

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE PELOTAS**  
**Programa de Pós-Graduação em Meteorologia**



**Dissertação**

**Estudo do impacto das emissões de poluentes na Região Metropolitana  
de Porto Alegre - RS**

**Ludmila Pochmann de Souza**

**Pelotas, 2013**

**Ludmila Pochmann de Souza**

**Estudo do impacto das emissões de poluentes na Região Metropolitana  
de Porto Alegre - RS**

Dissertação apresentada ao Programa  
de Pós-Graduação em Meteorologia da  
Universidade Federal de Pelotas, como  
requisito parcial à obtenção do título de  
Mestre em Meteorologia.

Orientador: Dr. Jonas da Costa Carvalho

Co-Orientador: Dr. Marcelo Félix Alonso

Pelotas, 2013

Dados de catalogação na fonte:  
Ubirajara Buddin Cruz – CRB-10/901  
Biblioteca de Ciência & Tecnologia - UFPEl

S729e

Souza, Ludmila Pochmann de  
Estudo do impacto das emissões de poluentes na Região Metropolitana de Porto Alegre - RS / Ludmila Pochmann de Souza. – 155f. ; il. – Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Meteorologia. Universidade Federal de Pelotas. Faculdade de Meteorologia. Pelotas, 2013. – Orientador Jonas da Costa Carvalho. ; co-orientador Marcelo Félix Alonso.

1. Meteorologia. 2. Ozônio troposférico. 3. WRF/CHEM. 4. Modelagem numérica. 5. Dispersão de poluentes. 6. PREP-CHEM. 7. CCATT-BRAMS. I. Carvalho, Jonas da Costa. II. Alonso, Marcelo Félix. III. Título.

CDD: 344.04633

Ludmila Pochmann de Souza

Estudo do impacto das emissões de poluentes na Região Metropolitana de  
Porto Alegre - RS

Dissertação aprovada, como requisito parcial, para obtenção do grau de Mestre em Meteorologia, Programa de Pós-Graduação em Meteorologia, Universidade Federal de Pelotas.

Data da Defesa: 31/07/2013

Banca examinadora:

.....  
Prof. Dr. Jonas da Costa Carvalho (Orientador)  
Doutor em Meteorologia pela Universidade de São Paulo.

.....  
Prof.Dr. Marcelo Félix Alonso (Co-orientador)  
Doutor em Meteorologia pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais.

.....  
Prof.Dra.Daniela Buske  
Doutora em Engenharia Mecânica pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

.....  
Prof.Dra. Ericka Voss Chagas Mariano  
Doutora em Geofísica Espacial, com ênfase em Ciências Atmosféricas pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais.



**Dedico este trabalho  
a minha avó Nair.**

## **Agradecimentos**

Agradeço a minha mãe Jany da Silva Pochmann, pelo exemplo de determinação, trabalho e amor em busca de suas metas. Ao meu pai, Roberto Poujeaux de Souza, pelo companheirismo, carinho e hospitalidade, e a toda minha família e amigos pelo apoio incondicional.

Ao professor Dr. Jonas da Costa Carvalho, orientador, pela aposta em meu trabalho e todo o incentivo e apoio profissional, em me manter focada e em busca do aperfeiçoamento na carreira e vida.

A todos os meus colegas, profissionais na área de meteorologia, pelos exemplos de suas conquistas e companheirismo em diversas situações. Em especial, ao meu co-orientador, Dr. Marcelo Félix Alonso, minhas colegas de mestrado, Aline Macedo de Oliveira, Patricia Nunes Tuchtenhagen e Venice Meazza de Camargo, e aos meteorologistas, Ricardo Acosta Gotuzzo, Natalia Parisotto Sinhori, Helena Barbieri de Azevedo e Gustavo Copstein Cuchiara. Obrigada, a todos vocês por fazem parte dessa conquista e da minha vida.

Por fim ao Grupo de Modelagem da Atmosfera e Interfaces (GMAI/INPE) pelo apoio e suporte e a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela bolsa concedida.

***“Sua altitude, depende de suas atitudes!”***  
***(Autor desconhecido)***

## Resumo

SOUZA, Ludmila Pochmann. **Estudo do impacto das emissões de poluentes na Região Metropolitana de Porto Alegre - RS 2013**. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Meteorologia. Universidade Federal de Pelotas, Pelotas.

A emissão de poluição de origem antrópica urbana é um grave problema de saúde pública nas grandes cidades, as quais apresentam deficiências de infraestrutura ocasionadas pelo rápido crescimento demográfico combinado com a falta de planejamento urbano. Dependendo do nível em que esses poluentes se encontram na atmosfera, podem produzir efeitos significativos nos seres humanos, aos animais e inclusive à vegetação. Em função do aumento na taxa de urbanização e do desenvolvimento industrial durante as últimas décadas, ocorreram acréscimos nas emissões atmosféricas antrópicas de precursores de ozônio nas regiões do Brasil altamente urbanizadas e desenvolvidas. Esforços no controle da poluição atmosférica estão sendo direcionados para a melhoria da qualidade do ar nessas áreas, com aplicação de medidas de controle e estratégias para diminuir as emissões, utilizando-se principalmente ferramentas como modelos numéricos de química atmosférica e monitoramento da qualidade do ar. No Estado do Rio Grande do Sul (RS), a Região Metropolitana de Porto Alegre (RMPA) é uma delas. Através de diversos estudos realizados, conclui-se que um dos maiores problemas originados pela poluição do ar em áreas urbanas é o provocado por oxidantes fotoquímicos, sendo o principal deles o ozônio ( $O_3$ ). O ozônio em superfície é formado por uma série de reações fotoquímicas complexas entre óxidos de nitrogênio ( $NO_x = NO + NO_2$ ) e compostos orgânicos voláteis (COV) na presença de luz solar. Os automóveis são as principais fontes de emissão dos precursores de ozônio, não descartando a contribuição destes por fontes estacionárias e biogênicas. Este trabalho tem como objetivo geral estudar o comportamento das concentrações de ozônio ( $O_3$ ) de superfície, óxidos de nitrogênio ( $NO_x$ ), monóxido de carbono (CO) e hidrocarbonetos (HC) na RMPA, através de simulações numéricas realizadas utilizando o PREP-CHEM (*Preprocessor of trace gas and aerosol emission fields for regional and global atmospheric chemistry models*) nos modelos CCATT-BRAMS (*Coupled Chemistry Aerosol and Tracer Transport model to the Brazilian developments on the Regional Atmospheric Modeling System*) e WRF/Chem (*Weather Research and Forecasting model coupled with Chemistry*). O domínio da modelagem é implementado sobre uma área cobrindo a RMPA, dando ênfase às fontes antrópicas (móveis) e biogênicas. Para a validação dos resultados, estes são comparados com dados de razão de mistura obtidos pelo monitoramento da qualidade do ar na RMPA.

## **Abstract**

SOUZA, Ludmila Pochmann. **Study of the impact of pollutant emissions in the metropolitan area of Porto Alegre - RS 2013**. Dissertation (Master Degree em Meteorologia) – Programa de Pós-Graduação em Meteorologia, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2013.

The emission of pollution from anthropogenic urban sources is a serious public health problem in large cities, which have infrastructure deficiencies caused by rapid population growth combined with the lack of urban planning. Depending on the level at which such pollutants are in the atmosphere, they can produce significant effects in humans, animals and even vegetation. Due to the increase in the rate of urbanization and industrial development over the past decades, there were increases in anthropogenic emissions of ozone precursors in the regions of Brazil highly urbanized and developed. Efforts to control air pollution are being directed to the improvement of air quality in these areas, with the application of control measures and strategies to reduce emissions, using mostly tools like numerical models of atmospheric chemistry and air quality monitoring. In the state of Rio Grande do Sul (RS), the Metropolitan Region of Porto Alegre (RMPA) is one of them. Through various studies, it was concluded that one of the major problems caused by air pollution in urban areas is caused by photochemical oxidants, the main one being the ozone ( $O_3$ ). The surface ozone is formed by a complex series of photochemical reactions between nitrogen oxides ( $NO_x = NO + NO_2$ ) and volatile organic compounds (VOCs) in the presence of sunlight. Cars are the main sources of emissions of ozone precursors, not discarding their contribution by stationary and biogenic sources. This work aims at investigating the behavior of the concentrations of surface ozone ( $O_3$ ) surface, nitrogen oxides ( $NO_x$ ), carbon monoxide (CO) and hydrocarbons (HC) in RMPA through numerical simulations performed using the PREP-CHEM -SRC (preprocessor of trace gas and aerosol emission fields for regional and global atmospheric chemistry models) models CCATT-BRAMS (Coupled Chemistry Aerosol and Tracer Transport model to the Brazilian developments on the Regional Atmospheric Modeling System) and WRF / Chem (Weather Research and Forecasting model coupled with Chemistry). The field of modeling is implemented on an area covering the MRPA, emphasizing the anthropogenic (mobile) and biogenic sources. To validate the results, they are compared with concentration data obtained by monitoring the air quality in the RMPA.

**Key-words:** tropospheric ozone, numerical modeling, pollutant dispersion, PREP-CHEM, CCATT-BRAMS, WRF/Chem.

## Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1 - Área de estudo - Região Metropolitana de Porto Alegre. Fonte: CUCHIARA, 2011.....	45
Figura 2 - Esquema do sistema CCATT-BRAMS. (Fonte: LONGO et al., 2013).....	47
Figura 3 - Alguns dos processos sub-grades envolvidos no transporte de gases e aerossóis e simulados pelo modelo CATT-BRAMS. Fonte: LONGO et al., 2013.....	48
Figura 4 - Representação do fluxo de programa durante a execução do modelo WRF/Chem. (Fonte: WRF ARW <i>Online Tutorial</i> ).....	50
Figura 5 - Imagem ilustrativa sobre o domínio da simulação. (Fonte: Google Maps). ....	51
Figura 6 - Ciclo diurno de emissões na RMPA. Fonte: FEPAM.....	53
Figura 7 - Carta sinótica do dia 05 de janeiro as 12Z (09 HL). Fonte: CPTEC/INPE. ....	58
Figura 8 - Radiossondagem do dia 05 de janeiro as 12Z (09 HL). Fonte: University of Wyoming. ....	58
Figura 9 - Carta sinótica do dia 08 de janeiro as 12Z (09 HL). Fonte: CPTEC/INPE. ....	59
Figura 10 - Imagem de satélite do dia 08 de janeiro as 18:30Z (15:30 HL). Fonte: DSA/CPTEC/INPE. ....	59
Figura 11 - Imagem de satélite do dia 11 de janeiro as 18Z (15 HL). Fonte: DSA/CPTEC/INPE. ....	60
Figura 12 - Radiossondagem do dia 12 de janeiro as 12Z (09 HL). Fonte: University of Wyoming. ....	60
Figura 13 - Localização das estações de monitoramento em Esteio (FEPAM) e em Porto Alegre (INMET). Fonte: CUCHIARA, 2011.....	61
Figura 14 - Pressão simulada pelo modelo CCATT-BRAMS (preto) e observada (cinza) e na estação Porto Alegre.....	62
Figura 15 - Pressão simulada pelo modelo CCATT-BRAMS (preto) e observada (cinza) e na estação Esteio.....	63
Figura 16 - Temperatura simulada pelo modelo CCATT-BRAMS (preto) e observada (cinza) e na estação Porto Alegre.....	63
Figura 17 - Temperatura simulada pelo modelo CCATT- BRAMS (preto) e observada (cinza) e na estação Esteio. ....	64

Figura 18 -	Velocidade do vento simulada pelo modelo CCATT-BRAMS (preto) e observada (cinza) e na estação Porto Alegre.....	64
Figura 19 -	Velocidade do vento (m/s) simulada pelo modelo CCATT-BRAMS (preto) e observada (cinza) e na estação Esteio.....	65
Figura 20 -	Vento em superfície simulado pelo modelo BRAMS as 00 HL no dia 05 de janeiro de 2009. ....	68
Figura 21 -	Vento em superfície simulado pelo modelo BRAMS as 12 HL no dia 05 de janeiro de 2009. ....	68
Figura 22 -	Vento em superfície simulado pelo modelo BRAMS as 00 HL no dia 06 de janeiro de 2009. ....	69
Figura 23 -	Vento em superfície simulado pelo modelo BRAMS as 12 HL no dia 06 de janeiro de 2009. ....	69
Figura 24 -	Vento em superfície simulado pelo modelo BRAMS as 00 HL no dia 07 de janeiro de 2009. ....	69
Figura 25 -	Vento em superfície simulado pelo modelo BRAMS as 12 HL no dia 07 de janeiro de 2009. ....	69
Figura 26 -	Vento em superfície simulado pelo modelo BRAMS as 00 HL no dia 08 de janeiro de 2009. ....	70
Figura 27 -	Vento em superfície simulado pelo modelo BRAMS as 12 HL no dia 08 de janeiro de 2009. ....	70
Figura 28 -	Vento em superfície simulado pelo modelo BRAMS as 00 HL no dia 09 de janeiro de 2009. ....	70
Figura 29 -	Vento em superfície simulado pelo modelo BRAMS as 12 HL no dia 09 de janeiro de 2009. ....	70
Figura 30 -	Vento em superfície simulado pelo modelo BRAMS as 00 HL no dia 10 de janeiro de 2009. ....	71
Figura 31 -	Vento em superfície simulado pelo modelo BRAMS as 12 HL no dia 10 de janeiro de 2009. ....	71
Figura 32 -	Vento em superfície simulado pelo modelo BRAMS as 00 HL no dia 11 de janeiro de 2009. ....	71
Figura 33 -	Vento em superfície simulado pelo modelo BRAMS as 12 HL no dia 11 de janeiro de 2009. ....	71
Figura 34 -	Vento em superfície simulado pelo modelo BRAMS as 00 HL no dia 12 de janeiro de 2009. ....	72
Figura 35 -	Vento em superfície simulado pelo modelo BRAMS as 12 HL no dia 12 de janeiro de 2009. ....	72
Figura 36 -	Razão de mistura de O <sub>3</sub> simulada pelo modelo CCATT-BRAMS as 06 HL no dia 05 de janeiro de 2009. ....	73
Figura 37 -	Razão de mistura de O <sub>3</sub> simulada pelo modelo CCATT-BRAMS as 15 HL no dia 05 de janeiro de 2009. ....	73
Figura 38 -	Razão de mistura de O <sub>3</sub> simulada pelo modelo CCATT-BRAMS as 06 HL no dia 06 de janeiro de 2009. ....	74
Figura 39 -	Razão de mistura de O <sub>3</sub> simulada pelo modelo CCATT-BRAMS as 15 HL no dia 06 de janeiro de 2009. ....	74
Figura 40 -	Razão de mistura de O <sub>3</sub> simulada pelo modelo CCATT-BRAMS as 06 HL no dia 07 de janeiro de 2009. ....	74
Figura 41 -	Razão de mistura de O <sub>3</sub> simulada pelo modelo CCATT-BRAMS as 15 HL no dia 07 de janeiro de 2009. ....	74

Figura 42 -	Razão de mistura de O <sub>3</sub> simulada pelo modelo CCATT-BRAMS as 06 HL no dia 08 de janeiro de 2009. ....	75
Figura 43 -	Razão de mistura de O <sub>3</sub> simulada pelo modelo CCATT-BRAMS as 15 HL no dia 08 de janeiro de 2009. ....	75
Figura 44 -	Razão de mistura de O <sub>3</sub> simulada pelo modelo CCATT-BRAMS as 06 HL no dia 09 de janeiro de 2009. ....	75
Figura 45 -	Razão de mistura de O <sub>3</sub> simulada pelo modelo CCATT-BRAMS as 15 HL no dia 09 de janeiro de 2009. ....	75
Figura 46 -	Razão de mistura de O <sub>3</sub> simulada pelo modelo CCATT-BRAMS as 06 HL no dia 10 de janeiro de 2009. ....	76
Figura 47 -	Razão de mistura de O <sub>3</sub> simulada pelo modelo CCATT-BRAMS as 15 HL no dia 10 de janeiro de 2009. ....	76
Figura 48 -	Razão de mistura de O <sub>3</sub> simulada pelo modelo CCATT-BRAMS as 06 HL no dia 11 de janeiro de 2009. ....	76
Figura 49 -	Razão de mistura de O <sub>3</sub> simulada pelo modelo CCATT-BRAMS as 15 HL no dia 11 de janeiro de 2009. ....	76
Figura 50 -	Razão de mistura de O <sub>3</sub> simulada pelo modelo CCATT-BRAMS as 0 HL no dia 12 de janeiro de 2009. ....	77
Figura 51 -	Razão de mistura de O <sub>3</sub> simulada pelo modelo CCATT-BRAMS as 15 HL no dia 12 de janeiro de 2009. ....	77
Figura 52 -	Razão de mistura de CO simulada pelo modelo CCATT-BRAMS as 00 HL no dia 05 de janeiro de 2009. ....	78
Figura 53 -	Razão de mistura de CO simulada pelo modelo CCATT-BRAMS as 08 HL no dia 05 de janeiro de 2009. ....	78
Figura 54 -	Razão de mistura de CO simulada pelo modelo CCATT-BRAMS as 00 HL no dia 06 de janeiro de 2009. ....	78
Figura 55 -	Razão de mistura de CO simulada pelo modelo CCATT-BRAMS as 08 HL no dia 06 de janeiro de 2009. ....	78
Figura 56 -	Razão de mistura de CO simulada pelo modelo CCATT-BRAMS as 00 HL no dia 07 de janeiro de 2009. ....	79
Figura 57 -	Razão de mistura de CO simulada pelo modelo CCATT-BRAMS as 08 HL no dia 07 de janeiro de 2009. ....	79
Figura 58 -	Razão de mistura de CO simulada pelo modelo CCATT-BRAMS as 00 HL no dia 08 de janeiro de 2009. ....	79
Figura 59 -	Razão de mistura de CO simulada pelo modelo CCATT-BRAMS as 08 HL no dia 08 de janeiro de 2009.....	79
Figura 60 -	Razão de mistura de CO simulada pelo modelo CCATT-BRAMS as 00 HL no dia 09 de janeiro de 2009.....	80
Figura 61 -	Razão de mistura de CO simulada pelo modelo CCATT-BRAMS as 08 HL no dia 09 de janeiro de 2009.....	80
Figura 62 -	Razão de mistura de CO simulada pelo modelo CCATT-BRAMS as 00 HL no dia 10 de janeiro de 2009.....	80
Figura 63 -	Razão de mistura de CO simulada pelo modelo CCATT-BRAMS as 08 HL no dia 10 de janeiro de 2009.....	80
Figura 64 -	Razão de mistura de CO simulada pelo modelo CCATT-BRAMS as 00 HL no dia 11 de janeiro de 2009.....	81
Figura 65 -	Razão de mistura de CO simulada pelo modelo CCATT-BRAMS as 08 HL no dia 11 de janeiro de 2009.....	81



Figura 66 -	Razão de mistura de CO simulada pelo modelo CCATT-BRAMS as 00 HL no dia 12 de janeiro de 2009.....	81
Figura 67 -	Razão de mistura de CO simulada pelo modelo CCATT-BRAMS as 08 HL no dia 12 de janeiro de 2009.....	81
Figura 68 -	Razão de mistura de HC simulada pelo modelo CCATT-BRAMS as 00 HL no dia 05 de janeiro de 2009.....	82
Figura 69 -	Razão de mistura de HC simulada pelo modelo CCATT-BRAMS as 12 HL no dia 05 de janeiro de 2009.....	82
Figura 70 -	Razão de mistura de HC simulada pelo modelo CCATT-BRAMS as 00 HL no dia 06 de janeiro de 2009.....	82
Figura 71 -	Razão de mistura de HC simulada pelo modelo CCATT-BRAMS as 12 HL no dia 06 de janeiro de 2009.....	82
Figura 72 -	Razão de mistura de HC simulada pelo modelo CCATT-BRAMS as 00 HL no dia 07 de janeiro de 2009.....	83
Figura 73 -	Razão de mistura de HC simulada pelo modelo CCATT-BRAMS as 12 HL no dia 07 de janeiro de 2009.....	83
Figura 74 -	Razão de mistura de HC simulada pelo modelo CCATT-BRAMS as 00 HL no dia 08 de janeiro de 2009.....	83
Figura 75 -	Razão de mistura de HC simulada pelo modelo CCATT-BRAMS as 12 HL no dia 08 de janeiro de 2009.....	83
Figura 76 -	Razão de mistura de HC simulada pelo modelo CCATT-BRAMS as 00 HL no dia 09 de janeiro de 2009. ....	84
Figura 77 -	Razão de mistura de HC simulada pelo modelo CCATT-BRAMS as 12 HL no dia 09 de janeiro de 2009.....	84
Figura 78 -	Razão de mistura de HC simulada pelo modelo CCATT-BRAMS as 00 HL no dia 10 de janeiro de 2009.....	84
Figura 79 -	Razão de mistura de HC simulada pelo modelo CCATT-BRAMS as 12 HL no dia 10 de janeiro de 2009.....	84
Figura 80 -	Razão de mistura de HC simulada pelo modelo CCATT-BRAMS as 00 HL no dia 11 de janeiro de 2009.....	85
Figura 81 -	Razão de mistura de HC simulada pelo modelo CCATT-BRAMS as 12 HL no dia 11 de janeiro de 2009.....	85
Figura 82 -	Razão de mistura de HC simulada pelo modelo CCATT-BRAMS as 00 HL no dia 12 de janeiro de 2009.....	85
Figura 83 -	Razão de mistura de HC simulada pelo modelo CCATT-BRAMS as 12 HL no dia 12 de janeiro de 2009.....	85
Figura 84 -	Razão de mistura de NO <sub>x</sub> simulada pelo modelo CCATT-BRAMS as 09 HL no dia 05 de janeiro de 2009.....	86
Figura 85 -	Razão de mistura de NO <sub>x</sub> simulada pelo modelo CCATT-BRAMS as 15 HL no dia 05 de janeiro de 2009.....	86
Figura 86 -	Razão de mistura de NO <sub>x</sub> simulada pelo modelo CCATT-BRAMS as 09 HL no dia 06 de janeiro de 2009.....	87
Figura 87 -	Razão de mistura de NO <sub>x</sub> simulada pelo modelo CCATT-BRAMS as 15 HL no dia 06 de janeiro de 2009.....	87
Figura 88 -	Razão de mistura de NO <sub>x</sub> simulada pelo modelo CCATT-BRAMS as 09 HL no dia 07 de janeiro de 2009.....	87
Figura 89 -	Razão de mistura de NO <sub>x</sub> simulada pelo modelo CCATT-BRAMS as 15 HL no dia 07 de janeiro de 2009.....	87

Figura 90 -	Razão de mistura de NO <sub>x</sub> simulada pelo modelo CCATT-BRAMS as 09 HL no dia 08 de janeiro de 2009.....	88
Figura 91 -	Razão de mistura de NO <sub>x</sub> simulada pelo modelo CCATT-BRAMS as 15 HL no dia 08 de janeiro de 2009.....	88
Figura 92 -	Razão de mistura de NO <sub>x</sub> simulada pelo modelo CCATT-BRAMS as 09 HL no dia 09 de janeiro de 2009.....	88
Figura 93 -	Razão de mistura de NO <sub>x</sub> simulada pelo modelo CCATT-BRAMS as 15 HL no dia 09 de janeiro de 2009.....	88
Figura 94 -	Razão de mistura de NO <sub>x</sub> simulada pelo modelo CCATT-BRAMS as 09 HL no dia 10 de janeiro de 2009.....	89
Figura 95 -	Razão de mistura de NO <sub>x</sub> simulada pelo modelo CCATT-BRAMS as 15 HL no dia 10 de janeiro de 2009.....	89
Figura 96 -	Razão de mistura de NO <sub>x</sub> simulada pelo modelo CCATT-BRAMS as 09 HL no dia 11 de janeiro de 2009.....	89
Figura 97 -	Razão de mistura de NO <sub>x</sub> simulada pelo modelo CCATT-BRAMS as 15 HL no dia 11 de janeiro de 2009.....	89
Figura 98 -	Razão de mistura de NO <sub>x</sub> simulada pelo modelo CCATT-BRAMS as 09 HL no dia 12 de janeiro de 2009.....	90
Figura 99 -	Razão de mistura de NO <sub>x</sub> simulada pelo modelo CCATT-BRAMS as 15 HL no dia 12 de janeiro de 2009.....	90
Figura 100 -	Razão de mistura de ozônio simulada pelo modelo CCATT-BRAMS (preto) e observada (cinza) e na estação Porto Alegre.....	91
Figura 101 -	Razão de mistura de ozônio simulada pelo modelo CCATT-BRAMS (preto) e observada (cinza) e na estação Esteio.....	91
Figura 102 -	Localização da estação de monitoramento de Esteio (FEPAM) em relação à BR116 e à REFAP/PETROBRAS. Fonte: CUCHIARA (2011). ....	92
Figura 103 -	Localização da estação de monitoramento em Porto Alegre. (Fonte: Google Maps). ....	93
Figura 104 -	Razão de mistura de monóxido de carbono simulada pelo modelo CCATT-BRAMS(preto) e observada (cinza) e na estação Porto Alegre.....	94
Figura 105 -	Razão de mistura de monóxido de carbono simulada pelo modelo CCATT-BRAMS (preto) e observada (cinza) e na estação Esteio.....	94
Figura 106 -	Razão de mistura de hidrocarbonetos simulada pelo modelo CCATT-BRAMS (preto) e observada (cinza) e na estação Porto Alegre.....	95
Figura 107 -	Razão de mistura de óxidos de nitrogênio simulada pelo modelo CCATT-BRAMS (preto) e observada (cinza) na estação Esteio....	96
Figura 108 -	Pressão simulada pelo modelo WRF/Chem (preto) e observada (cinza) e na estação Esteio.....	99
Figura 109 -	Pressão simulada pelo modelo WRF/Chem (preto) e observada (cinza) e na estação Porto Alegre.....	99
Figura 110 -	Temperatura simulada pelo modelo WRF/Chem (preto) e observada (cinza) e na estação Esteio.....	100
Figura 111 -	Temperatura simulada pelo modelo WRF/Chem (preto) e observada (cinza) e na estação Porto Alegre.....	100

Figura 112 -	Velocidade do vento simulada pelo modelo WRF/Chem (preto) e observada (cinza) e na estação Esteio.....	101
Figura 113 -	Velocidade do vento simulada pelo modelo WRF/Chem (preto) e observada (cinza) e na estação Porto Alegre.....	101
Figura 114 -	Vento em superfície simulado pelo modelo WRF as 00 HL no dia 05 de janeiro de 2009.....	104
Figura 115 -	Vento em superfície simulado pelo modelo WRF as 12 HL no dia 05 de janeiro de 2009.....	104
Figura 116 -	Vento em superfície simulado pelo modelo WRF as 00 HL no dia 06 de janeiro de 2009.....	104
Figura 117 -	Vento em superfície simulado pelo modelo WRF as 12 HL no dia 06 de janeiro de 2009.....	104
Figura 118 -	Vento em superfície simulado pelo modelo WRF as 00 HL no dia 07 de janeiro de 2009.....	105
Figura 119 -	Vento em superfície simulado pelo modelo WRF as 12 HL no dia 07 de janeiro de 2009.....	105
Figura 120 -	Vento em superfície simulado pelo modelo WRF as 00 HL no dia 08 de janeiro de 2009.....	105
Figura 121 -	Vento em superfície simulado pelo modelo WRF as 12 HL no dia 08 de janeiro de 2009.....	105
Figura 122 -	Vento em superfície simulado pelo modelo WRF as 00 HL no dia 09 de janeiro de 2009.....	106
Figura 123 -	Vento em superfície simulado pelo modelo WRF as 12 HL no dia 09 de janeiro de 2009.....	106
Figura 124 -	Vento em superfície simulado pelo modelo WRF as 00 HL no dia 10 de janeiro de 2009.....	106
Figura 125 -	Vento em superfície simulado pelo modelo WRF as 12 HL no dia 10 de janeiro de 2009.....	106
Figura 126 -	Vento em superfície simulado pelo modelo WRF as 00 HL no dia 11 de janeiro de 2009.....	107
Figura 127 -	Vento em superfície simulado pelo modelo WRF as 12 HL no dia 11 de janeiro de 2009.....	107
Figura 128 -	Vento em superfície simulado pelo modelo WRF as 00 HL no dia 12 de janeiro de 2009.....	107
Figura 129 -	Vento em superfície simulado pelo modelo WRF as 12 HL no dia 12 de janeiro de 2009.....	107
Figura 130 -	Razão de mistura de O <sub>3</sub> simulada pelo modelo WRF/Chem as 03 HL no dia 05 de janeiro de 2009.....	108
Figura 131 -	Razão de mistura de O <sub>3</sub> simulada pelo modelo WRF/Chem as 15 HL no dia 05 de janeiro de 2009.....	108
Figura 132 -	Razão de mistura de O <sub>3</sub> simulada pelo modelo WRF/Chem as 03 HL no dia 06 de janeiro de 2009.....	108
Figura 133 -	Razão de mistura de O <sub>3</sub> simulada pelo modelo WRF/Chem as 15 HL no dia 06 de janeiro de 2009.....	108
Figura 134 -	Razão de mistura de O <sub>3</sub> simulada pelo modelo WRF/Chem as 03 HL no dia 07 de janeiro de 2009.....	109
Figura 135 -	Razão de mistura de O <sub>3</sub> simulada pelo modelo WRF/Chem as 15 HL no dia 07 de janeiro de 2009.....	109

Figura 136 -	Razão de mistura de O <sub>3</sub> simulada pelo modelo WRF/Chem as 03 HL no dia 08 de janeiro de 2009.....	109
Figura 137 -	Razão de mistura de O <sub>3</sub> simulada pelo modelo WRF/Chem as 15 HL no dia 08 de janeiro de 2009.....	109
Figura 138 -	Razão de mistura de O <sub>3</sub> simulada pelo modelo WRF/Chem as 03 HL no dia 09 de janeiro de 2009.....	110
Figura 139 -	Razão de mistura de O <sub>3</sub> simulada pelo modelo WRF/Chem as 15 HL no dia 09 de janeiro de 2009.....	110
Figura 140 -	Razão de mistura de O <sub>3</sub> simulada pelo modelo WRF/Chem as 03 HL no dia 10 de janeiro de 2009.....	110
Figura 141 -	Razão de mistura de O <sub>3</sub> simulada pelo modelo WRF/Chem as 15 HL no dia 10 de janeiro de 2009.....	110
Figura 142 -	Razão de mistura de O <sub>3</sub> simulada pelo modelo WRF/Chem as 03 HL no dia 11 de janeiro de 2009.....	111
Figura 143 -	Razão de mistura de O <sub>3</sub> simulada pelo modelo WRF/Chem as 15 HL no dia 11 de janeiro de 2009.....	111
Figura 144 -	Razão de mistura de O <sub>3</sub> simulada pelo modelo WRF/Chem as 03 HL no dia 12 de janeiro de 2009.....	111
Figura 145 -	Razão de mistura de O <sub>3</sub> simulada pelo modelo WRF/Chem as 15 HL no dia 12 de janeiro de 2009.....	111
Figura 146-	Razão de mistura de CO simulada pelo modelo WRF/Chem as 06 HL no dia 05 de janeiro de 2009.....	112
Figura 147-	Razão de mistura de CO simulada pelo modelo WRF/Chem as 18 HL no dia 05 de janeiro de 2009.....	112
Figura 148-	Razão de mistura de CO simulada pelo modelo WRF/Chem as 06 HL no dia 06 de janeiro de 2009.....	112
Figura 149-	Razão de mistura de CO simulada pelo modelo WRF/Chem as 18 HL no dia 06 de janeiro de 2009.....	112
Figura 150-	Razão de mistura de CO simulada pelo modelo WRF/Chem as 06 HL no dia 07 de janeiro de 2009.....	113
Figura 151-	Razão de mistura de CO simulada pelo modelo WRF/Chem as 18 HL no dia 07 de janeiro de 2009.....	113
Figura 152-	Razão de mistura de CO simulada pelo modelo WRF/Chem as 06 HL no dia 08 de janeiro de 2009.....	113
Figura 153-	Razão de mistura de CO simulada pelo modelo WRF/Chem as 18 HL no dia 08 de janeiro de 2009.....	113
Figura 154 -	Razão de mistura de CO simulada pelo modelo WRF/Chem as 06 HL no dia 09 de janeiro de 2009.....	114
Figura 155 -	Razão de mistura de CO simulada pelo modelo WRF/Chem as 18 HL no dia 09 de janeiro de 2009.....	114
Figura 156 -	Razão de mistura de CO simulada pelo modelo WRF/Chem as 06 HL no dia 10 de janeiro de 2009.....	114
Figura 157 -	Razão de mistura de CO simulada pelo modelo WRF/Chem as 18 HL no dia 10 de janeiro de 2009.....	114
Figura 158 -	Razão de mistura de CO simulada pelo modelo WRF/Chem as 06 HL no dia 11 de janeiro de 2009.....	115
Figura 159 -	Razão de mistura de CO simulada pelo modelo WRF/Chem as 18 HL no dia 11 de janeiro de 2009.....	115

Figura 160 -	Razão de mistura de CO simulada pelo modelo WRF/Chem as 06 HL no dia 12 de janeiro de 2009.....	115
Figura 161 -	Razão de mistura de CO simulada pelo modelo WRF/Chem as 18 HL no dia 12 de janeiro de 2009.....	115
Figura 162 -	Razão de mistura de HC simulada pelo modelo WRF/Chem as 08 HL no dia 05 de janeiro de 2009.....	116
Figura 163 -	Razão de mistura de HC simulada pelo modelo WRF/Chem as 18 HL no dia 05 de janeiro de 2009.....	116
Figura 164 -	Razão de mistura de HC simulada pelo modelo WRF/Chem as 08 HL no dia 06 de janeiro de 2009.....	116
Figura 165 -	Razão de mistura de HC simulada pelo modelo WRF/Chem as 18 HL no dia 06 de janeiro de 2009.....	116
Figura 166 -	Razão de mistura de HC simulada pelo modelo WRF/Chem as 08 HL no dia 07 de janeiro de 2009.....	117
Figura 167 -	Razão de mistura de HC simulada pelo modelo WRF/Chem as 18 HL no dia 07 de janeiro de 2009.....	117
Figura 168 -	Razão de mistura de HC simulada pelo modelo WRF/Chem as 08 HL no dia 08 de janeiro de 2009.....	117
Figura 169 -	Razão de mistura de HC simulada pelo modelo WRF/Chem as 18 HL no dia 08 de janeiro de 2009.....	117
Figura 170 -	Razão de mistura de HC simulada pelo modelo WRF/Chem as 08 HL no dia 09 de janeiro de 2009.....	118
Figura 171 -	Razão de mistura de HC simulada pelo modelo WRF/Chem as 18 HL no dia 09 de janeiro de 2009.....	118
Figura 172 -	Razão de mistura de HC simulada pelo modelo WRF/Chem as 08 HL no dia 10 de janeiro de 2009.....	118
Figura 173 -	Razão de mistura de HC simulada pelo modelo WRF/Chem as 18 HL no dia 10 de janeiro de 2009.....	118
Figura 174 -	Razão de mistura de HC simulada pelo modelo WRF/Chem as 08 HL no dia 11 de janeiro de 2009.....	119
Figura 175 -	Razão de mistura de HC simulada pelo modelo WRF/Chem as 18 HL no dia 11 de janeiro de 2009.....	119
Figura 176 -	Razão de mistura de HC simulada pelo modelo WRF/Chem as 08 HL no dia 12 de janeiro de 2009.....	119
Figura 177 -	Razão de mistura de HC simulada pelo modelo WRF/Chem as 18 HL no dia 12 de janeiro de 2009.....	119
Figura 178 -	Razão de mistura de NO <sub>x</sub> simulada pelo modelo WRF/Chem as 06 HL no dia 05 de janeiro de 2009.....	120
Figura 179 -	Razão de mistura de NO <sub>x</sub> simulada pelo modelo WRF/Chem as 15 HL no dia 05 de janeiro de 2009.....	120
Figura 180 -	Razão de mistura de NO <sub>x</sub> simulada pelo modelo WRF/Chem as 06 HL no dia 06 de janeiro de 2009.....	120
Figura 181 -	Razão de mistura de NO <sub>x</sub> simulada pelo modelo WRF/Chem as 15 HL no dia 06 de janeiro de 2009.....	120
Figura 182 -	Razão de mistura de NO <sub>x</sub> simulada pelo modelo WRF/Chem as 06 HL no dia 07 de janeiro de 2009.....	121
Figura 183 -	Razão de mistura de NO <sub>x</sub> simulada pelo modelo WRF/Chem as 15 HL no dia 07 de janeiro de 2009.....	121

Figura 184 -	Razão de mistura de NO <sub>x</sub> simulada pelo modelo WRF/Chem as 06 HL no dia 08 de janeiro de 2009.....	121
Figura 185 -	Razão de mistura de NO <sub>x</sub> simulada pelo modelo WRF/Chem as 15 HL no dia 08 de janeiro de 2009.....	121
Figura 186 -	Razão de mistura de NO <sub>x</sub> simulada pelo modelo WRF/Chem as 06 HL no dia 09 de janeiro de 2009.....	122
Figura 187 -	Razão de mistura de NO <sub>x</sub> simulada pelo modelo WRF/Chem as 15 HL no dia 09 de janeiro de 2009.....	122
Figura 188 -	Razão de mistura de NO <sub>x</sub> simulada pelo modelo WRF/Chem as 06 HL no dia 10 de janeiro de 2009.....	122
Figura 189 -	Razão de mistura de NO <sub>x</sub> simulada pelo modelo WRF/Chem as 15 HL no dia 10 de janeiro de 2009.....	122
Figura 190 -	Razão de mistura de NO <sub>x</sub> simulada pelo modelo WRF/Chem as 06 HL no dia 11 de janeiro de 2009.....	123
Figura 191 -	Razão de mistura de NO <sub>x</sub> simulada pelo modelo WRF/Chem as 15 HL no dia 11 de janeiro de 2009.....	123
Figura 192 -	Razão de mistura de NO <sub>x</sub> simulada pelo modelo WRF/Chem as 06 HL no dia 12 de janeiro de 2009.....	123
Figura 193 -	Razão de mistura de NO <sub>x</sub> simulada pelo modelo WRF/Chem as 15 HL no dia 12 de janeiro de 2009.....	123
Figura 194 -	Razão de mistura de ozônio simulada pelo modelo WRF/Chem (preto) e observada (cinza) e na estação Porto Alegre. ....	124
Figura 195 -	Razão de mistura de ozônio simulada pelo modelo WRF/Chem (preto) e observada (cinza) e na estação Esteio.....	125
Figura 196 -	Razão de mistura de monóxido de carbono simulada pelo modelo WRF/Chem (preto) e observada (cinza) e na estação Esteio.....	126
Figura 197 -	Razão de mistura de monóxido de carbono simulada pelo modelo WRF/Chem (preto) e observada (cinza) e na estação Porto Alegre.....	126
Figura 198 -	Razão de mistura de hidrocarbonetos simulada pelo modelo WRF/Chem (preto) e observada (cinza) e na estação Porto Alegre.....	127
Figura 199 -	Razão de mistura de óxidos de nitrogênio simulada pelo modelo WRF/Chem (preto) e observada (cinza) e na estação Esteio.....	128

