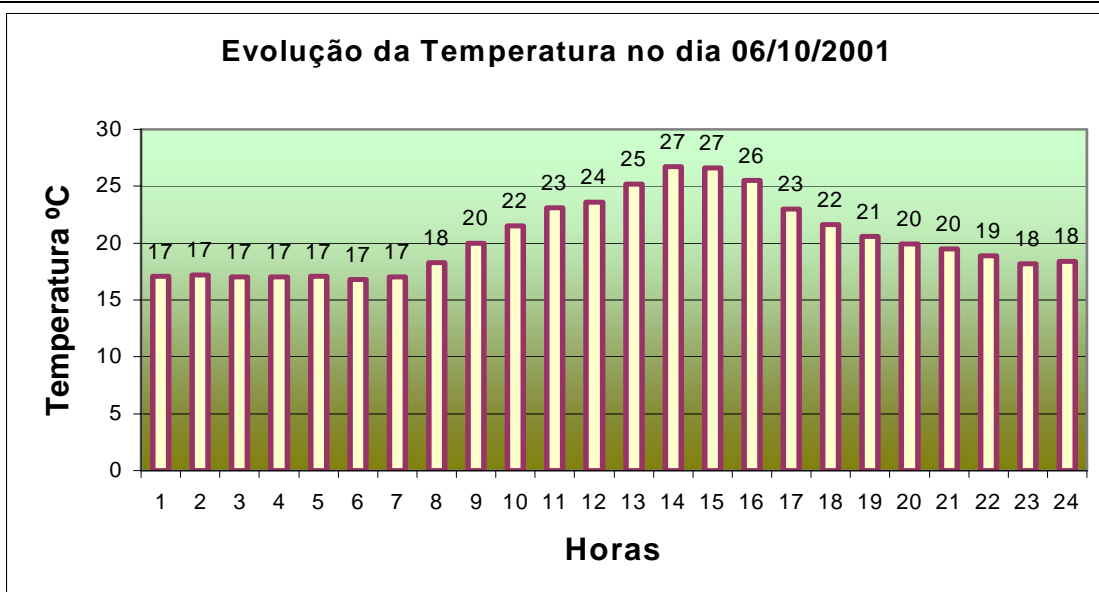


Figura 6.35 – Variação temporal da temperatura do ar para o dia 06/10/2001.

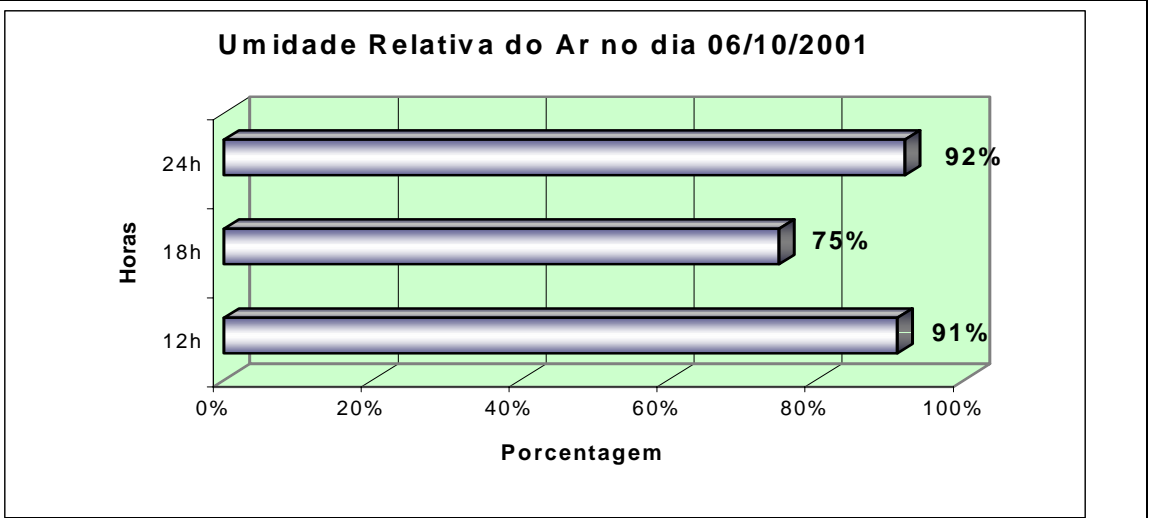


Figura 6.36 – Variação temporal da umidade relativa para o dia 06/10/2001.

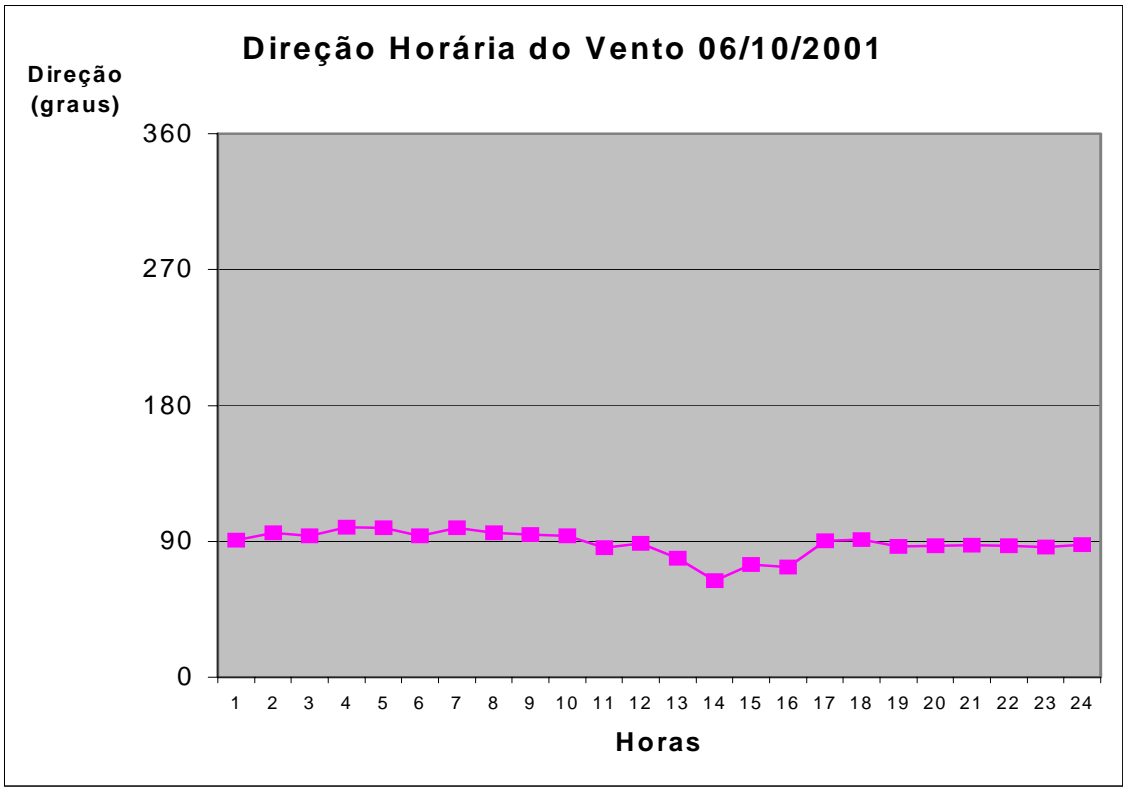


Figura 6.37 – Variação temporal da direção do vento para o dia 06/10/2001.

Tabela 6.7 - Dados do dia 06/10/2001 coletados na estação nº 5 cujas coordenadas UTM são: x = 460506 e y = 6697231 e da grade são: x = - 1944 e y = 2141

<b>POLUENTE</b>	<b>Tempo de Amostragem</b>	<b>Conc Medida Estação</b>	<b>Conc Simulada Estação</b>	<b>Localização Estação</b>	<b>Conc Máxima Simulada</b>	<b>Localização Máxima Concentração</b>
<b>MP</b>	24 h	14,2	0,023	-2000x2000	3,64	-3000x500
<b>SO<sub>2</sub></b>	24 h	8,0	0,190	-2000x2000	20,13	-2000x500
<b>NO - 01</b>	1 h	7,0	0,000	-2000x2000	72,50	-10000x500
<b>NO - 02</b>	1 h	7,0	0,000	-2000x2000	61,66	-10000x1000
<b>NO - 03</b>	1 h	7,0	0,000	-2000x2000	59,27	-10000x1000
<b>NO - 04</b>	1 h	7,0	0,000	-2000x2000	63,82	-10000x2000
<b>NO - 05</b>	1 h	7,0	0,000	-2000x2000	67,84	-10000x2000
<b>NO - 06</b>	1 h	7,0	0,000	-2000x2000	72,67	-10000x1000
<b>NO - 07</b>	1 h	7,0	0,003	-2000x2000	124,13	-3000x500
<b>NO - 08</b>	1 h	7,0	1,132	-2000x2000	137,77	-500x500
<b>NO - 09</b>	1 h	7,0	0,476	-2000x2000	118,77	-500x500
<b>NO - 10</b>	1 h	7,0	0,482	-2000x2000	115,73	-500x500
<b>NO - 11</b>	1 h	7,0	0,018	-2000x2000	64,34	-500x500
<b>NO - 12</b>	1 h	7,0	0,073	-2000x2000	81,82	-500x500
<b>NO - 13</b>	1 h	7,0	0,0002	-2000x2000	85,96	-500x-500
<b>NO - 14</b>	1 h	7,0	0,000	-2000x2000	151,73	-500x-500
<b>NO - 15</b>	1 h	7,0	0,00001	-2000x2000	125,37	-500x-500
<b>NO - 16</b>	1 h	7,0	0,000	-2000x2000	153,97	-500x-500
<b>NO - 17</b>	1 h	7,0	0,178	-2000x2000	104,60	-500x500
<b>NO - 18</b>	1 h	7,0	0,000	-2000x2000	102,68	-3000x500
<b>NO - 19</b>	1 h	7,0	0,000	-2000x2000	74,78	-10000x-500
<b>NO - 20</b>	1 h	7,0	0,000	-2000x2000	80,02	-10000x-500
<b>NO - 21</b>	1 h	7,0	0,000	-2000x2000	69,33	-10000x-500
<b>NO - 22</b>	1 h	7,0	0,000	-2000x2000	78,40	-10000x-500
<b>NO - 23</b>	1 h	7,0	0,000	-2000x2000	75,41	-10000x-500
<b>NO - 24</b>	1 h	7,0	0,000	-2000x2000	63,80	-10000x-500

Os gráficos a seguir representam as isolinhas de concentração de SO<sub>2</sub> e MP, e mostram os máximos de concentração dos poluentes com a identificação das posições das fontes e da estação receptora no dia analisado(figura 6.38).