## Lista de Tabelas

Tabela 1 -	Distribuição da frota veicular por categoria e em número de veículos na RMPA.....	34
Tabela 2 -	Consumo de combustível na RMPA.....	34
Tabela 3 -	Taxas de emissão para RMPA.....	35
Tabela 4 -	Concentrações de referência para padrões de qualidade do ar estabelecidos pela resolução CONAMA 03/90.	42
Tabela 5 -	Características do domínio da simulação e opções de configuração dos modelos CCATT-BRAMS e WRF/Chem.....	52
Tabela 6 -	Porcentagem de emissão de hidrocarboneto particionado por espécie, para a cidade de Porto Alegre.....	54
Tabela 7 -	Análise estatística das variáveis meteorológicas simuladas pelo modelo BRAMS.....	66
Tabela 8 -	Análise estatística das concentrações de O <sub>3</sub> , CO, NO <sub>x</sub> e HCT simuladas pelo CCATT-BRAMS, para as estações de Esteio e Porto Alegre (PA).....	97
Tabela 9 -	Análise estatística das variáveis meteorológicas simuladas pelo modelo WRF.....	102
Tabela 10 -	Análise estatística das concentrações de O <sub>3</sub> , CO, NO <sub>x</sub> e HCT simuladas pelo CCATT-BRAMS, para as estações de Esteio e Porto Alegre (PA).....	129

## **Lista de Anexos**

Anexo A -	Cartas Sinóticas de Superfície.....	141
Anexo B -	Radiossondagens.....	147
Anexo C -	Imagens do satélite GOES 10.....	151



## Lista de Equações

Equação 1 - Cálculo das taxas de emissão.....	35
Equação 2 - Índice de concordância ( $d$ ).....	55
Equação 3 - Coeficiente de Correlação ( $R$ ).....	55
Equação 4 - Raiz do erro médio quadrático (RMSE).....	56

## Lista de Siglas e Abreviaturas

3BEM	<i>Brazilian Biomass Burning Emission Model</i>
AERONET	<i>Aerosol Robotic NETwork</i>
AFWA	<i>Air Force Weather Agency</i>
ANFAVEA	Associação Nacional dos Fabricantes de Veículos Automotores
ANP	Agência Nacional do Petróleo
BRAMS	<i>Brazilian developments on the Regional Atmospheric Modeling System</i>
C <sub>10</sub> H <sub>16</sub>	Monoterpenos
CAMx	<i>Comprehensive Air quality Model with extensions</i>
CALGRID	<i>Californian Grid Model</i>
CAPE	Energia Potencial Convectiva Disponível
CAPES	Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior
CCATT-BRAMS	<i>Coupled Chemistry Aerosol and Tracer Transport model to the Brazilian developments on the Regional Atmospheric Modeling System</i>
CETESB	Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental do Estado de São Paulo
CLP	Camada Limite Planetária
CO	Monóxido de Carbono
CO <sub>2</sub>	Gás Carbônico
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
COV	Complexo Orgânico Volátil

COVNM	Compostos Orgânicos Voláteis Não Metanos
CPPMet	Centro de Pesquisas e Previsões Meteorológicas
CPTEC	Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos
CTOT, VTOT e TOTL	índices de taxas de convecção
d	Índice de concordância
DETRAN/RS	Departamento de Trânsito do Estado do Rio Grande do Sul
DISME	Distrito de Meteorologia
DSA	Divisão de Satélites
EDGAR	<i>Emission Database for Global Atmospheric Research</i>
E	<i>East</i> (Leste)
ESEF	Escola Superior de Educação Física
EPA	<i>Environmental Protection Agency</i>
FAA	<i>Federal Aviation Administration</i>
FAPERGS	Fundação de Amparo à Pesquisa no Rio Grande do Sul
FEPAM	Fundação Estadual de Proteção Ambiental Henrique Luiz Roessler
FINEP	Financiadora de Estudos e Projetos
FSL	<i>Forecast System Laboratory</i>
GOES	<i>Geostationary Operational Environmental Satellite</i>
GMAI	Grupo de Modelagem da Atmosfera e Interfaces
GPT	Grupo de Previsão do Tempo
H <sub>2</sub> O	Água
H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	Peróxido de Hidrogênio
H <sub>2</sub> S	Sulfeto de Hidrogênio
hab	Habitantes
HCl	Ácido Clorídrico
HC	Hidrocarboneto
HCT	Hidrocarbonetos Totais
HL	Hora Local
hPa	hecto pascais (unidade de medida de pressão atmosférica)
IBAMA	Instituto Nacional do Meio Ambiente e Recursos Naturais Renováveis

IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IEMA	Instituto Energia e Meio Ambiente
IGBP	Programa Internacional da Geosfera Biosfera
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
JST	Jato Subtropical
K	Índice de probabilidade de ocorrência de tempestades
km	quilômetros
kmAc	quilometragem acumulada
LES	<i>Large Eddy Simulations</i>
LIFT	índice de Instabilidade por levantamento
mb	milibares (unidade de medida de pressão atmosférica)
mm	milímetros
MEGAN	<i>Model of Emissions of Gases and Aerosols from Nature</i>
MOCAGE	<i>Multiscale Chemistry and Transport Model</i>
MP	Material Particulado
NCAR	National Center for Atmospheric Research
NCEP	National Center for Environmental Prediction
NE	Nordeste
NO	Monóxido de Nitrogênio
NO <sub>2</sub>	Dióxido de Nitrogênio
NOAA	<i>National Oceanic and Atmospheric Administration</i>
NOX	Óxidos de Nitrogênio
O	Molécula de Oxigênio
O <sub>2</sub>	Gás Oxigênio
O <sub>3</sub>	Ozônio
OLSON, OGE	banco de dados de carbono na vegetação
PAN	Peroxiacetilnitrato ou Nitrato de Peroxiacetila
PCPV	Plano de Controle de Poluição Veicular
PIV's	Postos de Inspeção Veiculares
PNM	Pressão ao Nível do Mar
PREP-CHEM	<i>Preprocessor of trace gas and aerosol emission fields for regional and global atmospheric chemistry models</i>

ppb	partes por bilhão
R	Índice de correlação
RAMS	<i>Regional Atmospheric Modeling System</i>
REFAP	Refinaria Alberto Pasqualine
RETRO	<i>Reanalysis of the Tropospheric chemical composition</i>
RMPA	Região metropolitana de Porto Alegre
RMSE	<i>The Root Square Error</i> ou Raiz do erro médio quadrático
S	South (Sul)
SBPA	Aeroporto Salgado Filho (South America Brazil Porto Alegre)
SE	sudeste
SHOW	<i>Showalter</i>
SMAM	Secretaria Municipal do Meio Ambiente
SO <sub>2</sub>	Dióxido de Enxofre
SO <sub>3</sub>	Trióxido de Enxofre
SO <sub>x</sub>	Óxidos de Enxofre
SPACK	<i>Simplified Preprocessor for Atmospheric Chemical Kinetics</i>
SWEAT	<i>Severe Weather Threat Index</i>
UFPeI	Universidade Federal de Pelotas
UFRGS	Universidade Federal do Rio Grande do Sul
U.S EPA	<i>United States Environmental Protection Agency</i>
UTC	<i>Coordinated Universal Time</i>
W	West (Oeste)
WRF	<i>Weather Research and Forecasting model</i>
WRF/Chem	<i>Weather Research and Forecasting model coupled with Chemistry</i>
Z	<i>Zulu Time Zone</i>

## Sumário

<b>1 Introdução.....</b>	<b>26</b>
<b>2 Objetivos.....</b>	<b>28</b>
<b>3 Revisão de Literatura.....</b>	<b>29</b>
<b>3.1 Fontes e Inventários de Emissões.....</b>	<b>29</b>
<b>3.1.1 Fontes Antropogênicas.....</b>	<b>30</b>
<b>3.1.2 Fontes Biogênicas.....</b>	<b>30</b>
<b>3.1.3 Inventário de emissões.....</b>	<b>31</b>
<b>3.2 Ozônio.....</b>	<b>36</b>
<b>3.3 Modelagem na formação de Ozônio.....</b>	<b>38</b>
<b>3.4 Padrões de qualidade do ar .....</b>	<b>41</b>
<b>4 Materiais e Métodos.....</b>	<b>44</b>
<b>4.1 Descrição do local de Estudo.....</b>	<b>44</b>
<b>4.2 Descrição do Modelo CCATT-BRAMS.....</b>	<b>45</b>
<b>4.3 Descrição do Modelo WRF/Chem.....</b>	<b>49</b>
<b>4.4 Características da simulação.....</b>	<b>50</b>
<b>4.4.1 PREP-CHEM (<i>PREProcessor of Trace gas and Aerosol Emission fields for Regional and Global Atmospheric CHEMistry Models</i>).....</b>	<b>53</b>
<b>4.5 Análise estatística dos resultados.....</b>	<b>55</b>
<b>4.5.1 Índice de concordância (<i>d</i>).....</b>	<b>55</b>
<b>4.5.2 Coeficiente de Correlação (<i>R</i>).....</b>	<b>55</b>
<b>4.5.3 Raiz do erro médio quadrático (RMSE).....</b>	<b>56</b>
<b>5 Resultados.....</b>	<b>57</b>
<b>5.1 Análise sinótica.....</b>	<b>57</b>

<b>5.2 Simulação com o modelo CCATT-BRAMS.....</b>	<b>61</b>
<b>5.2.1 Simulação das condições meteorológicas.....</b>	<b>61</b>
<b>5.2.2 Simulação das espécies químicas.....</b>	<b>72</b>
<b>5.3 Simulação com o modelo WRF/Chem.....</b>	<b>98</b>
<b>5.3.1 Simulação das condições meteorológicas.....</b>	<b>98</b>
<b>5.3.2 Simulação das espécies químicas.....</b>	<b>107</b>
<b>6 Conclusões.....</b>	<b>130</b>
<b>7 Referências.....</b>	<b>134</b>

## 1 Introdução

Atualmente, um dos assuntos mais discutidos em âmbito mundial é o tema Meio Ambiente. Com o crescimento populacional, industrial e o intenso tráfego de veículos nas últimas décadas, houve um acréscimo nas emissões atmosféricas de poluentes gerando impactos sobre o meio ambiente e existe uma tendência de aumento nas emissões nos próximos anos. As substâncias poluidoras podem ser de origem natural ou antrópica e podem estar no estado gasoso, líquido ou sólido. Alguns exemplos de fontes urbanas causadoras das sérias modificações da composição química da atmosfera, da água e do solo, são as emissões de efluentes domésticos e industriais e as toneladas de gases poluentes e aerossóis emitidos diariamente por veículos automotores e indústrias, que podem afetar a química atmosférica nas escalas local, continental e mesmo global. A atmosfera urbana contém diversos tipos de poluentes, constituindo uma das mais graves ameaças à qualidade de vida de seus habitantes. Nas grandes cidades a frota veicular é a principal fonte de poluentes atmosféricos devido ao processo de combustão incompleta, emitindo principalmente monóxido de carbono (CO), hidrocarbonetos (HC), óxidos de enxofre (SO<sub>x</sub>), óxidos de nitrogênio (NO<sub>x</sub>) e material particulado (MP).

Uma maneira para definir a poluição do ar, consiste em um estado da atmosfera na qual substâncias estão presentes em concentrações maiores que em um ambiente normal (atmosfera limpa). A concentração de um poluente é a razão entre a quantidade ou a massa deste e o volume da solução em que esse composto encontra-se dissolvido, que neste estudo é o ar (ARYA, 1999). Esta concentração vai depender da taxa em que este poluente é emitido, dos processos de produção e remoção e das características meteorológicas (LAWRENCE et al., 2007).



O conhecimento sobre a poluição atmosférica antrópica e seus efeitos nocivos na população têm motivado a comunidade científica internacional a prover metodologias para a estimativa, controle e mitigação, bem como as ferramentas capazes de quantificar os impactos das diversas fontes de poluição. Sabe-se que devido às características dinâmicas da atmosfera no processo de dispersão, os gases poluentes podem ser transportados por vários quilômetros, contaminando e prejudicando a saúde da população e o meio vegetal. E também que, um dos maiores problemas originados pela poluição do ar em áreas urbanas é o provocado por oxidantes fotoquímicos, sendo o principal deles o ozônio ( $O_3$ ), incluindo outras espécies como dióxido de nitrogênio ( $NO_2$ ), peroxiacetilnitrato (PAN) e peróxido de hidrogênio ( $H_2O_2$ ). O ozônio em superfície é formado por uma série de reações fotoquímicas complexas entre óxidos de nitrogênio ( $NO_x = NO + NO_2$ ) e compostos orgânicos voláteis (COV) na presença de luz solar (DERWENT et al., 2003). Os automóveis são as principais fontes de emissão dos precursores de ozônio (ATKINSON-PALOMBO et al., 2006), não descartando a contribuição destes por fontes estacionárias (TAO et al., 2005) e biogênicas. Altas concentrações de ozônio estão relacionadas à redução da função pulmonar em estudos estatísticos e clínicos (ABELSOHN et al., 2002; GIODA & GIODA, 2006; LIN et al., 2003; SALDIVA et al., 1994, 1995).

No que diz respeito ao estudo de emissão, transporte, deposição e concentração de poluentes na atmosfera, a modelagem numérica é um dos métodos mais importantes para o estudo da poluição fotoquímica. Utilizando essa técnica, o presente estudo pretende avaliar o impacto das emissões da RMPA na formação e na destruição do ozônio troposférico em escala local e regional. Pretende, ainda, verificar a influência de parâmetros meteorológicos na dispersão dos poluentes e verificar a variação diurna dos contaminantes primários e secundários. Este estudo propiciará informações relativas à formação dos contaminantes atmosféricos, promovendo o conhecimento do transporte e reações fotoquímicas na RMPA além de contribuir para o desenvolvimento da aplicação de modelos numéricos. Neste caso, tanto o diagnóstico quanto o prognóstico do ozônio e seus precursores em escalas local e regional de emissões urbanas podem dar subsídios a futuros estudos de qualidade do ar e clima.

Na sequência, este trabalho está subdividido da seguinte maneira: objetivos, revisão de literatura, metodologia, resultados, conclusões e referências.

## 2 Objetivos

Este trabalho tem como objetivo geral testar a acurácia dos resultados de dois modelos numéricos de previsão da qualidade do ar a partir da utilização de uma nova ferramenta para preparar os campos de emissões, o PREP-CHEM (*Preprocessor of trace gas and aerosol emission fields for regional and global atmospheric chemistry models*), para a Região Metropolitana de Porto Alegre (RMPA) e estudar o comportamento das concentrações de ozônio (O<sub>3</sub>) troposférico, óxidos de nitrogênio (NO<sub>x</sub>), monóxido de carbono (CO) e hidrocarbonetos (HC).

As simulações foram realizadas utilizando os modelos CCATT-BRAMS (*Coupled Chemistry Aerosol and Tracer Transport model to the Brazilian developments on the Regional Atmospheric Modeling System*) e *Weather Research and Forecasting model coupled with Chemistry* (WRF/Chem). Os resultados das simulações serão comparados com dados de razão de mistura medidos pela Fundação Estadual de Proteção Ambiental Henrique Luiz Roessler (FEPAM).

Os objetivos específicos do trabalho são:

- Avaliar a influência de parâmetros meteorológicos na dispersão dos poluentes;
- Avaliar a variação diurna dos poluentes primários e secundários;
- Realizar análises dos resultados dos modelos CCATT-BRAMS e WRF/Chem a partir da utilização do *PREProcessor of Trace gas and Aerosol Emission fields for Regional and Global Atmospheric CHEMistry Models* (PREP-CHEM).

### **3 Revisão de Literatura**

Segundo Arya (1999), todo o processo de análise e estudo deve levar em conta que, a partir da emissão, a poluição do ar urbano em forma de plumas é transportada pelo vento para outras áreas (rurais e desertos), longe de sua região de origem. Além disso, muitas fontes rurais e agrícolas, bem como fontes naturais localizadas dentro e fora da região, contribuem para a poluição do ar. A Região Metropolitana de Porto Alegre (RMPA) encaixa-se perfeitamente nessa definição, pois inclui áreas de tráfego intenso, parques industriais e amplas áreas urbanas e rurais. Distâncias de transporte e tempos de viagem envolvidos para estas espécies de poluentes são grandes o suficiente para algumas transformações químicas. Além disso, a área de estudo se caracteriza pelo terreno complexo e por consideráveis variações no uso do solo. Consequentemente, os parâmetros meteorológicos que afetam a difusão, o transporte, a transformação e os processos de remoção são funções do tempo e do espaço. Portanto, um modelo regional de qualidade do ar deve incluir informações detalhadas sobre todas as emissões antrópicas e biogênicas (estimadas para cada área de grade horizontal), uso do solo, topografia e meteorologia regional, incluindo as características de dispersão.

#### **3.1 Fontes e Inventário de Emissões**

A caracterização da poluição de origem urbana requer um conhecimento detalhado de suas fontes. Existem dois tipos de fontes de emissão de poluentes: antrópica (causada pela influência do homem) e biogênica (emissões naturais). Um inventário de emissões abrangente de fontes antropogênicas e biogênicas é fundamental em estudos de controle de qualidade do ar.

### 3.1.1 Fontes Antropogênicas

As fontes antrópicas associadas às atividades tecnológicas contêm milhares, ou mesmo milhões, de fontes individuais que variam de pequenas fontes, tais como incineradores e churrasqueiras de quintal, a fontes de grande porte, como usinas alimentadas a combustíveis fósseis e outras instalações industriais. Também são divididas em duas categorias: estacionárias e móveis.

As fontes antropogênicas estacionárias provêm do uso de combustíveis fósseis [material particulado (MP), dióxido e trióxido de enxofre ( $\text{SO}_2$  e  $\text{SO}_3$ ), monóxido de carbono (CO), hidrocarbonetos (HC) e óxidos de nitrogênio ( $\text{NO}_x$ )], dos processos industriais [material particulado, dióxido e trióxido de enxofre, ácido clorídrico (HCl), hidrocarbonetos, mercaptans, háfnio, sulfeto de hidrogênio ( $\text{H}_2\text{S}$ ) e óxidos de nitrogênio] e da queima de resíduos sólidos (material particulado, dióxido e trióxido de enxofre, ácido clorídrico e óxidos de nitrogênio). Já as fontes antropogênicas móveis se subdividem em veículos automotores (material particulado, monóxido de carbono, óxidos de nitrogênio, hidrocarbonetos e aldeídos) e aviões e barcos (óxidos de enxofre e óxidos de nitrogênio).

### 3.1.2 Fontes Biogênicas

A floresta é a principal fonte biogênica de compostos orgânicos voláteis não metanos (COVNM) para a atmosfera, principalmente sob a forma de isopreno e monoterpenos (GUENTHER et al., 1995). A importância da participação dos compostos orgânicos voláteis (COV) na química da troposfera está associada à presença de níveis elevados de óxidos de nitrogênio ( $\text{NO}_x$ ) e às reações fotoquímicas em que participam radicais hidroxilas e peroxiradicaís, que levam à formação do ozônio troposférico (MOREIRA, 2003). Na atmosfera, os COV podem ainda reagir e gerar uma variedade de produtos oxidantes como, por exemplo, os carbonilos, cuja degradação fotoquímica representa uma fonte significativa de radicais livres para a atmosfera, os ácidos orgânicos, que contribuem para a deposição ácida, o monóxido de carbono, o qual é um gás que afeta a concentração de radicais hidroxilas, e uma série de compostos condensáveis que estão envolvidos na formação de aerossóis naturais atmosféricos (KAVOURAS et al., 1998; PIO et al., 2001). A interação e reação destes compostos na baixa troposfera são importantes

nos episódios de poluição fotoquímica (PARRA et al., 2004) em áreas urbanas (BENJAMIN et al., 1996; CHANG et al., 2005) e são muito importantes em áreas rurais (TSIGARIDIS; KANANKIDOU, 2002). A emissão de COV pelas plantas é influenciada por uma variedade de fatores físicos e biológicos (variação genética, luz, temperatura, umidade, concentração de gás carbônico, condutância estomática, desenvolvimento da folha, hora do dia e estação do ano) [NETO et al., 2007]. A quantificação dos fluxos de COV é de extrema importância não só em termos globais, mas também como dados de entrada de modelos fotoquímicos que permitem descrever e simular os processos envolvidos em poluição atmosférica (MOREIRA, 2003).

A aplicação de um modelo de dispersão para cada uma dessas fontes é impraticável. Mesmo a suposição básica implicada em tal abordagem de que as contribuições de cada fonte para a concentração total de um ponto receptor são aditivas é questionável. O nível de especificidade é, de fato, a característica principal que define um inventário, e também a causa principal das incertezas (ALONSO, 2011).

### **3.1.3 Inventário de emissões**

Um inventário de emissões deve conter as variações diurnas, semanais e sazonais de emissões, e essa informação é essencial para que a modelagem da qualidade do ar urbano seja bem sucedida (ARYA, 1999). Um inventário de emissões é uma lista da quantidade de poluentes emitidos por todas as fontes dentro dos limites fixos de uma área particular de um determinado período de tempo. Normalmente não é prático e economicamente viável monitorar, continuamente, cada fonte de emissão na região e também não é possível controlar as concentrações de poluentes no ar ambiente em muitos pontos. Na prática, o método usado para desenvolver o inventário de emissões utiliza o monitoramento real das emissões de fontes maiores e estima as emissões de fontes menores, considerando fatores de emissão desenvolvidos para cada tipo de fonte. Para desenvolver um inventário de emissões para uma área deve-se (1) listar os tipos de fontes, tais como automóveis, lareiras em casa, e assim por diante, (2) determinar os tipos de poluentes atmosféricos emitidos a partir de cada tipo de fonte, como SO<sub>2</sub>, CO e material particulado, (3) encontrar os fatores de emissão adequados (ver, por

exemplo, *United States Environmental Protection Agency* (U.S EPA) , 1973-1983) para cada um dos poluentes de interesse, e (4) estimar o número e o tamanho das fontes específicas na área. Fatores de emissão válidos para cada fonte de poluição do ar são a chave para um inventário de emissões preciso. Dados sobre estimativas das emissões reais estão disponíveis a partir de muitos manuais, publicações do governo e artigos científicos. Fatores de emissão devem ser criticamente examinados para assegurar que os testes a partir do qual eles foram obtidos são representativos e próximos da realidade (predominantes) em condições operacionais. Dados sobre as emissões estão disponíveis a partir de muitas fontes, incluindo comissões estaduais e de desenvolvimento industrial, câmaras de comércio, associações locais, fabricantes ou distribuidores industriais, revendedores ou distribuidores de combustível, empresas de seguro, agências de controle de poluição do ar, empresas de transportes e departamentos estaduais.

A contribuição relativa de cada fonte para a emissão de um determinado poluente primário, dentro de um ambiente urbano, envolve um complexo levantamento de diversos fatores. Para fontes móveis, por exemplo, é importante conhecer o tipo e idade da frota veicular, o comportamento do tráfego e a configuração das vias. Os fatores de emissão também dependem fortemente do padrão de condução do veículo, o qual pode variar em função da localidade (BERKOWICZ et al., 2006). Para as indústrias, as emissões podem ser inventariadas em três níveis de detalhamento, ou seja, nível de planta, referente a uma atividade industrial que poderá conter várias atividades emissoras, nível pontual, referente às medidas diretas de chaminés, dutos, ventos ou outras fontes de emissões e nível de processo, referente à operação unitária de uma categoria específica de fontes (EPA, 1999).

Existe ainda uma deficiência das informações contidas nestes inventários, as informações existentes no Brasil ainda não contêm exatamente a precisão necessária, o que acarreta ainda uma grande limitação na modelagem da qualidade do ar nas cidades brasileiras. Por isso a vantagem da utilização da modelagem numérica em estudos de qualidade do ar é exatamente a possibilidade de fazer uma avaliação indireta da qualidade da informação existente.

O inventário local de fontes antropogênicas móveis da RMPA foi realizado pela FEPAM no âmbito de um projeto estruturante FINEP-FAPERGS (Projeto Estruturante em Agroenergia (Biodiesel) do RS – Subprojeto Ambiental, Processo

0800042), adequado às metodologias aceitas nacionalmente e em consenso com a metodologia desenvolvida pela U.S. EPA. Os fatores de emissão utilizados foram fornecidos pela Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB) e pelo Instituto Energia e Meio Ambiente (IEMA), adequadas e corrigidas para a frota circulante do RS.

Os métodos utilizados para elaboração do inventário foram pelas estimativas dos fatores de emissão dos veículos. Esses fatores estimam as emissões de fontes móveis quando combinados com as correções para os valores de quilometragem acumulada [kmAc], as estimativas de consumo de combustível e a autonomia de combustível da frota. A partir dos dados disponíveis para o Estado, considerou-se que a adaptação da metodologia “*Bottom Up*” foi a que melhor se harmonizou ao cenário gaúcho. A mesma possibilita a quantificação e identificação das emissões de poluentes de forma desagregada, ou seja, partindo dos consumidores finais e do uso dos veículos para avaliar o consumo total de combustíveis no Estado.

Os dados referentes à frota de veículos foram obtidos no Departamento de Trânsito do Estado do Rio Grande do Sul (DETRAN/RS). Como a região estudada não apresenta Postos de Inspeção Veiculares (PIV’S), com equipamentos capazes de mensurar a quilometragem média rodada pelos veículos, toda a abordagem do estudo foi feita em função da frota circulante. O inventário foi organizado de forma que a frota de veículos fosse dividida em categorias, conforme a tab.1. A tabela mostra a distribuição da frota na RMPA, por categoria e por número de veículos. Apesar de apresentarem diferentes subcategorias, conforme orientação da Associação Nacional dos Fabricantes de Veículos Automotores (ANFAVEA) pode ser utilizada uma média para a variável referente à quilometragem.

Tabela 1 – Distribuição da frota veicular por categoria e em número de veículos na RMPA.

Categoria dos veículos	Número de veículos (1000 unidades)
Veículos quatro rodas ciclo Otto/ Gasolina	1.078.855
Veículos quatro rodas ciclo Otto/ Álcool	69.422
Motocicletas e motonetas	258.015
Caminhões	40.584
Caminhonetes	13.397
Camionetas	11.564
Micro-ônibus	4.436
Ônibus	9.954
TOTAL	1.486.227

Fonte: DETRAN/RS, 2009.

Em conjunto com os dados do DETRAN, as informações referentes ao consumo de combustível são importantes para a caracterização das emissões atmosféricas da RMPA. Os volumes de combustível consumidos foram obtidos junto a Agência Nacional do Petróleo (ANP). Há uma considerável discrepância entre o volume real consumido e os valores compilados, pois não é possível afirmar que um veículo abastecido em determinado município transite apenas no mesmo. O consumo de combustível na RMPA está evidenciado na tab. 2, onde podemos notar que um total de 1.836.358.411 litros são consumidos anualmente na RMPA.

Tabela 2 – Consumo de combustível na RMPA.

Combustível	Consumo (Litros)
Gasolina	913.838.962
Álcool	185.907.727
Diesel	736.611.722
TOTAL	1.836.358.411

Fonte: ANP, 2009.



A RMPA, apesar de ser quase na sua totalidade urbana, apresenta municípios com uma população rural relativamente considerável. Sendo assim, os dados de consumo ficam ponderados pela população urbana de cada município, que posteriormente são corrigidos, levando em consideração o número de veículos e um fator de correção para consumo.

O cálculo das taxas de emissão é dado pela seguinte expressão geral:

$$E_{pol, ano} = \sum_{ano-modelo} F_e \times N \times C \times A \times 10^6 \quad \text{equação (1)}$$

onde  $E$  é a taxa de emissão do poluente (t/ano),  $F_e$  é o fator de emissão do poluente (g/km),  $A$  é a autonomia dos veículos (km/l),  $C$  é o consumo de combustíveis (l/ano) e  $N$  é o número de veículos.

As taxas de emissão de óxidos de nitrogênio ( $\text{NO}_x$ ), monóxido de carbono (CO), hidrocarboneto total (HCT) e material particulado (MP), obtidos pelo inventário da FEPAM são apresentadas na tab. 3.

Tabela 3 – Taxas de emissão para RMPA.

Combustível	Emissões macro (ton/ano)			
	$\text{NO}_x$	CO	HCT	MP
Gasolina	5.884	108.756	7.500	702
Álcool	1.094	16.418	2.245	-
Motos	2.396	17.234	627	-
Diesel	18.605	2.474	824	349
Total	27.979	144.883	11.196	1.051

Fonte: FEPAM, 2009.

### 3.2 Ozônio

O ozônio ( $O_3$ ) é um gás à temperatura ambiente, instável, altamente reativo, oxidante e diamagnético. O gás liquefaz a temperatura de  $-111,9^\circ C$  e possui ponto de congelamento de  $-251,4^\circ C$ . Possui coloração azul-pálida, atingindo coloração azul-escura quando transita para o estado líquido. Está presente tanto na estratosfera (camada da atmosfera situada entre 20 e 50 km da superfície da Terra) quanto na troposfera (camada da atmosfera a partir da superfície até em torno de 15 km de altura) em concentrações e razões de mistura diferentes. Uma notável característica deste gás é sua capacidade de absorver luz solar na faixa do ultravioleta, o que o torna um 'escudo' natural da Terra (Camada de Ozônio), impedindo que a faixa do espectro da luz solar prejudicial aos seres vivos chegue à superfície terrestre protegendo os humanos e a outras formas de vida.

A maior parte do  $O_3$  (aproximadamente 90%) encontra-se na estratosfera (Camada de Ozônio), através de sua produção natural que ocorre com a colisão de uma molécula de gás oxigênio ( $O_2$ ) com um átomo de oxigênio ( $O_2 + O = O_3$ ). Sua destruição não-catalítica se deve ao fato dele absorver a radiação ultravioleta solar, sendo destruído por esse processo ou por reações com átomos de oxigênio. Já a destruição catalítica do ozônio ocorre devido à existência de átomos e moléculas, chamados de catalisadores, que reagem eficientemente com o ozônio retirando um átomo de oxigênio de sua estrutura molecular. Enquanto o  $O_3$  estratosférico leva o título de "bom" ozônio, em função do bloqueio da radiação ultravioleta, o  $O_3$  troposférico leva o título de "mal" ozônio como veremos a seguir.

O ozônio na troposfera é um gás residual (considerado um poluente). Portanto, deve-se fazer o possível para evitar a sua formação já que, em determinadas concentrações, tem um efeito prejudicial aos seres humanos, animais e plantas. Pode ser tanto de origem natural (produzido em pequenas quantidades), quanto de origem antropogênica. O  $O_3$  troposférico antropogênico é formado através de uma série de reações químicas catalisadas pela radiação solar e seus precursores: óxidos de nitrogênio ( $NO_x$ ), complexos orgânicos voláteis (COV) e hidrocarbonetos (HC). Esses precursores são emitidos a partir de uma variedade de fontes artificiais, como visto anteriormente. O processo ocorre principalmente pela combustão incompleta de combustíveis fósseis, explicada a seguir.

A combustão da gasolina pura, ao reagir completamente com o oxigênio, forma basicamente água ( $H_2O$ ) e gás carbônico ( $CO_2$ ). Porém, em decorrência de fatores de tempo, imperfeição no contato dos reagentes e a presença de compostos indesejáveis (como o enxofre), a reação de combustão ocorrida no motor não se completa, resultando em hidrocarbonetos (HC) não queimados e monóxido de carbono (CO). A combustão do diesel sofre a influência dos mesmos fatores e acabam formando material particulado (MP) e  $NO_x$ . Os três compostos (CO, HC e  $NO_x$ ), formados em grande quantidade a partir da combustão de combustíveis fósseis, constituem os principais poluentes veiculares emitidos atualmente. Nos veículos leves, automóveis, camionetas e furgões, as emissões são originárias de quatro fontes principais: o carburador, o tanque de combustível, o cárter e o escapamento. As emissões provenientes do escapamento representam cerca de 80% das emissões totais veiculares. Centros urbanos são locais que possuem alta concentração destes poluentes devido à presença de intenso tráfego veicular e áreas industriais, e é por isso que essas são regiões propícias a maior incidência de ozônio troposférico.

Emissões dos precursores provenientes de fontes naturais, tais como os relâmpagos, o solo e as árvores também contribuem para a formação do ozônio. O  $O_3$  se caracteriza pelo seu alto potencial de oxidação, que em presença de materiais orgânicos ou inorgânicos ocasionam a sua destruição. A floresta é a principal fonte biogênica de compostos orgânicos voláteis não-metanos (COVNM) para a atmosfera, principalmente sob a forma de isopreno e monoterpenos<sup>1</sup> (GUENTHER et al., 1995).

A concentração de  $O_3$  na atmosfera também é altamente influenciada por fatores meteorológicos, como intensidade da radiação solar, temperatura, velocidade e direção dos ventos e pela concentração dos precursores. Observações realizadas por Pudasainee (2006) têm revelado que as concentrações de  $O_3$  aumentam com a intensidade de radiação e a elevação de temperatura, principalmente nos meses de

---

<sup>1</sup> Monoterpenos são hidrocarbonetos de fórmula química  $C_{10}H_{16}$ , formados por duas unidades isopreno, podendo ser cíclicos ou ramificados. Encontram-se em muitas plantas e são o constituinte principal da resina, além de produzidos e emitidos pelas folhas de árvores em quantidades consideráveis. Reagem com moléculas oxidantes presentes na atmosfera, e podem afetar o clima pois têm o efeito de dispersão de luz solar, contribuindo para a diminuição da temperatura terrestre.

verão, onde a insolação intensiva e o suprimento suficiente das substâncias antropogênicas podem atingir valores que são prejudiciais à saúde dos seres humanos. Os poluentes primários podem ser transportados de áreas urbanas e industriais a outras áreas, localizadas a distâncias remotas das fontes de poluição. Diante disso, a variação de  $O_3$  próximo à superfície pode ser considerada não somente em relação ao local das estações onde estão sendo realizadas as medidas de amostragem, mas também a nível regional e continental. Enquanto o tempo de vida de precursores oxidantes como o  $NO_x$  e os COV não ultrapassa dois dias na baixa troposfera, o ozônio possui um tempo de vida de dias a meses, e o transporte intercontinental tipicamente varia entre cinco e dez dias (WILD; AKIMOTO, 2001).

A presença do ozônio na Troposfera acarreta vários prejuízos para o meio ambiente, entre eles a formação do *Smog* fotoquímico, que é uma neblina que contém altos níveis de  $O_3$  e  $NO_x$ . A névoa fotoquímica causa irritação nas vias respiratórias e nos olhos, danos às plantações, a vegetação natural e aos materiais em geral, pois causa oxidação e corrosão de materiais como o ferro presente em construções de edifícios e maquinários em geral. Portanto, a melhor maneira para evitar o aparecimento do “mal” ozônio nas camadas mais baixas da atmosfera, e consequentemente, evitar que episódios de *Smog* fotoquímico ocorram, é reduzindo as emissões dos poluentes precursores (ALONSO, 2011).

### 3.3 Modelagem da Formação de Ozônio

A modelagem de processos químicos na atmosfera é uma ferramenta importante no diagnóstico e prognóstico da composição química atmosférica no âmbito global e regional. Atualmente, os esforços concentram-se na representação dos processos de emissão, transporte, remoção e transformação (reatividade química) dos diversos constituintes da atmosfera (gases e aerossóis), além de parametrizar seus impactos como, por exemplo, na transferência radiativa e na física de nuvens. Modelos numéricos que contemplam a solução da química e transporte de gases e aerossóis interligados com a solução do estado atmosférico, representam o estado da arte em modelagem acoplada da atmosfera. Tais modelos são comumente denominados “modelos interligados” (ou do inglês, *on-line*) e as duas principais vantagens de um modelo online são: (1) o uso comum da dinâmica na solução da meteorologia e da química e (2) o *feedback* da presença dos

poluentes para a meteorologia (por exemplo, o impacto dos aerossóis nas taxas de aquecimento). A utilização de um sistema único de coordenadas espaciais e a utilização de parametrizações físicas do modelo atmosférico faz com que o transporte das partículas de aerossol e gases traço seja consistente com o modelo atmosférico em si e minimiza erros numéricos associados às interpolações (FREITAS et al., 2009).

Modelos têm sido aplicados, recentemente, em diversas áreas urbanas, para avaliar o ozônio e seus precursores. Dentre os estudos realizados em diversas metrópoles mundiais pode-se citar: Cidade do México (México), Shanghai e Hong Kong (China) (TIE et al., 2006; 2007 e 2009; GENG et al., 2006; JIANG et al., 2008), Leste da China (JIANG et al., 2012) e Tóquio (Japão) (YOSHINO et al., 2012). No Brasil, Freitas et al. (2005) avaliou o modelo BRAMS para a Região Metropolitana de São Paulo, Dallarosa et al. (2007) simularam a concentração de ozônio e de seus precursores em uma região influenciada pela termoelétrica de Candiota - RS, Borrego et al. (2010) apresentaram um estudo para avaliar a poluição fotoquímica sobre a RMPA usando os modelos CAMx (*Comprehensive Air quality Model with extensions*) e CALGRID (*Californian Grid Model*), Alonso (2011) utilizou o modelo CCATT-BRAMS para realizar a previsão do tempo químico para a América do Sul e avaliou o impacto das emissões urbanas, Cuchiara (2011) utilizou o modelo WRF/Chem para simular as emissões veiculares na Região metropolitana de Porto Alegre (RMPA) e Boian e Andrade (2012) verificaram a interação da poluição atmosférica entre duas regiões metropolitanas do estado de São Paulo.