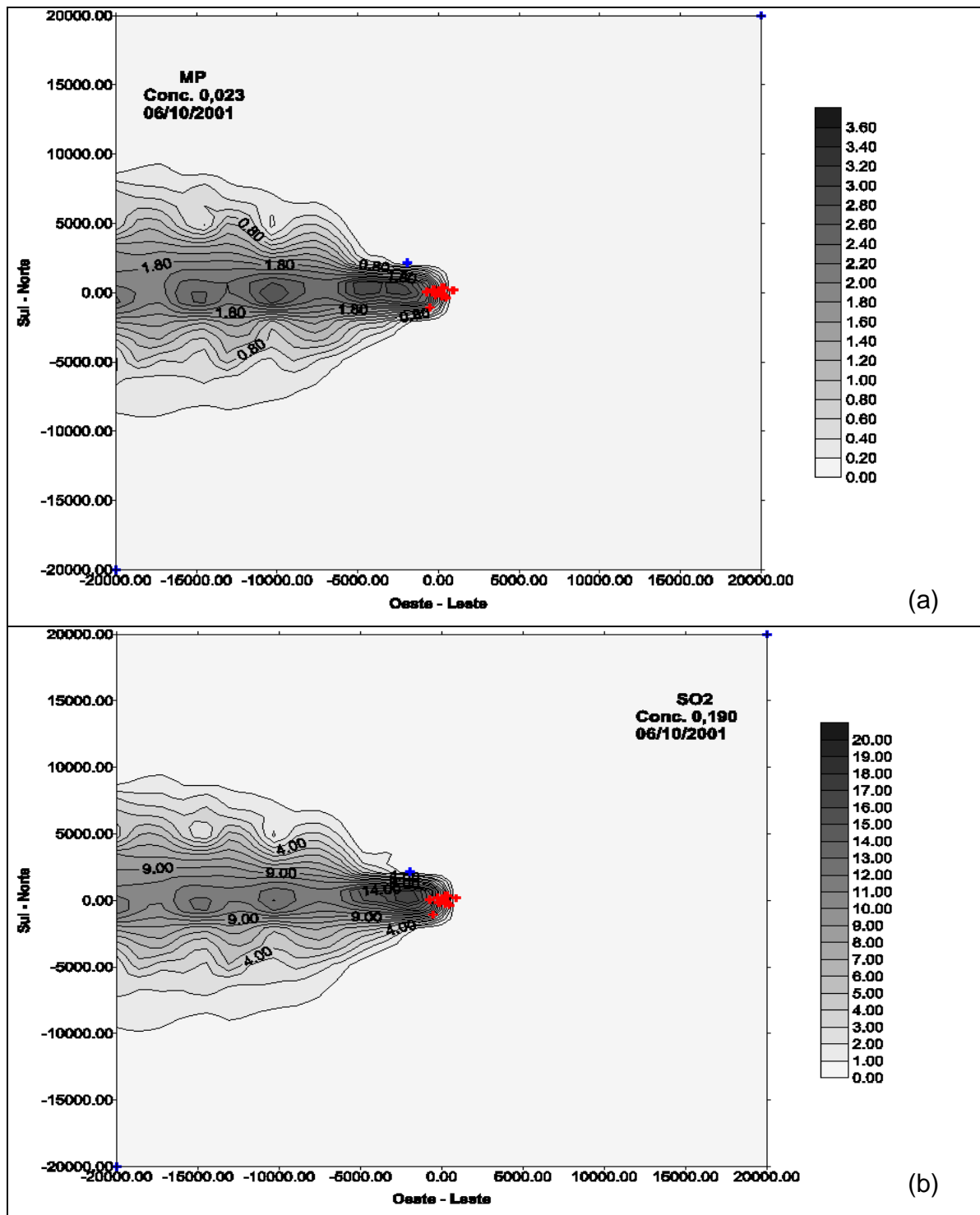


Figura 6.38 - Gráficos de Isolinhas de Concentração representativas para o período médio de 24 horas. Os pontos em vermelho representam as diferentes fontes de emissão localizadas junto a COPESUL, e em azul é a localização da estação de qualidade do ar para (a) MP e (b) SO<sub>2</sub>.

Os gráficos (figuras 6.39 e 6.40) mostram a análise estatística de comparação entre os valores modelados e medidos com os padrões primário e secundário exigidos pela resolução CONAMA nº 3 de 28/06/1990.

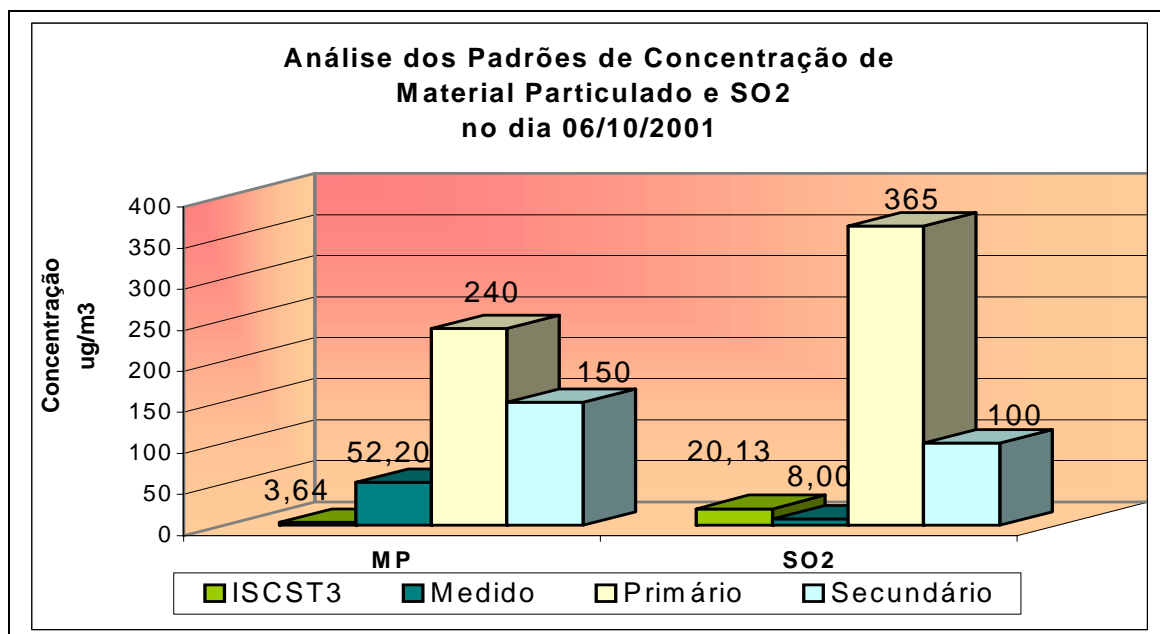


Figura 6.39 – Análise estatística do SO<sub>2</sub> e MP para o dia 06/10/2001.

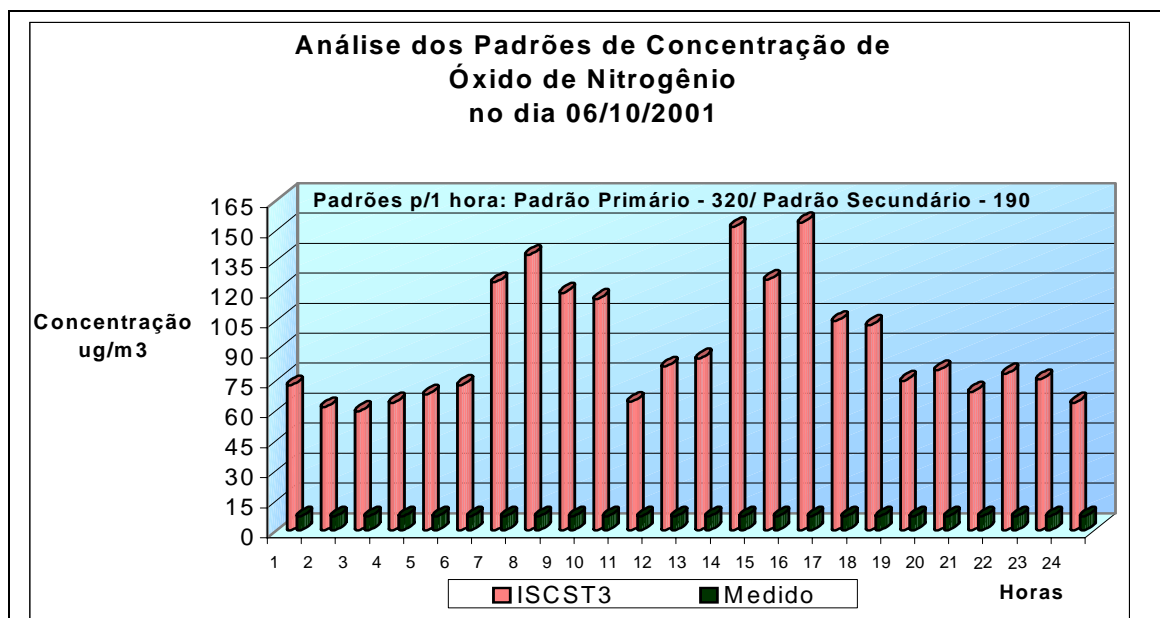


Figura 6.40 – Análise estatística do NO<sub>x</sub> para o dia 06/10/2001.

## 6.8 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Os resultados apresentados representam a dispersão de poluentes emitidos pela COPEL e os máximos de concentração de SO<sub>2</sub>, MP e NO<sub>x</sub> ilustrados através de gráficos de isolinhas de concentração.

Quando gerado o Modelo Numérico do Terreno (MNT) verificou-se a topografia da região e a localização do Complexo Petroquímico, sendo esta região de estudo relativamente plana.

Estes resultados gerados pela modelagem com o Modelo de dispersão ISCST3, mostram que os valores modelados geralmente se apresentam inferiores aos valores que foram medidos pela estação de qualidade do ar.

Os valores modelados para MP variaram de 0,00µg/m<sup>3</sup> até 1,471µg/m<sup>3</sup>, enquanto que os valores medidos obtiveram valores da ordem de 14,2µg/m<sup>3</sup> a 53,8µg/m<sup>3</sup>.

Para o SO<sub>2</sub> os valores modelados variaram de 0,00µg/m<sup>3</sup> até 8,142µg/m<sup>3</sup> enquanto que os valores medidos foram de 8,0µg/m<sup>3</sup> durante todo o período analisado.

Para o NO<sub>x</sub> verificou-se exatamente o contrário, pois os valores modelados variaram de 153,97µg/m<sup>3</sup> até 219,59µg/m<sup>3</sup> enquanto que os valores medidos foram de 7,0µg/m<sup>3</sup> até 39,0µg/m<sup>3</sup>.

As incertezas relacionadas aos resultados são as seguintes:

- presença de outras fontes de emissão de poluentes localizadas na região de estudo, tais como as indústrias de 2ª geração que são: Ipiranga Petroquímica S.A., Nitriflex do Sul Ltda., OPP Petroquímica S.A., OPP Poliolefinas S.A., Oxiteno S.A., Petroflex/Coperbo S.A., e Petroquímica Triunfo S.A., e a fornecedora de insumos White Martins S.A;
- o equipamento de coleta de SO<sub>2</sub> pode não estar calibrado, explicando o valor de 8,0µg/m<sup>3</sup> para todo o período de coleta;



- a qualidade dos dados meteorológicos utilizados para inicialização do modelo de dispersão;
- a calibração dos sensores meteorológicos .

As incertezas do modelo de dispersão são:

- para o cálculo da estabilidade atmosférica são utilizados parâmetros empíricos;
- o modelo é tipo pluma gaussiana;
- o modelo é estacionário.

Neste estudo verificou-se que o principal problema de poluição junto a COPESUL é o  $\text{NO}_x$  .

Verificamos na busca por elementos que identificassem melhor os resultados gerados pelo modelo de dispersão, que na última versão do Aplicativo ISC3View foram feitos ajustes para melhorar os resultados modelados pelo mesmo assim como a visualização gráfica dos resultados e da área de estudo estão melhor representados, provando que o modelo gera bons resultados.

O modelo de dispersão mostra-se limitado mas, sendo de fácil utilização, pode ser utilizado para solucionar problemas que necessitem rapidez.

## CAPÍTULO VII

### CONCLUSÕES

#### 7.1 CONCLUSÕES

Verificamos que, através dos valores medidos de SO<sub>2</sub> e MP nas estações, estes são bem menores que os valores modelados, isto se deve ao fato de existirem outras fontes na região referentes as indústrias de 2ª geração que são: Ipiranga Petroquímica S.A., Nitriflex do Sul Ltda., OPP Petroquímica S.A., OPP Poliolefinas S.A., Oxiteno S.A., Petroflex/CoperboS.A., e Petroquímica Triunfo S.A., e a fornecedora de insumos White Martins S.A.

O modelo tipo pluma gaussiana utilizado neste trabalho em geral subestima os valores de concentração, por utilizar como parâmetros de entrada dados empíricos relacionados principalmente no cálculo da estabilidade atmosférica, também este é um modelo estacionário.

É observado através dos resultados obtidos que a direção preferencial daquela região é de leste/nordeste, esta direção predomina devido a circulação de mesoescala onde a brisa marítima tem grande influência na região de estudo, com isso os valores máximos de concentração ocorrem em geral a oeste/sudoeste das fontes emissoras, em alguns casos estes valores se aproximam dos padrões secundários de NO<sub>x</sub>, ultrapassando os mesmos como é o caso dos dias 26/05 e 13/08 com valores de 198,67 µg/m<sup>3</sup> na 11ª hora e de 219,59 µg/m<sup>3</sup> na 10ª hora.