A previsão do impacto da redução de  $\text{NO}_x$  e COV na formação de ozônio, em ambientes urbanos, possui grandes incertezas, que podem ser relativamente reduzidas através de campanhas intensivas de medição, adicionalmente aos resultados de modelagem (SILLMAN et al., 1999). Além dos modelos de química e transporte Eulerianos, que possuem diferentes hipóteses e limitações, os inventários de emissão são também responsáveis pela incerteza na relação  $\text{O}_3$ -  $\text{NO}_x$  -COV. A representação espacial das emissões impacta consideravelmente na simulação da dispersão e química dos poluentes na atmosfera, principalmente no que diz respeito ao seu ciclo diurno (TIE et al, 2010). O avanço da capacidade computacional e das técnicas de processamento em alto desempenho possibilitou o refinamento das resoluções espaciais e temporais nos modelos, tornando indispensável o desenvolvimento de metodologias de agregação das informações de inventários

locais na modelagem em escalas regional e global (LAWRENCE, 2007; BUTLER et al., 2008; TIE et al., 2010).

Grandes quantidades de compostos químicos são emitidas para a atmosfera através dos processos antrópicos e biogênicos. Na atmosfera, estes gases traço estão sujeitos a diversos mecanismos de transporte e complexas transformações físico-químicas, estas últimas responsáveis pela formação de poluentes secundários. No entanto, mesmo que a representação destes complexos processos seja bastante realista nos modelos de poluição do ar, os resultados das simulações não o serão se a emissão não estiver também adequadamente incluída.

Considerando as características necessárias para modelagem química da atmosfera, e tirando proveito do desenvolvimento específico para as regiões tropicais/subtropicais, utiliza-se o modelo CCATT-BRAMS (*Coupled Chemistry Aerosol and Tracer Transport model to the Brazilian developments on the Regional Atmospheric Modeling System*) [FREITAS et al., 2009, LONGO et al. 2007, LONGO et al., 2011] que é uma ferramenta capaz de simular as emissões, transporte, processos de remoção de gases traços e aerossóis e a reatividade química na atmosfera. Está sendo desenvolvido pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) e segue operacional no Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC/INPE). Trata-se de um modelo que reflete o estado da arte em previsão de tempo químico, com várias correções e ajustes para o estudo sobre a América do Sul. O modelo atmosférico BRAMS é baseado no *Regional Atmospheric Modeling System* (RAMS), com várias melhorias associadas com a representação de cúmulos de convecção, inicialização de umidade do solo, esquema de superfície ajustada para o continente sul-americano, entre outros. Além do transporte na escala da grade, estão incluídos os efeitos da turbulência na escala sub-grade, o transporte convectivo guiado pela convecção rasa e profunda, a ascensão da pluma associada com focos de vegetação, entre outros. Como exemplo de utilização do CCATT-BRAMS cita-se o estudo para a América do Sul de Alonso (2011).

Os processos que governam o transporte e a dispersão de poluentes são numerosos e complexos não sendo possível descrevê-los sem a utilização dos modelos matemáticos, sendo assim, também se utiliza o modelo WRF/Chem (*Chemical Weather Research and Forecasting Model*), que é um sistema computacional de última geração de previsão do tempo em mesoescala designado tanto para o serviço operacional quando para as necessidades de pesquisa,

desenvolvido mundialmente. O esforço no desenvolvimento do WRF teve início no ano de 1990 e tem sido realizado desde então através de uma parceria de colaboração internacional do *National Center for Atmospheric Research* (NCAR), *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA), *National Center for Environmental Prediction* (NCEP), *Forecast Systems Laboratory* (FSL), *Air Force Weather Agency* (AFWA), *Naval Research Laboratory*, Universidade de Oklahoma, *Federal Aviation Administration* (FAA), Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC) dentre outros colaboradores. É um modelo totalmente compressível, Euleriano e pode ser integrado em modo não hidrostático. A física do modelo inclui cálculo de turbulência não-local para camada limite planetária e determinação de radiação de onda longa e onda curta em várias bandas espectrais. Possui dois núcleos dinâmicos, um sistema de assimilação de dados, e uma arquitetura de software que permite a computação paralela e extensibilidade do sistema. Além do cálculo dinâmico, um modelo químico é totalmente acoplado (*online*) com o WRF (WRF/Chem). Em Grell et al. (2005) é dada uma descrição mais detalhada dos módulos que descrevem o WRF/Chem, tais como transporte, deposição seca, emissões, parametrização de aerossóis e frequência de fotólise.

WRF permite aos pesquisadores a capacidade de produzir simulações refletindo tanto os dados reais (observações, análises) ou condições atmosféricas idealizadas. Também fornece previsão operacional de uma plataforma flexível e computacionalmente eficiente, oferecendo avanços na física, numéricos e de assimilação de dados fornecidos pelos muitos desenvolvedores da comunidade de pesquisa. Está atualmente em uso operacional no NCEP, AFWA, e outros centros.

### **3.4 Padrões de Qualidade do Ar**

Um padrão de qualidade do ar define legalmente as concentrações máximas de um componente atmosférico para garantir a proteção da saúde e do bem estar das pessoas. Os padrões de qualidade do ar são baseados em estudos científicos dos efeitos produzidos por poluentes específicos e são estabelecidos em níveis que possam propiciar uma margem de segurança adequada. Através da Portaria Normativa nº 348 de 14/03/1990 e Resolução CONAMA nº 03/90 (Tabela 4), ficam estabelecidos os padrões nacionais de qualidade do ar. No Brasil são estabelecidos dois tipos de padrões de qualidade do ar:

1. Padrões Primários: São as concentrações de poluentes que, ultrapassadas poderão afetar a saúde da população. Podem se entendidos como níveis máximos toleráveis de concentração de poluentes atmosféricos, constituindo-se em metas de curto e médio prazo.
2. Padrões Secundários: São as concentrações de poluentes atmosféricos abaixo das quais se prevê o mínimo efeito adverso sobre o bem estar da população, assim como o mínimo dano à fauna e à flora, aos materiais e ao meio ambiente em geral. Podem ser entendidos como níveis desejados de concentração de poluentes, constituindo-se em meta de longo prazo.

Tabela 4 – Concentrações de referência para padrões de qualidade do ar estabelecidos pela resolução CONAMA 03/90.

POLUENTE	TEMPO DE AMOSTRAGEM	CONAMA 03/1990	
		PADRÃO PRIMÁRIO ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	PADRÃO SECUNDÁRIO ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )
Part. Totais em Suspensão	24 horas MGA	240 <sup>(1)</sup> 80 <sup>(2)</sup>	150 <sup>(1)</sup> 60 <sup>(2)</sup>
Dióxido de Enxofre	24 horas MAA	365 80 <sup>(3)</sup>	100 40 <sup>(3)</sup>
Monóxido de Carbono	1 hora 8 horas	40.000 (35ppm) 10.000 (9ppm)	40.000 (35ppm) 10.000 (9ppm)
Ozônio	1 hora	160 <sup>(1)</sup>	160 <sup>(1)</sup>
Fumaça	24 horas MAA	150 <sup>(1)</sup> 60 <sup>(3)</sup>	100 <sup>(1)</sup> 40 <sup>(3)</sup>
Partículas Inaláveis	24 horas MAA	150 <sup>(1)</sup> 50 <sup>(3)</sup>	150 <sup>(1)</sup> 50 <sup>(3)</sup>
Dióxido de Nitrogênio	1 hora MAA	320 <sup>(1)</sup> 100 <sup>(3)</sup>	190 <sup>(1)</sup> 100 <sup>(3)</sup>

<sup>(1)</sup> não deve ser excedido mais que uma vez ao ano.

<sup>(2)</sup> média geométrica anual.

<sup>(3)</sup> média aritmética anual.



Como a Resolução CONAMA não apresenta padrão para compostos orgânicos voláteis (COV), pode-se utilizar como alternativa o padrão de qualidade do ar recomendado pela U.S. EPA ( $160 \mu\text{g}/\text{m}^3$  - média de 3 horas), indicado para hidrocarboneto total (HCT).

## **4 Materiais e métodos**

### **4.1 Descrição do local de estudo**

O domínio da modelagem foi implementado sobre uma área cobrindo as cidades da Região Metropolitana de Porto Alegre (RMPA) (32°S - 28.5°S) e (53°W - 49°W). A RMPA está localizada no meio-leste do Rio Grande do Sul, o estado mais ao sul do Brasil, compreendendo 33 municípios distribuídos sobre uma área de 10.097,196 km<sup>2</sup> correspondendo a aproximadamente 3,7% do território do RS (Fig. 1). É considerada a 3ª região metropolitana mais desenvolvida no Brasil (após SP e RJ) e uma das áreas de maior densidade populacional com aproximadamente 4 milhões de habitantes, o que equivale a 36,7% da população do Estado. As cidades mais populosas são Canoas, Gravataí e Novo Hamburgo (IBGE 2010).

É uma região altamente urbanizada, com uma densidade de 394,13 hab/km<sup>2</sup>, e caracterizada por diferentes tipologias industriais, incluindo diversas fontes fixas (refinarias, siderúrgicas, termoeletricas) e fontes móveis (aproximadamente 620 mil veículos circulando). No caso das fontes biogênicas, destaca-se a capital, Porto Alegre, por ser considerada uma das cidades mais arborizadas do País, com cerca de 1,3 milhões de árvores apenas em vias públicas, excluindo praças, parques, a zona rural do município e áreas particulares. A estimativa da Secretaria Municipal do Meio Ambiente (SMAM) coloca a capital gaúcha na privilegiada situação de ter quase uma árvore por habitante.

Segundo dados do DETRAN/RS em 2012, a frota de veículos na RMPA teve um aumento de praticamente 300 mil veículos automotores desde 2009. O total da frota em circulação registrada pelo órgão em 2009 era de 1.664.257, e pela última análise realizada em 2012, era de 1.961.744 veículos.

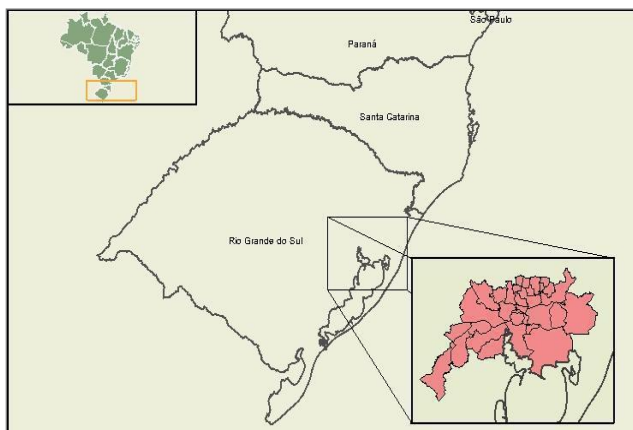


Figura 1 - Área de estudo - Região Metropolitana de Porto Alegre.

Fonte: CUCHIARA, 2011.

Destacam-se, ainda, a presença de inúmeras empresas, tais como Refinaria Alberto Pasqualini, General Motors, Souza Cruz, Polo Petroquímico do Sul, Gerdau Riograndense, Cimento Votoran e Celulose Riograndense. Há que se destacar a importante estrada federal, RODOVIA BR 116, que interliga a maior parte das cidades da região metropolitana. O trecho norte desta via, entre Porto Alegre e Novo Hamburgo, se constitui no 2º trecho mais movimentado do Brasil (o 1º é a Via Dutra, que liga o Rio de Janeiro a São Paulo).

O transporte de poluentes emitidos na RMPA está sob a influência de circulações locais: brisa marítima, com a relativa proximidade do Oceano Atlântico; brisa lacustre, pelo fato da RMPA estar localizada a norte da Laguna dos Patos; escoamento vale-montanha, geradas pela complexidade do terreno e pela não-homogeneidade do tipo de superfície. Nesta situação, o estudo da dispersão dos poluentes através de modelagem numérica precisa ser realizado empregando modelos não-estacionários e não-homogêneos (CARVALHO et al., 2002). Daí a escolha dos modelos CCATT-BRAMS e WRF/Chem.

#### 4.2 Descrição do Modelo CCATT-BRAMS

O CCATT-BRAMS é um modelo de química acoplado ao de transporte de aerossóis, desenvolvido juntamente com o modelo brasileiro do *Regional Atmospheric Modeling System* (BRAMS). É um modelo Euleriano, ou seja, modelo de transporte químico tridimensional (3D) acoplado em linha (*on-line*) com um modelo de área atmosférica limitada. Projetado para estudos locais e regionais de química

atmosférica da superfície e para baixa estratosfera, tanto para fins operacionais e de pesquisa (LONGO et al., 2013).

O CCATT prognostica a razão de mistura de gases traço através da solução da equação da conservação de massa. Inclui os processos de advecção na escala de grade resolvida com o esquema avançado *upstream* de segunda ordem, a difusão horizontal é baseada na formulação de Smagorinsky e a difusão vertical é parametrizada de acordo com o esquema de Mellor e Yamada (1974), que utiliza um prognóstico da equação de energia cinética turbulenta. Considera deposição seca e úmida, ascensão da pluma associada com focos de queimadas e transporte vertical associado à convecção rasa (não precipitante) e profunda. O modelo é capaz de simular as emissões, o transporte, os processos de remoção de gases traços, a interação de aerossóis com a radiação solar e terrestre (onda curta e longa) e as reatividades químicas com total coerência com a dinâmica de simulações atmosféricas.

O sistema CCATT-BRAMS foi desenvolvido utilizando ferramentas digitais avançadas, a fim de se obter um modelo flexível multi uso, que permite ao usuário flexibilidade na escolha das espécies químicas, tipos de emissão e bases de dados. O sistema é composto por três pré-processadores: para os mecanismos químicos, para o banco de dados de emissões e para as condições de contorno e iniciais. Um esquema do sistema CCATT-BRAMS pode ser visualizado na Fig. 2.

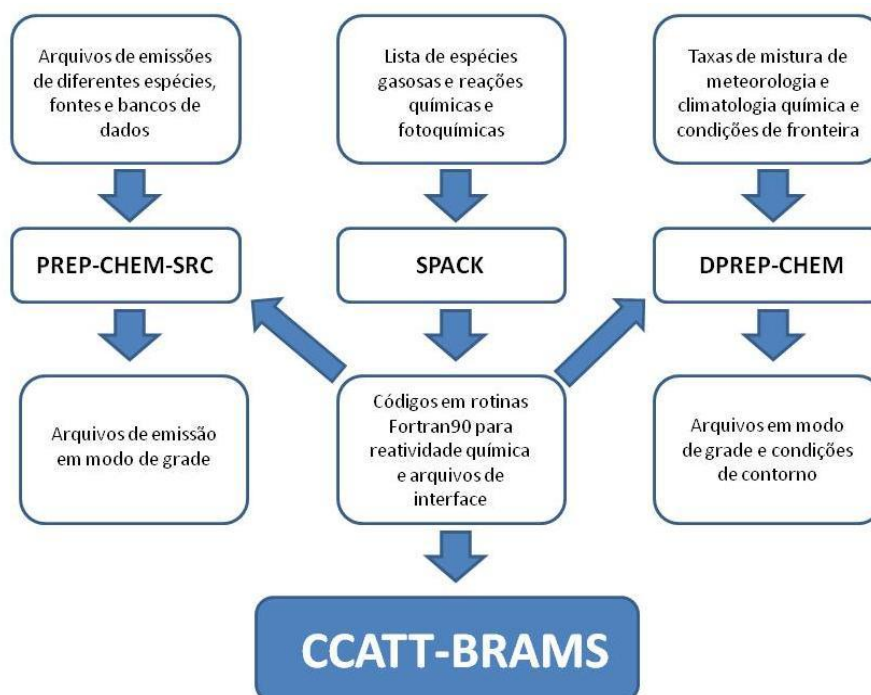


Figura 2 – Esquema do sistema CCATT-BRAMS. (Fonte: LONGO et al., 2013)

Resumidamente a ferramenta *Simplified Preprocessor for Atmospheric Chemical Kinetics* (SPACK) permite a escolha do mecanismo químico. O *Preprocessor of trace gas and aerosol emission fields for regional and global atmospheric chemistry models* (PREP-CHEM) (FREITAS et al., 2011), é uma ferramenta para a preparação dos campos de emissões para modelos regionais e globais de qualidade do ar. E o DPREP-CHEM gera as condições iniciais e de contorno de química a serem utilizadas na simulação do CCATT-BRAMS.

O modelo BRAMS (*Brazilian developments on the Regional Atmospheric Modeling System*) é baseado no RAMS (*Regional Atmospheric Modeling System*), com diversas melhorias associadas com a representação de convecção cumulus, a inicialização da umidade do solo e regime de superfície, entre outros. RAMS é um modelo de previsão numérica multi-objetivo desenhado para simular circulações atmosféricas com escalas variando da escala hemisférica até simulações de grandes turbilhões (LES- *Large Eddy Simulations*) da Camada Limite Planetária (CLP). O modelo é equipado com um esquema de aninhamento múltiplo que permite que as equações do modelo sejam solucionadas simultaneamente em qualquer número de grades computacionais com resoluções espaciais diferentes que

interagem entre si. Também possui um complexo conjunto de módulos para simular processos como: transferência radiativa, troca de água, calor e momento entre a superfície e a atmosfera, transporte turbulento na CLP e microfísica das nuvens. As condições iniciais podem ser definidas a partir de vários conjuntos de dados observacionais que podem ser combinados e processados com um pacote isentrópico e mesoescala de análise de dados. Para as condições de contorno, os esquemas 4DDA permitem que os campos atmosféricos sejam aproximados aos dados de grande escala. Pacotes do BRAMS utilizados nesse sistema incluem uma versão *ensemble* do esquema de convecção profunda e rasa baseado no formalismo de fluxo de massa e dados de inicialização da umidade do solo.

A Fig. 3 mostra alguns processos simulados pelo CATT-BRAMS, bem como uma parametrização radiativa adicional, que considera a interação entre partículas de aerossol e radiação de onda curta e longa, além do espalhamento e absorção pelos aerossóis. Apresenta, também, um modelo dinâmico derivado de três anos de propriedades óticas de dados recuperados de algumas das medidas dos sites AERONET<sup>2</sup>, usado para os aerossóis de fumaça.

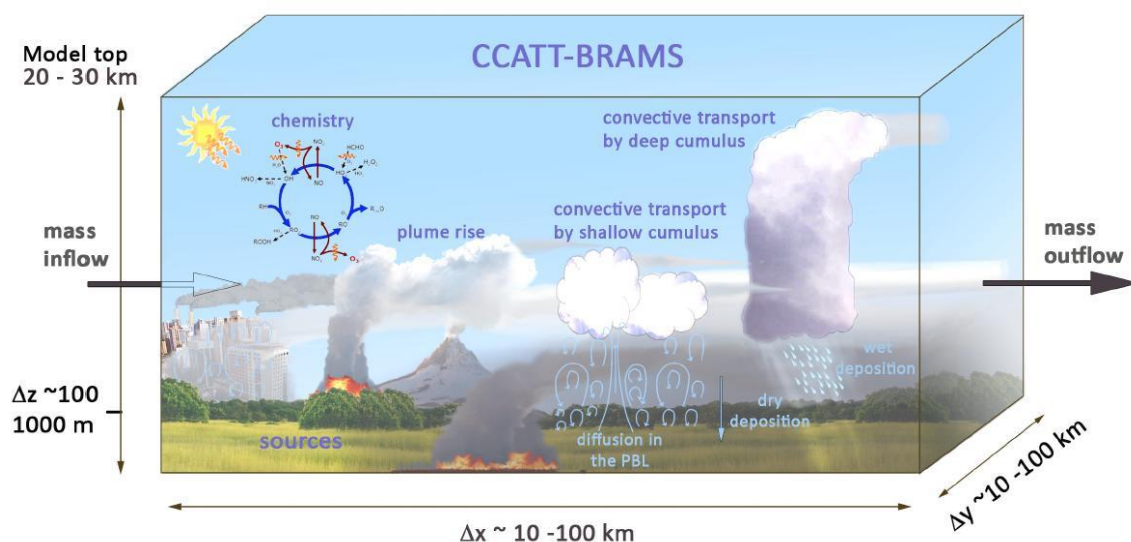


Figura 3 - Alguns dos processos sub-grades envolvidos no transporte de gases e aerossóis e simulados pelo modelo CATT-BRAMS. (Fonte: LONGO et al., 2013).

<sup>2</sup> AERONET - (Aerosol Robotic NETwork) é uma rede de fotômetros baseados em terra dom que medem as propriedades de aerossóis atmosféricos, é um sistema de observação do NOAA.

### 4.3 Descrição do Modelo WRF/Chem

O *Weather Research and Forecasting* (WRF) é um sistema de última geração de modelagem da qualidade do ar, de previsão numérica do tempo entre outras funções. Projetado para atender tanto a pesquisa atmosférica quanto necessidades operacionais de previsão de tempo. É desenvolvido pelo NOAA, NCAR, NCEP, FSL, AFWA, Universidade de Oklahoma, FAA e outros institutos de pesquisa.

Seu modelo meteorológico WRF é não-hidrostático, com dois núcleos dinâmicos (WPS e ARW) [Fig. 4], duas coordenadas verticais (altura e coordenadas Eulerianas), bem como muitas opções diferentes para parametrizações físicas para representar processos. É projetado para ser um modelo flexível, sendo o estado da arte na modelagem numérica, com código portátil, que é eficiente em um ambiente de computação massivamente paralelo. No WRF são calculadas componentes como a velocidade do vento, a perturbação da temperatura potencial, a perturbação do geopotencial e a perturbação da pressão em superfície entre outras variáveis físicas. Possibilita, também, gerar outras variáveis, incluindo energia cinética turbulenta e as razões de mistura de vapor d'água, chuva/neve e água/gelo das nuvens. A física do modelo inclui, ainda, cálculo de turbulência não-local para camada limite planetária e determinação de radiação de onda longa e onda curta em várias bandas espectrais.

A parte química do WRF/Chem simula a emissão, transporte (advectivo, convectivos e difusivos), deposição seca e úmida, interações e transformações químicas de gases traços e aerossóis, fotólise, de maneira simultânea com a meteorologia. É utilizado para investigação da qualidade do ar em escala regional, local e interações em microescala podendo servir para previsão de tempo químico, análises, medições de campanhas de campo, assimilação de satélite e medições químicas *in situ*, testando estratégias de redução da poluição e seus impactos sobre o tempo, clima e qualidade do ar. Uma descrição detalhada pode ser encontrada em Grell et al. (2005).

O módulo químico possibilita várias escolhas para os mecanismos químicos na fase gasosa, incluindo os mecanismos RADM2, RACM, CB-4 e CBM-Z. Para o esquema de fotólise, três escolhas podem ser feitas: esquema Madronich acoplado com hidrometeoros, aerossóis e parametrizações convectivas; esquema de fotólise Fast-J; ou esquema de fotólise FTUV. Existem quase 50 opções químicas para a fase gasosa principal e os módulos de aerossol. Disponibiliza também um modelo de

ascensão da pluma (*plumerise*) para tratar as emissões de queimadas florestais (FREITAS, et al.2007), informações de satélite (e outras observações aéreas também podem ser usadas), para determinar a localização de queimadas e propriedades de fogo. Cinzas vulcânicas e o transporte de cinzas finas em altas concentrações para longas distâncias. Opções para apenas o transporte (4 caixas), o transporte de cinzas e os efeitos diretos de aerossóis podem ser incluídos.

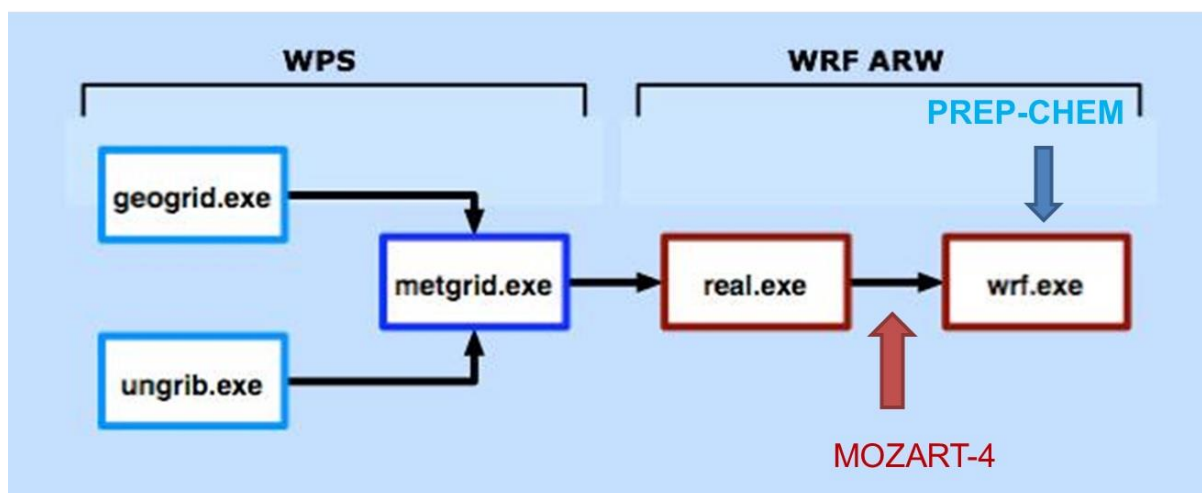


Figura 4 – Representação do fluxo de programa durante a execução do modelo WRF/Chem. (Fonte: WRF ARW *Online Tutorial*).

#### 4.4 Características da Simulação

Para a validação dos modelos sobre a RMPA, foi escolhido um período que compreende as características atmosféricas necessárias para a concentração de poluentes precursores e com tempo necessário para a formação, transporte, deposição e destruição do ozônio. Tal escolha teve como base inicial o trabalho de Cuchiara (2011), segundo ele o período favorável à concentração do ozônio começou às 00 UTC do dia 5 e terminou a 00 UTC do dia 9 de janeiro de 2009. E o período desfavorável para a concentração do ozônio começou às 00 UTC do dia 9 e terminou a 00 UTC do dia 12 de janeiro de 2009.

Ambos os modelos foram executados em uma configuração de grade centrada na cidade de Porto Alegre (30.05°S e 51.16°W), configuradas com 62 x 62 pontos, resolução horizontal de 10 km e 33 níveis na vertical. O domínio da simulação foi delimitado pelas coordenadas 28.5°S e 32°S de latitude e 53°W e



49°W de longitude (Fig. 5), abrangendo parte dos Estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina e o Oceano Atlântico adjacente à costa gaúcha.

Na simulação do modelo atmosférico BRAMS foram utilizadas as análises do modelo global do CPTEC (T245L65) para compor a condição inicial e de contorno de meteorologia. Os dados do CPTEC têm resolução horizontal de 2 graus e resolução temporal de 6 horas. Já o modelo WRF/Chem foi inicializado com análise FNL do NCEP, com resolução espacial de 1° x 1° e resolução temporal de 6 horas.

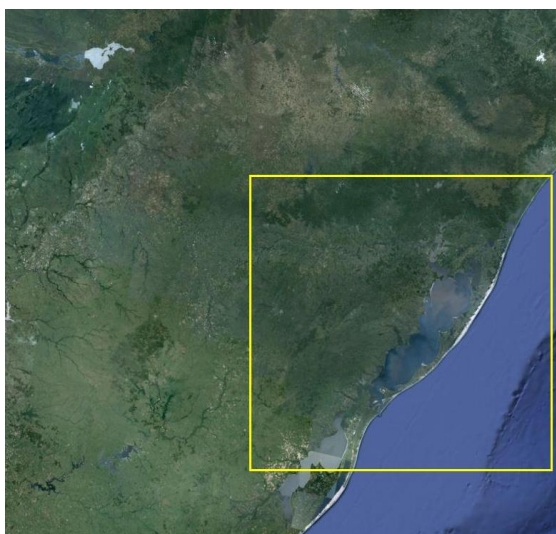


Figura 5 – Imagem ilustrativa sobre o domínio da simulação. (Fonte: Google Maps).

A ferramenta de PREP-CHEM fornece campos de emissão interpolados para o transporte de grade dos dois modelos. O pré-processador considera fontes da queima de biomassa, vulcânicas e urbano-industrial-veiculares. As emissões de origem antrópica utilizadas no PREP-CHEM são provenientes das bases de dados *Emission Database for Global Atmospheric Research* (EDGAR) e *Reanalysis of the Tropospheric chemical composition* (RETRO), com uma correção da Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental (CETESB) para a Região Metropolitana de São Paulo (CETESB/2002) e atualizada para a América do Sul.

A seguir é apresentado na tab. 5, um resumo sobre as configurações dos dois modelos.

Tabela 5 - Características do domínio da simulação e opções de configuração dos modelos CCATT-BRAMS e WRF/Chem.

	CCATT-BRAMS	WRF/Chem
Período	00UTC -24/12/2008 até as 00UTC -13/01/2009	
Condições iniciais de contorno da meteorologia	CPTEC (T245L65)	GFS/FNL - NCEP
Grade horizontal	62 x 62 pontos	
Espaçamento da grade	10 km	
Níveis na vertical	33	
Mecanismo Químico	RACM	RADM2
Pré-processador de emissões	PREP-CHEM	
Inventários Antropogênicos	RETRO, EDGAR, emissions_yevich_logan, FEPAM	
Inventários Biogênicos	MEGAN	
Simulação do pacote químico	Sim	
Condições iniciais de climatologia química	MOCAGE	MOZART-4
Passo no tempo	160s meteorologia e 40s química	60s meteorologia e 30s química

O ciclo diurno das taxas de emissão da RMPA, calculado a partir de dados de médias horárias de concentração observadas pela FEPAM, foi implementado nas simulações dos dois modelos. Os ciclos diurnos de emissão de CO, HCT e NOX podem ser considerados conforme a Fig. 6, em que é apresentado o peso de emissão de cada precursor no período de 24 horas. Observações das concentrações de poluentes na RMPA indicam que os picos de emissão dos precursores de ozônio ocorrem nas primeiras horas da manhã e no final da tarde (CUCHIARA, 2011).

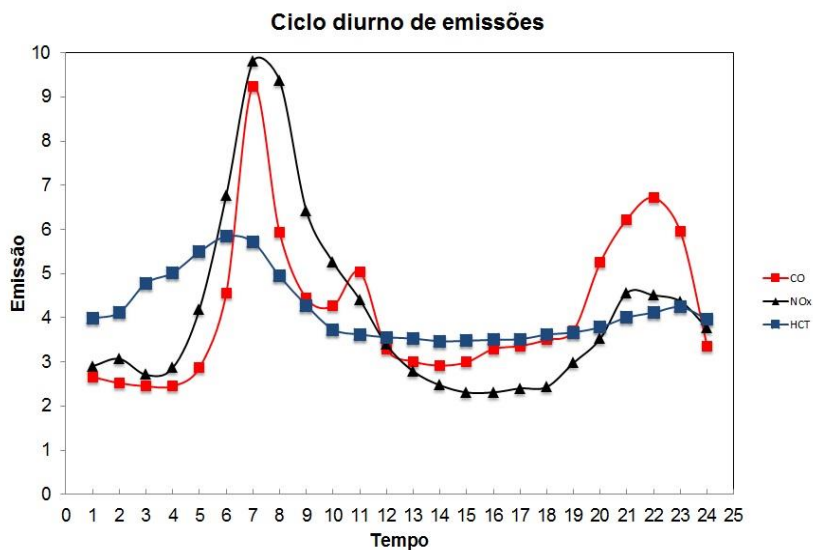


Figura 6 – Ciclo diurno de emissões na RMPA.  
Fonte: FEPAM

#### 4.4.1 PREP-CHEM (PREProcessor of Trace gas and Aerosol Emission fields for Regional and Global Atmospheric CHEMistry Models)

Segundo Freitas et al. (2011) o PREP-CHEM é uma ferramenta para a preparação das emissões de poluentes para uso nos modelos de qualidade de ar, desenvolvida no CPTEC/INPE. Os dados de emissão provêm da ação de queimada ou pelo próprio processo de fotossíntese e outros processos de transformação da floresta, pela combustão de produtos derivados de petróleo através de veículos ou indústrias, carvoarias e muitos outros fatores. O sistema vem sendo mantido e aperfeiçoado no CPTEC-INPE, pelo Grupo de Modelagem Atmosférica e Interfaces (GMAI).

Os campos de emissões gerados para os modelos CCATT-BRAMS e WRF/Chem para este experimento, compreendem o período das 00UTC do dia 01/01/2009 às 00UTC do dia 13/01/2009. Foram utilizados os conjuntos de dados dos inventários de fontes antropogênicas RETRO (*REanalysis of TROpospheric chemical composition over the past 40 years* – <http://www.ceip.at/>) e EDGAR (*Emission Database for Global Atmospheric Research* - OLIVIER; BERDOWSKI, 2001), além do inventário de emissões que insere na simulação a influência das emissões pelo uso de biocombustíveis e de queima de resíduos agrícolas (YEVICH; LOGAN, 2003). Foram acionados, ainda, os dispositivos de emissão de fontes

biogênicas baseados no banco de dados gerados pelo modelo MEGAN (GUENTHER et al., 2006) e o modelo *Brazilian Biomass Burning Emission Model* (3BEM - LONGO et al., 2010) que interpola dados de queima de biomassa e parâmetros de ascensão de pluma. O modelo 3BEM utiliza os dados de cobertura de terra do Programa Internacional da Geosfera-Biosfera (IGBP/INPE), dados de densidade de carbono dos arquivos OLSON<sup>3</sup>, OGE.

A inserção de fontes antrópicas móveis foi realizada através do pré-processador PREP-CHEM, informando as taxas de emissão de CO, NO<sub>x</sub> e HCT de cada um dos 33 municípios da RMPA. Os municípios foram considerados como fontes área e os contornos dessas fontes, em graus de latitude e longitude, foram obtidos a partir de mapa georeferenciado disponibilizado pelo IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística). Essas informações foram agrupadas em um arquivo texto e, seguindo a metodologia de ALONSO (2011), foram lidas pelas rotinas do PREP-CHEM. Também foi implementada na rotina de emissões antrópicas do PREP-CHEM, a especiação dos hidrocarbonetos totais (HCT) para RMPA (tab. 6). Baseada no estudo feito por Cuchiara (2011). Adicionalmente foi feito um ajuste para corrigir a razão NO<sub>x</sub>/HC, baseado na razão dos pesos totais de emissão do inventário FEPAM para RMPA.

Tabela 6 - Porcentagem de emissão de hidrocarboneto particionado por espécie, para a cidade de Porto Alegre.

Espécie	Porcentagem (%)
HC3	29,8
HC5	9,26
HC8	2,47
OL2	13,31
OLT	4,46
OLI	8,13
TOL	22,66
XYL	9,81

Fonte: CUCHIARA, 2011.

<sup>3</sup>

Banco de dados de carbono na

vegetação. <http://cdiac.ornl.gov/epubs/ndp/ndp017/ndp017b.html>

## 4.5 Análise Estatística dos resultados

Para análise quantitativa dos resultados das simulações dos dois modelos, em comparação aos dados de observação existentes da RMPA, serão considerados três índices estatísticos vistos a seguir.

### 4.5.1 Índice de concordância (d)

O índice de concordância é utilizado para idealizar as amplitudes dos erros entre o modelo (estimado) e o observado (medido). Este índice varia entre 0 e 1, indicando maior discordância e concordância respectivamente.

$$d = 1 - \frac{\sum (Pi - Oi)^2}{\sum (|Pi| + |Oi|)^2} \quad \text{equação (2)}$$

onde  $Pi$  é o valor previsto e  $Oi$  o valor observado.

### 4.5.2 Coeficiente de Correlação (R)

A correlação indica a força e a direção do relacionamento linear entre duas variáveis aleatórias, que neste estudo são os resultados calculados pelo modelo e os observados pelas estações de monitoramento.

$$R_{(Pi, Oi)} = \frac{\sum (Pi \cdot Oi) - \frac{\sum Pi \sum Oi}{N}}{\sqrt{\left[ \sum Pi^2 - \frac{(\sum Pi)^2}{N} \right] \cdot \left[ \sum Oi^2 - \frac{(\sum Oi)^2}{N} \right]}} \quad \text{equação (3)}$$

onde  $Pi$  é o valor previsto,  $Oi$  o valor observado e  $N$  é a quantidade de medidas na amostra.

Sendo,

$R=-1$	Correlação perfeita negativa
$-1 < R < 0$	Correlação negativa
$R=0$	Correlação nula
$0 < R < 1$	Correlação positiva
$R = 1$	Correlação positiva
$0,2 < R < 0,4$	Correlação fraca *
$0,4 < R < 0,7$	Correlação moderada *
$0,7 < R < 0,9$	Correlação forte *

(\* possuí o mesmo significado para os casos negativos ou positivos)

#### 4.6.3 Raiz do erro médio quadrático (RMSE)

*The Root Square Error* (RMSE) ou Raiz do erro médio quadrático é uma medida da diferença entre os valores previstos pelo modelo e os valores efetivamente observados a partir do ambiente que está sendo modelado. Essas diferenças individuais são também chamadas de resíduos, e o RMSE serve para agregá-los em uma única medida de poder de previsão.

O RMSE de um modelo de previsão no que diz respeito à estimativa de uma variável  $\phi_i$  é definido como a raiz quadrada do erro quadrático médio e da ideia da magnitude do módulo (sem levar em conta do sinal) do erro do modelo.

$$RMSE = \left[ \sum \frac{(\phi_i - \phi_{obs})^2}{N} \right]^{1/2} \quad \text{equação (4)}$$

onde  $\phi_i$  é o valor simulado e  $\phi_{obs}$  é o valor observado e  $N$  é o número de medidas na amostra.

## 5 Resultados

### 5.1 Análise sinótica

No mês de janeiro, no Estado do Rio Grande do Sul, já ocorreu o solstício de verão do Hemisfério Sul, e segundo a climatologia do local, a partir do mês de dezembro, os sistemas frontais avançam mais rapidamente sobre a região o que pode causar chuvas intensas e valores significativos de precipitação em algumas áreas. Segundo valores de climatologia do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), para o mês de janeiro na RMPA, os valores de temperatura máxima variam entre 29°C e 31°C, as temperaturas mínimas entre 18°C e 20°C, e a precipitação média entre 100 e 140 mm. Especificamente, em janeiro de 2009, segundo o Boletim Climanálise (CPTEC/INPE), houve a intensificação do fenômeno La Niña ao longo dos setores central e oeste do Pacífico Equatorial, o que inibe a formação de nuvens e, conseqüentemente, provoca a ocorrência de secas severas no Rio Grande do Sul (RS). Neste ano, ainda, a intensificação da alta subtropical do Atlântico Sul, deslocada para sul e associada à predominância de anomalias positivas de pressão ao nível do mar (PNM), não favoreceu o avanço dos sistemas frontais provenientes de latitudes mais altas. Sendo assim, esses acontecimentos auxiliaram na predominância de tempo bom nos primeiros dias da análise, o que favoreceu a formação e concentração do ozônio sobre a RMPA.

Para análise meteorológica do período, utilizam-se cartas sinóticas de altitude (250 hPa), níveis médios (500 hPa) e superfície [Anexo A], e imagens de satélite (GOES 10) [Anexo B], disponibilizadas pela Divisão de Satélites (DSA) do CPTEC/INPE. Além disso, utilizam-se as sondagens do perfil vertical realizadas no Aeroporto Salgado Filho em Porto Alegre, disponibilizadas pela Universidade de

Wyoming [Anexo C]. São realizadas análises dos seguintes Índices de Instabilidade Termodinâmica: *Showalter* (SHOW), que indica probabilidade de ocorrência de tempestades, *Severe Weather Threat Index* (SWEAT), utilizado para analisar o potencial de tempestades muito severas (formações de tornados, intensidade de movimentos ciclônicos), Instabilidade por levantamento (LIFT), que indica instabilidade ou estabilidade da atmosfera, índice K, que indica a probabilidade para ocorrência ou não de tempestades, índices de taxas de convecção (CTOT, VTOT e TOTL) e Energia Potencial Convectiva Disponível (CAPE).

A análise sinótica revela que, a partir do dia (05/01/09), o Estado do Rio Grande do Sul estava sob a influência de uma ampla área de alta pressão (1015 hPa). Esse sistema é classificado como uma alta pós-frontal, que estava associada à passagem da frente fria estacionária sobre o oceano Atlântico (Fig. 7). Tal condição sinótica inibiu a formação de nebulosidade, manteve a intensidade da velocidade do vento baixa e favoreceu a estabilidade atmosférica próxima à superfície, como pode ser visualizado na sondagem da Fig. 8. Essas condições atmosféricas permanecem atuantes no dia 06/01/2009, com a atmosfera mais seca e estável do que observada na sondagem do dia anterior.

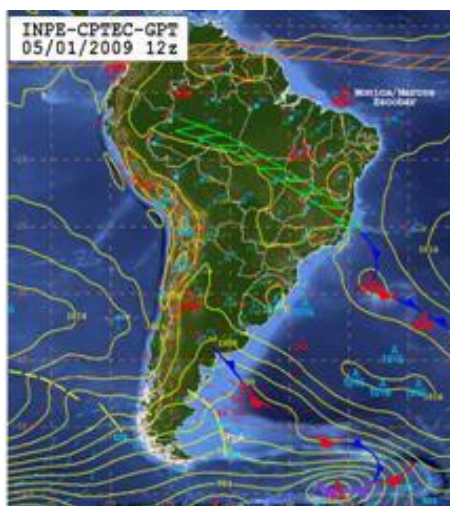


Figura 7 – Carta sinótica do dia 05 de janeiro às 12Z (09 HL).  
Fonte: CPTEC/INPE.

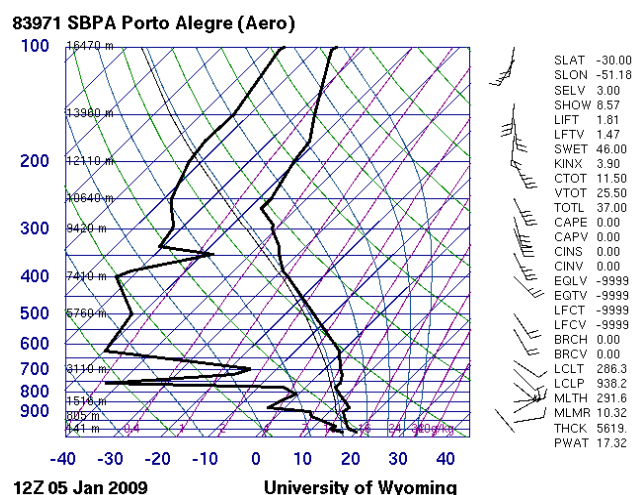


Figura 8 – Radiossondagem do dia 05 de janeiro às 12Z (09 HL).  
Fonte: University of Wyoming.

No dia 07/01/09, algumas características da atmosfera começaram a sofrer mudança de padrão na Região Sul em função da aproximação de um cavado que estava adiante de uma frente fria (Fig. 9). Mas apenas a partir das 12Z do dia 08/01,



a circulação em superfície na RMPA começa a ser influenciada pela passagem da frente-fria, o que instabilizou o tempo principalmente no litoral. A circulação no oeste do continente favoreceu a advecção de umidade da região Amazônica para a Região Sul do Brasil. Além disso, o acoplamento de um cavado que atuava entre o sul do Uruguai e RS ajudou na convecção observada nesta área. Na imagem de satélite (Fig. 10) observa-se a linha a sudeste do RS, que indica a presença da instabilidade provocada pelo sistema frontal. Praticamente todo o Estado ficou sob a influência de baixa pressão, o que é confirmado pela sondagem de Porto Alegre [Anexo B].

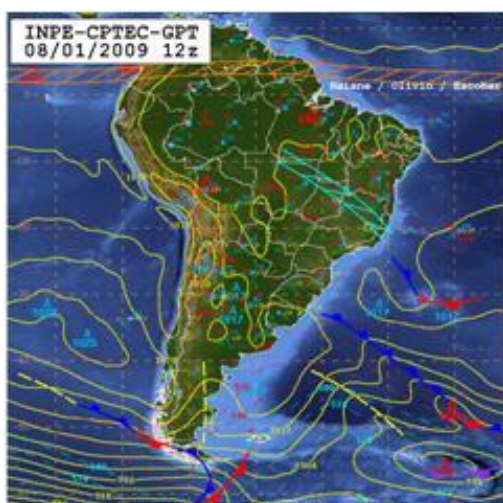


Figura 9 – Carta sinótica do dia 08 de janeiro às 12Z (09 HL).  
Fonte: CPTEC/INPE.

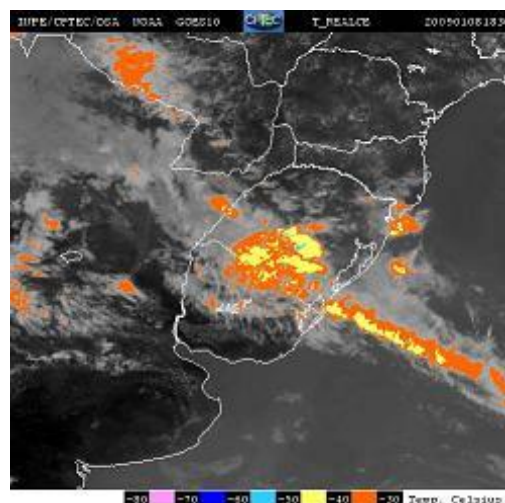


Figura 10 – Imagem de satélite do dia 08 de janeiro às 18:30Z (15:30 HL).  
Fonte: DSA/CPTEC/INPE.

A partir, das 12Z do dia 08/01 até o fim do período, os valores nos índices termodinâmicos permaneceram nos padrões característicos de instabilidade atmosférica, a circulação do vento se manteve ciclônica e houve uma diminuição da temperatura em superfície. No decorrer do período, houve diminuição no valor do CAPE, indicando uma atmosfera continuamente instável. Analisando a imagem de satélite do dia 11/01 (Fig. 11) já é possível verificar a diminuição da nebulosidade sobre a região sul, com deslocamento dos sistemas para leste. E na sondagem do

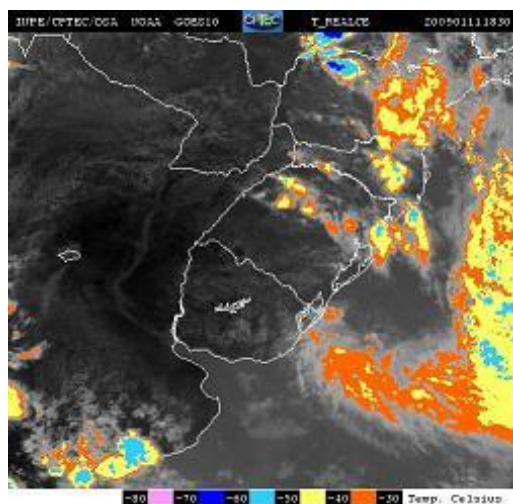


Figura 11 – Imagem de satélite do dia 11 de janeiro às 18Z (15HL).  
Fonte: DSA/CPTEC/INPE.

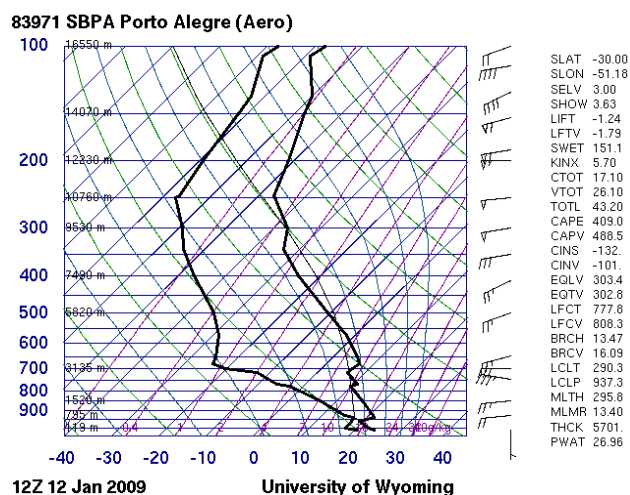


Figura 12 – Radiossndagem do dia 12 de janeiro às 12Z (09 HL).  
Fonte: University of Wyoming.

dia 12/01 (Fig. 12), é novamente visível o distanciamento entre o perfil de temperatura do ar e de temperatura do ponto de orvalho, o que indica uma atmosfera seca. O escoamento do vento passa a ser de oeste em toda a extensão da camada e a intensidade do vento aumenta por causa do Jato Subtropical (JST). O índice CAPE volta a ficar mais alto, com valor observado de 409, mas não indica fortes instabilidades sobre a RMPA. A temperatura do ar em superfície volta a subir, de 22°C no dia anterior para 25°C.

Sabe-se que as condições meteorológicas são um dos fatores mais importantes para a formação da poluição fotoquímica. Estes fatores incluem intensa radiação solar, ventos fracos, céu claro, alta temperatura, baixa umidade, camada limite estável, etc (ARYA, 1999). Portanto, a meteorologia no período (05 a 12 de janeiro de 2009) esteve caracterizada por duas condições distintas. Na primeira, entre os dias 05 e 09 de janeiro de 2009, a RMPA esteve sob a condição de céu claro e ventos fracos em superfície. E na segunda, entre os dias 09 e 12 de janeiro de 2009, as condições meteorológicas eram de céu encoberto e ventos moderados em superfície.

## 5.2 Simulação com o modelo CCATT-BRAMS

### 5.2.1 Simulação das condições meteorológicas

Após a análise sinótica, realiza-se uma avaliação dos resultados meteorológicos simulados, utilizando os dados medidos por duas estações de superfície (Fig. 13). A primeira estação foi instalada pela FEPAM no município de Esteio ( $-29,85^{\circ}$  S;  $-51,17^{\circ}$  W) e fornece dados horários de pressão, temperatura do ar, direção e velocidade do vento e umidade relativa. A segunda estação está instalada no 8<sup>o</sup> DISME/INMET em Porto Alegre ( $-30,05^{\circ}$  S;  $-51,16^{\circ}$  W) e registra dados horários das mesmas variáveis meteorológicas.

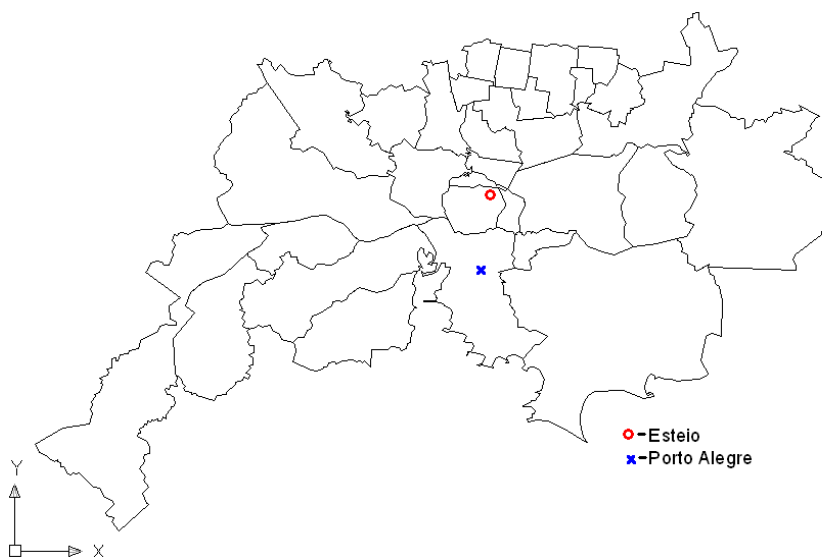


Figura 13 - Localização das estações de monitoramento em Esteio(FEPAM) e em Porto Alegre (INMET).

Fonte: CUCHIARA, 2011.

As Figs. 14 e 15 mostram as comparações entre os valores de pressão simulados pelo modelo BRAMS e observados nas estações de superfície de Porto Alegre e de Esteio, respectivamente. Os resultados revelam que o modelo não simula satisfatoriamente os valores observados de pressão, ocorrendo uma subestimação em torno de 10 mb nos valores simulados para as duas localidades. Tal resultado pode estar relacionado à qualidade dos dados de análise utilizados para condição inicial e de contorno de meteorologia no modelo BRAMS.

As Figs. 16 e 17 apresentam comparações entre os valores observados e simulados de temperatura do ar em 2m para as estações de Porto Alegre e Esteio, respectivamente. Nota-se que o modelo BRAMS simula razoavelmente bem a variabilidade diurna (ciclo diurno) e a tendência diária. Porém, o modelo não simula bem os valores e a posição dos mínimos e máximos de temperatura ar para quase totalidade do período de simulação.

Nas Figs. 18 e 19 são apresentadas as comparações entre valores simulados e observados de velocidade do vento para as mesmas estações. De um modo geral, o modelo simula satisfatoriamente os valores observados pelas estações de Porto Alegre e Esteio. Nota-se que existe a tendência do modelo BRAMS superestimar os valores medidos pela estação de Porto Alegre e de subestimar os valores monitorados pela estação de Esteio.

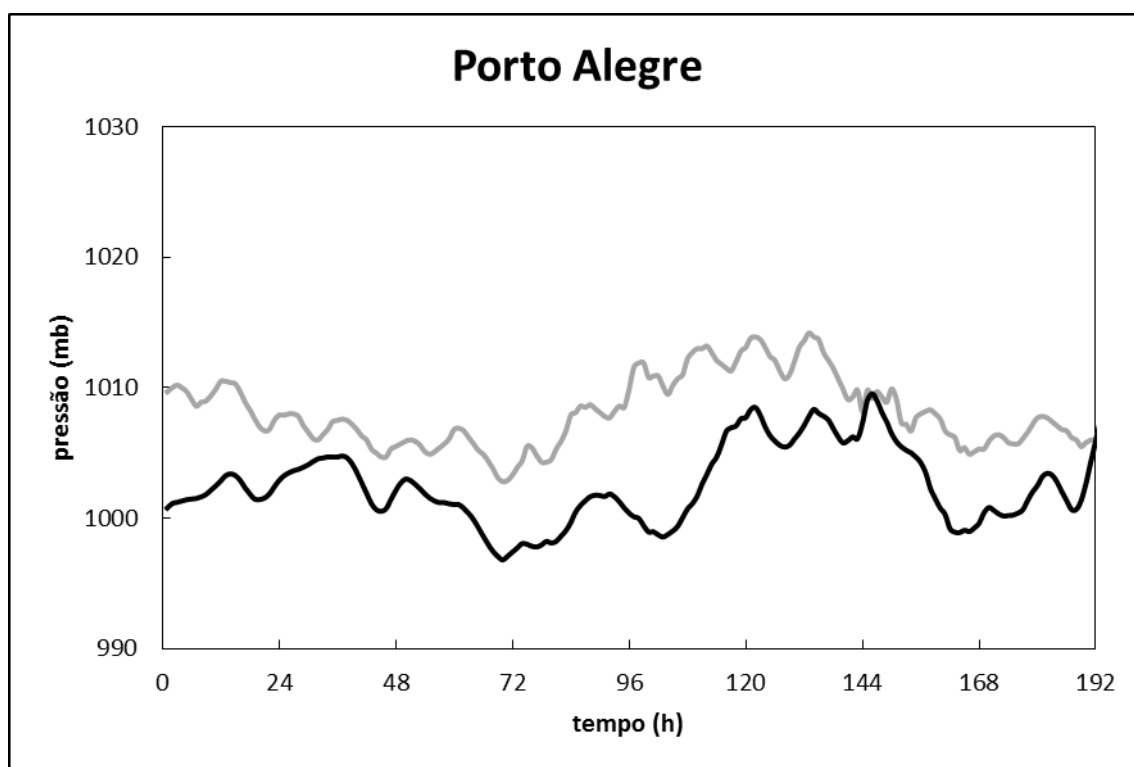


Figura 14 – Pressão simulada pelo modelo CCATT-BRAMS (preto) e observada (cinza) e na estação Porto Alegre.

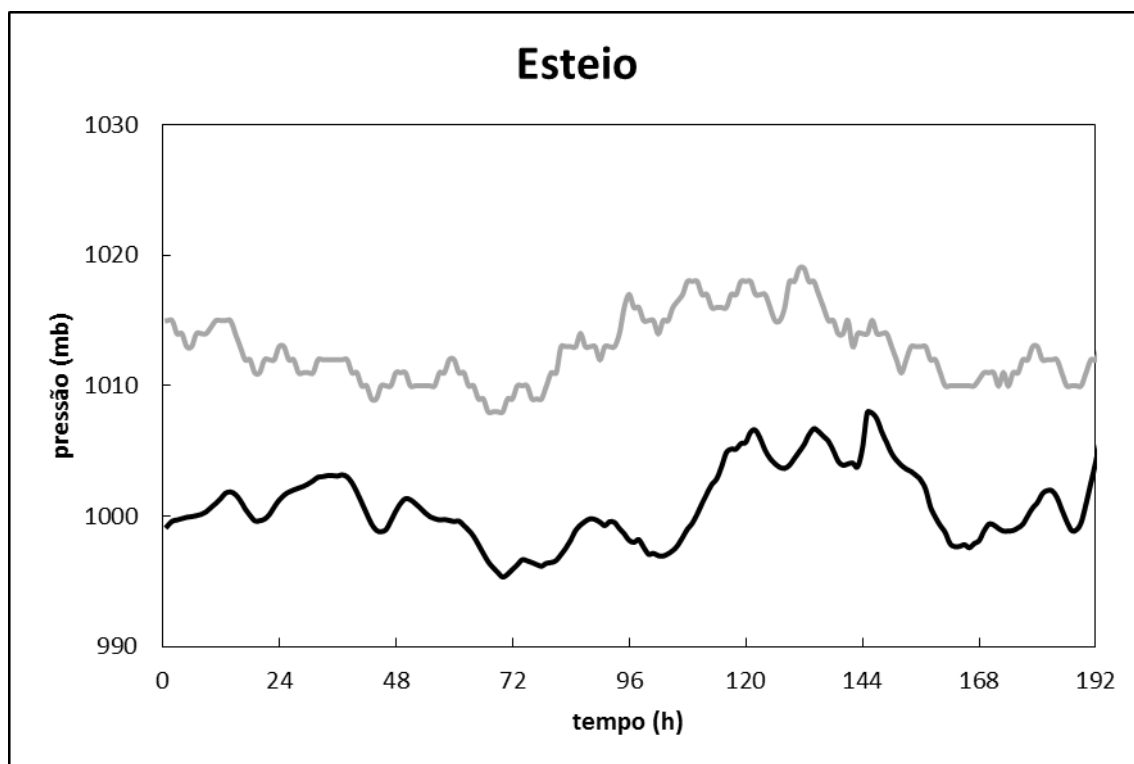


Figura 15 – Pressão simulada pelo modelo CCATT-BRAMS (preto) e observada (cinza) e na estação Esteio.

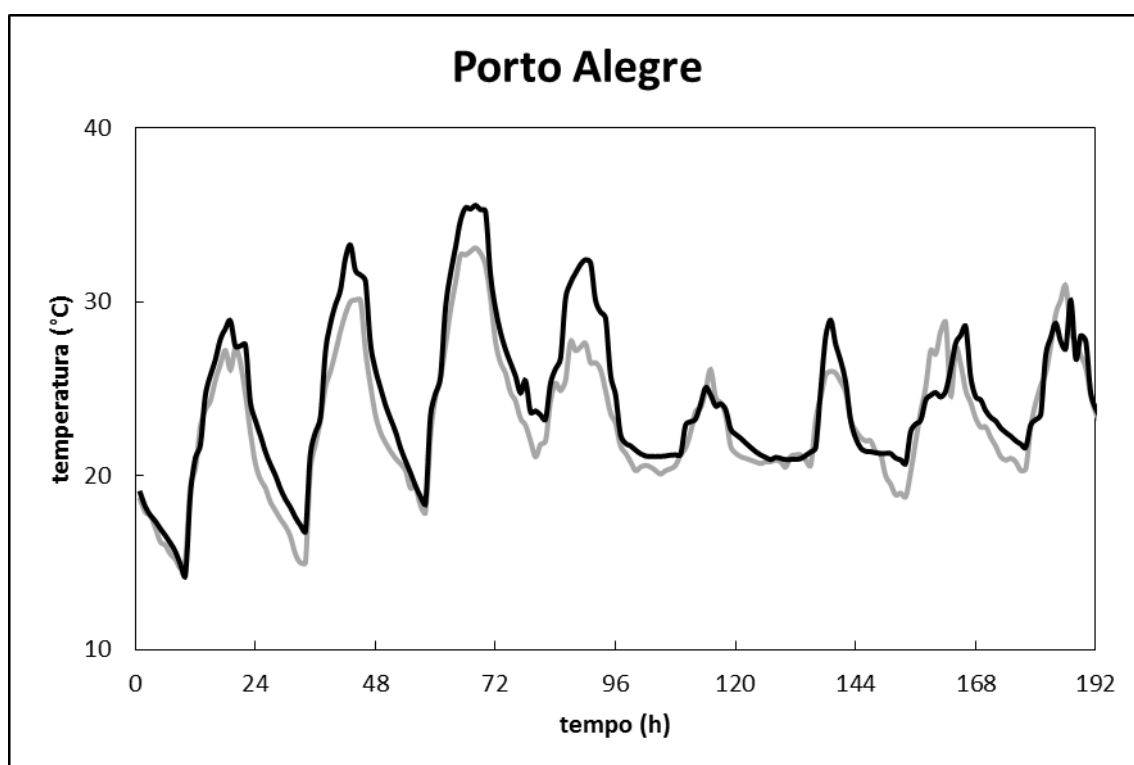


Figura 16 – Temperatura simulada pelo modelo CCATT-BRAMS (preto) e observada (cinza) e na estação Porto Alegre.

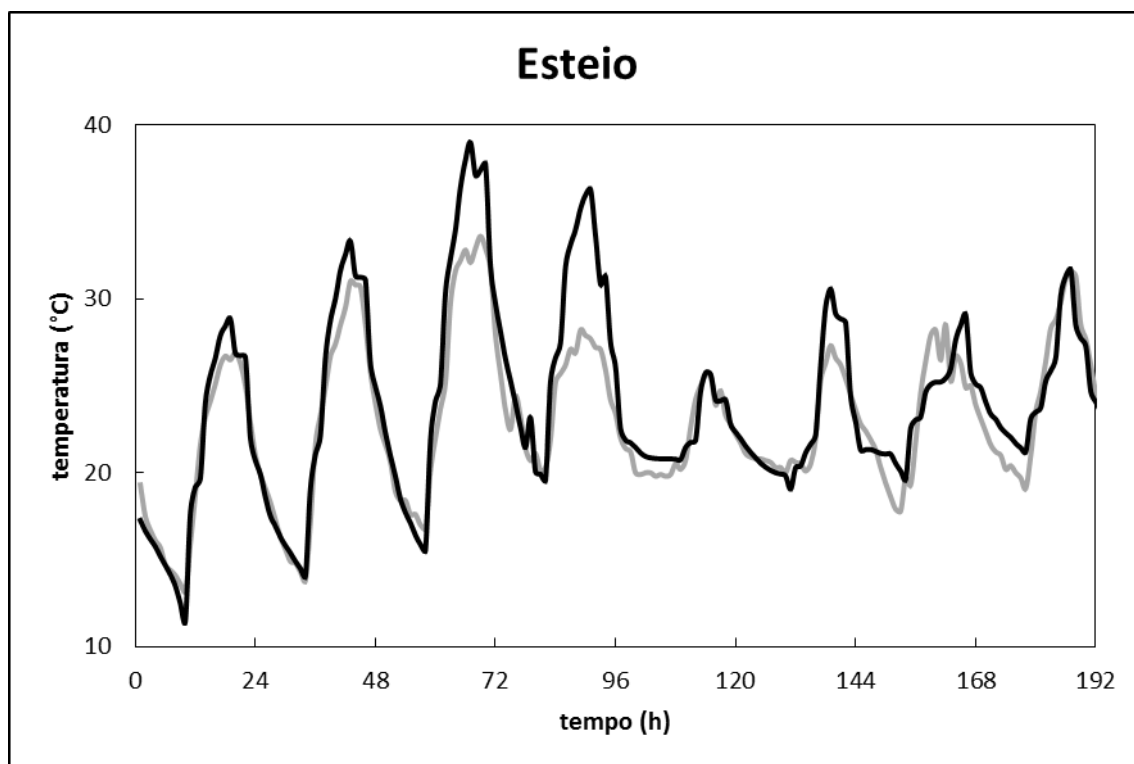


Figura 17 – Temperatura simulada pelo modelo CCATT- BRAMS (preto) e observada (cinza) e na estação Esteio.

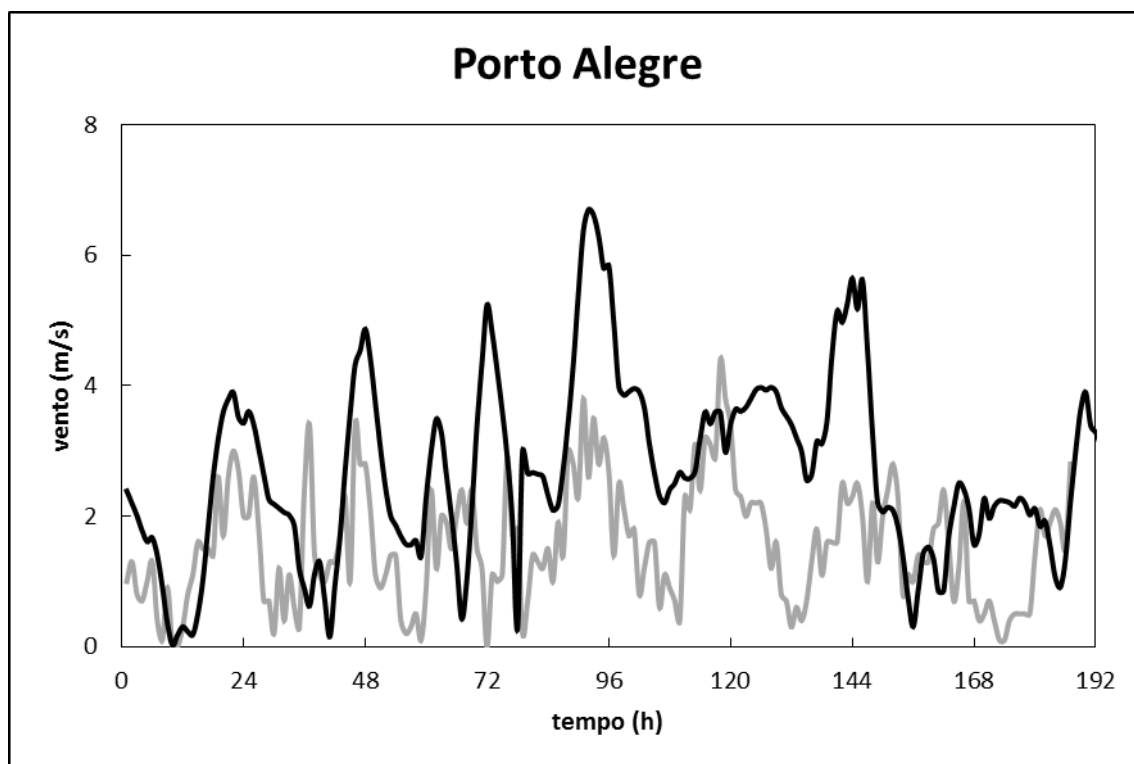


Figura 18 – Velocidade do vento simulada pelo modelo CCATT-BRAMS (preto) e observada (cinza) e na estação Porto Alegre.

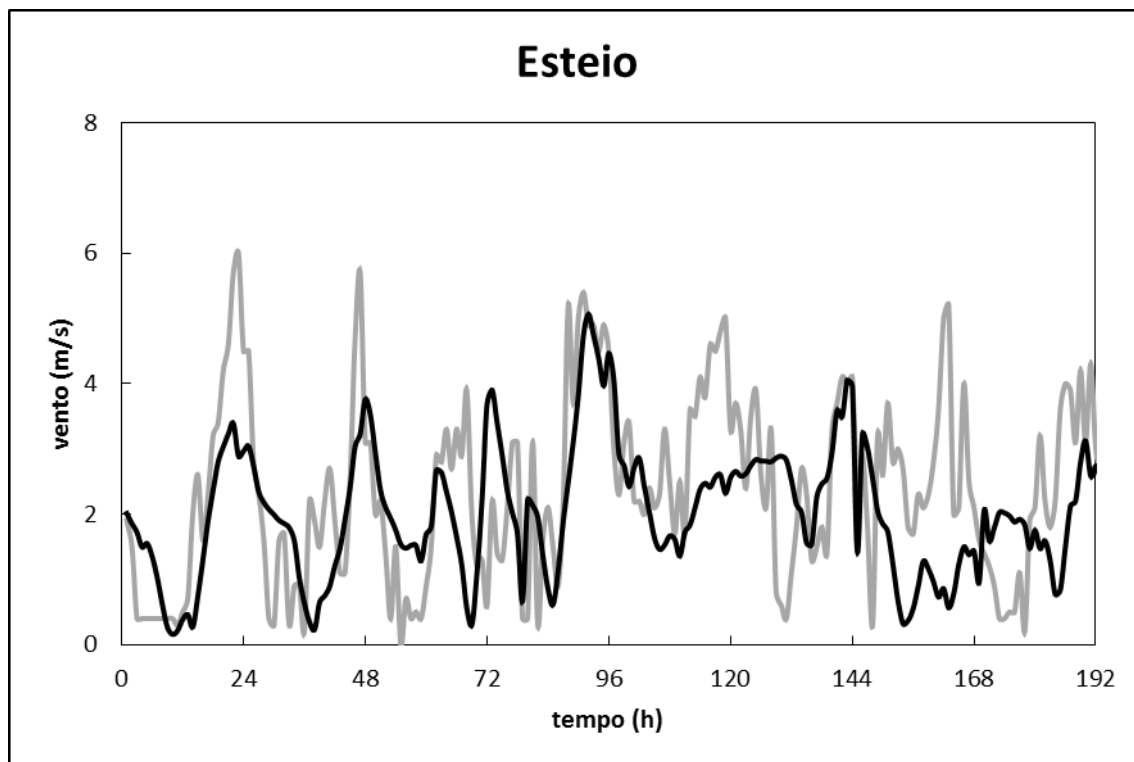


Figura 19 – Velocidade do vento (m/s) simulada pelo modelo CCATT-BRAMS (preto) e observada (cinza) e na estação Esteio.

Os resultados de uma análise estatística das variáveis meteorológicas avaliadas nas Figs. 14 a 19 são apresentados na tab. 7. Os índices estatísticos considerados são índice de concordância (d), correlação (R) e raiz do erro quadrático médio (RMSE).

Os índices de concordância (d) apresentaram resultados satisfatórios para as três variáveis consideradas. Já os índices de correlação (R), confirmando a análise realizada nas Figs. 14 a 19 estão em torno de 60 % para pressão, em torno de 40% para a velocidade do vento e 99% para a temperatura. Apesar de a análise apresentar menores correlações para pressão e velocidade, a avaliação revela erros relativamente pequenos para o RMSE.

Tabela 7 – Análise estatística das variáveis meteorológicas simuladas pelo modelo BRAMS.

Variável	Estação	d	R	RMSE (mb)
Pressão	FEPAM	0,99	0,58	12,25
	INMET	0,99	0,60	6,21
				RMSE (°C)
Temperatura	FEPAM	0,99	0,93	2,25
	INMET	0,99	0,94	1,81
				RMSE (ms <sup>-1</sup> )
Velocidade do vento	FEPAM	0,92	0,46	1,34
	INMET	0,86	0,42	1,73

Para verificar como ocorreu o transporte de poluentes na RMPA, é realizada uma breve análise da circulação do vento na região. A área é caracterizada por consideráveis variações do uso e cobertura do solo, com centros urbano-industriais e, também, pela presença de grandes reservatórios de água. Naturalmente, o transporte de poluentes emitidos nesta região está sob a influência de circulações locais, como brisa marítima, brisa lacustre, escoamento de vale/montanha e circulação de ilha de calor urbano. As variações do tipo de superfície têm consequências diretas no campo de vento horizontal, gerando acelerações e estagnações do vento em algumas áreas (CUCHIARA, 2011).

As Figs. 20 a 35 apresentam os campos de direção e intensidade do vento simulados pelo modelo BRAMS sobre a RMPA. As figuras mostram a circulação do vento simulada às 00 e às 12 HL (Hora Local) para o período de 05 a 12 de janeiro de 2009. Às 00 HL do dia 05, observou-se que o BRAMS simulou ventos de intensidade fraca sobre o continente e com direção predominante de nordeste (NE). A velocidade do vento continuou fraca durante o dia (12 HL) e os efeitos da brisa lacustre influenciaram sua intensidade e direção em algumas regiões, sendo possível visualizar a mudança na direção do sentido do vento de NE para leste (E)



sobre a RMPA. As 00 HL do segundo dia (06), a direção continua a ser de leste em algumas regiões do continente e sobre a RMPA, permanecendo sobre o oceano de norte-nordeste, apresentando maiores intensidades quando comparadas ao dia anterior. Ventos de nordeste estão ocorrendo por efeito do escoamento do sistema de alta pressão que se encontra na região e tem sentido anti-horário de circulação (Fig. A4, AnexoA). Neste mesmo dia, as 12 HL, a direção do vento apresentou predominância de nordeste, mas novamente os efeitos de circulação local alteraram a configuração sobre o litoral, onde foi possível observar ventos mais intensos do quadrante leste devido à brisa marítima. No dia 07 de janeiro, as 00 HL, (Fig. 24) o vento estava com fraca intensidade e com predominância das direções leste e nordeste, o que novamente evidencia o efeito do escoamento do sistema de alta que ainda neste horário atuava sobre o Atlântico. Este padrão modifica-se, pois no decorrer deste dia, inicia a passagem de um sistema frontal sobre o oceano. Às 12 HL (Fig. 25), a velocidade do vento continuou fraca e os efeitos da passagem da frente influenciaram a direção do vento, onde foi possível visualizar áreas de estagnação e convergência do campo de vento sobre e no entorno da RMPA, e a mudança da direção dos ventos vindos de sul sobre o continente. Na Fig. 26, referente à noite do dia 08 (00 HL), o escoamento do vento comportou-se segundo a figura, com uma concordância satisfatória com a carta sinótica do mesmo horário (Fig. A9 – Anexo A), pois a característica pré-frontal é de ventos calmos e mudança no sentido do giro dos ventos (detalhe no canto inferior esquerdo da imagem), em que ventos de sul já podem ser observados. Durante o dia (as 12 HL), a direção do vento sobre passou a ser de sudeste, influenciada pela chegada de um sistema frontal ao Estado, que se deslocou rapidamente para o oceano sem atingir a RMPA.

Como o sistema frontal teve rápido deslocamento e passou apenas sobre o oceano, na noite do dia 09 de janeiro (00 HL), o escoamento acabou novamente ganhando influência de um anticiclone, só que desta vez um sistema de alta pressão pós-frontal (após a passagem da frente) e ocorreu a diminuição da velocidade do vento. As 12 HL, os ventos tornaram-se moderados e com direção de leste-sudeste. As 00 HL do dia 10, o vento continuou a escoar do quadrante leste com alguma variação de sudeste sobre o continente, e ocorrendo alguma calmaria do vento ao norte da RMPA. Durante a tarde (Fig. 31), a componente do vento de nordeste predominou e a intensidade passou de fraca a moderada. Na noite do dia 11 de janeiro (Fig. 32), ocorreu a predominância sobre o oceano de vento de nordeste,

acompanhando o giro do anticiclone, mas como sobre o continente estávamos tendo a presença de um cavado (área de baixa pressão), se observa na Fig. 33 ventos fracos com giro ciclônico (horário) sobre praticamente toda imagem (área roxa). As 12 HL, o escoamento sobre a RMPA esteve sobre a influência da brisa marítima, com ventos de leste-nordeste. No dia 12 à noite (00HL), temos pela carta sinótica (Fig. A19), a intensificação do cavado que está sobre o RS, mas na Fig. 34, conseguimos apenas observar calma. Já na sequência as 12HL, o sistema de baixa pressão acabou se intensificando (Fig. A20) e podemos ver a predominância de ventos sudoeste e valores de velocidade do vento mais significativos na costa.