Deste estudo pode-se ainda concluir que o principal problema de poluição junto a COPESUL é o NO<sub>x</sub>, portanto para este poluente é necessário providenciar medidas visando reduzir a emissão do mesmo, ou se considerarmos as outras fontes de emissão de NO<sub>x</sub> junto a região da COPESUL, como as indústrias de 2ª geração, com certeza os padrões secundários de NO<sub>x</sub> ultrapassam os permitidos pela legislação CONAMA que é de 190 µg/m<sup>3</sup>.

## 7.2 SUGESTÕES

Colocamos a seguir algumas sugestões em relacionadas a futuros estudos que podem ser desenvolvidos junto a região do Polo Petroquímico.

As próximas simulações de dispersão devem ser realizadas com dados das fontes de emissão amostrados na chaminé, esperando-se assim resultados mais confiáveis, além disso devem ser consideradas todas as fontes de emissão relacionadas as indústrias de 2ª geração localizadas junto a COPESUL.

Um outro fator importante para novas pesquisas é a utilização do modelo de mesoescala RAMS (Regional Atmospheric Modeling System), através deste será possível relacionar as circulações de mesoescala com a dispersão de poluentes na região. Além do RAMS é interessante ainda a utilização do modelo fotoquímico para estudar a formação, o transporte e a deposição dos poluentes fotoquímicos.

Para avaliação dos resultados obtidos é importante ainda aumentar a rede de monitoramento da qualidade do ar, visto que na região da COPESUL só sabe-se da existência de uma estação móvel de qualidade do ar, sendo isto não suficiente para obtenção de resultados conclusivos.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALVES, Rita de Cássia Marques. *Estudo da dispersão de SO<sub>2</sub> emitido pela usina termoeleétrica de Candiota-RS, Brasil*. Dissertação de Mestrado. USP –IAG. São Paulo, 1996.
- AZAD, A.K., Kitada T. Characteristics of the air pollution in the city of Dhaka, Bangladesh in winter. *Atmospheric Environment*, Vol.32.Nº11, pp 1991-2005,1998.
- BEYRICH,F. Schaller E. Et alli. An observational study of sulphur dioxide transport across the Erzgebirge mountains. *Atmospheric Environment*, Vol.32.Nº6, pp 1027-1038,1998.
- BOELTER,J.K. and H.J. DAVIDSON. Ozone geration by indoor, electrostatic air cleaners. *Aerosol Science and Techbology*. Volume 27, n0.6, pp. 689-708. 1997.
- BRIGGS G.A. *Plume Rise Predictions*. In *Lectures on Air Pollution and Environmental Impact Analysis*, D.A. Hagen, ed., American Meteorological Society, Boston. Massachusetts, 59-111. 1975.
- BROOKSCOLE. Documento eletrônico. *Living in the Environment*, Miller, 10<sup>th</sup> edition. Informação disponível na Internet via <http://www.brookscole.com>. Informação capturada em Setembro de 2001.
- CERQUEIRA, Luciana. *Citação do documento eletrônico: Poluentes Atmosféricos*. [on line] Fórum Livre. Disponível na Internet via <http://www.unilivre.org.br/centro/textos/forum/polar.htm>. Arquivo capturado em Abril de 2001.
- CETESB. *Relatório de qualidade do ar no estado de São Paulo*. CETESB - Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental. São Paulo. SP. 1994.
- CGA. Documento eletrônico. *Poluentes Atmosféricos*. Informações disponível na Internet via <http://www.drarn-lvt.pt/cga/bs/poluentes>. Informação capturada em Abril de 2001.
- CONAMA. Documento Eletrônico. Ministério do Meio Ambiente. Conselho Nacional do Meio Ambiente. Informações disponível na Internet via <http://www.mma.gov.br/conama> e <http://www.lei.adv.br/conama.htm>. Informação capturada em Abril de 2001.
- COPELUL. Documento Eletrônico. Informações disponível na Internet via <http://www.copesul.com.br> Informação capturada em Abril de 2001.

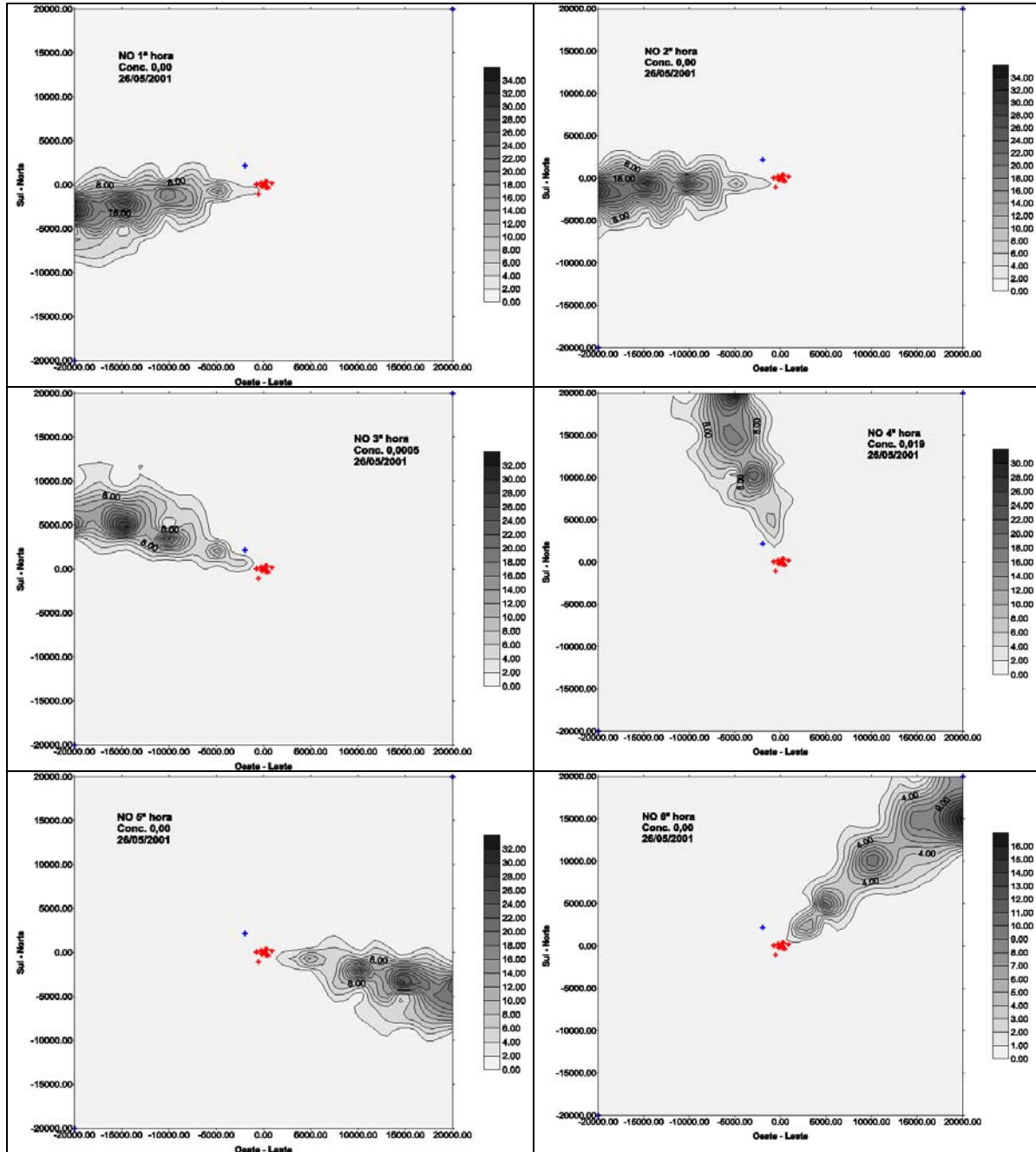
- DÁMASO T. *Lluvia Acida Candiota*. Editado por Ideas. 1992.
- EIA-RIMA - UTE Gaúcha - *Instalação da Usina Termoelétrica Gaúcha*. FEPAM. Vol2. MRS Estudos Ambientais Ltda. Porto Alegre -RS. Julho de 200.
- EIA-RIMA - COPESUL - *Ampliação da Capacidade Instalada da COPESUL* - FEPAM. Vol 2.1. CSD - Geoklock - Geologia e Engenharia Ambiental Ltda. Porto Alegre -RS - Abril de 1996.
- ELSEVIER SCIENCE INC. *Complying With Clean Air Act Regulations:Issues and Techniques*. 1995.
- ELSOM, D.M. *Air Pollution:Causes, Effects and Control Policies*, Basil Blackewll, New York. 1989.
- EPA . *Industrial Source Complex (ISC) Dispersion Model - User's Guide- Second Edition (Revised)*, vol I. EPA-405/4-88-002a, dez.H.E.Cramer Co, Inc.Salt Lake City, UT. 1987.
- EPA . *Industrial Source Complex (ISC3) Dispersion Models - User's Guide- Vol.1 e 2*, EPA-454/B-95-003a-b.1995.
- EPA. *Guideline for Public Reporting of Daily Air Quality Pollutant Index(PSI)* - U.S. EPA Office Air Quality Standard. 1977.
- EPA. United States Environmental Protection Agency. *Volatile Organic Compound Species Data Manual(2<sup>nd</sup> Edition)*. EPA-950/4-80-015. 1985.
- EPA. Documento eletrônico. Emissions and Air Quality Data. Informações disponível na Internet via <http://www.epa.gov/oar> Informação capturada em Maio de 2001.
- EPA. Documento eletrônico. Informações disponível na Internet via <http://www.epa.gov/ttn/rto/areas/sitemap/index.htm>. Informação capturada em Setembro de 2001.
- FEPAM. *Código Estadual do Meio Ambiente*. Disco do SEMA(Secretaria Estadual do Meio Ambiente), 2001.
- FEEMA. *Legislação Ambiental Básica. Coletânea da Legislação Federal e Estadual de Meio Ambiente*. Rio de Janeiro. RJ. 1992.
- GIFFORD, F.A. *Turbulent Diffusion - Typing Schemes: A Review*, Nucl. Saf. Vol. 17(1), pp 71. 1976.
- HANNA, R.S., G.A. Briggs, R.P. Hosker . *Handbook on Atmospheric Diffusion*. Technology Information Center, U.S. Department of Energy. 1982.
- HOLZWORTH, G.C. *A study of air pollution potencial for the western United States*. J. Appl. Meteor., vol.19,1,pp.366-382. 1962.

- KERR, A.A.F.Sansigolo. *Caracterização Física do Aerosol Atmosférico de Cubatão e uma Experiência de Aplicação do Modelo de Dispersão por Pluma Gaussiana*. Dissertação de Mestrado, Universidade de São Paulo - SP, Instituto de Física, Departamento de Física de Estado Sólido. 104pp. 1983.
- LYONS, T.J. and W.D. Scott. *Principles of Air Pollution Meteorology*. Publicado por Belhaven Press.London.Great Britain.1990.
- MOREIRA,J.C. e SENE, E. *Trilhas da Geografia*. Editora Scipione. São Paulo. SP.2000.
- NAIK,S.Medha. *Dispersion of Sulpher Dioxide Around the Thermal Power Plant at Ahmedabad, India*. Atmospheric Environment, vol. 26B n° 3, pp.331-338.1992.
- NASA. Documento Eletrônico. Informações disponível na Internet via <http://www.nasa.gov/about/education/ozone/resources.htm>. Informação capturada em Abril de 2001.
- NASA. Documento Eletrônico. Informações disponível na Internet via <http://www.nasa.gov/about/education/ozone/resources.htm>. Informação capturada em Maio de 2001.
- NASA. Documento Eletrônico. Camada de Ozônio - Dezembro de 2000. Informações disponível na Internet via [http://science.nasa.gov/headlines/y2000/ast12dec\\_1.htm](http://science.nasa.gov/headlines/y2000/ast12dec_1.htm). Informação capturada em Maio de 2001.
- NOAA. Documento Eletrônico. Informações disponível na Internet via <http://www.al.noaa.gov/wwwhb/pubdocs/greenhouse.html> . Informação capturada em Junho de 2001.
- NOAA. Documento Eletrônico. Informações disponível na Internet via <http://www.al.noaa.gov/wwwhb/pubdocs/troporutral.html>. Informação capturada em Junho de 2001.
- OLIVEIRA, A.P. & Fitzjarrald,D.R.The Amazon River Breeze and The Local Boundary Layer: II. Linear Analysis and Modeling Bound Layer. *Met.*, Vol 67, pp 75-96.
- PASQUILL F. *Atmospheric Diffusion*. Ellis Horwood, Chischester. 1974.
- PARK, J., CHO S.Y. A long range transport of SO<sub>2</sub> and sulfate between Korea and east China. *Atmospheric Environment*, Vol.32.N°16, pp 2745-2756,1998.
- PARK, S.U. Kim C.H. A numerical model for the simulation of SO<sub>2</sub> concentrations in the Kyongin region, Korea. *Atmospheric Environment*, Vol.33.N°, pp 3119-3132,1999.