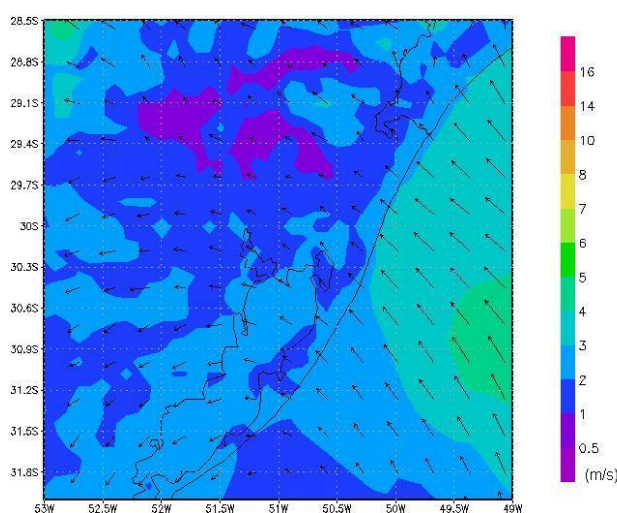


Figura 20 – Vento em superfície simulado pelo modelo BRAMS as 00HL no dia 05 de janeiro de 2009.

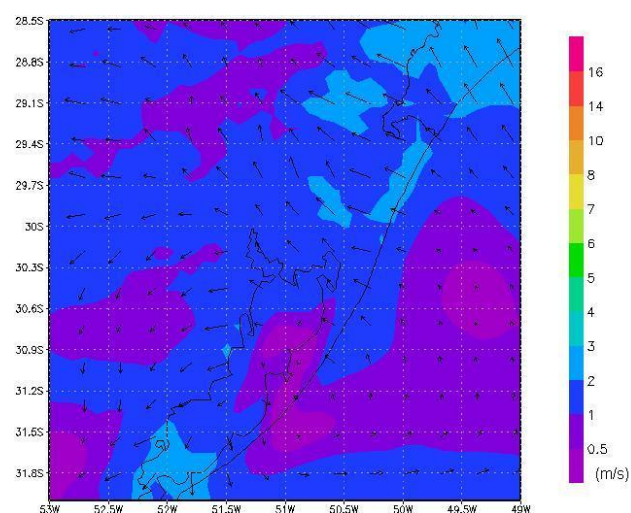


Figura 21 – Vento em superfície simulado pelo modelo BRAMS as 12HL no dia 05 de janeiro de 2009.

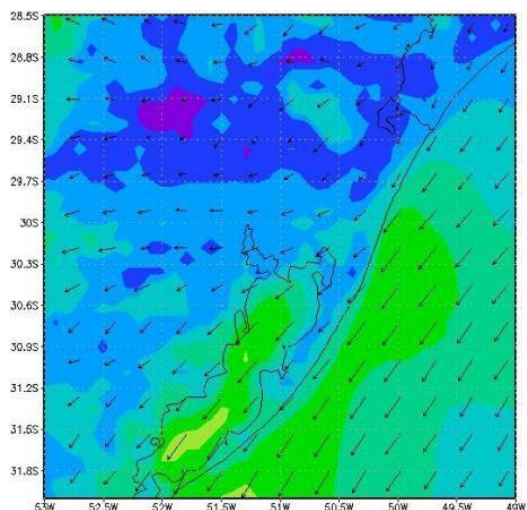


Figura 22 – Vento em superfície simulado pelo modelo BRAMS as 00HL no dia 06 de janeiro de 2009.

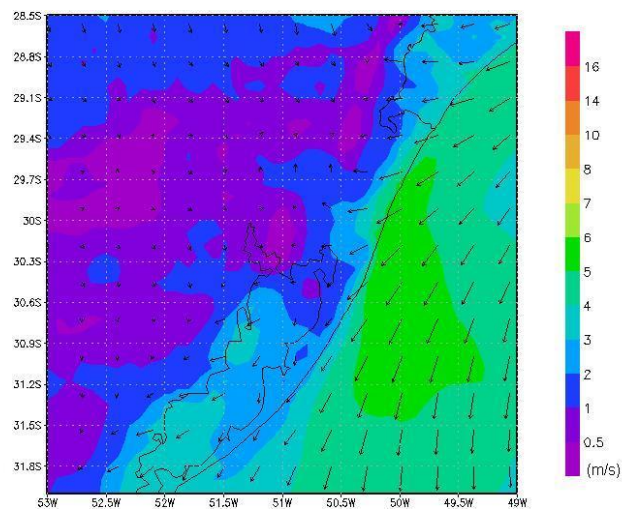


Figura 23 – Vento em superfície simulado pelo modelo BRAMS as 12HL no dia 06 de janeiro de 2009.

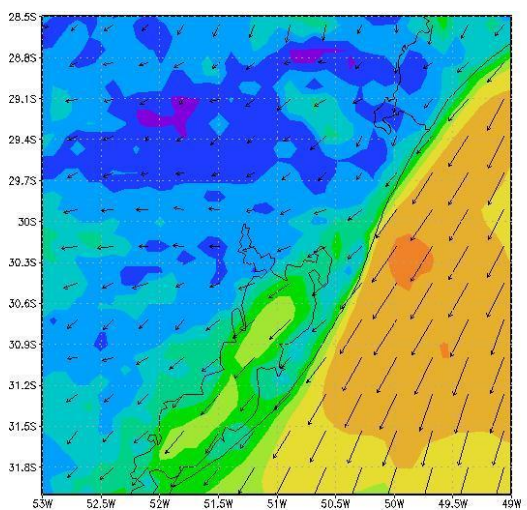


Figura 24 – Vento em superfície simulado pelo modelo BRAMS as 00HL no dia 07 de janeiro de 2009.

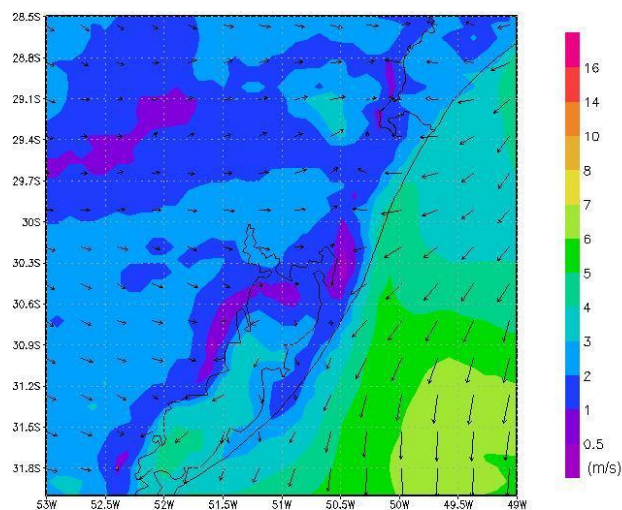


Figura 25 – Vento em superfície simulado pelo modelo BRAMS as 12HL no dia 07 de janeiro de 2009.



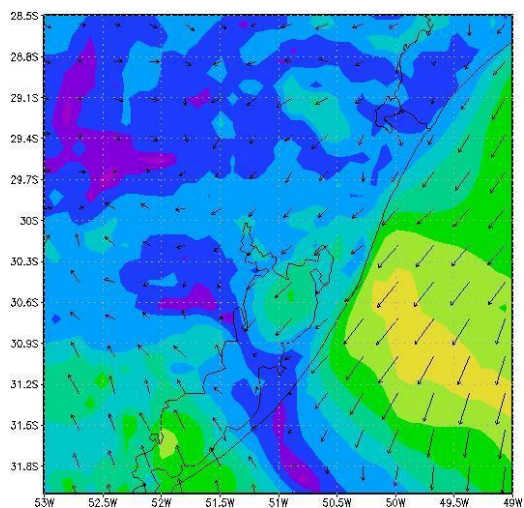


Figura 26 – Vento em superfície simulado pelo modelo BRAMS as 00HL no dia 08 de janeiro de 2009.

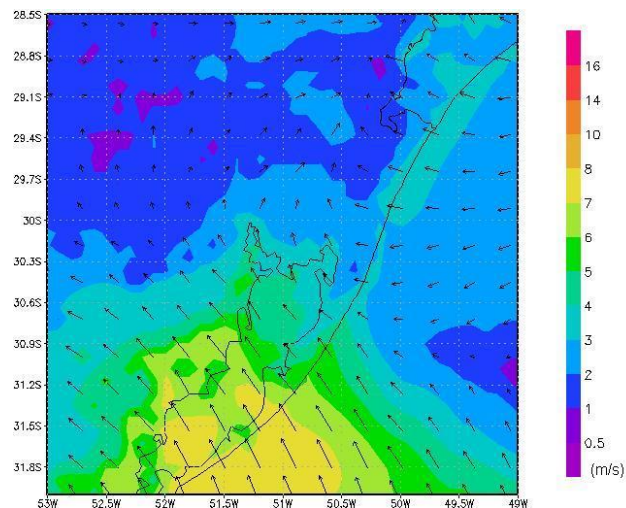


Figura 27 – Vento em superfície simulado pelo modelo BRAMS as 12HL no dia 08 de janeiro de 2009.

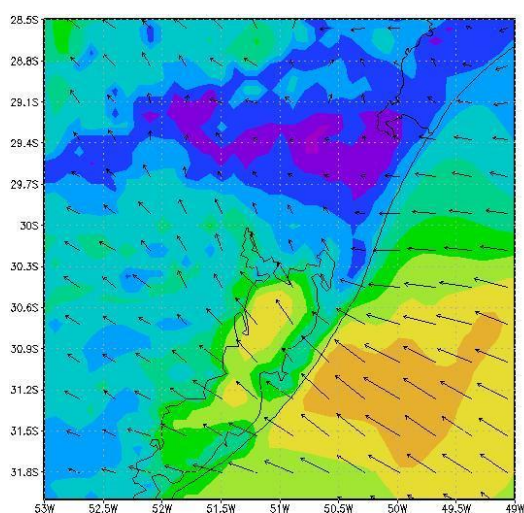


Figura 28 – Vento em superfície simulado pelo modelo BRAMS as 00HL no dia 09 de janeiro de 2009.

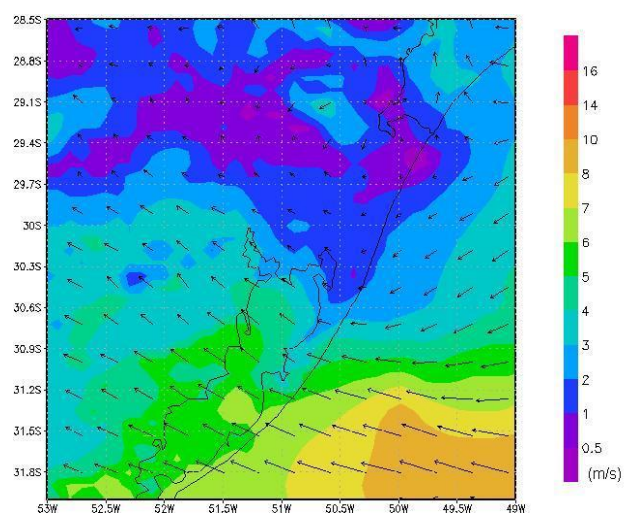


Figura 29 – Vento em superfície simulado pelo modelo BRAMS as 12HL no dia 09 de janeiro de 2009.

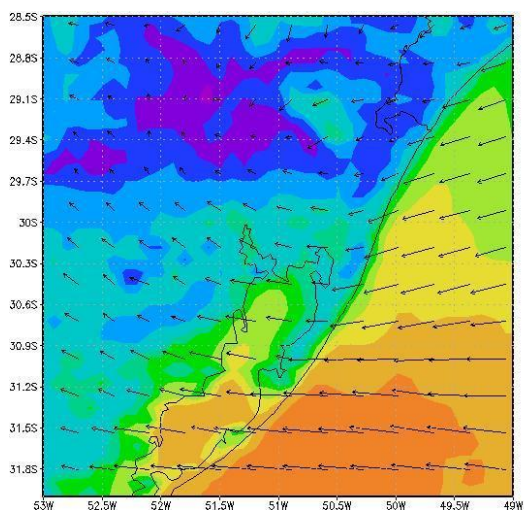


Figura 30 – Vento em superfície simulado pelo modelo BRAMS as 00HL no dia 10 de janeiro de 2009.

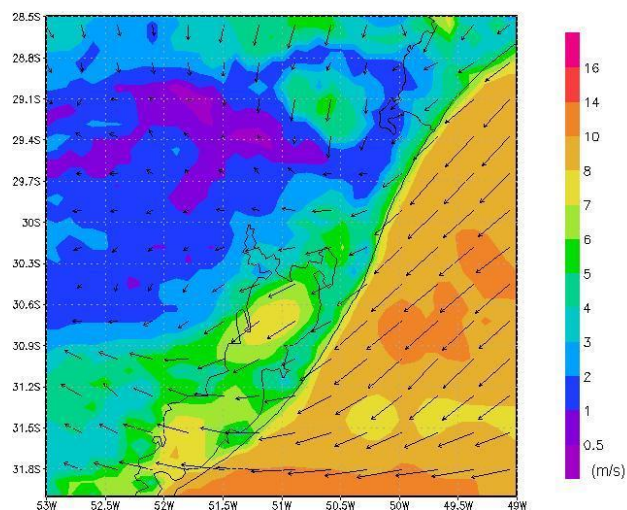


Figura 31 – Vento em superfície simulado pelo modelo BRAMS as 12HL no dia 10 de janeiro de 2009.

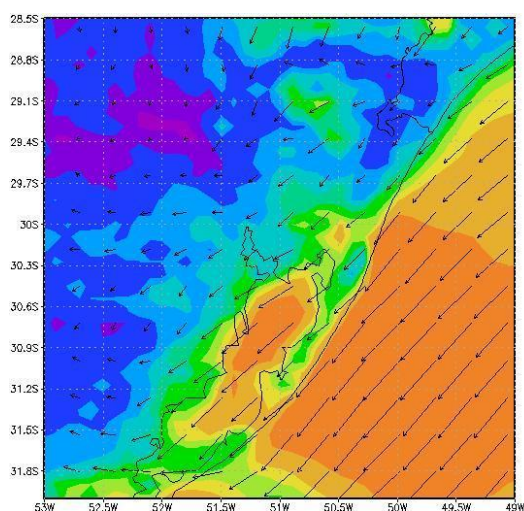


Figura 32 – Vento em superfície simulado pelo modelo BRAMS as 00HL no dia 11 de janeiro de 2009.

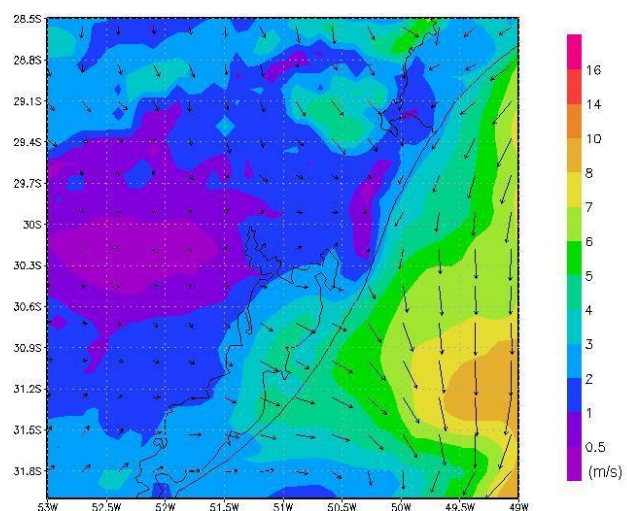


Figura 33 – Vento em superfície simulado pelo modelo BRAMS as 12HL no dia 11 de janeiro de 2009.



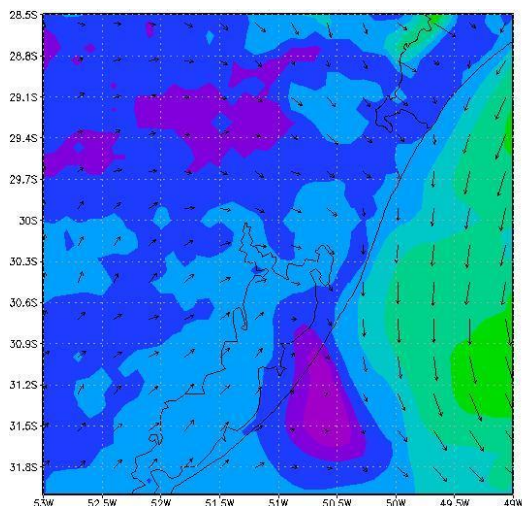


Figura 34 – Vento em superfície simulado pelo modelo BRAMS as 00HL no dia 12 de janeiro de 2009.

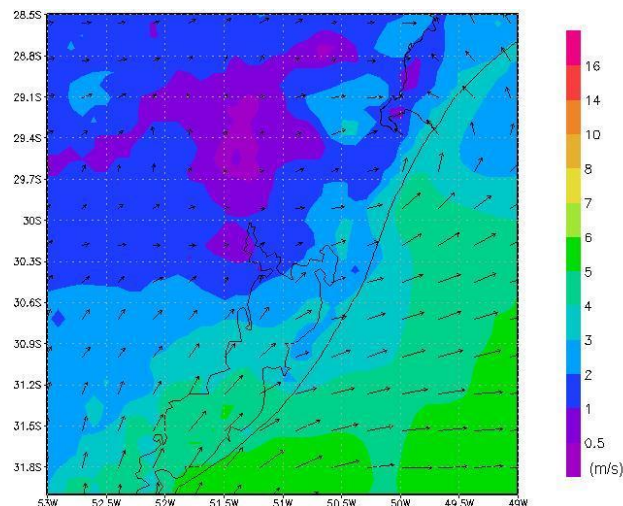


Figura 35 – Vento em superfície simulado pelo modelo BRAMS as 12HL no dia 12 de janeiro de 2009.

De acordo com a análise meteorológica, entre os dias 5 e 8 de janeiro se observam condições propícias para gerar altas concentrações de ozônio, ou seja, altas temperaturas e ventos fracos. Já para o período de 9 a 12 de janeiro, em decorrência da nebulosidade variável, as condições meteorológicas não foram tão favoráveis para gerar altas concentrações de ozônio na RMPA.

### 5.2.2 Simulação das espécies químicas

Nesta seção são discutidos os resultados da simulação da atmosfera química sobre a RMPA, utilizando o modelo CCATT-BRAMS. Esta discussão usa como base a análise sinótica realizada na seção anterior e tenta demonstrar a influência na fotoquímica de ozônio. Adicionalmente, é realizada uma avaliação dos resultados do modelo através de comparações com dados observados de razão de mistura. Os dados observados são provenientes de duas estações de qualidade do ar instaladas pela FEPAM na RMPA. A primeira está instalada no município de Esteio (-29,85°S, -51,17°W) e a segunda está instalada em Porto Alegre (-30,05 °S; -51,16 °W).

As Figs. 36 a 51 mostram uma sequência dos campos de razão de mistura em superfície de ozônio ( $O_3$ ) no período de 05 a 12 de janeiro de 2009, as 06 e 15 HL. Os resultados mostram que as altas concentrações de  $O_3$  ocorrem após o meio-dia e os valores mínimos ocorreram na madrugada; valores máximos acontecem em torno das 15 HL, horário em que já ocorreu a concentração máxima diária de  $NO_x$  e

COV e o pico diário de temperatura. Valores mínimos ocorrem em torno das 06 HL, horário em que não há radiação disponível para fotólise.

De acordo com a Resolução CONAMA nº 03/90, o limite de concentração média máxima de 1 hora de  $O_3$  não deve ultrapassar o valor  $160 \mu g/m^3$  (81 ppb) e não deve ser excedido mais de uma vez por ano. Observa-se que as 15HL dos dias 06, 07 e 08, período favorável a formação de  $O_3$ , a concentração máxima apresenta valores de 55 ppb, ou seja, 33% abaixo do limite estabelecido pelo CONAMA.

Nos dias 05, 06, 08 e 09, durante o dia, a pluma de  $O_3$  é transportada de leste para oeste. Nota-se, também, que no dia 08 (Fig. 43) o vento transportou a pluma de  $O_3$  para fora da área da RMPA. Já no dia 07 as 15 HL (Fig. 41), a pluma de  $O_3$  permanece estagnada sobre a RMPA, devido à convergência do campo de vento gerada pelas brisas e ventos de oeste. Esses resultados corroboram as simulações realizadas por Cuchiara (2011), com o modelo WRF/Chem.

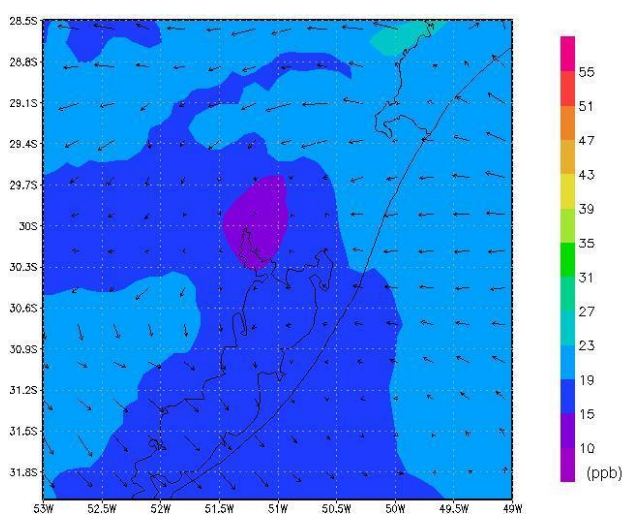


Figura 36 – Razão de mistura de  $O_3$  simulada pelo modelo CCATT- BRAMS as 06 HL no dia 05 de janeiro de 2009.

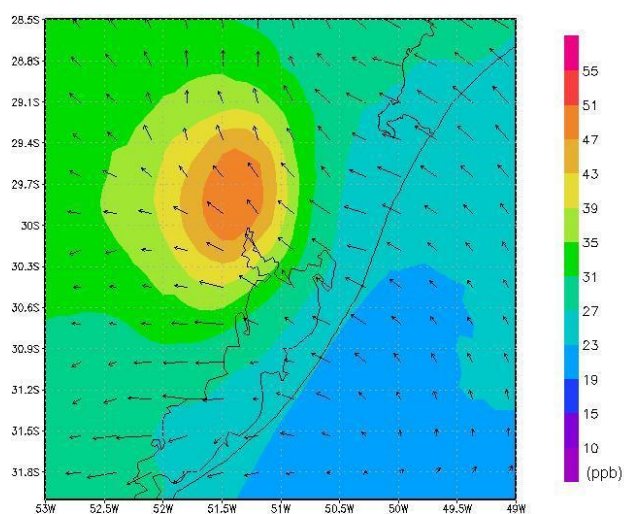


Figura 37 – Razão de mistura de  $O_3$  simulada pelo modelo CCATT-BRAMS as 15 HL no dia 05 de janeiro de 2009.

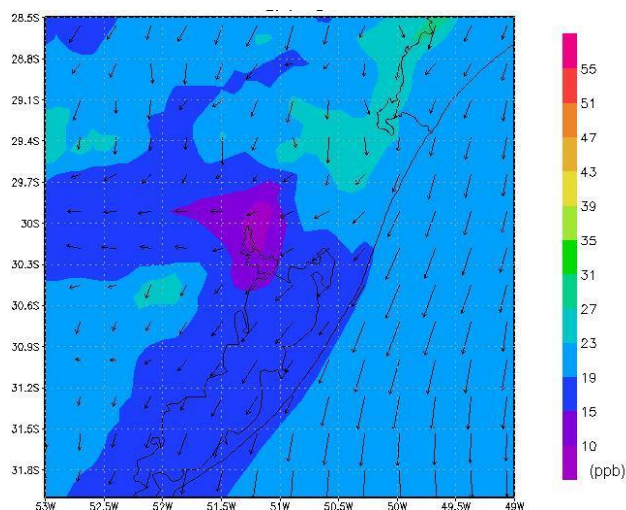


Figura 38 – Razão de mistura de  $O_3$  simulada pelo modelo CCATT-BRAMS às 06 HL no dia 06 de janeiro de 2009.

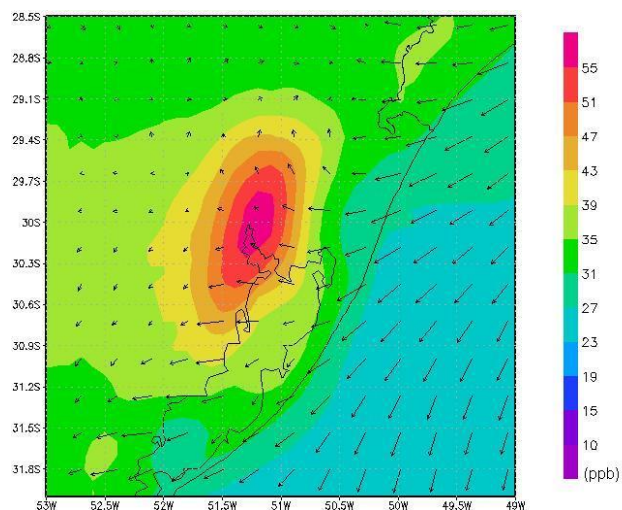


Figura 39 – Razão de mistura de  $O_3$  simulada pelo modelo CCATT-BRAMS às 15 HL no dia 06 de janeiro de 2009.

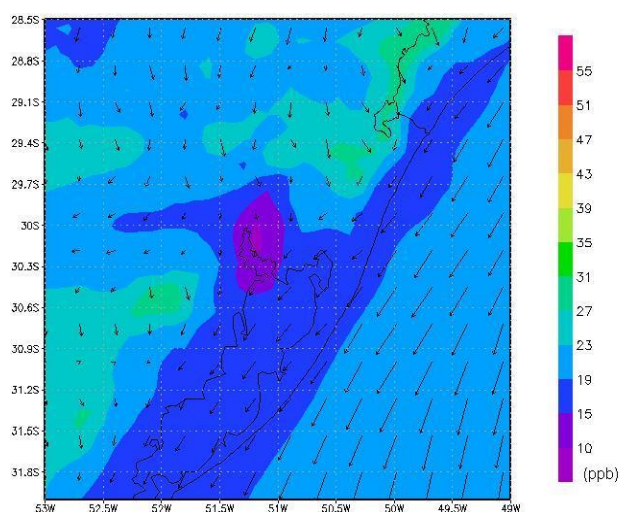


Figura 40 – Razão de mistura de  $O_3$  simulada pelo modelo CCATT-BRAMS às 06 HL no dia 07 de janeiro de 2009.

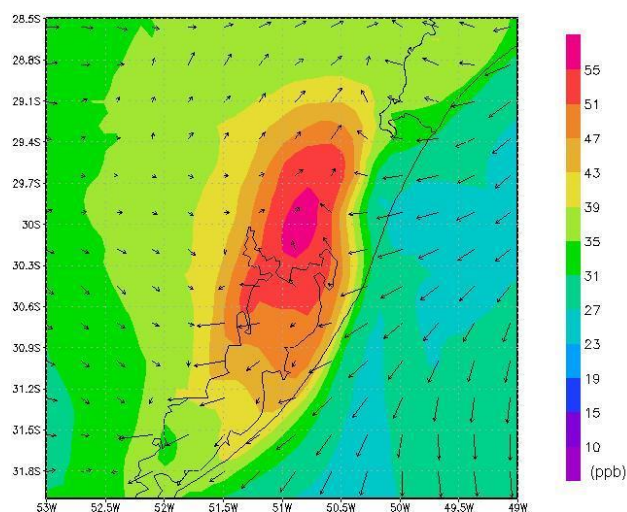


Figura 41 – Razão de mistura de  $O_3$  simulada pelo modelo CCATT-BRAMS às 15 HL no dia 07 de janeiro de 2009.



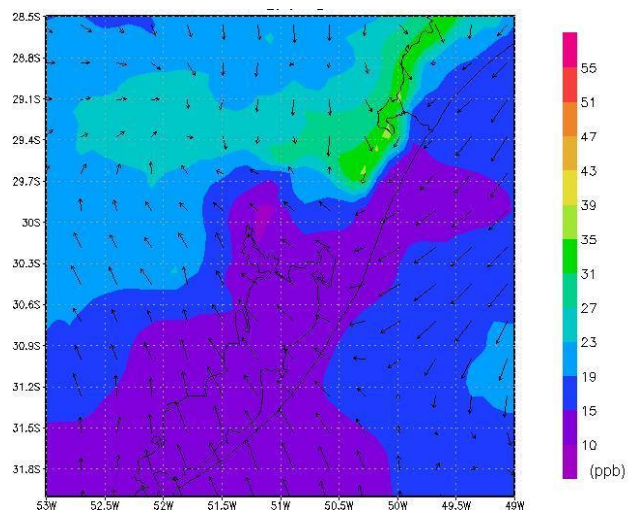


Figura 42 – Razão de mistura de  $O_3$  simulada pelo modelo CCATT-BRAMS às 06 HL no dia 08 de janeiro de 2009.

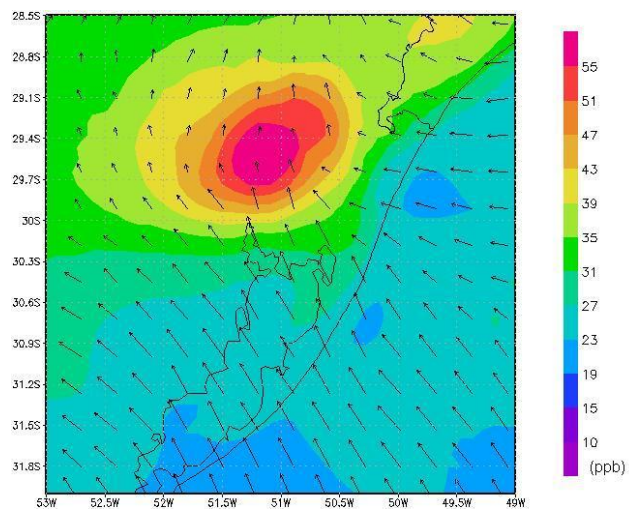


Figura 43 – Razão de mistura de  $O_3$  simulada pelo modelo CCATT-BRAMS às 15 HL no dia 08 de janeiro de 2009.

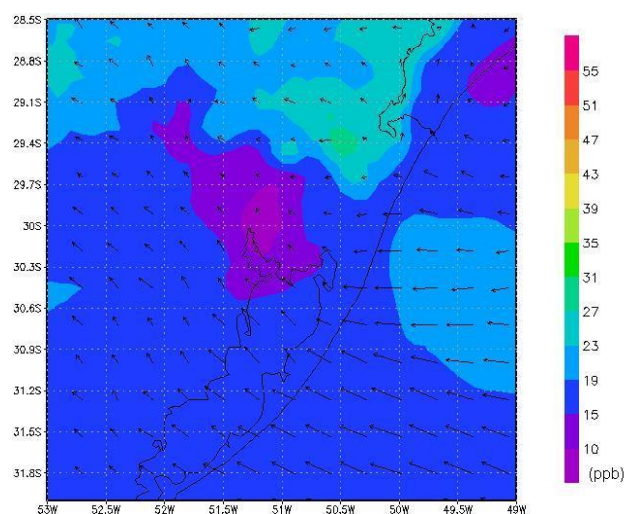


Figura 44 – Razão de mistura de  $O_3$  simulada pelo modelo CCATT-BRAMS às 06 HL no dia 09 de janeiro de 2009.

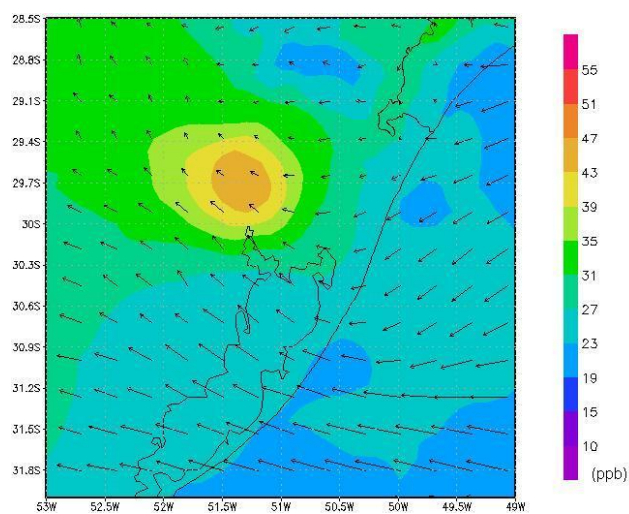


Figura 45 – Razão de mistura de  $O_3$  simulada pelo modelo CCATT-BRAMS às 15 HL no dia 09 de janeiro de 2009.

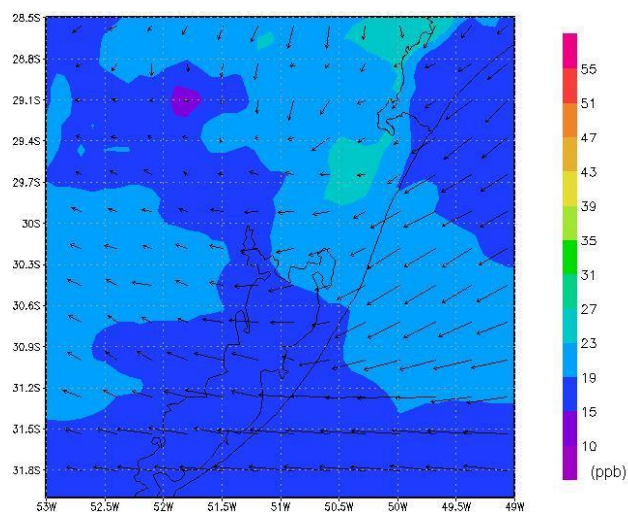


Figura 46 – Razão de mistura de  $O_3$  simulada pelo modelo CCATT-BRAMS as 06 HL no dia 10 de janeiro de 2009.

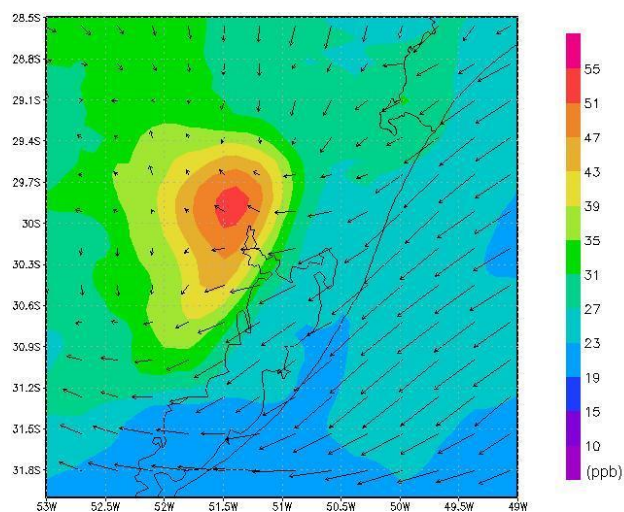


Figura 47 – Razão de mistura de  $O_3$  simulada pelo modelo CCATT-BRAMS as 15 HL no dia 10 de janeiro de 2009.

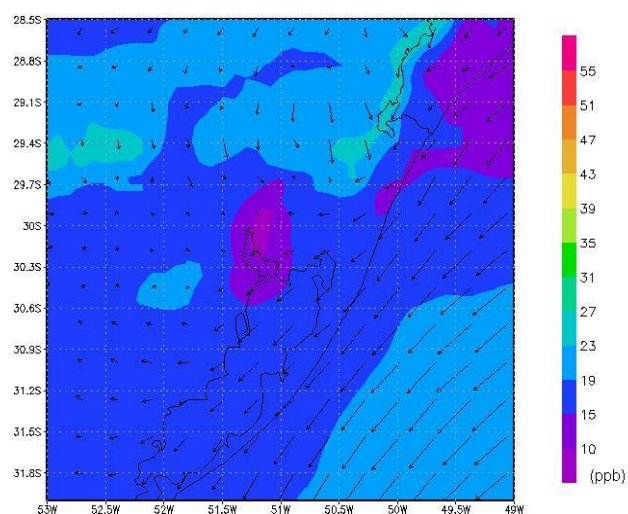


Figura 48 – Razão de mistura de  $O_3$  simulada pelo modelo CCATT-BRAMS as 06 HL no dia 11 de janeiro de 2009.

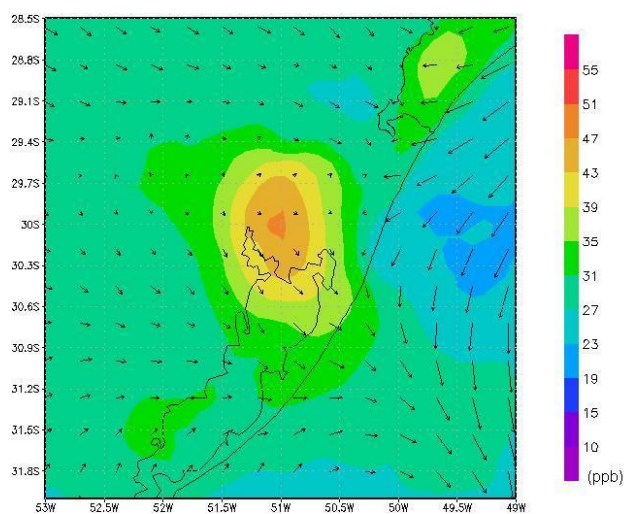


Figura 49 – Razão de mistura de  $O_3$  simulada pelo modelo CCATT-BRAMS as 15 HL no dia 11 de janeiro de 2009.