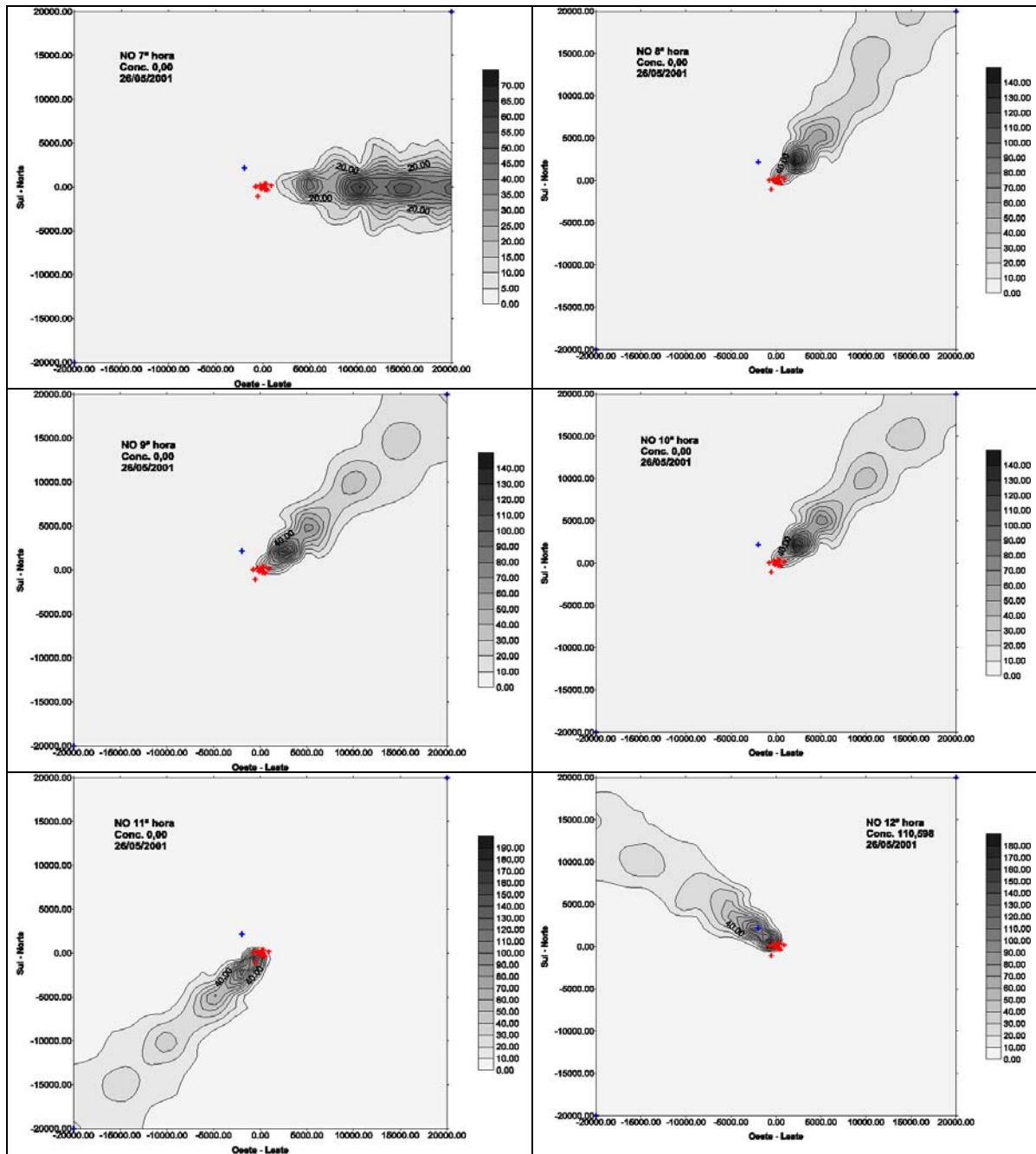
- PRONAR. Documento Eletrônico. Programa Nacional de Controle de Qualidade do ar. Informações disponível na Internet via [http://www.mct.gov.br/clima/cpmunic\\_old/pronar.htm](http://www.mct.gov.br/clima/cpmunic_old/pronar.htm). Informação capturada em Abril de 2001.
- SEINFELD, J.H. *Atmospheric Chemistry and Physics of Air Pollution*. Ed. John Wiley & Sons. New York. 1986(Reprinted 1998).
- SHI, P.J.; M.R. HARRISON. Regression Modeling of Hourly NO<sub>x</sub> and NO<sub>2</sub> Concentrations in Urban Air in London. *Atmospheric Environment* Vol.24, N0.24, pp.4081-4094.
- SLADE, D. H. *Meteorology and Atomic Energy, U.S.* Atomic Energy Commission – Office of Information Service, 1968.
- SMITH, F.B. and R.D. Hunt . *Meteorological Aspects of the Transport of Pollution over Long Distances*. *Atmospheric Environment*, vol. 12, pp 461-477. 1978.
- STERN, A. C. *The Effects of Air Pollution*. Academic Press, INC. N.Y.1984.
- STULL, R.B. *An Introduction to Boundary Layer Meteorology*. Kluwer Academic Publishers, Norwell, Mass.1988(Reprinted 1997).
- TURNER, D. Bruce. *Workbook of Atmospheric Dispersion Estimates – EPA – Office of Air Programs*. Research Triangle Park, North Carolina. 1970.
- TURNER, D. Bruce. *Workbook of Atmospheric Dispersion Estimates*, Segunda edição, Lewis Publishers, 1994.
- VENKATRAM, A., and WYNGAARD, J.C.(eds). *Lectures on Air Pollution Modeling*. AMS, Boston. 1988.
- WILSON, R.B. *Review of development and application of crster and pmter models*. *Atmospheric Environment*, Vol.27B.Nº1, pp 41-57, 1993.
- ZANETTI, P. *Air Pollution Modeling*. Published by Van Nostrand Reinhold. New York. U.S.A. 1990.

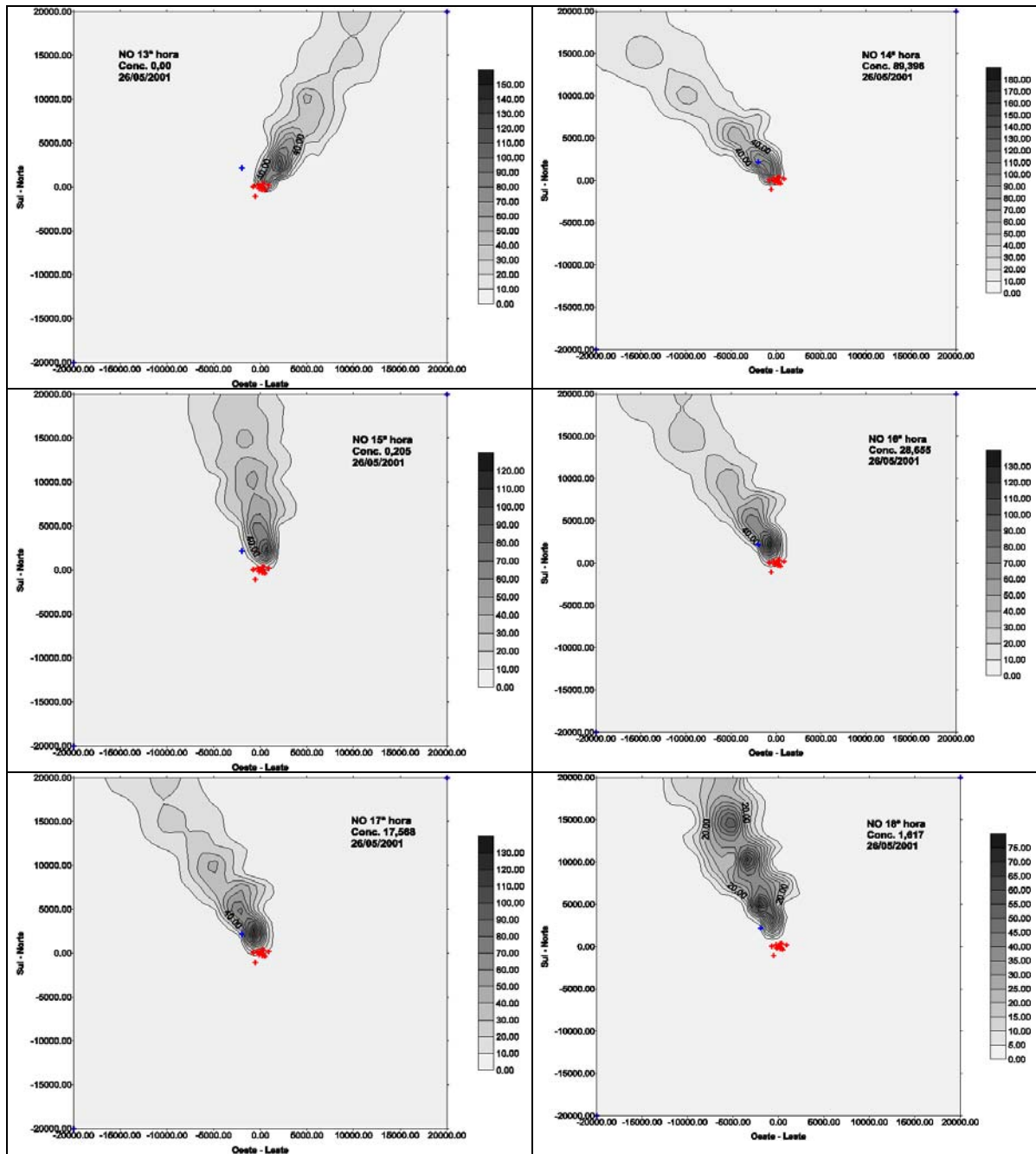
# APÊNDICE A

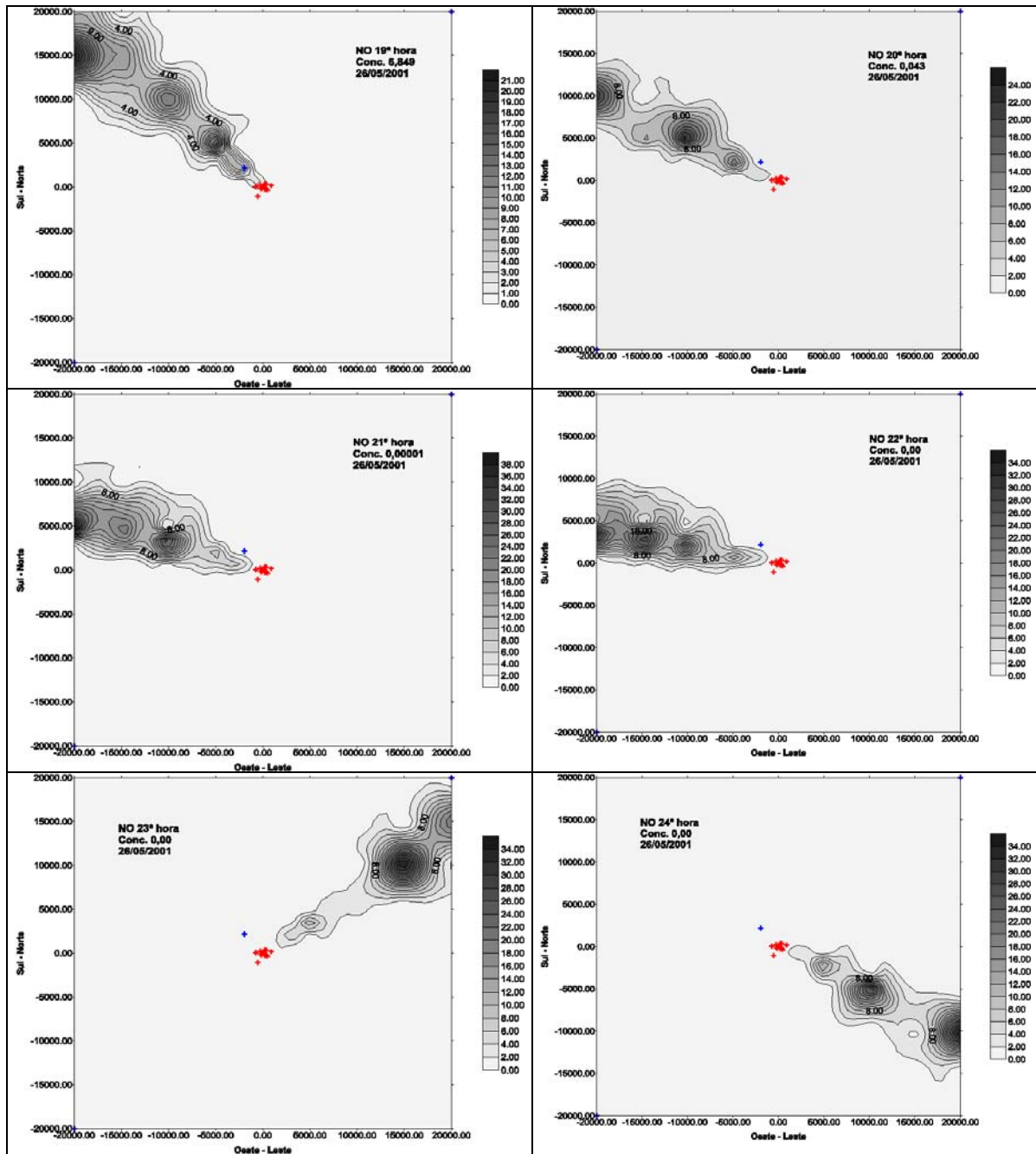
## Gráficos do NO<sub>x</sub> no dia 26/05/2001