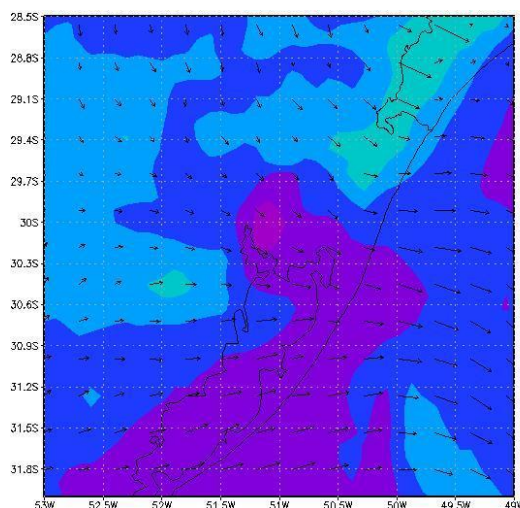


Figura 50 – Razão de mistura de  $O_3$  simulada pelo modelo CCATT-BRAMS às 06 HL no dia 12 de janeiro de 2009.

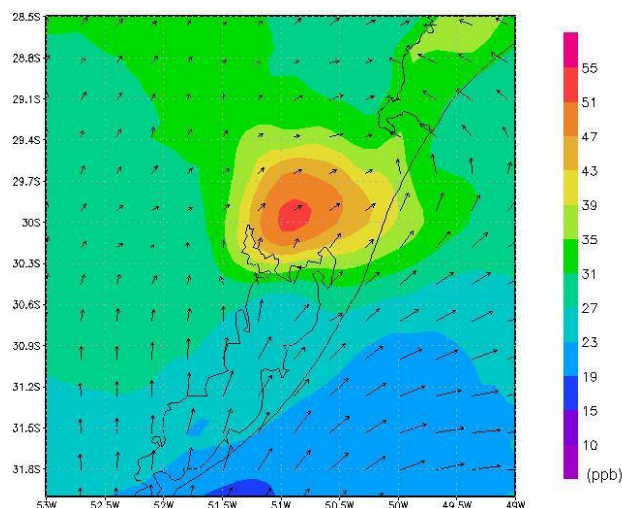


Figura 51 – Razão de mistura de  $O_3$  simulada pelo modelo CCATT-BRAMS às 15 HL no dia 12 de janeiro de 2009.

As Figs. 52 a 67 mostram as simulações do campo de razão de mistura em superfície de monóxido de carbono (CO) no período de 05 a 12 de janeiro de 2009, às 00 e 08 HL. O CO é um poluente diretamente emitido por fontes na superfície e, uma vez na atmosfera, possui um tempo de vida de aproximadamente dois meses (SEINFELD & PANDIS, 1998). Por consequência, este poluente é basicamente controlado pelos processos de emissão e transporte. O escoamento vale/montanha (Serra Geral) e as brisas lacustre e marítima exercem um papel importante para o transporte de poluentes na RMPA. Por exemplo, nos dias 07, 08 e 09 observa-se o escoamento de vale/montanha e brisa marítima, que cooperam para o transporte da pluma de CO a partir da RMPA.

De acordo com o padrão secundário do CONAMA 03/1990 (tab.4), a concentração média de 1 horas de CO não deve ultrapassar o valor de  $40.000 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (35 ppm ou 35 000 ppb). Observa-se que nas simulações realizadas para o período estudado, a concentração máxima de CO apresenta valores inferiores aos limites estabelecidos pelo CONAMA.

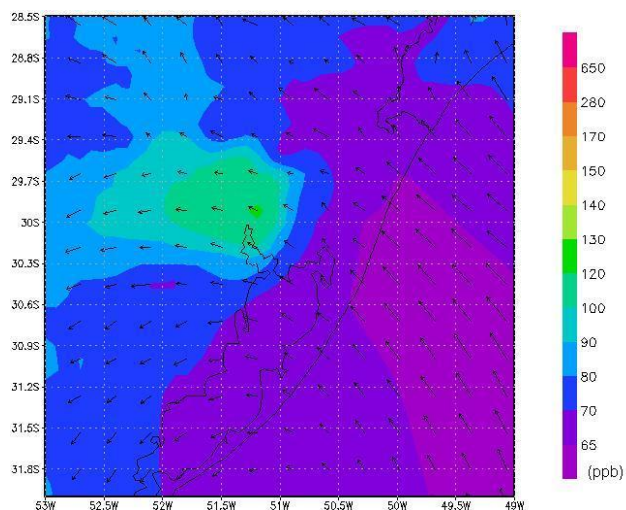


Figura 52 – Razão de mistura de CO simulada pelo modelo CCATT-BRAMS às 00 HL no dia 05 de janeiro de 2009.

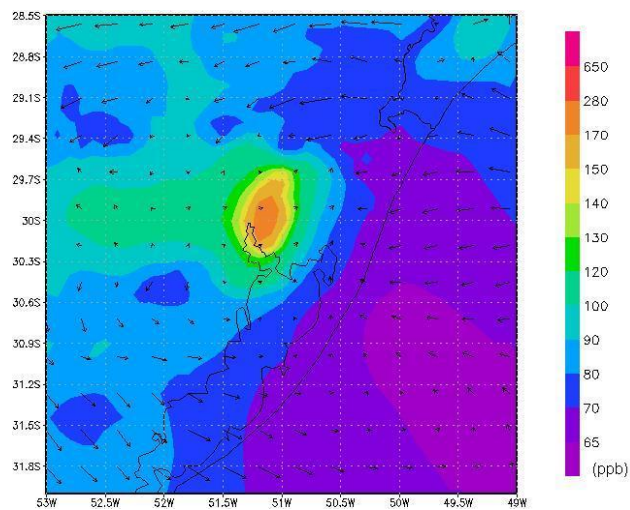


Figura 53 – Razão de mistura de CO simulada pelo modelo CCATT-BRAMS às 08 HL no dia 05 de janeiro de 2009.

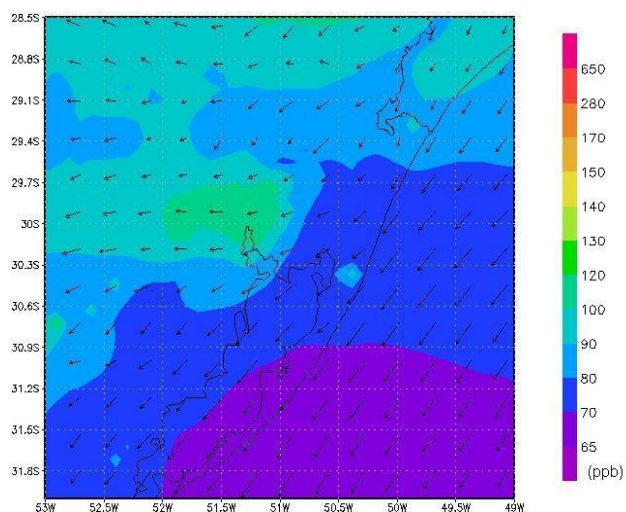


Figura 54 – Razão de mistura de CO simulada pelo modelo CCATT-BRAMS às 00 HL no dia 06 de janeiro de 2009.

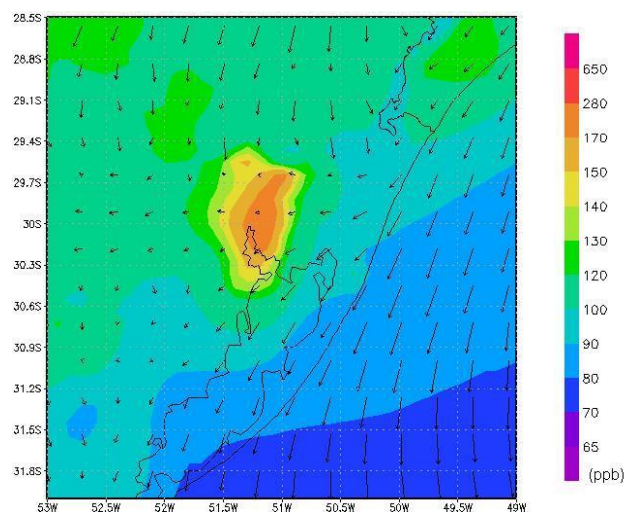


Figura 55 – Razão de mistura de CO simulada pelo modelo CCATT-BRAMS às 08 HL no dia 06 de janeiro de 2009.



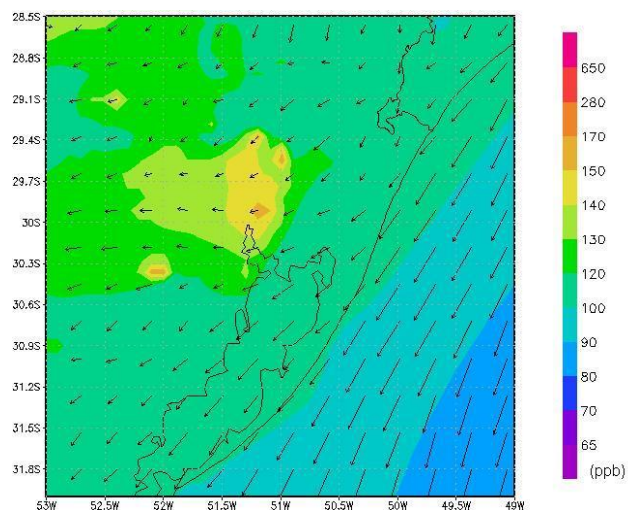


Figura 56 – Razão de mistura de CO simulada pelo modelo CCATT-BRAMS às 00 HL no dia 07 de janeiro de 2009.

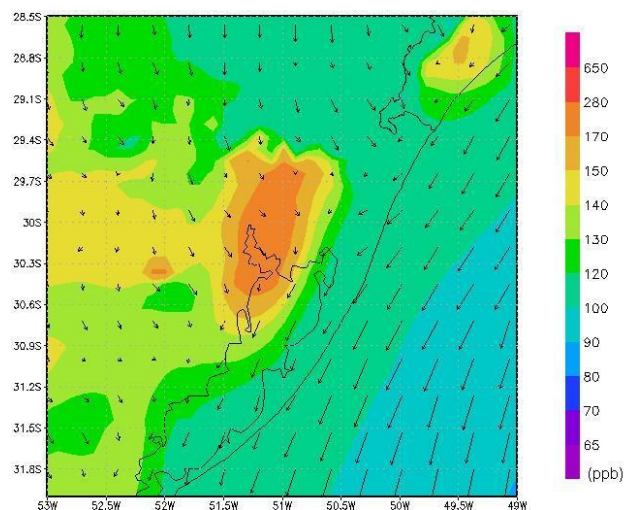


Figura 57 – Razão de mistura de CO simulada pelo modelo CCATT-BRAMS às 08 HL no dia 07 de janeiro de 2009.

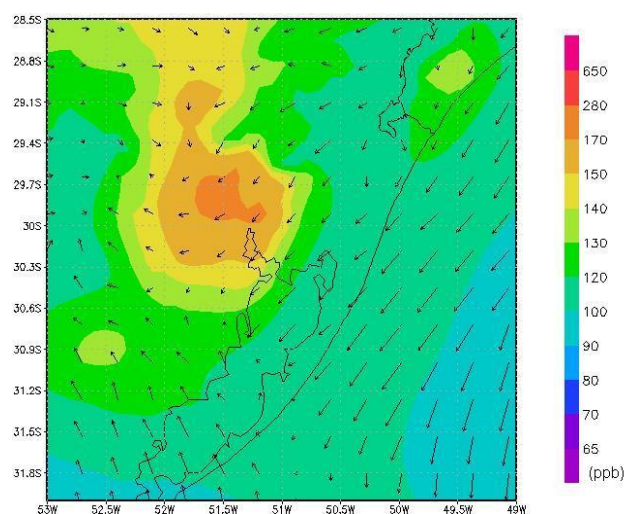


Figura 58 – Razão de mistura de CO simulada pelo modelo CCATT-BRAMS às 00 HL no dia 08 de janeiro de 2009.

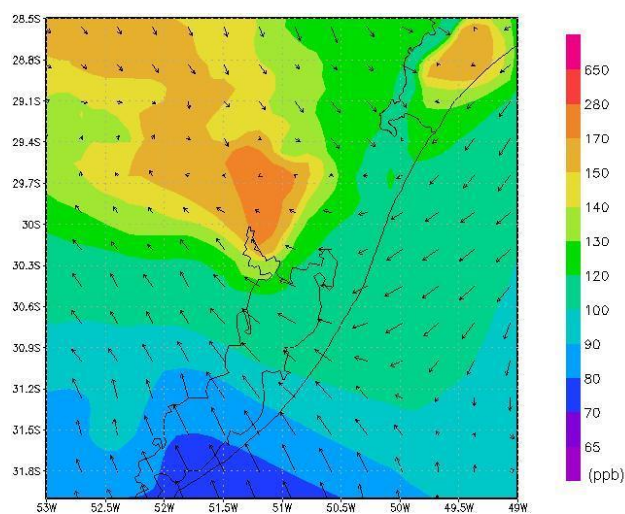


Figura 59 – Razão de mistura de CO simulada pelo modelo CCATT-BRAMS às 08 HL no dia 08 de janeiro de 2009.

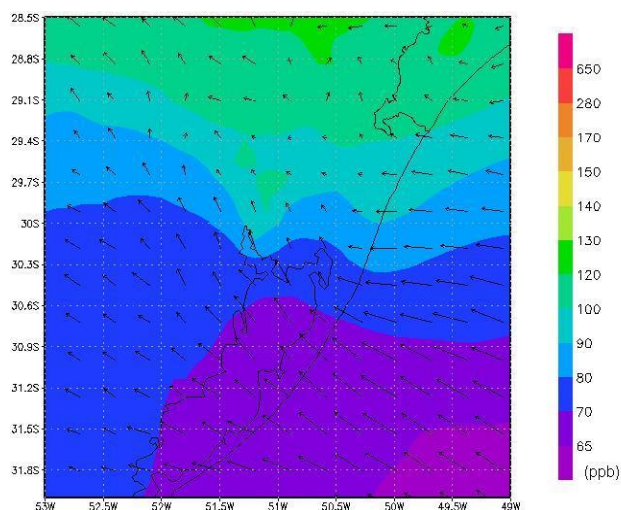


Figura 60 – Razão de mistura de CO simulada pelo modelo CCATT-BRAMS às 00 HL no dia 09 de janeiro de 2009.

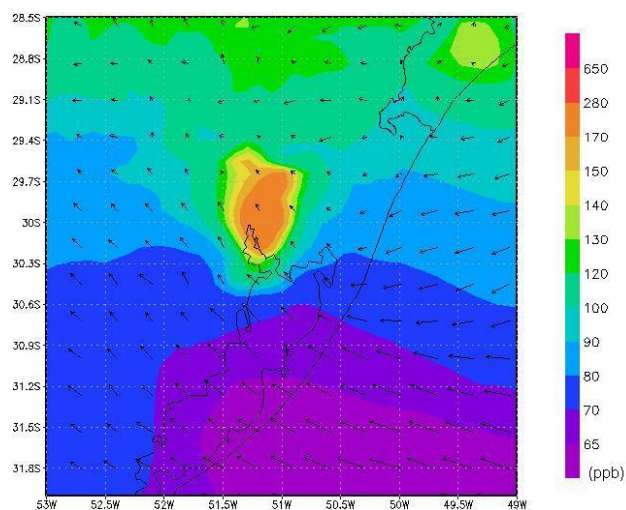


Figura 61 – Razão de mistura de CO simulada pelo modelo CCATT-BRAMS às 08 HL no dia 09 de janeiro de 2009.

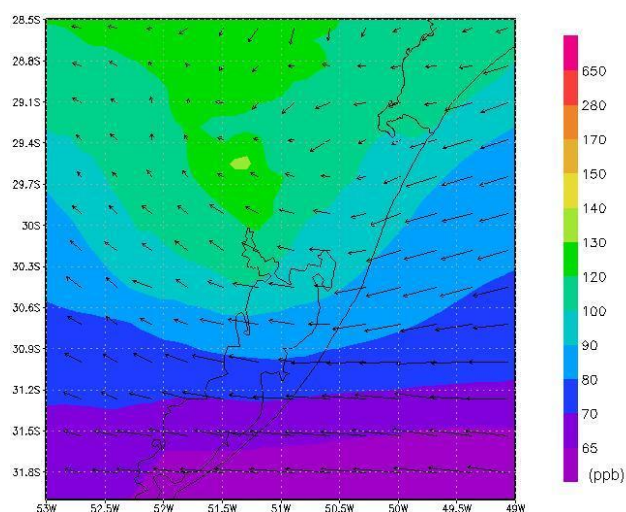


Figura 62 – Razão de mistura de CO simulada pelo modelo CCATT-BRAMS às 00 HL no dia 10 de janeiro de 2009.

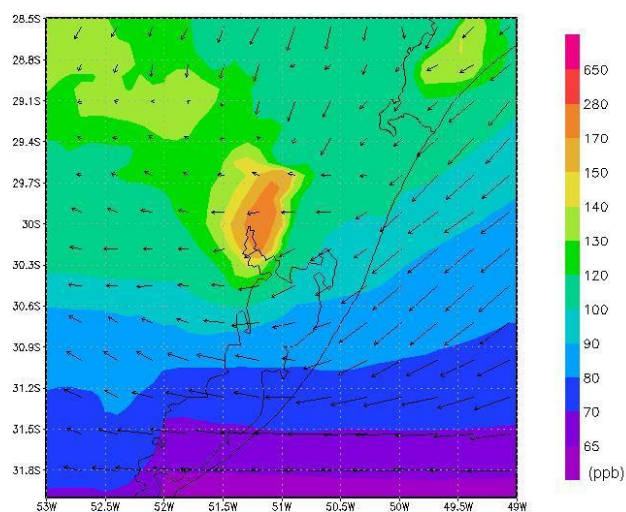


Figura 63 – Razão de mistura de CO simulada pelo modelo CCATT-BRAMS às 08 HL no dia 10 de janeiro de 2009.



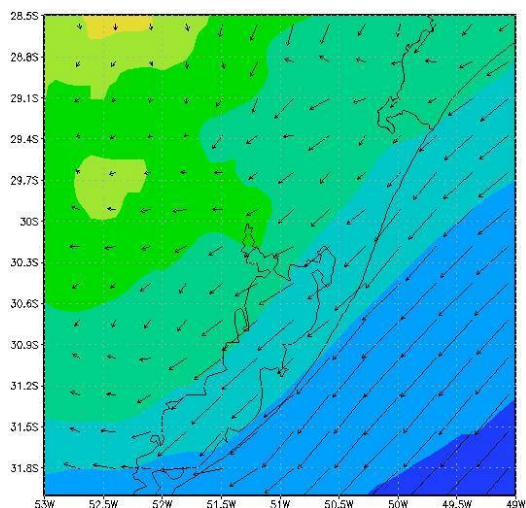


Figura 64 – Razão de mistura de CO simulada pelo modelo CCATT-BRAMS as 00 HL no dia 11 de janeiro de 2009.

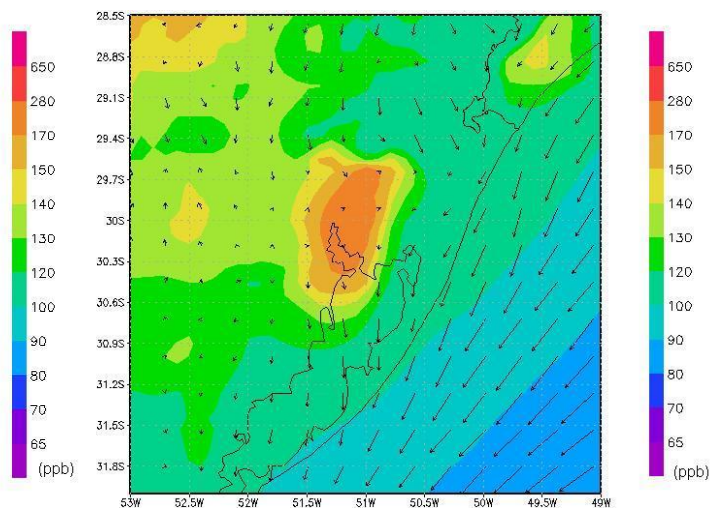


Figura 65 – Razão de mistura de CO simulada pelo modelo CCATT-BRAMS as 08 HL no dia 11 de janeiro de 2009.

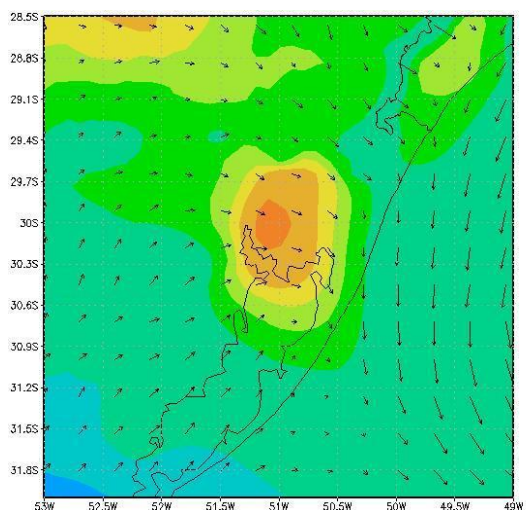


Figura 66 – Razão de mistura de CO simulada pelo modelo CCATT-BRAMS as 00 HL no dia 12 de janeiro de 2009.

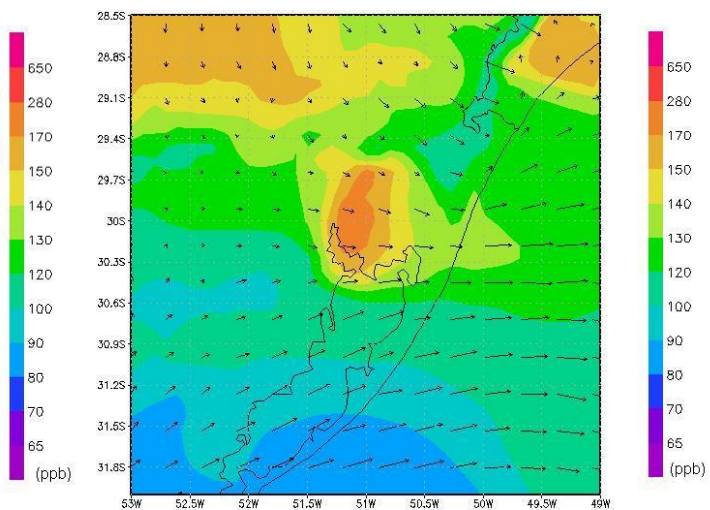


Figura 67 – Razão de mistura de CO simulada pelo modelo CCATT-BRAMS as 08 HL no dia 12 de janeiro de 2009.

Nas Figs. 68 a 83 são apresentados os campos de razão de mistura em superfície de hidrocarbonetos (HC) no período de 05 a 12 de janeiro de 2009, às 00 e 12 HL, simulados pelo modelo CCATT-BRAMS. Os hidrocarbonetos são compostos orgânicos formados unicamente por carbono e hidrogênio, oxidam-se facilmente liberando calor e propiciam a formação de novos compostos auxiliando na poluição urbana, por se associarem aos  $\text{NO}_x$  e a luz solar formando o ozônio troposférico. Novamente é possível observar que devido à convergência do campo

de vento gerada pelas brisas e ventos de oeste no dia 07 as 12 HL (Fig. 73), a concentração da pluma sobre a RMPA é transportada para sul sobre a Laguna dos Patos. E nos dias 08 e 09 com a mudança do quadrante dos ventos, as 12 HL o transporte ocorre para o norte do estado. É possível ver ainda, que nos dias 10, 11 e 12 parte dos HC observados no mapa advém pelos ventos de norte, e por se tratar de um período de férias, possivelmente tenham sido produzidos nos litorais do RS e SC.

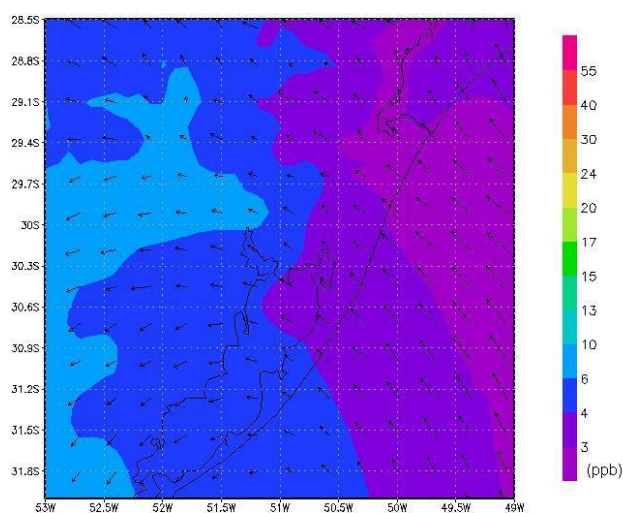


Figura 68 – Razão de mistura de HC simulada pelo modelo CCATT-BRAMS as 00 HL no dia 05 de janeiro de 2009.

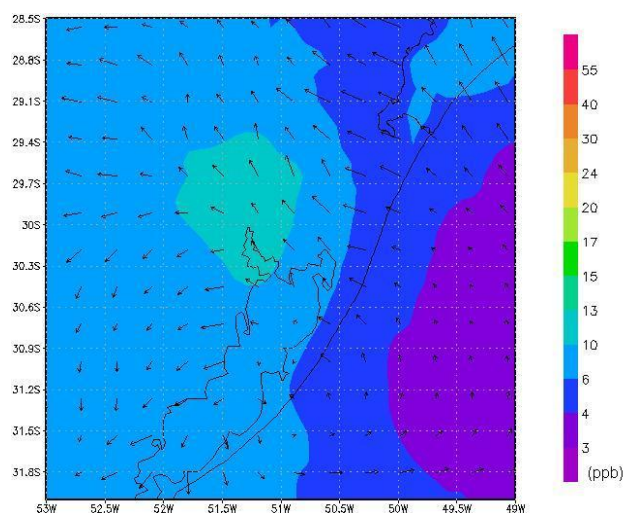


Figura 69 – Razão de mistura de HC simulada pelo modelo CCATT-BRAMS as 12 HL no dia 05 de janeiro de 2009.

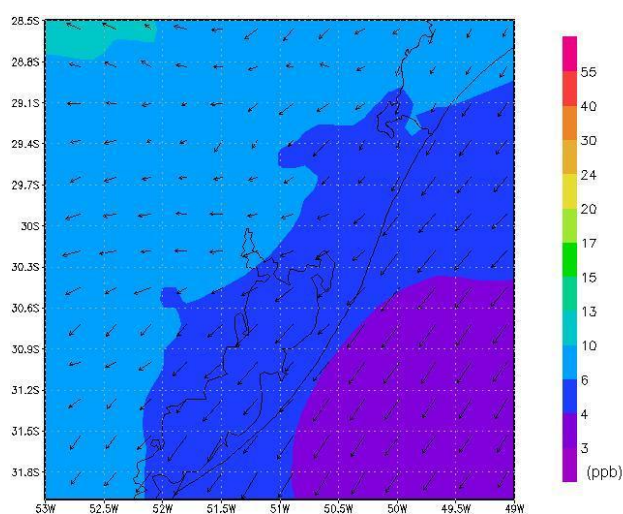


Figura 70 – Razão de mistura de HC simulada pelo modelo CCATT-BRAMS as 00 HL no dia 06 de janeiro de 2009.

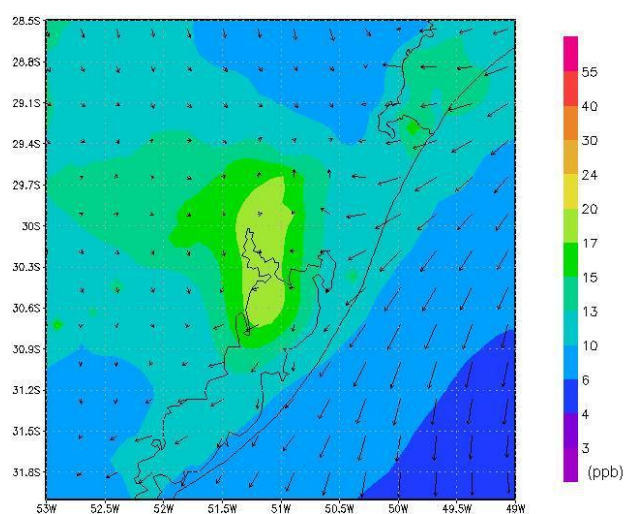


Figura 71 – Razão de mistura de HC simulada pelo modelo CCATT-BRAMS as 12 HL no dia 06 de janeiro de 2009.



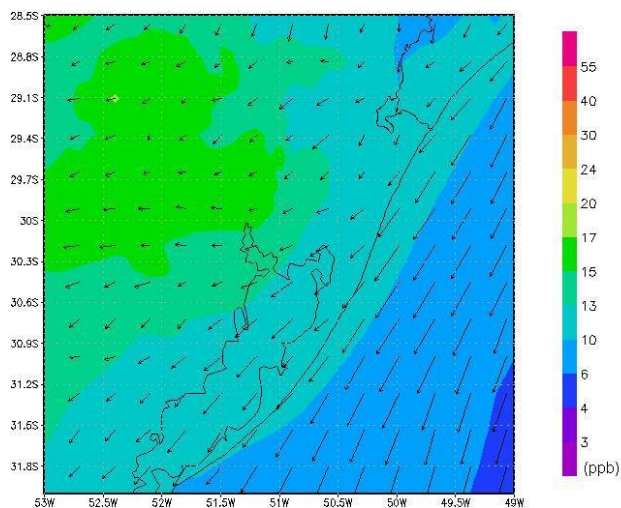


Figura 72 – Razão de mistura de HC simulada pelo modelo CCATT-BRAMS as 00 HL no dia 07 de janeiro de 2009.

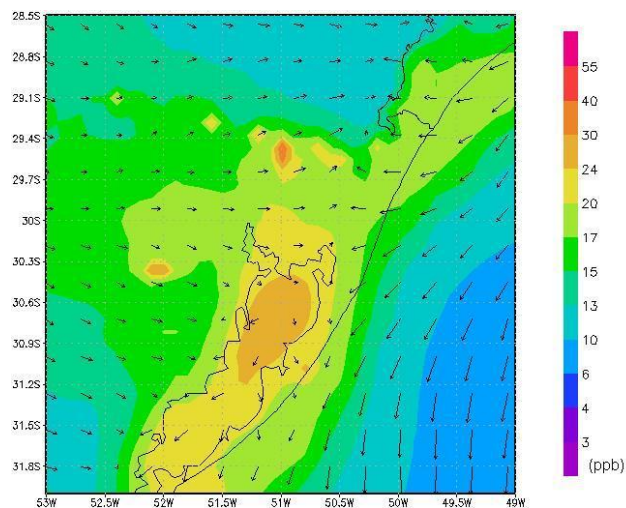


Figura 73 – Razão de mistura de HC simulada pelo modelo CCATT-BRAMS as 12 HL no dia 07 de janeiro de 2009.

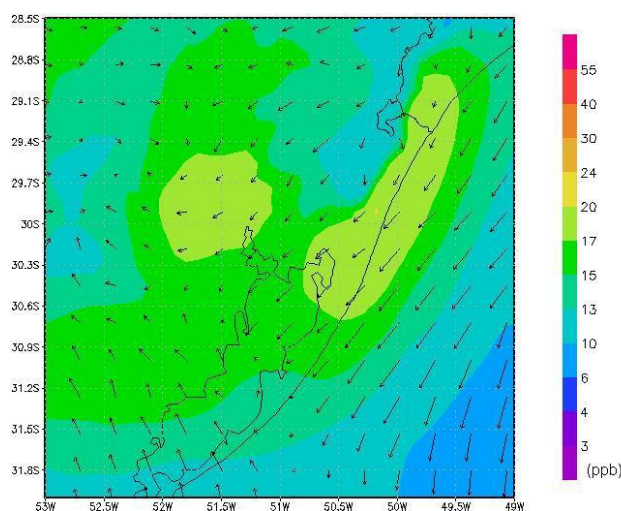


Figura 74 – Razão de mistura de HC simulada pelo modelo CCATT-BRAMS as 00 HL no dia 08 de janeiro de 2009.

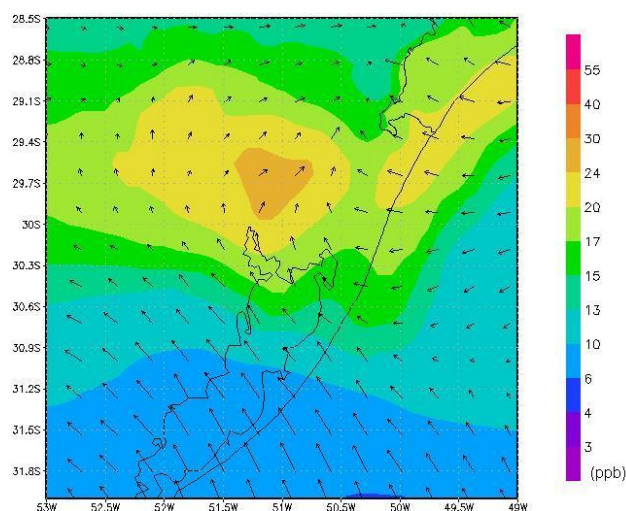


Figura 75 – Razão de mistura de HC simulada pelo modelo CCATT-BRAMS as 12 HL no dia 08 de janeiro de 2009.

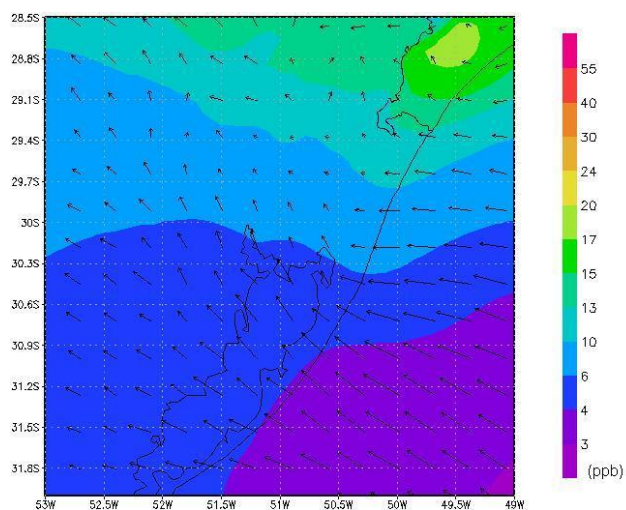


Figura 76 – Razão de mistura de HC simulada pelo modelo CCATT-BRAMS as 00 HL no dia 09 de janeiro de 2009.

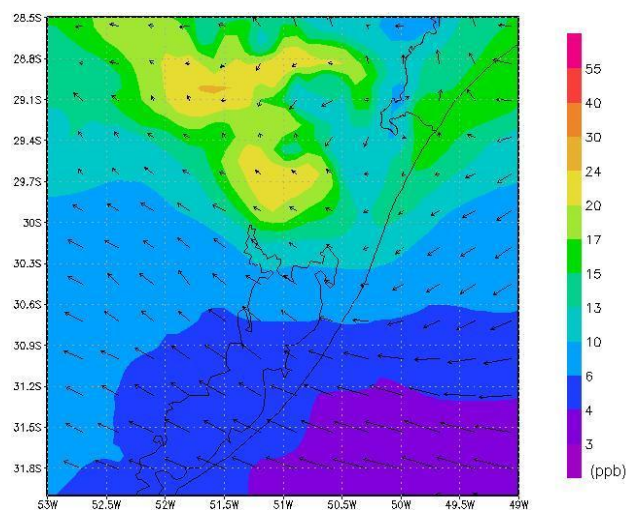


Figura 77 – Razão de mistura de HC simulada pelo modelo CCATT-BRAMS as 12 HL no dia 09 de janeiro de 2009.

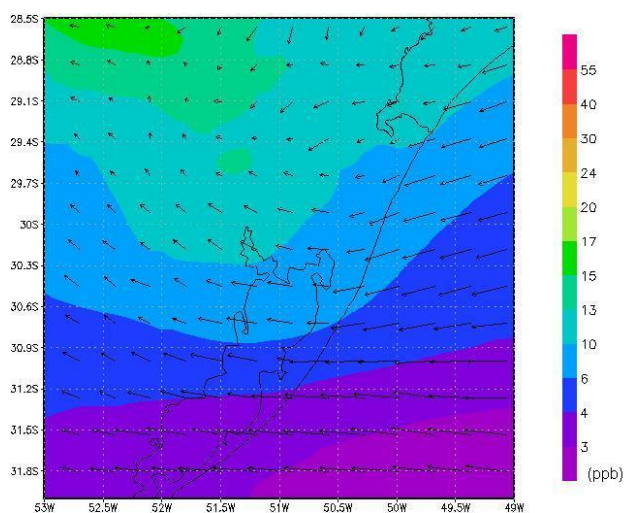


Figura 78 – Razão de mistura de HC simulada pelo modelo CCATT-BRAMS as 00 HL no dia 10 de janeiro de 2009.

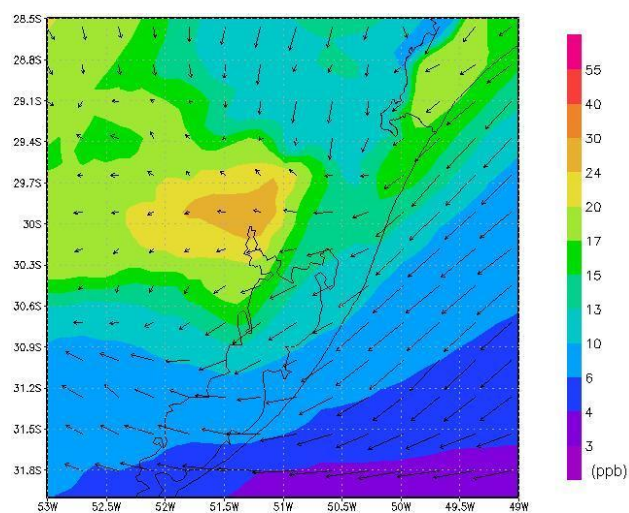


Figura 79 – Razão de mistura de HC simulada pelo modelo CCATT-BRAMS as 12 HL no dia 10 de janeiro de 2009.



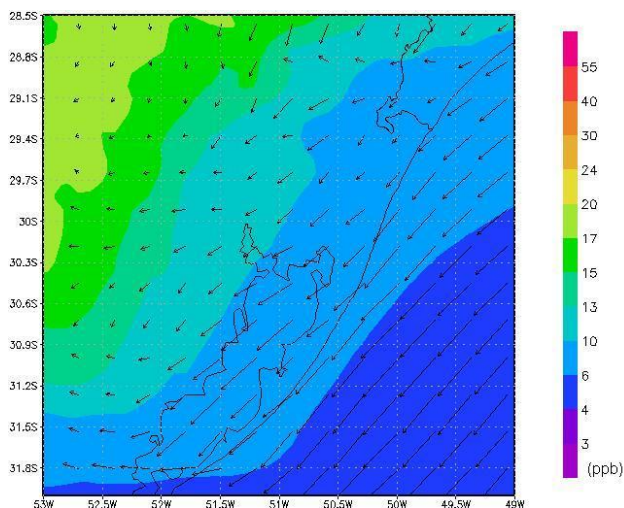


Figura 80 – Razão de mistura de HC simulada pelo modelo CCATT-BRAMS as 00 HL no dia 11 de janeiro de 2009.

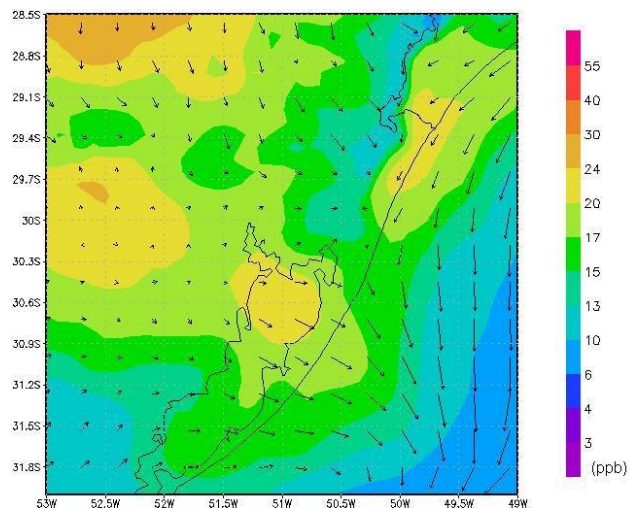


Figura 81 – Razão de mistura de HC simulada pelo modelo CCATT-BRAMS as 12 HL no dia 11 de janeiro de 2009.

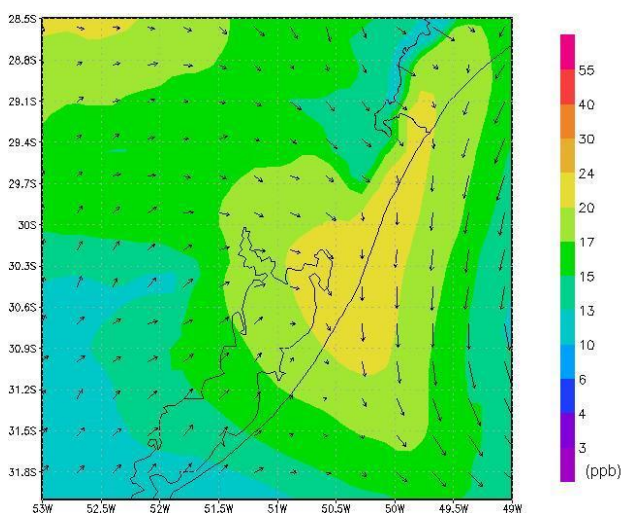


Figura 82 – Razão de mistura de HC simulada pelo modelo CCATT-BRAMS as 00 HL no dia 12 de janeiro de 2009.

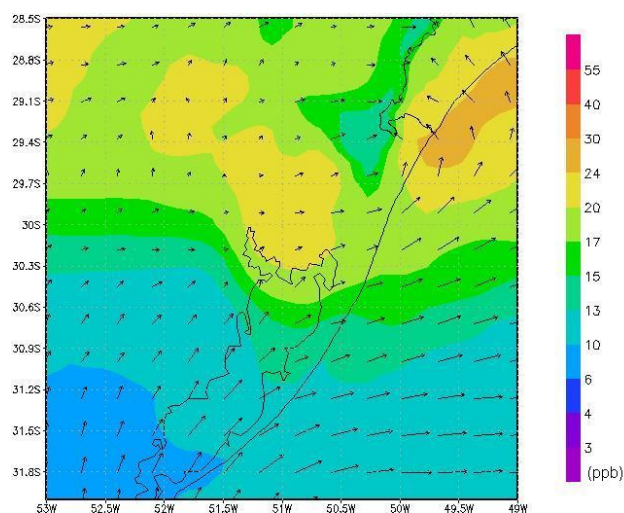


Figura 83 – Razão de mistura de HC simulada pelo modelo CCATT-BRAMS as 12 HL no dia 12 de janeiro de 2009.

Nas Figs. 84 a 99 são apresentados os campos de razão de mistura em superfície de  $\text{NO}_x$  ( $\text{NO} + \text{NO}_2$ ) no período de 05 a 12 de janeiro de 2009, as 09 e 15 HL, simulados pelo modelo CCATT-BRAMS. O óxido de nitrogênio ( $\text{NO}_x$ ) é formado pela soma de  $\text{NO}$  (presente em baixas concentrações na atmosfera, não representando perigo à saúde humana), e pelo  $\text{NO}_2$  (precursor do *smog* fotoquímico, e encontrado no ar externo em regiões urbanas e industriais), a união dos dois em conjunção com a luz solar e hidrocarbonetos, resulta na produção de  $\text{O}_3$ . O  $\text{NO}_x$  é

também emitido diretamente por fontes na superfície e tem um tempo de vida de aproximadamente 1 a 2 dias. Sua distribuição é determinada pela combinação dos processos de química, transporte e emissão.

De acordo com as figuras, os valores máximos de concentração de  $\text{NO}_x$  ocorrem nos primeiros momentos da manhã. Durante a tarde, a razão de mistura de  $\text{NO}_x$  diminui devido à intensificação da mistura turbulenta na vertical e devido à evolução da camada limite planetária. Considerando o padrão secundário da Resolução CONAMA nº 03/90 para o  $\text{NO}_2$  (tab. 4), nota-se que as concentrações de  $\text{NO} + \text{NO}_2$  estão bem abaixo do valor de  $190 \text{ } (\mu\text{g}/\text{m}^3)$  ou 34 ppb.

Nos dias 05 e 06 as 09 HL (Figs. 84 e 86), nota-se que com a divergência do vento para leste a pluma de  $\text{NO}_x$  produzida na RMPA é transportada para o interior do continente. Este resultado mostra que o modelo é capaz de simular os efeitos da brisa lacustre e a sua influência na dispersão dos poluentes na região.

A evolução (simulada e observada) será mostrada na Fig 107. As mesmas circulações locais que influenciam o transporte de monóxido de carbono e hidrocarbonetos influenciam o transporte de  $\text{NO}$  e de  $\text{NO}_2$ .

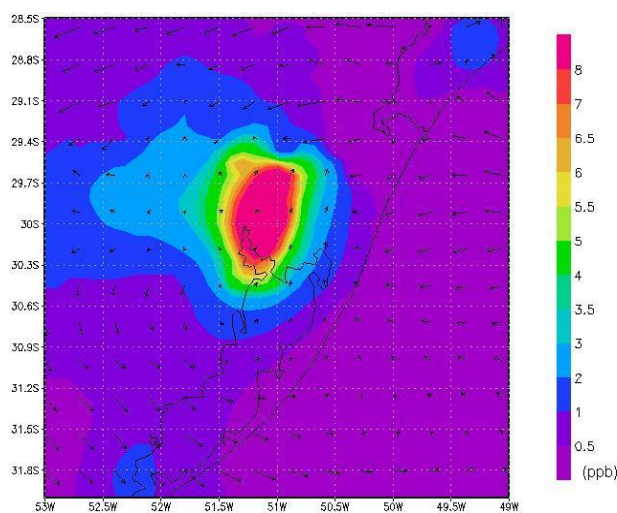


Figura 84 – Razão de mistura de  $\text{NO}_x$  simulada pelo modelo CCATT-BRAMS as 09HL no dia 05 de janeiro de 2009.

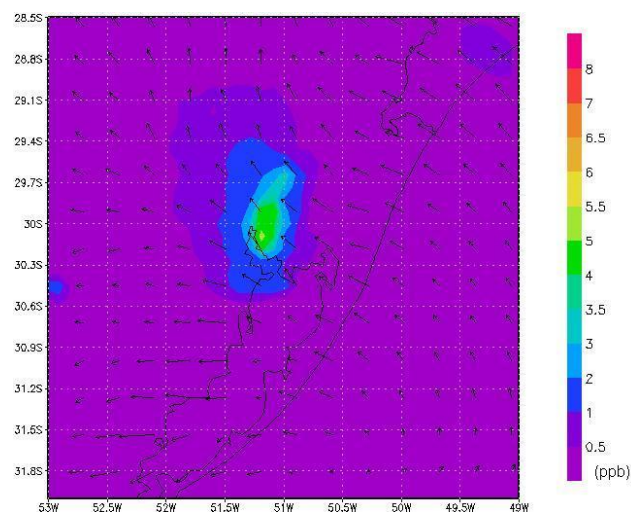


Figura 85 – Razão de mistura de  $\text{NO}_x$  simulada pelo modelo CCATT-BRAMS as 15HL no dia 05 de janeiro de 2009.



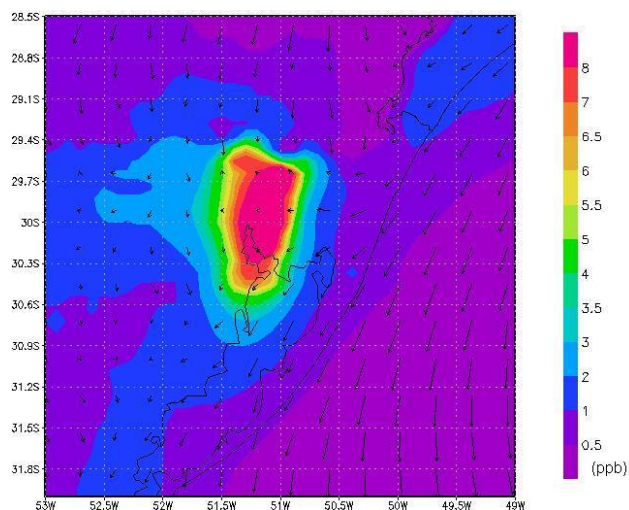


Figura 86 – Razão de mistura de  $\text{NO}_x$  simulada pelo modelo CCATT-BRAMS às 09HL no dia 06 de janeiro de 2009.

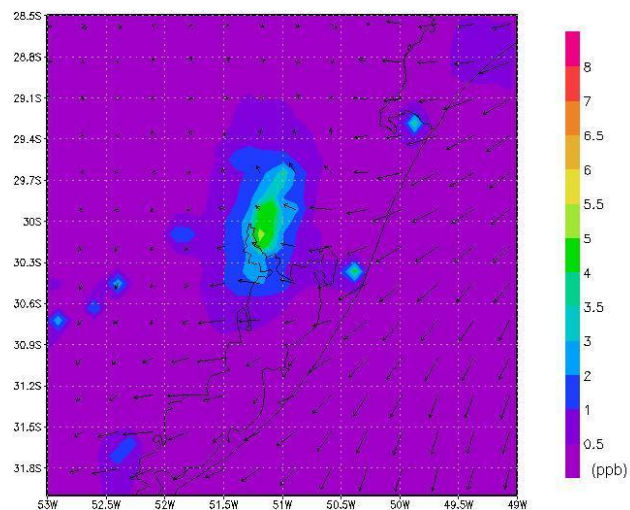


Figura 87 – Razão de mistura de  $\text{NO}_x$  simulada pelo modelo CCATT-BRAMS às 15HL no dia 06 de janeiro de 2009.

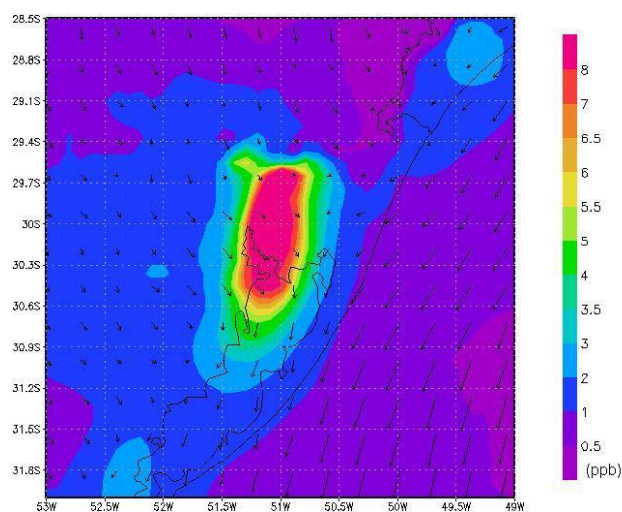


Figura 88 – Razão de mistura de  $\text{NO}_x$  simulada pelo modelo CCATT-BRAMS às 09HL no dia 07 de janeiro de 2009.

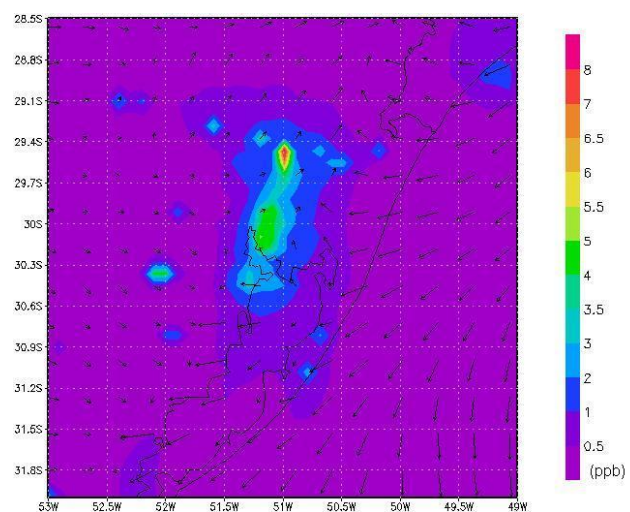


Figura 89 – Razão de mistura de  $\text{NO}_x$  simulada pelo modelo CCATT-BRAMS às 15HL no dia 07 de janeiro de 2009.

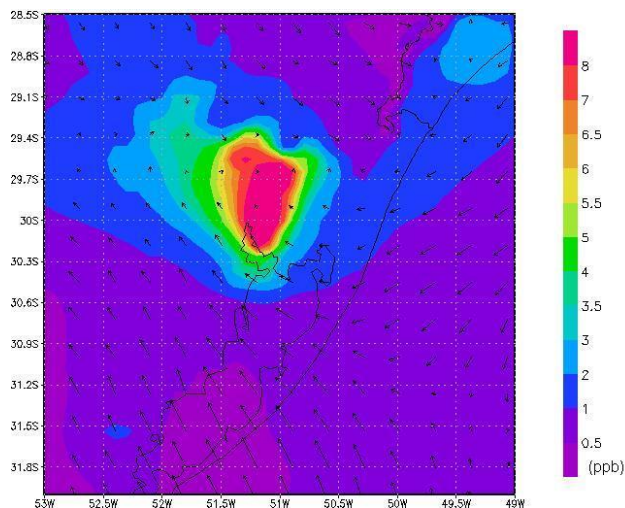


Figura 90 – Razão de mistura de  $\text{NO}_x$  simulada pelo modelo CCATT-BRAMS as 09HL no dia 08 de janeiro de 2009.

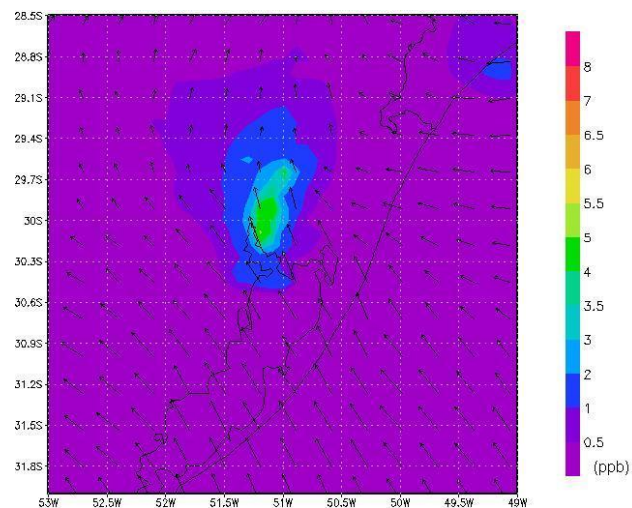


Figura 91 – Razão de mistura de  $\text{NO}_x$  simulada pelo modelo CCATT-BRAMS as 15HL no dia 08 de janeiro de 2009.

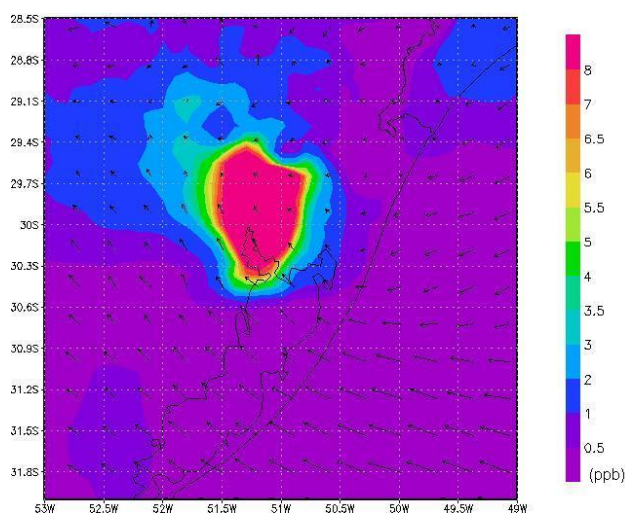


Figura 92 – Razão de mistura de  $\text{NO}_x$  simulada pelo modelo CCATT-BRAMS as 09HL no dia 09 de janeiro de 2009.

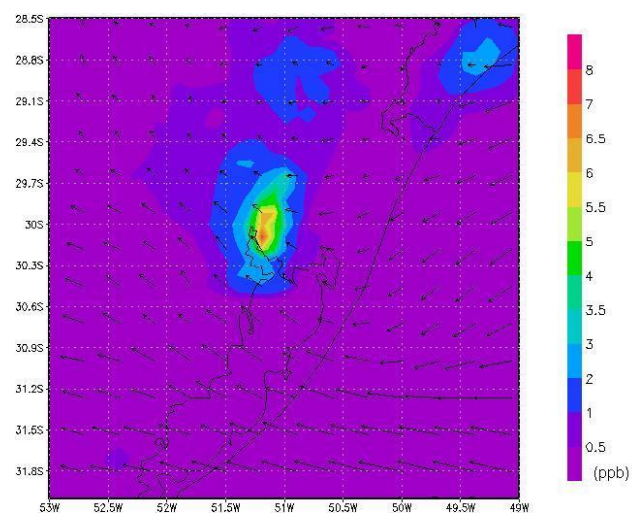


Figura 93 – Razão de mistura de  $\text{NO}_x$  simulada pelo modelo CCATT-BRAMS as 15HL no dia 09 de janeiro de 2009.



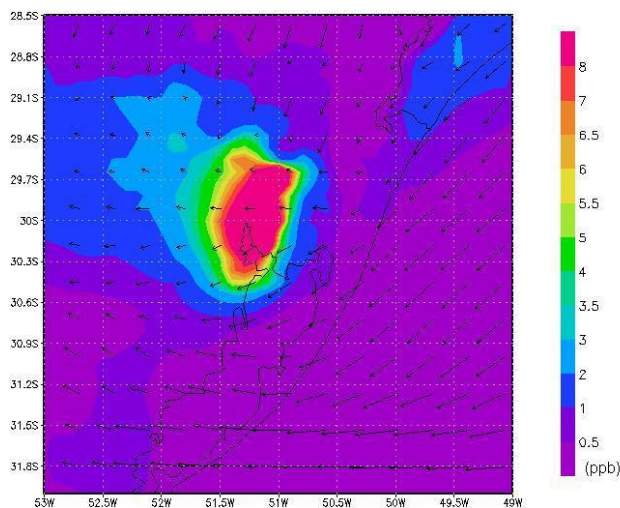


Figura 94 – Razão de mistura de  $\text{NO}_x$  simulada pelo modelo CCATT-BRAMS as 09HL no dia 10 de janeiro de 2009.

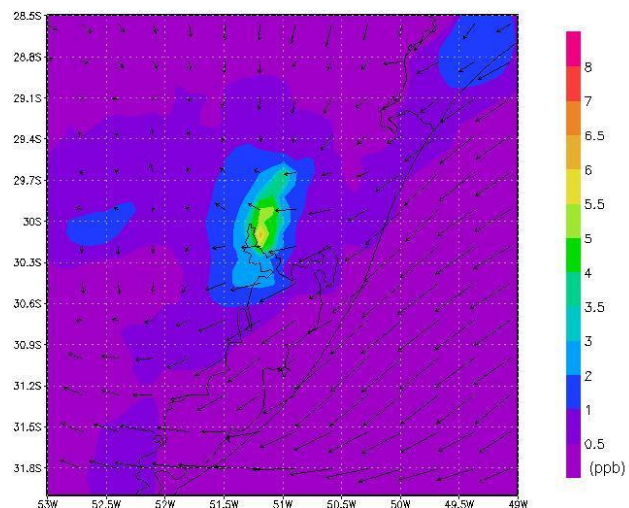


Figura 95 – Razão de mistura de  $\text{NO}_x$  simulada pelo modelo CCATT-BRAMS as 15HL no dia 10 de janeiro de 2009.

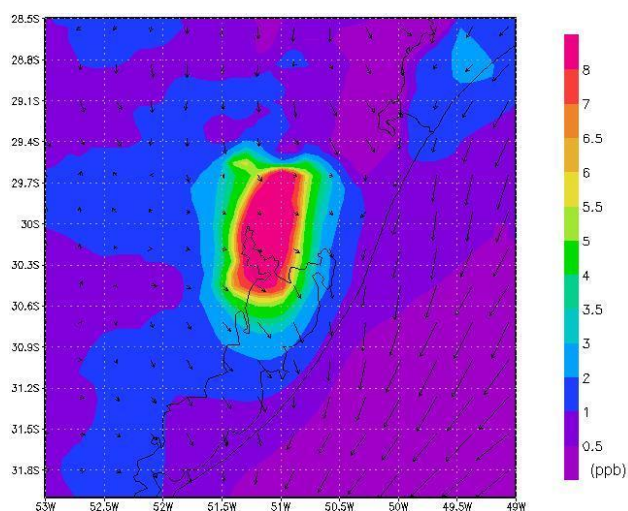


Figura 96 – Razão de mistura de  $\text{NO}_x$  simulada pelo modelo CCATT-BRAMS as 09HL no dia 11 de janeiro de 2009.

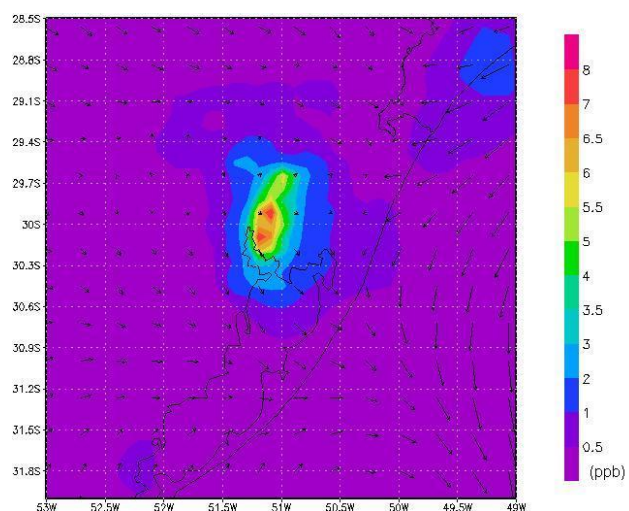


Figura 97 – Razão de mistura de  $\text{NO}_x$  simulada pelo modelo CCATT-BRAMS as 15HL no dia 11 de janeiro de 2009.

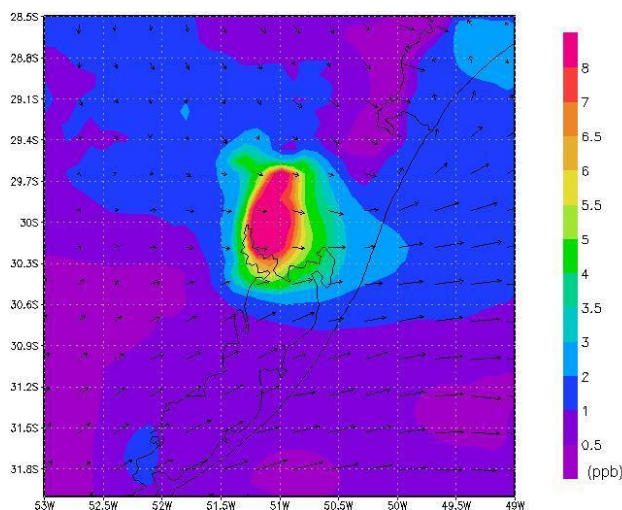


Figura 98 – Razão de mistura de  $\text{NO}_x$  simulada pelo modelo CCATT-BRAMS às 09HL no dia 12 de janeiro de 2009.

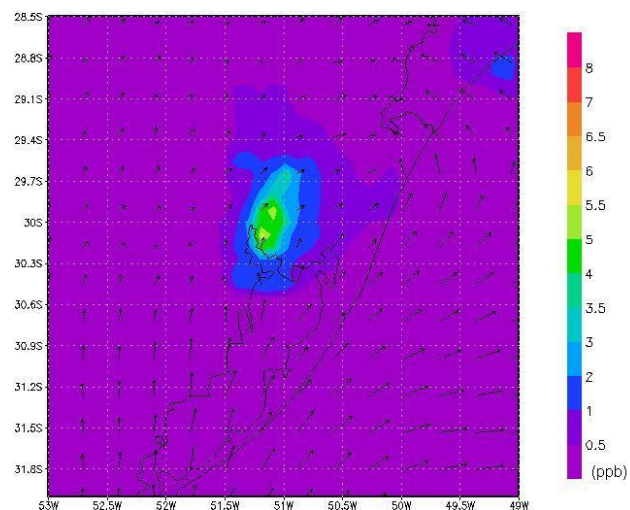


Figura 99 – Razão de mistura de  $\text{NO}_x$  simulada pelo modelo CCATT-BRAMS às 15HL no dia 12 de janeiro de 2009.

A seguir apresentamos a comparação das simulações de razão de mistura com dados observados nas estações instaladas pela FEPAM em Porto Alegre e Esteio. As comparações são efetuadas entre os dias 5 e 12 de janeiro de 2009 para o  $\text{O}_3$  e para seus precursores ( $\text{CO}$ ,  $\text{HC}$  e  $\text{NO}_x$ ).

As Figs. 100 e 101 apresentam as comparações entre a razão de mistura simulada e observada de  $\text{O}_3$ . Nota-se que a simulação acompanha a evolução dos valores observados, com picos de  $\text{O}_3$  ocorrendo entre o meio-dia e o início da tarde. Observa-se que, nas duas localidades, os valores simulados superestimam consideravelmente os valores observados. De uma maneira geral, estes resultados podem ser uma consequência dos erros associados à simulação do  $\text{HC}$  pelo modelo CCATT-BRAMS. Especificamente, as deficiências podem estar relacionadas ao inventário de emissões e à especiação do  $\text{HC}$ .



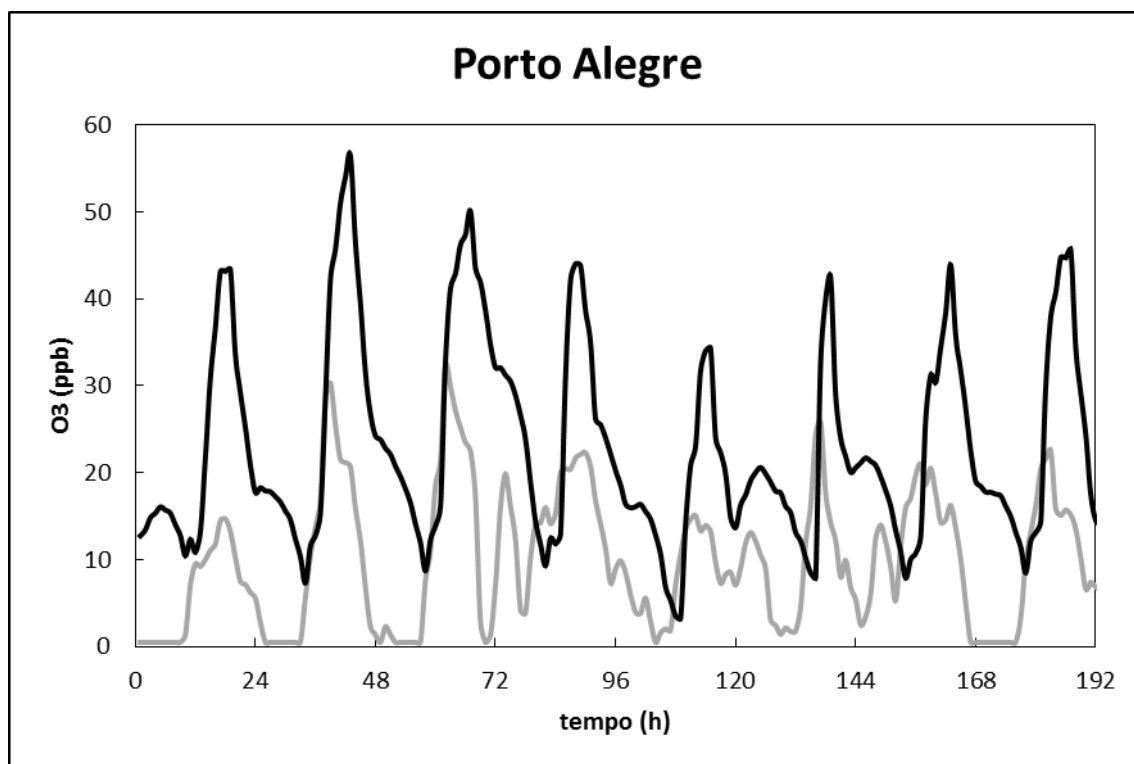


Figura 100 - Razão de mistura de ozônio simulada pelo modelo CCATT-BRAMS (preto) e observada (cinza) e na estação Porto Alegre.

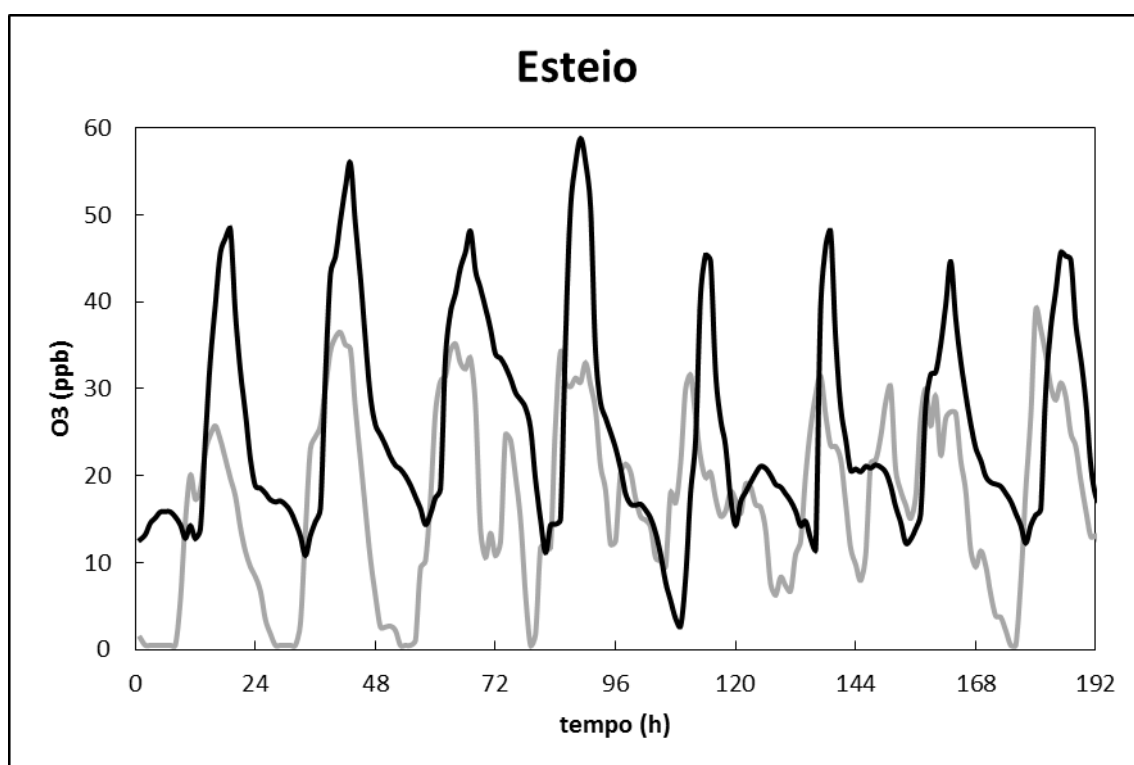


Figura 101 - Razão de mistura de ozônio simulada pelo modelo CCATT-BRAMS (preto) e observada (cinza) e na estação Esteio.

Para uma melhor compreensão da análise comparativa dos dados observados e simulados no período estudado, devemos esclarecer alguns aspectos gerais. Além das características meteorológicas favoráveis para a formação e destruição do ozônio troposférico, a data inicial de nosso estudo é compatível com o início da semana, e que mesmo se tratando de uma época de férias escolares, ainda assim, nos dois locais onde se encontram as estações de monitoramento, existe um intenso tráfego diário de veículos. A estação de Esteio encontra-se situada as margens da BR-116 que é considerada a segunda estrada de maior fluxo do país (Fig. 102).

Já a estação de Porto Alegre (Fig. 103), localiza-se no campus da Escola Superior de Educação Física da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (ESEF-UFRGS). A ESEF está localizada em uma área urbana com muitos edifícios e por onde cruzam três avenidas de trânsito rápido. Esta configuração resulta em níveis consideráveis de emissão e dificulta a dispersão dos poluentes.

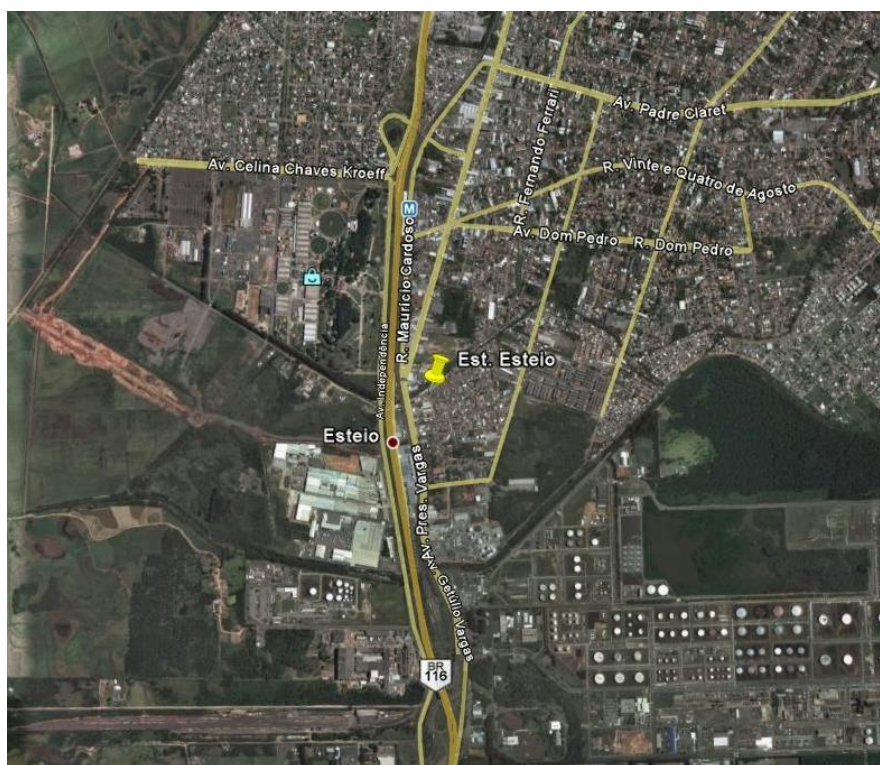


Figura 102 – Localização da estação de monitoramento de Esteio (FEPAM) em relação à BR116 e à REFA/PETROBRAS. Fonte: CUCHIARA (2011).



Figura 103 – Localização da estação de monitoramento em Porto Alegre. (Fonte: Google Maps).

As Figs. 104 e 105 apresentam a comparação entre os valores simulados e observados de razão de mistura de CO para estações Porto Alegre e Esteio, respectivamente. Observa-se que os máximos de razão de mistura ocorrem nos primeiros horários da manhã, por volta das 07 - 08 HL. Concordando com a rotina de tráfego na RMPA, pois neste horário há maior circulação de veículos pesados nas avenidas e estradas da região, como caminhões e ônibus, maiores emissores de CO por utilizarem combustível do tipo diesel.

Para a estação de Porto Alegre, o modelo subestimou de maneira considerável os valores observados, mas simula razoavelmente bem ciclo diurno e a tendência dos valores de razão de mistura. Para a estação de Esteio, os valores simulados tendem a superestimar os valores observados nos primeiro 3 dias e de subestimar no restante do período.