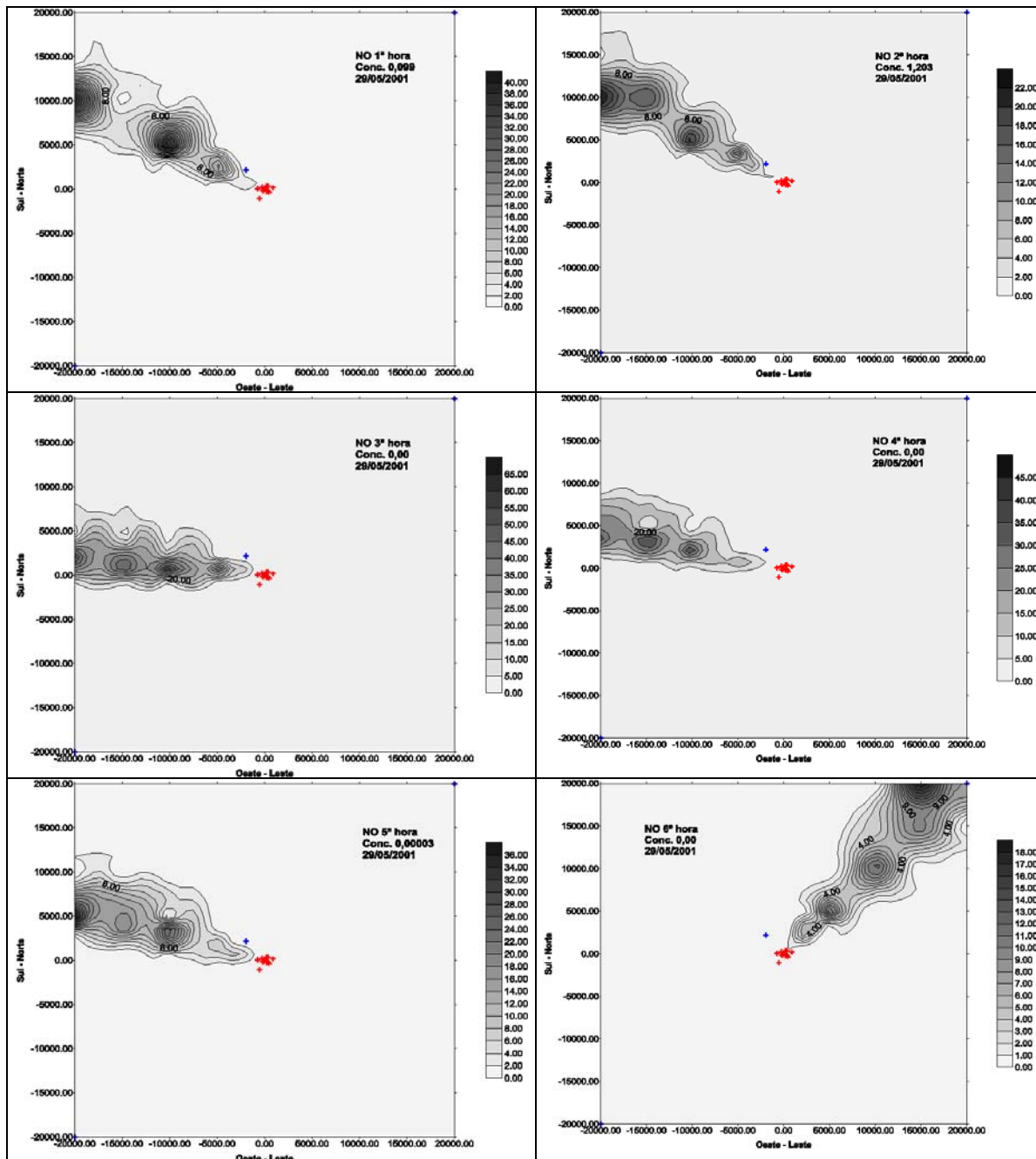


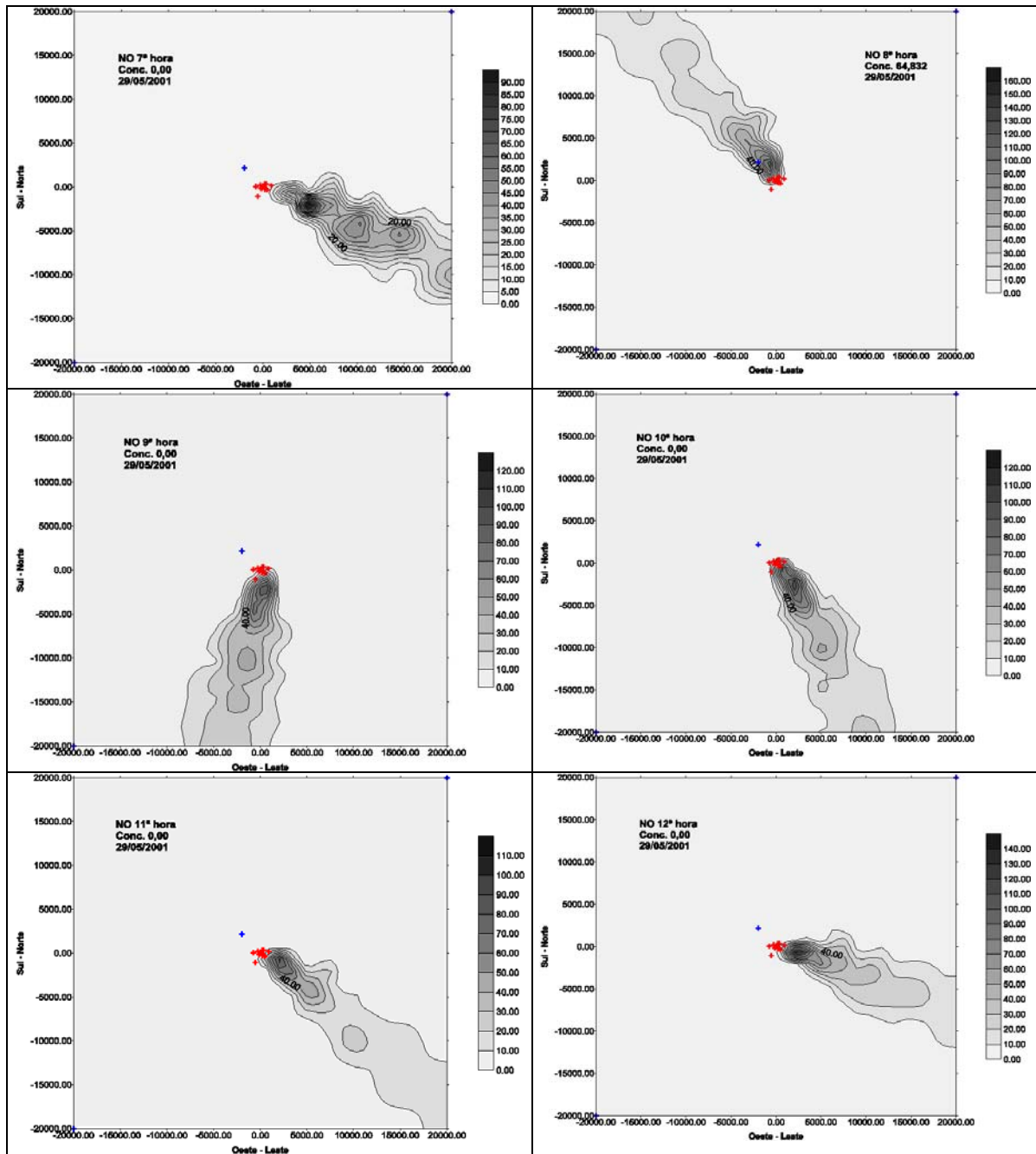


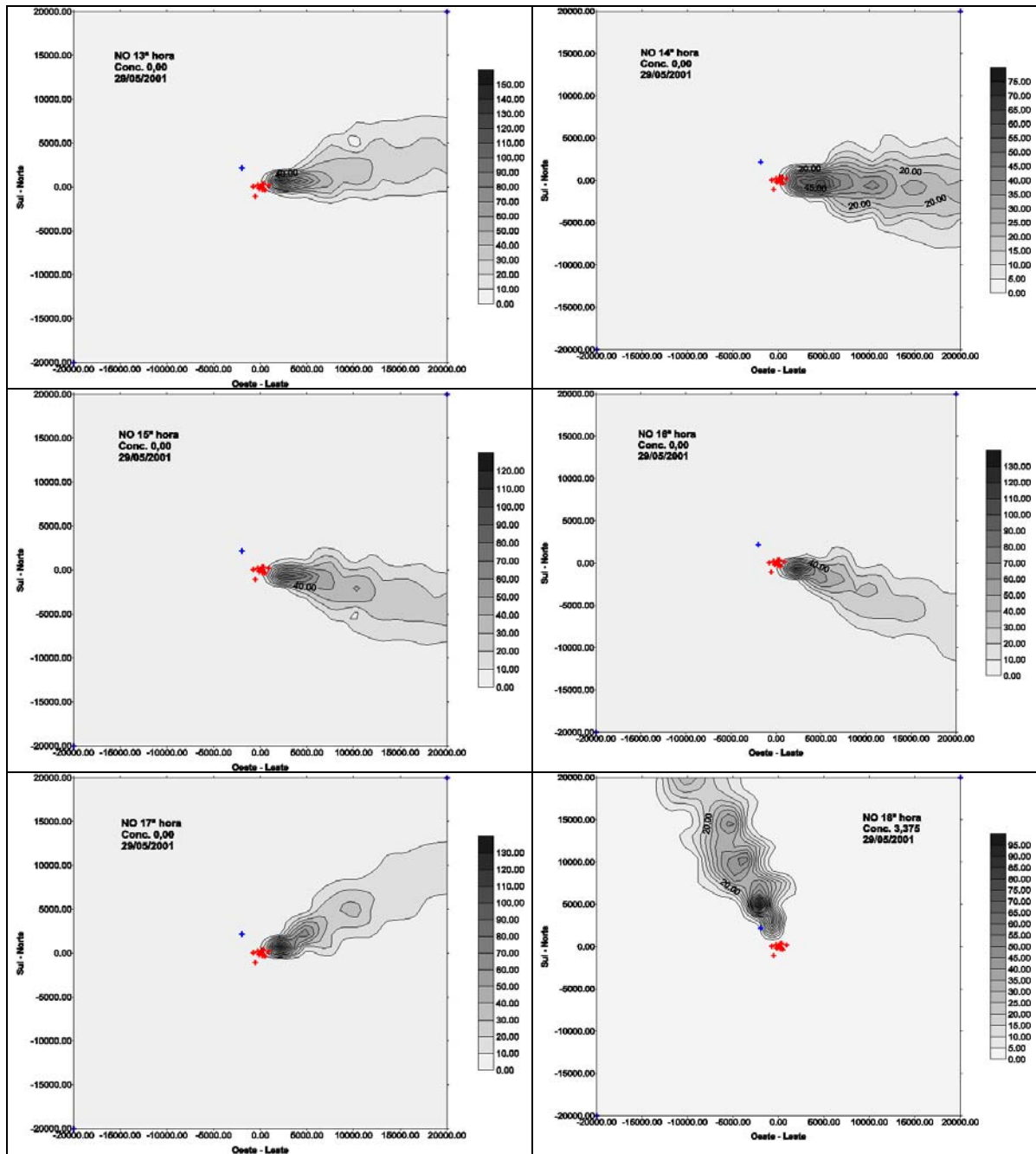


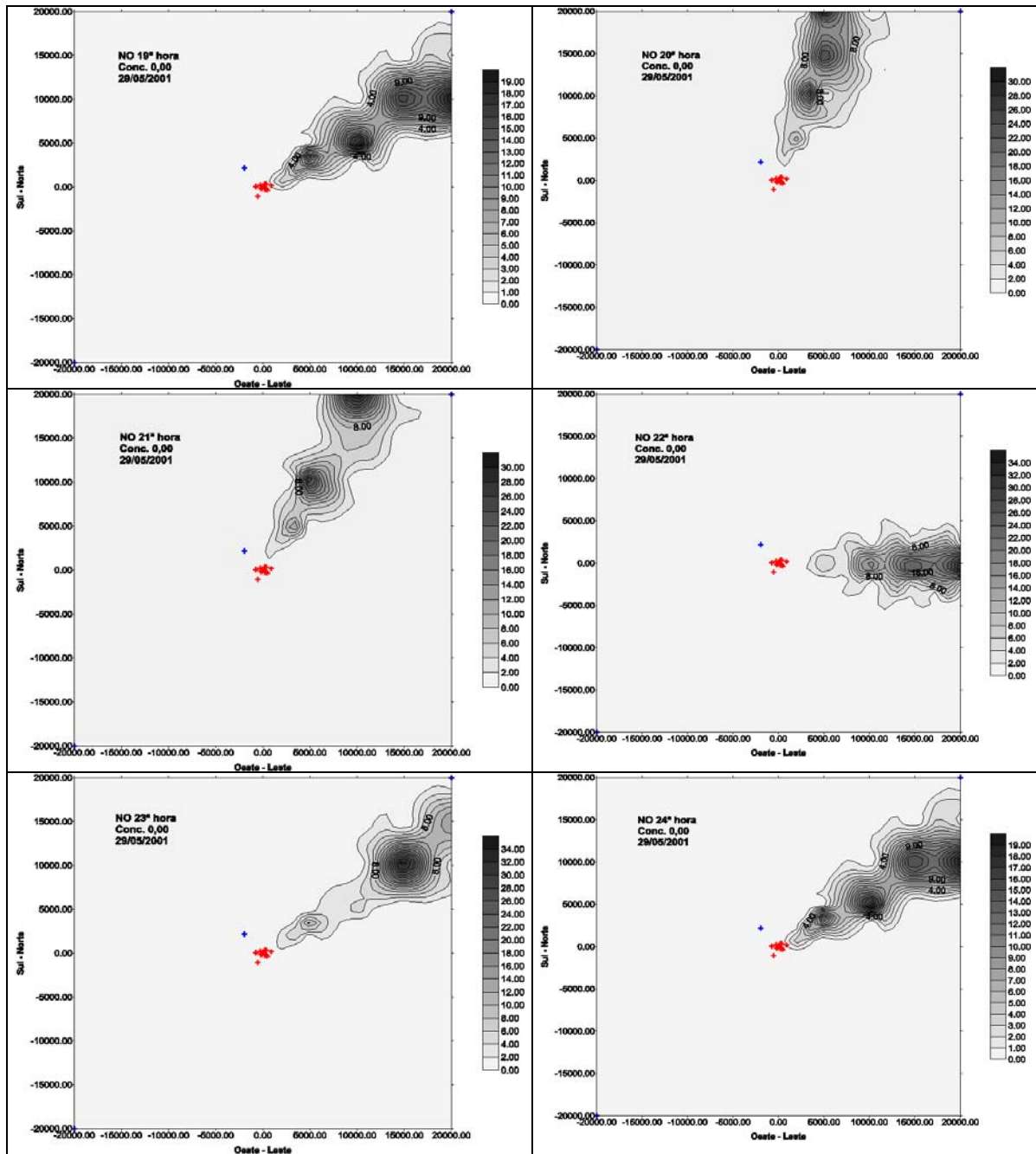
## APÊNDICE B

### Gráficos do NO<sub>x</sub> no dia 29/05/2001



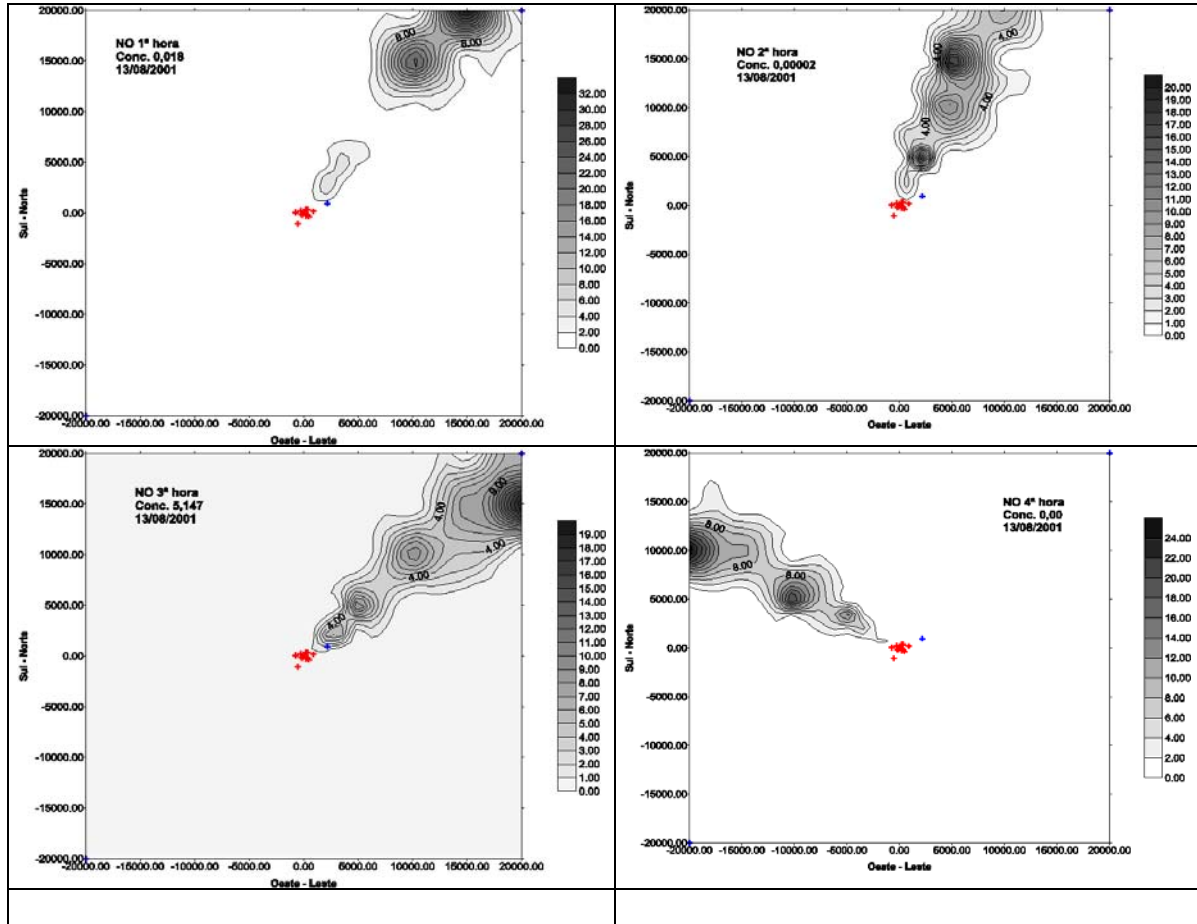




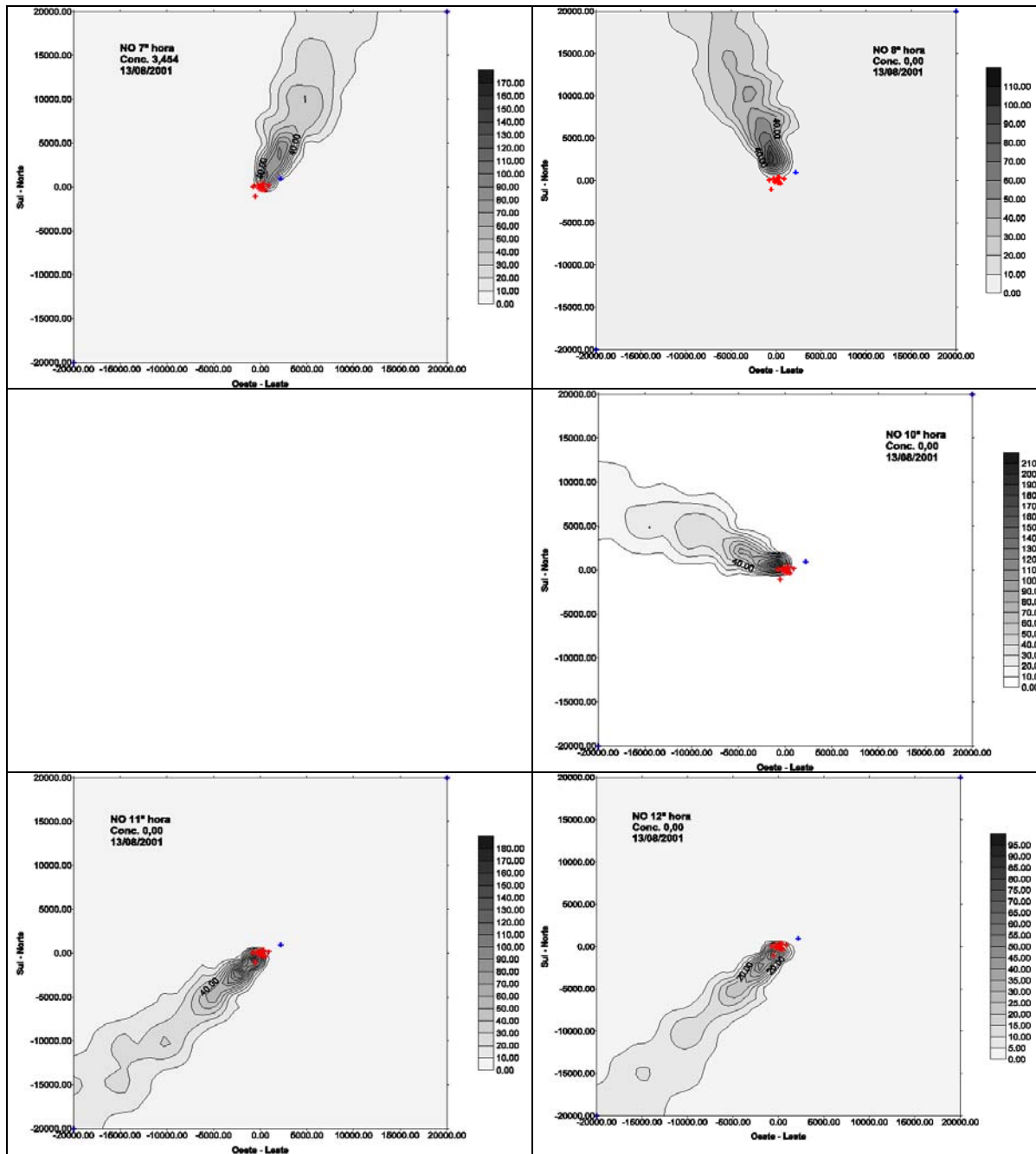


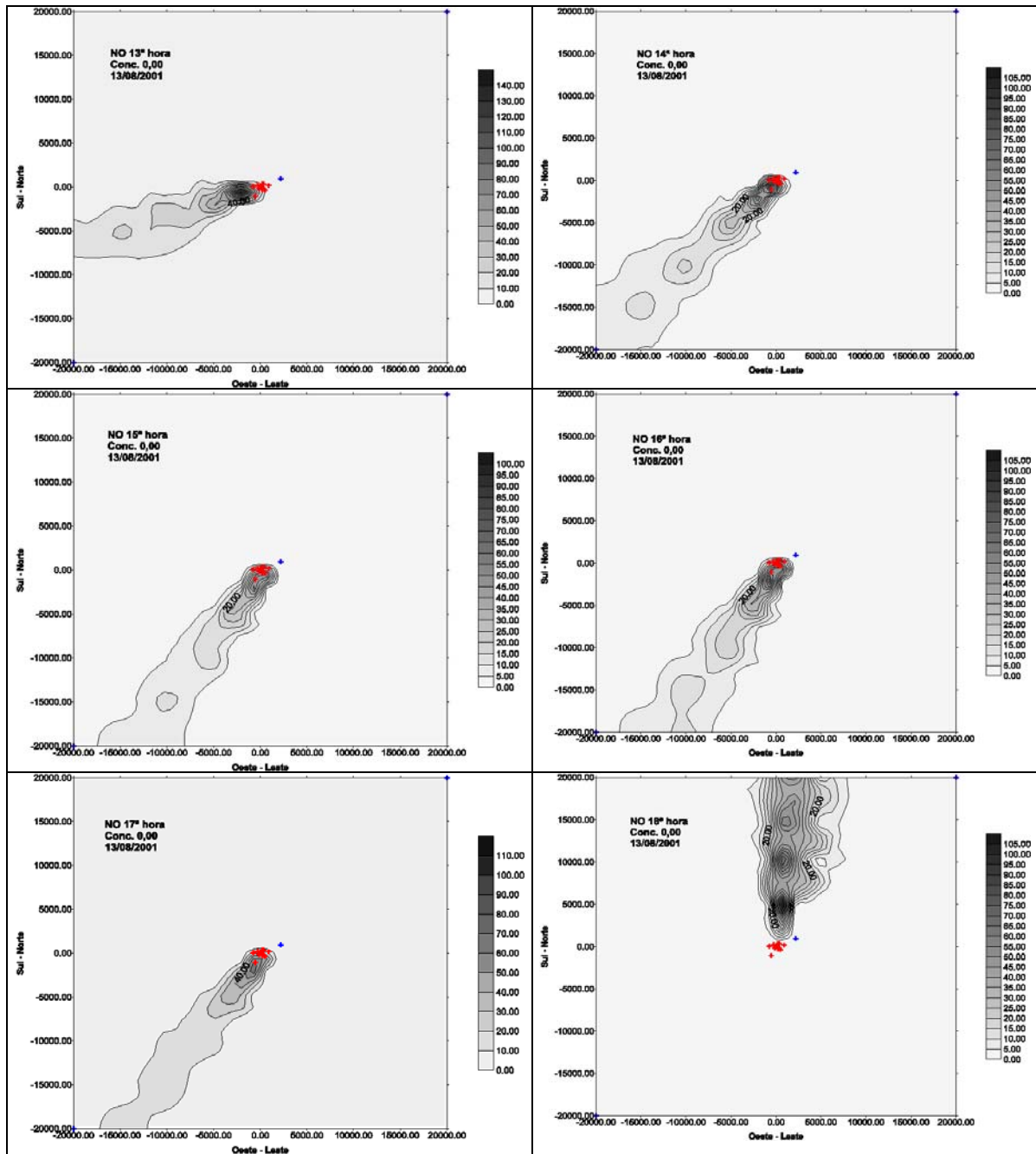
# APÊNDICE C

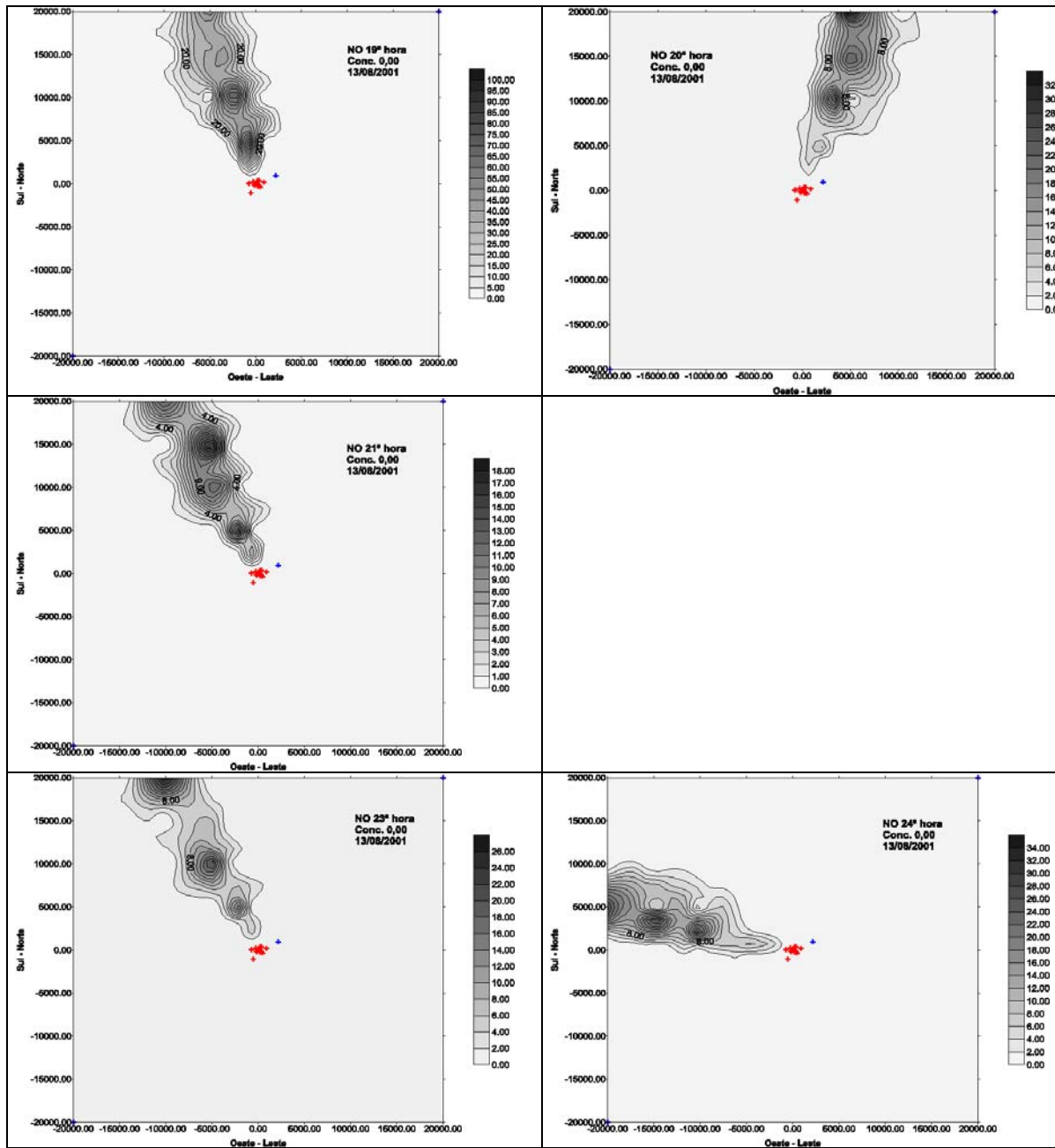
## Gráficos do NO<sub>x</sub> no dia 13/08/2001





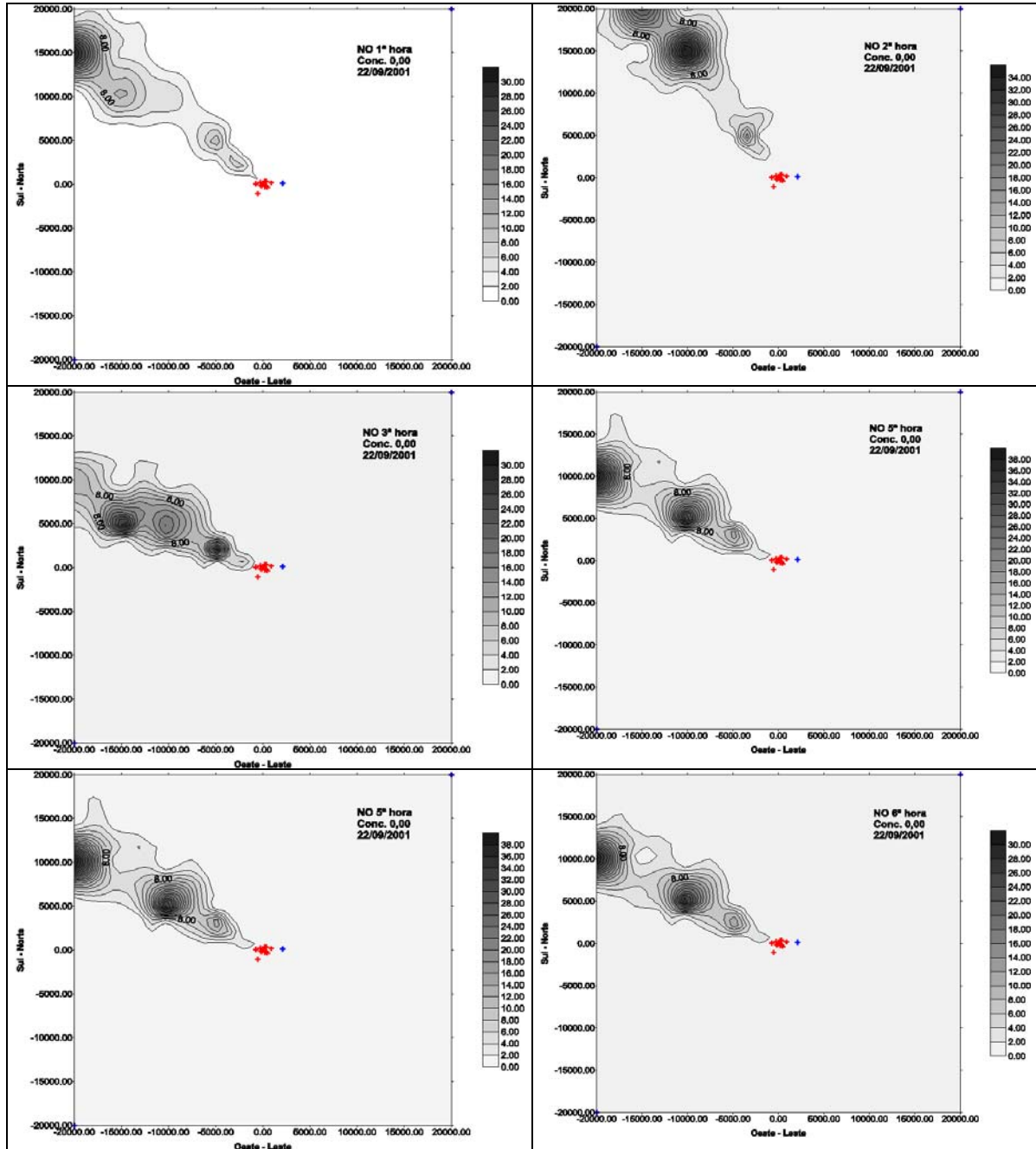


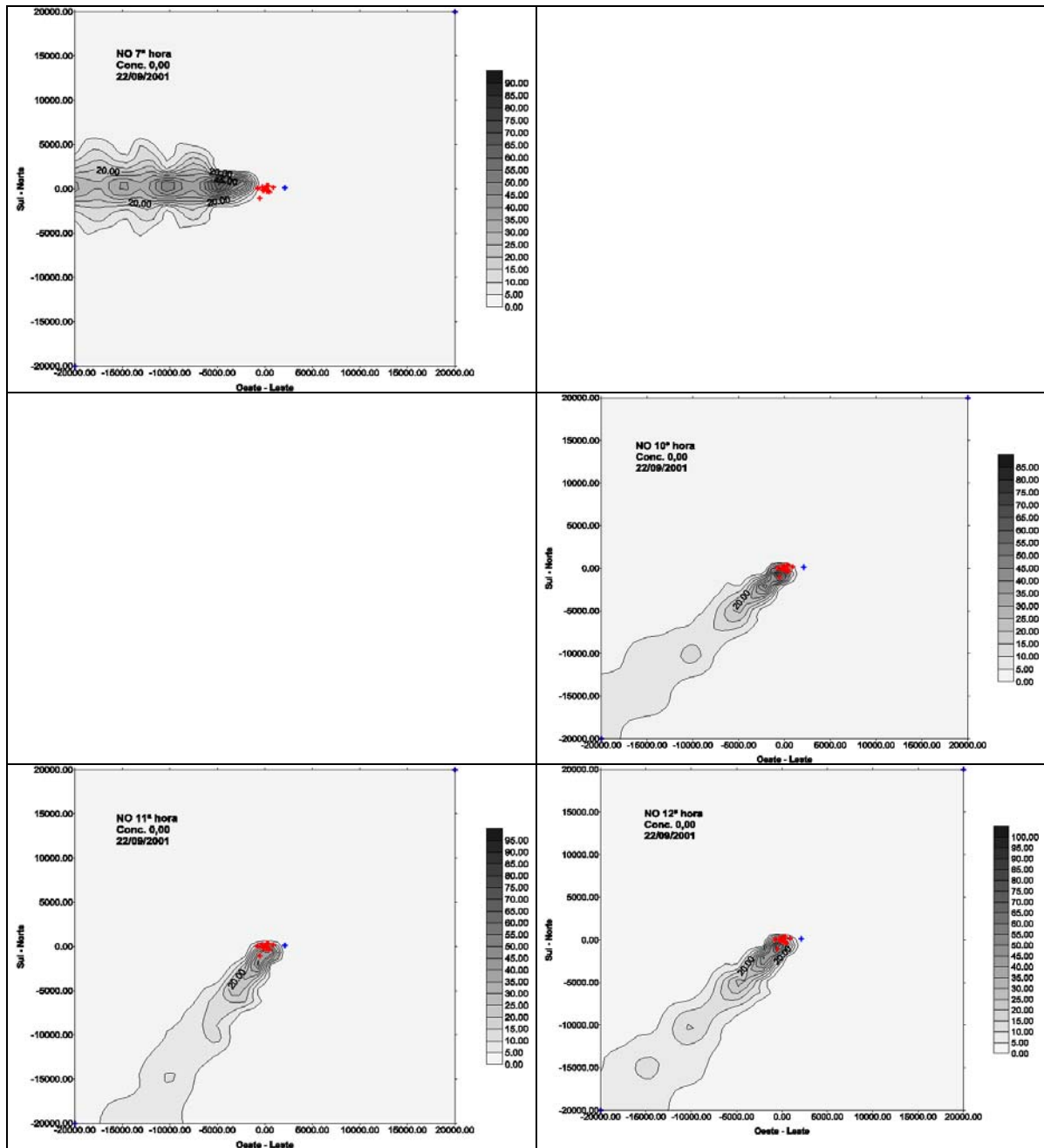


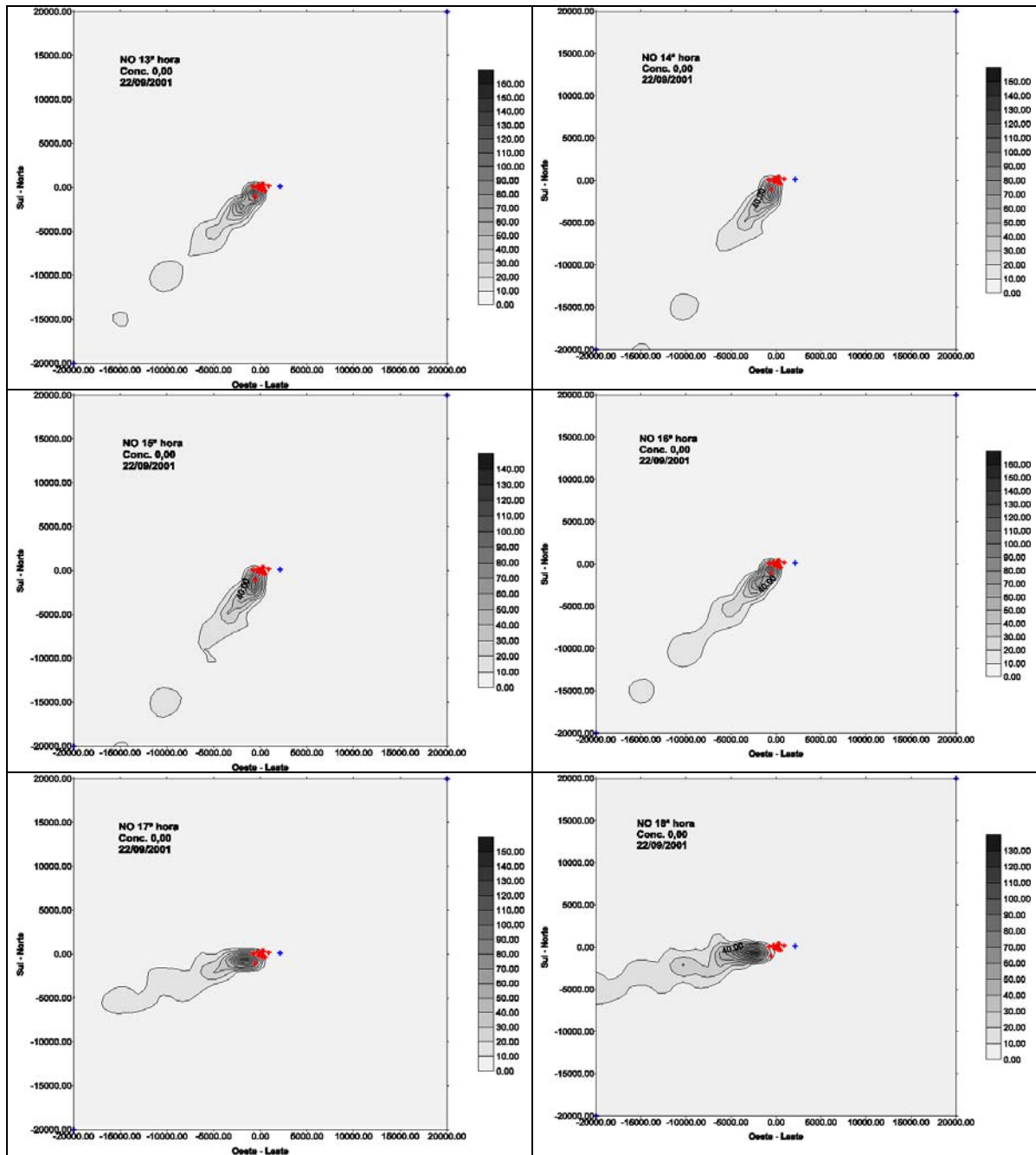


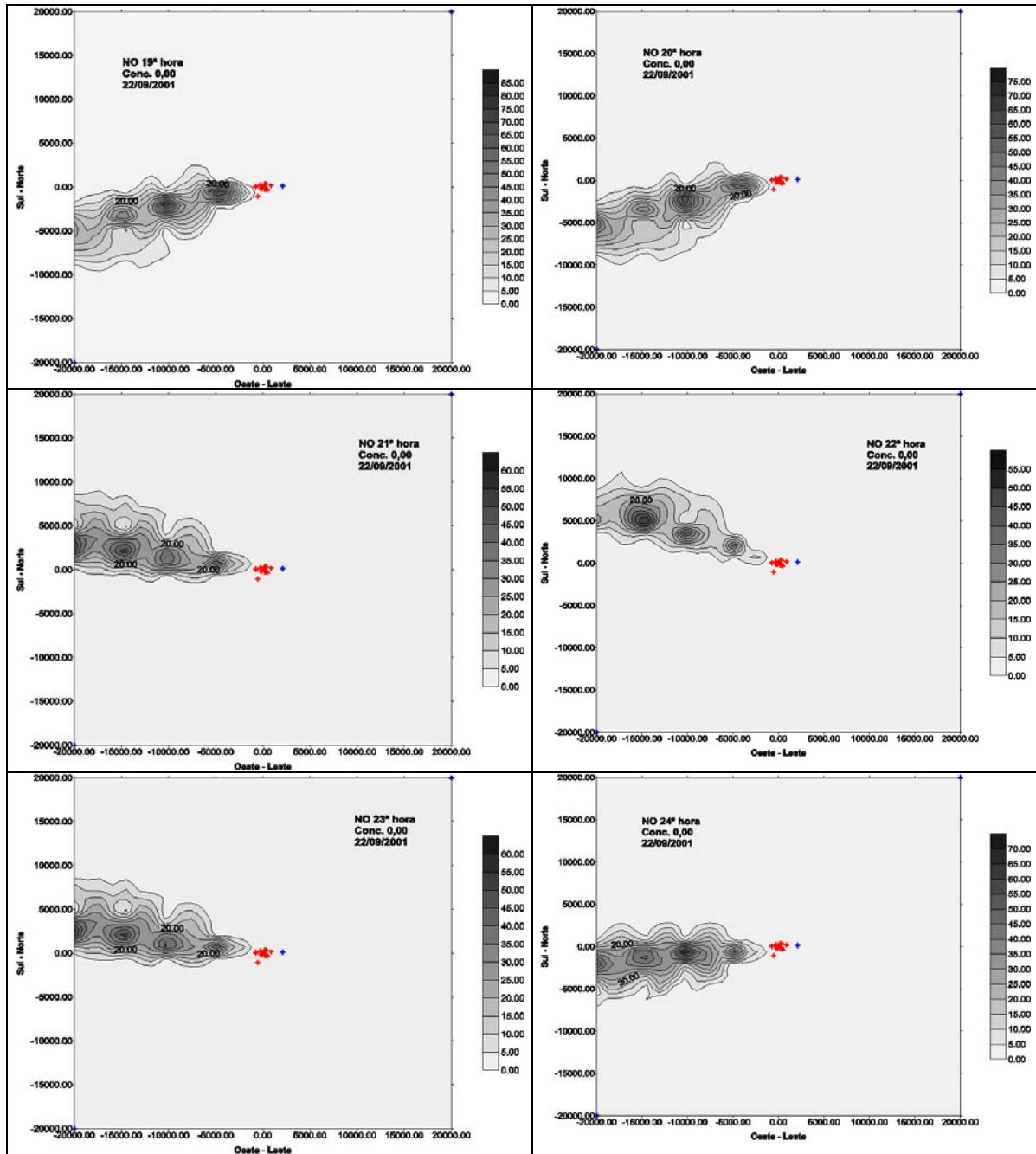
## APÊNDICE D

### Gráficos do NO<sub>x</sub> no dia 22/09/2001









# APÊNDICE E

## Gráficos do NO<sub>x</sub> no dia 06/10/2001