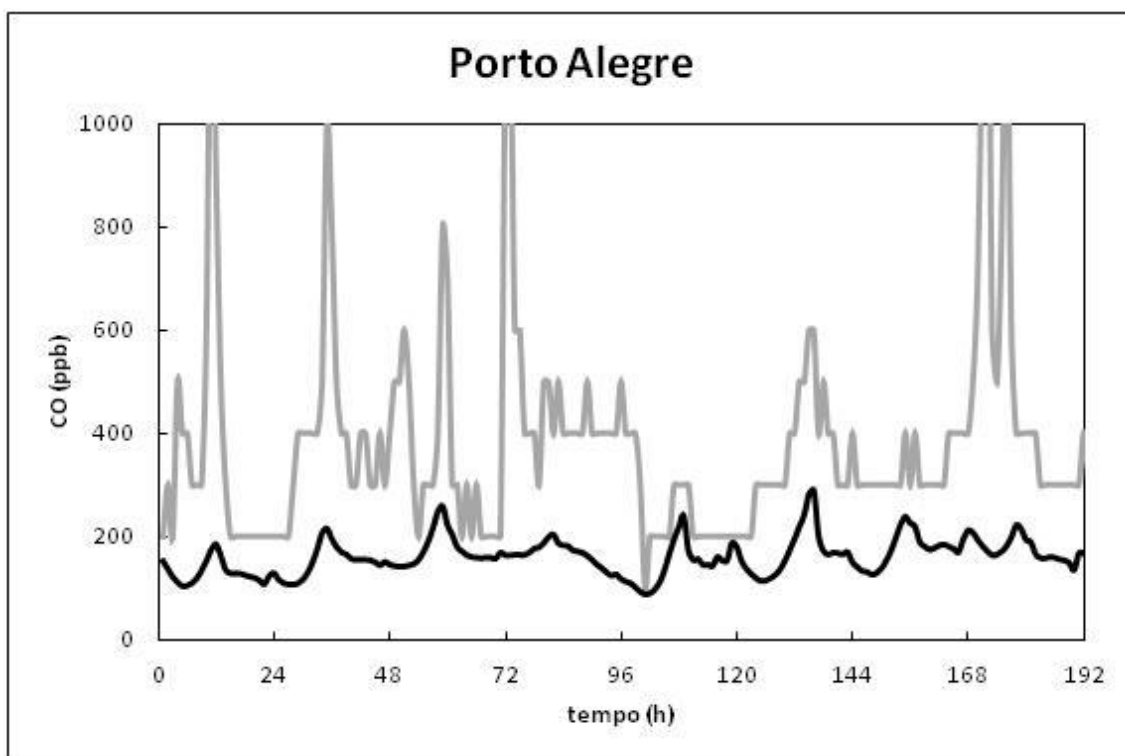


Figura 104- Razão de mistura de monóxido de carbono simulada pelo modelo CCATT-BRAMS(preto) e observada (cinza) e na estação Porto Alegre.

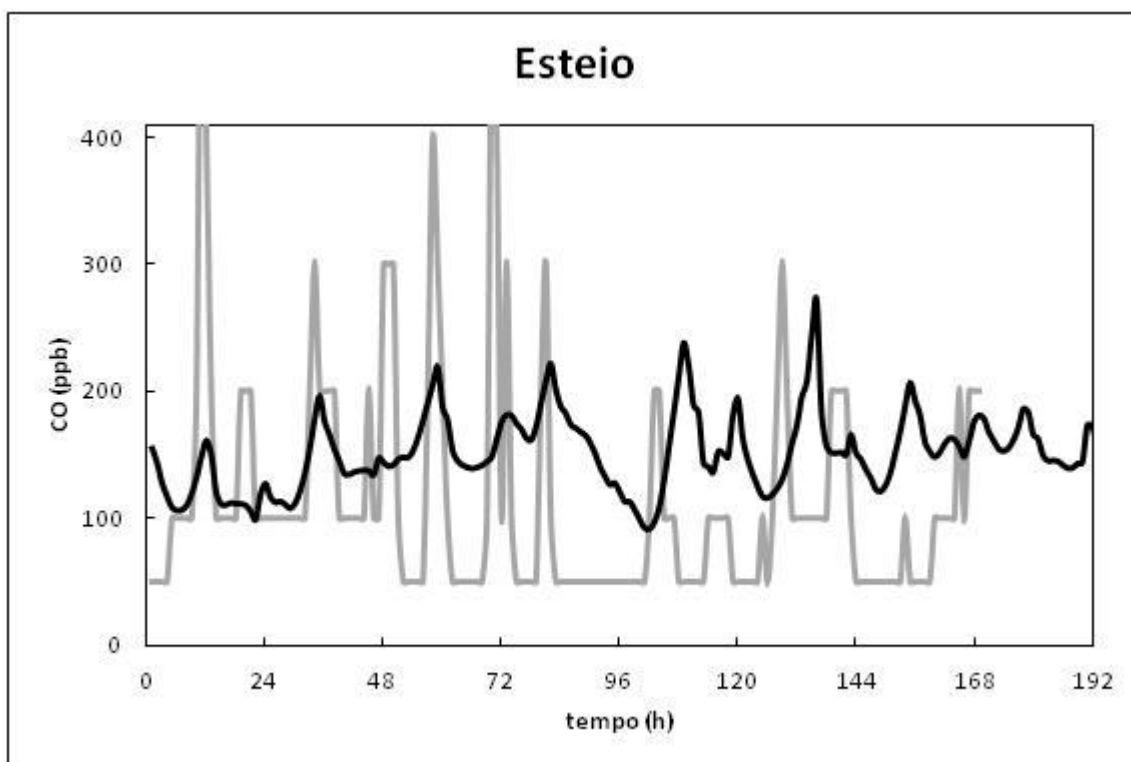


Figura 105 - Razão de mistura de monóxido de carbono simulada pelo modelo CCATT-BRAMS (preto) e observada (cinza) e na estação Esteio.

Em razão de não haverem medições de HC para cidade de Esteio, apresentamos na Fig. 106 a comparação da razão de mistura de HC simulada pelo modelo CCATT-BRAMS e os valores observados para cidade de Porto Alegre.

O modelo simula razoavelmente bem ciclo diurno, mas superestima os valores observados. Nota-se pelo gráfico, que os valores simulados ficaram o dobro dos observados. Essa discrepância pode ter sido causada pela especiação de hidrocarbonetos utilizada. Esta especiação foi baseada no cálculo feito por CUCHIARA (2011). Nela são atribuídos percentuais diários de emissão para oito tipos de HC.

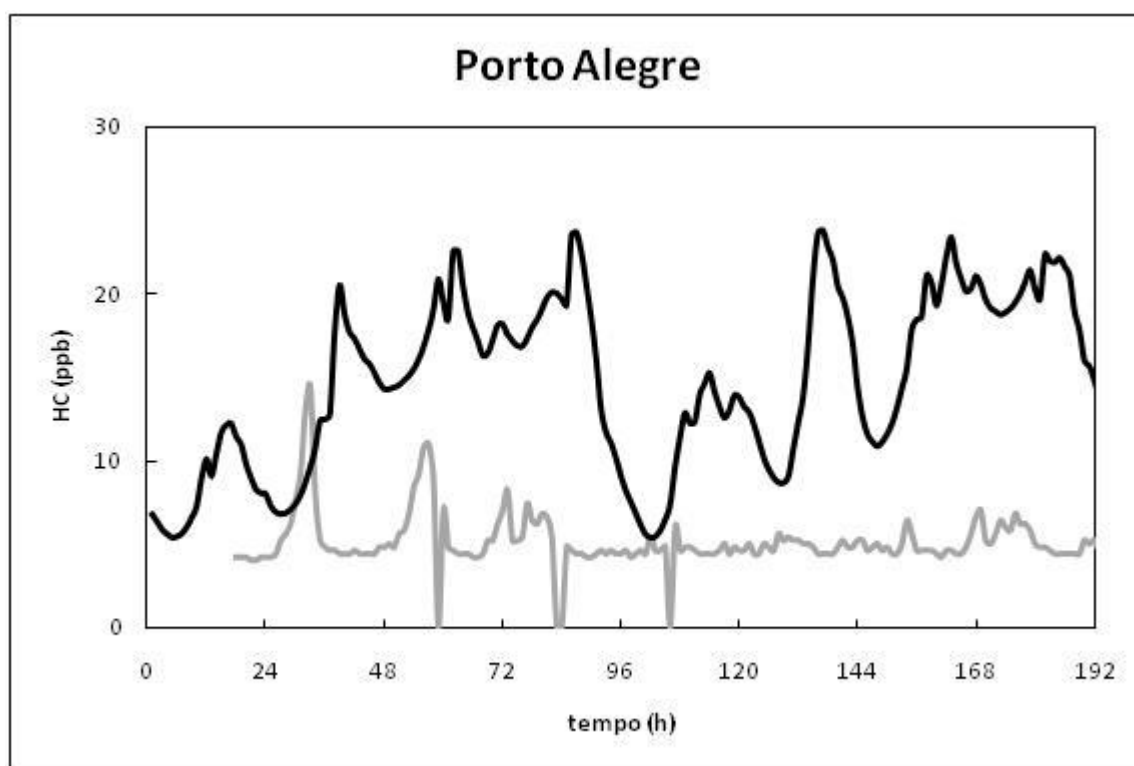


Figura 106 – Razão de mistura de hidrocarbonetos simulada pelo modelo CCATT-BRAMS (preto) e observada (cinza) e na estação Porto Alegre.

Na Fig. 107 é apresentada a comparação entre simulação e observação de razão de mistura de  $\text{NO}_x$  para a estação de Esteio. É possível notar que o modelo CCATT-BRAMS simula razoavelmente bem a tendência dos valores observados em quase todo o período de simulação. O  $\text{NO}_x$  apresenta comportamentos diferentes de acordo com as condições meteorológicas do primeiro e do segundo período. De uma forma geral, os valores de razão de mistura são maiores durante o primeiro

período, caracterizado por céu claro e ventos fracos. O modelo simula bem a evolução diurna, mas apresenta algumas diferenças em relação aos valores observados, nos dias 08 e 09 de janeiro. A comparação com a estação de Porto Alegre não é apresentada por falta de dados observados.

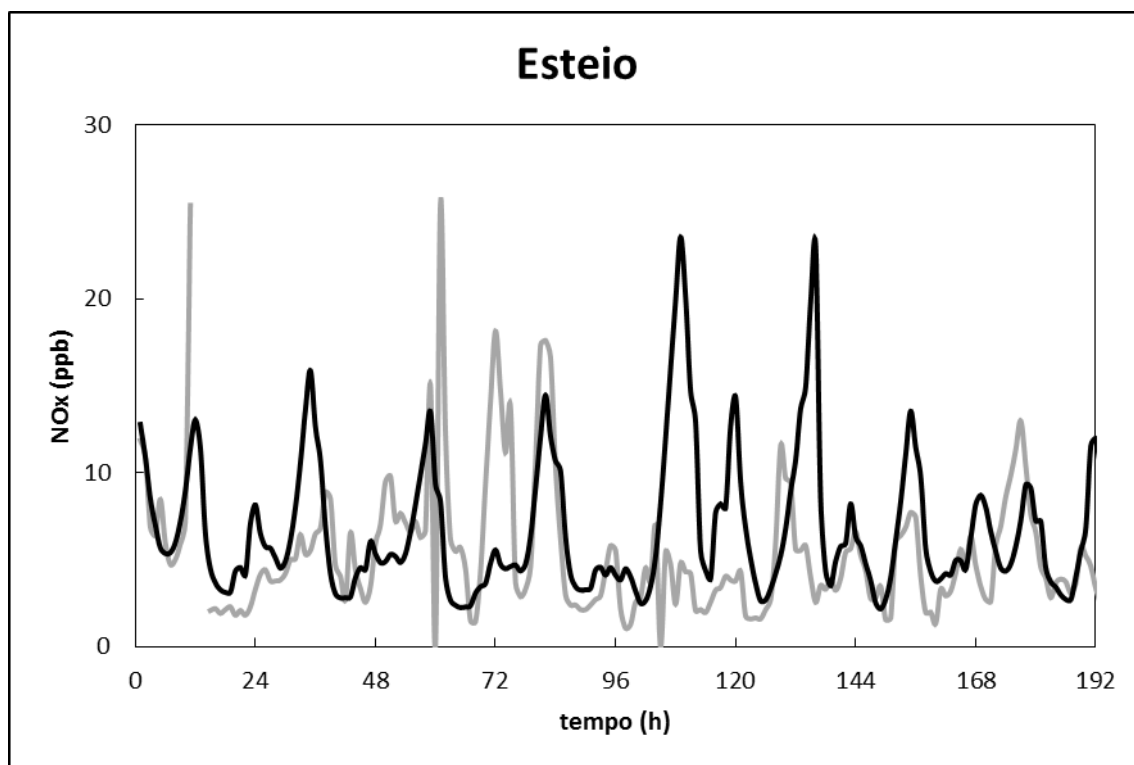


Figura 107 - Razão de mistura de óxidos de nitrogênio simulada pelo modelo CCATT-BRAMS (preto) e observada (cinza) na estação Esteio.

Na tab.8 temos uma noção quantitativa dos resultados obtidos. Nela é mostrada a análise estatística das concentrações de  $O_3$ , CO,  $NO_x$  e HC simuladas pelo CCATT-BRAMS nas duas estações de monitoramento. Consta-se que, segundo a estatística, a simulação do ozônio troposférico obteve bons resultados para o índice de concordância, ficando de 0,91 para Esteio e de 0,80 para Porto Alegre. E para simulação de seus precursores, os índices de concordância (d) ficaram todos acima de 0,7, caracterizando que os valores previstos pelo modelo concordam razoavelmente com os observados.

A correlação (R) do ozônio simulado para RMPA pelo CCATT-BRAMS apresentou valores considerados moderados para todo o período de simulação, ficando em 0,52 para ambas as estações. E quando selecionados apenas os resultados dos dias 05 a 08 de janeiro, que foram os quatro dias em que as

condições meteorológicas foram mais favoráveis à formação de  $O_3$ , esse índice sobe para 0,67 em Esteio e para 0,59 em Porto Alegre.

Nas duas últimas colunas da tabela, podemos ver que os valores médios dos erros cometidos pelos cálculos do modelo para cada poluente.

Tabela 8 – Análise estatística das concentrações de  $O_3$ , CO,  $NO_x$  e HC simuladas pelo CCATT-BRAMS, para as estações de Esteio e Porto Alegre (PA).

		d		R		RMSE (ppb)	
Poluente	Dias de simulação	Esteio	PA	Esteio	PA	Esteio	PA
$O_3$	7 dias	0,91	0,80	0,52	0,52	13,71	16,47
	4 dias	0,89	0,77	0,67	0,59	15,56	18,16
CO	7 dias	0,88	0,73	0,07	0,32	99,94	306,03
	4 dias	0,87	0,69	0,21	0,39	105,85	322,47
$NO_x$	7 dias	0,85	X	0,19	X	5,19	X
	4 dias	0,87	X	0,41	X	4,41	X
HC	7 dias	X	0,70	X	-0,06	X	11,58
	4 dias	X	0,76	X	-0,18	X	11,25



### 5.3 Simulação com o modelo WRF/Chem

#### 5.3.1 Simulação das condições meteorológicas

Nesta seção são apresentados os resultados da simulação dos campos meteorológicos (pressão à superfície, temperatura e velocidade do vento), utilizando o modelo WRF. As simulações são comparadas com dados observados pelas duas estações de superfície instaladas pela FEPAM nos municípios de Esteio e Porto Alegre (Fig. 13).

As Figs. 108 e 109 mostram as comparações entre os valores de pressão simulados pelo modelo WRF e observados nas estações de superfície de Esteio e de Porto Alegre, respectivamente. Os resultados revelam que o modelo simula coerentemente o padrão de evolução e os valores observados para Esteio, com uma pequena subestimação em torno de 10 mb. Tal resultado pode estar relacionado aos dados de reanálise utilizados para condição inicial e de contorno de meteorologia no modelo WRF.

As Figs. 110 e 111 apresentam comparações entre os valores simulados e observados de temperatura do ar em 2m de altura para as estações de Esteio e Porto Alegre, respectivamente. Nota-se que o modelo WRF simula razoavelmente bem a variabilidade diurna (ciclo diurno) e a tendência diária para ambos locais. Apenas destaca-se que para Porto Alegre o modelo superestima para quase todo o período os valores mínimos de temperatura.

Nas Figs. 112 e 113 são apresentadas as comparações entre valores simulados e observados de velocidade do vento para as mesmas estações. Nos gráficos, percebe-se que o modelo simula satisfatoriamente a evolução diurna para ambas as estações e os valores observados pela estação de superfície de Esteio. Já para Porto Alegre o modelo superestimou os valores de velocidade do vento para todo o período, o que ocorreu também com o modelo CCATT-BRAMS (Fig. 18) e pode ser explicado pela localização da estação de monitoramento do INMET. Nesta estação, os valores medidos de velocidade do vento podem estar sofrendo a influência de obstáculos existentes na região, o que torna a comparação entre modelo e observação muito difícil.



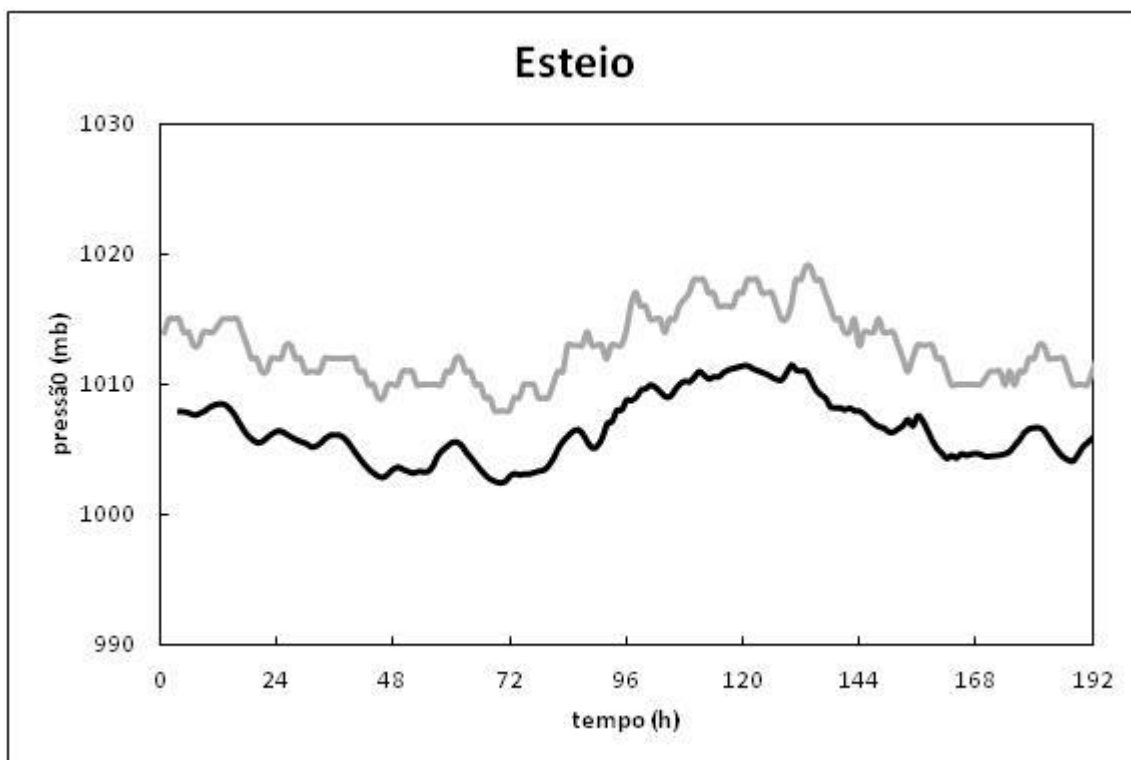


Figura 108 - Pressão simulada pelo modelo WRF/Chem (preto) e observada (cinza) e na estação Esteio.

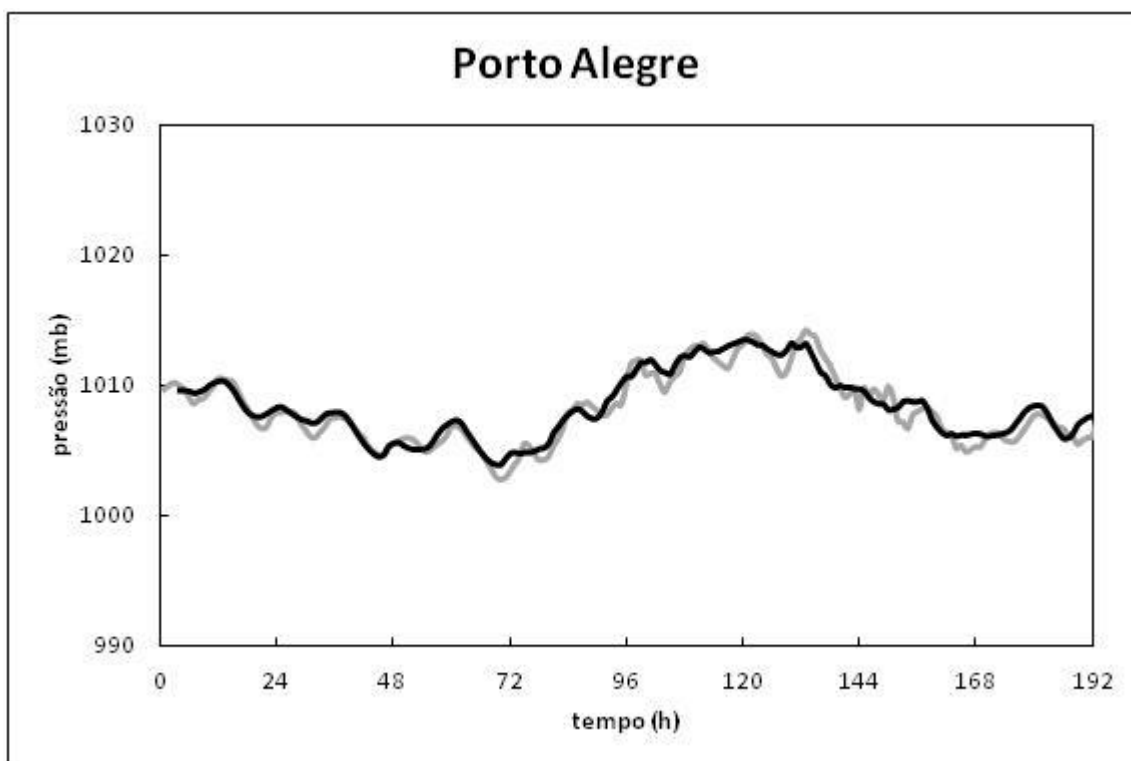


Figura 109 - Pressão simulada pelo modelo WRF/Chem (preto) e observada (cinza) e na estação Porto Alegre.

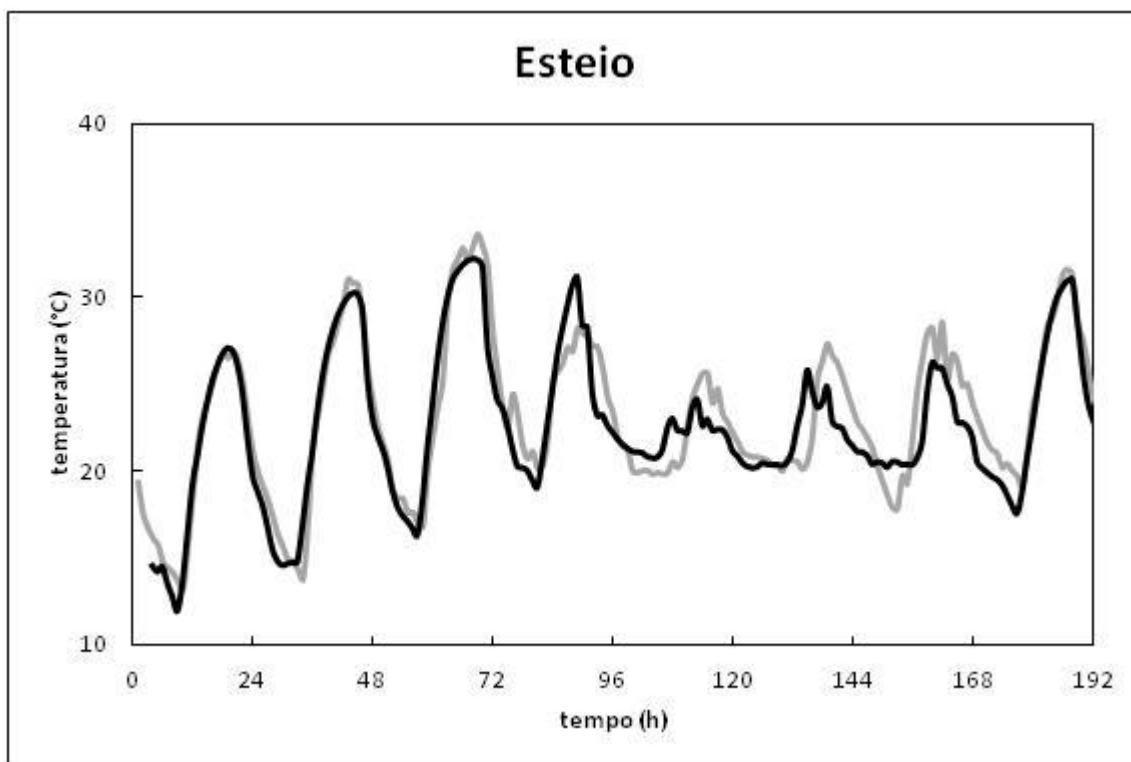


Figura 110 - Temperatura simulada pelo modelo WRF/Chem (preto) e observada (cinza) e na estação Esteio.

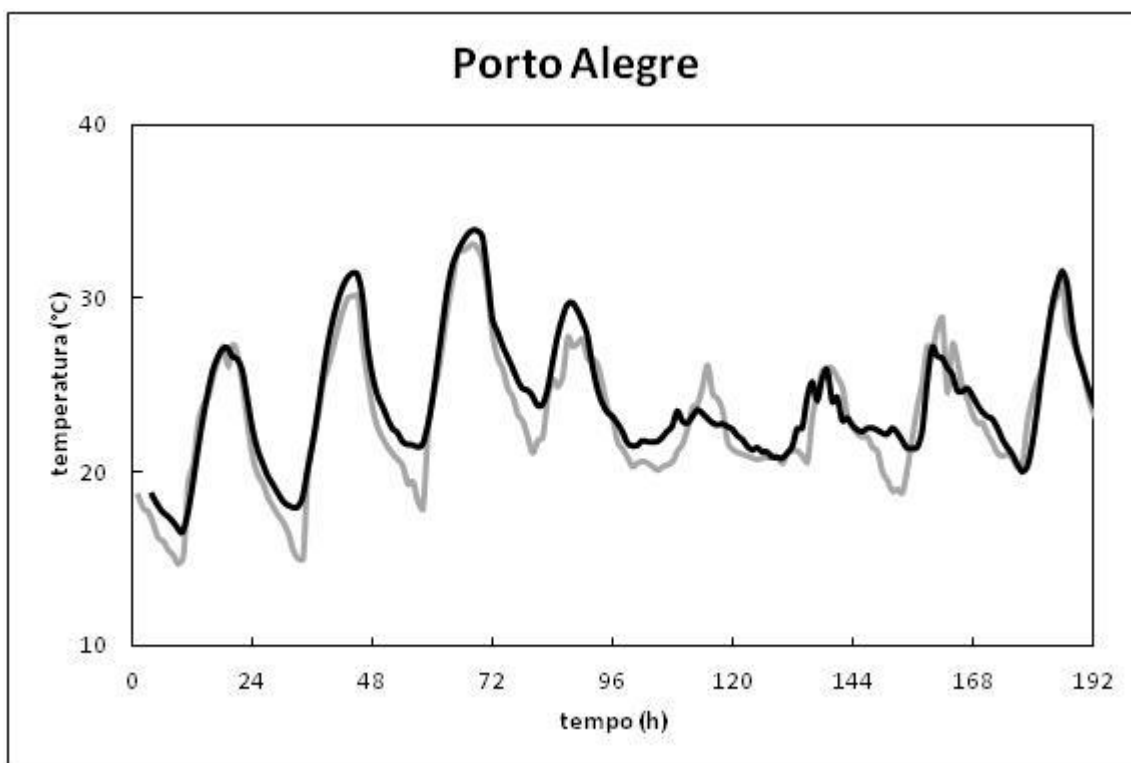


Figura 111 - Temperatura simulada pelo modelo WRF/Chem (preto) e observada (cinza) e na estação Porto Alegre.

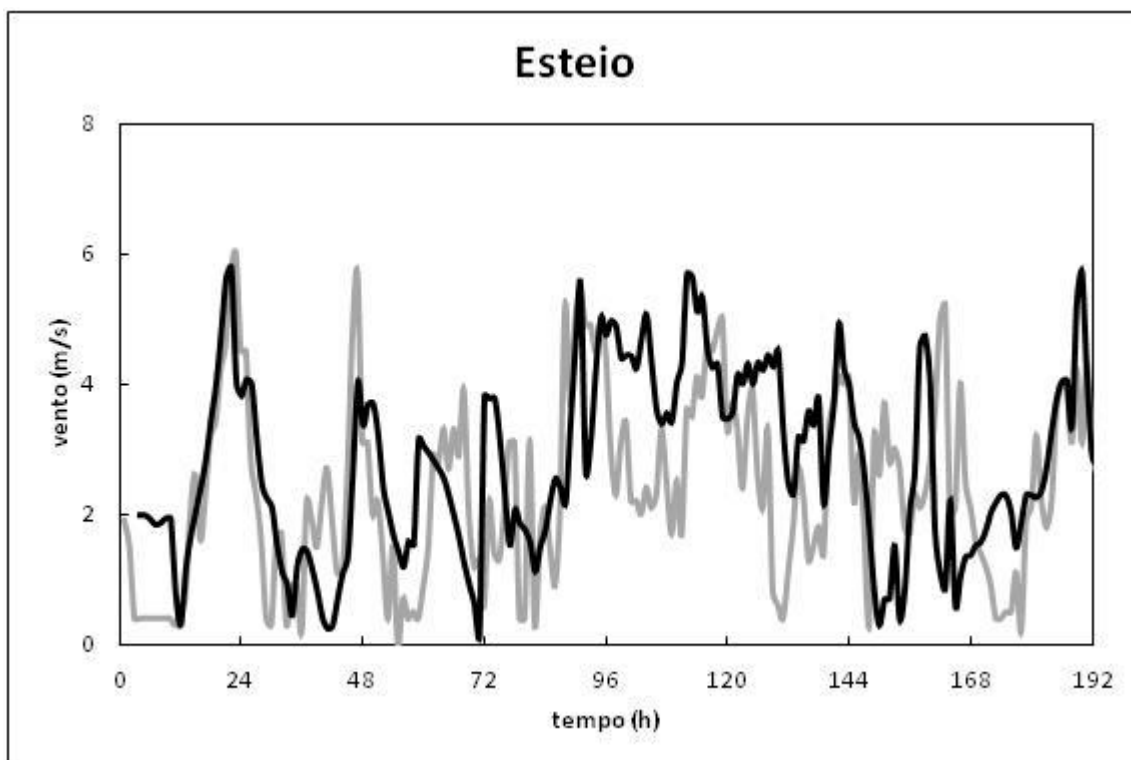


Figura 112 - Velocidade do vento simulada pelo modelo WRF/Chem (preto) e observada (cinza) e na estação Esteio.

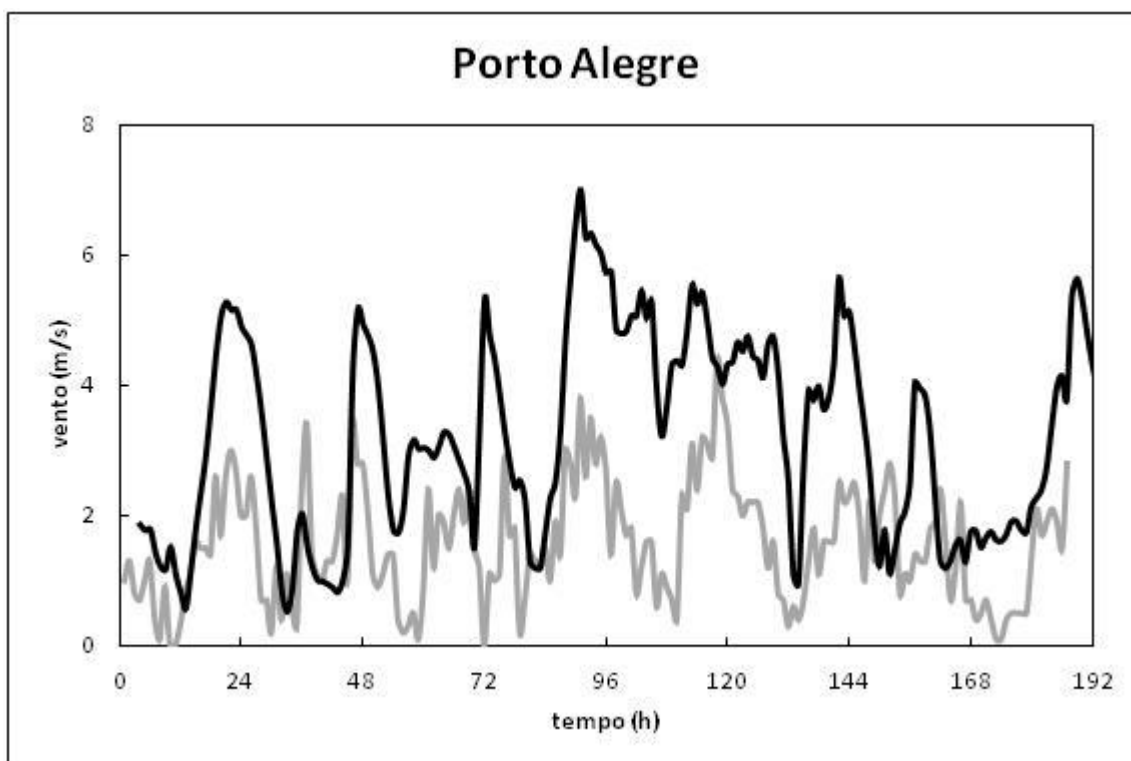


Figura 113 - Velocidade do vento simulada pelo modelo WRF/Chem (preto) e observada (cinza) e na estação Porto Alegre.

Os resultados da análise estatística para as variáveis meteorológicas consideradas nas Figs. 108 a 113 são apresentados na tab. 9. Os índices estatísticos utilizados são os mesmos apresentados nas Eqs. 2 a 4: índice de concordância (d), correlação (R) e raiz do erro quadrático médio (RMSE). O modelo WRF obteve altos índices de concordância e correlação para pressão e temperatura nas duas localidades, concordando com as comparações apresentadas nas Figs. 108 a 111. Já para a velocidade do vento, as simulações geraram valores de índice de concordância consideravelmente altos, mas com correlações baixas. Observa-se, também, valores relativamente baixos de RMSE, indicando que o modelo WRF simula bem a magnitude do campo de vento. Como exemplo, destaca-se a velocidade do vento simulada para Porto Alegre, onde a diferença em relação à velocidade observada é de apenas 2,08 m/s. Para Esteio esse valor diminui para 1,49 m/s. Destaca-se, ainda, que os índices de concordância para os valores simulados de magnitude do vento para Porto Alegre e Esteio são melhores quando comparados aos gerados no trabalho de Cuchiara (2011), utilizando uma versão anterior do modelo WRF.

Tabela 9 – Análise estatística das variáveis meteorológicas simuladas pelo modelo WRF.

Variável	Estação	d	R	RMSE (mb)
Pressão	FEPAM	0,99	0,93	6,31
	INMET	0,99	0,95	0,81
				RMSE (°C)
Temperatura	FEPAM	0,99	0,93	1,67
	INMET	0,99	0,93	1,56
				RMSE (ms <sup>-1</sup> )
Velocidade do vento	FEPAM	0,93	0,47	1,49
	INMET	0,84	0,53	2,08

As Figs. 114 a 129 apresentam os campos de direção e intensidade do vento simulados pelo modelo WRF sobre a RMPA. As figuras mostram a circulação do vento simulada às 00 e às 12 HL (Hora Local) para o período de 05 a 12 de janeiro de 2009. Às 00 HL do dia 05 observou-se que o WRF simulou ventos com total coerência e de forma idêntica ao modelo BRAMS. Portanto, pode-se observar nas Fig. 114 a 129 as mesmas características descritas na seção 5.2.1, ou seja, às 00 HL do dia 05, observa-se ventos de intensidade fraca sobre o continente e com direção predominante de nordeste (NE). A velocidade do vento continua fraca durante o dia (12 HL) e os efeitos da brisa lacustre influenciam sua intensidade e direção em algumas regiões, sendo possível visualizar a mudança na direção do sentido do vento de NE para leste (E) sobre a RMPA. Às 00 HL do dia (06), a direção continua a ser de leste em algumas regiões do continente e sobre a RMPA, permanecendo sobre o oceano de norte-nordeste, apresentando maiores intensidades quando comparadas ao dia anterior. Neste mesmo dia, às 12 HL (Fig. 117), a direção do vento apresenta predominância de nordeste, novamente notam-se os efeitos de circulação local alterando a configuração sobre o litoral, onde é possível observar ventos mais intensos do quadrante leste devido à brisa marítima. No dia 07 de janeiro, às 00 HL, (Fig. 118) observa-se o vento com fraca intensidade e com predominância das direções leste e nordeste, evidenciando o efeito do escoamento do sistema de alta que atuava sobre o Atlântico. Às 12 HL (Fig. 119), a velocidade do vento continua fraca, e em decorrência da aproximação da frente fria, o padrão de circulação sobre o continente muda para direção noroeste (NO). A Fig. 120, referente à noite do dia 08 (00 HL), mostra ventos calmos e mudança no sentido do giro dos ventos (detalhe no canto inferior da imagem), em que ventos de sul são observados. Durante o dia (às 12 HL), a direção do vento passa a ser de sudeste (SE), influenciada pela chegada do sistema frontal ao Estado.

Na noite do dia 09 de janeiro (00 HL), o escoamento recebe a influência de um anticiclone pós-frontal (após a passagem da frente) e permanece a predominância de direção SE. Às 12 HL, os ventos continuam moderados e com direção de leste-sudeste. Às 00 HL do dia 10, o vento continua a escoar do quadrante leste com alguma variação de sudeste sobre o continente. Durante a tarde (Fig. 125), a componente do vento de nordeste predomina e a intensidade passa de fraca a moderada. Na noite do dia 11 de janeiro (Fig. 126), ocorre a predominância sobre o oceano de vento de nordeste, acompanhando o giro do

anticiclone. As 12 HL como sobre o continente havia a presença de um cavado (área de baixa pressão), se observa na Fig. 127 ventos fracos com giro ciclônico (horário) no canto inferior esquerdo da imagem. No dia 12 à noite (00HL), tem-se, a intensificação do cavado que está sobre o RS, na Fig. 128, consegue-se observar calma. Na sequência as 12HL, o sistema de baixa pressão acaba se intensificando e pode-se ver a predominância de ventos sudoeste e valores de velocidade do vento mais significativos na costa.

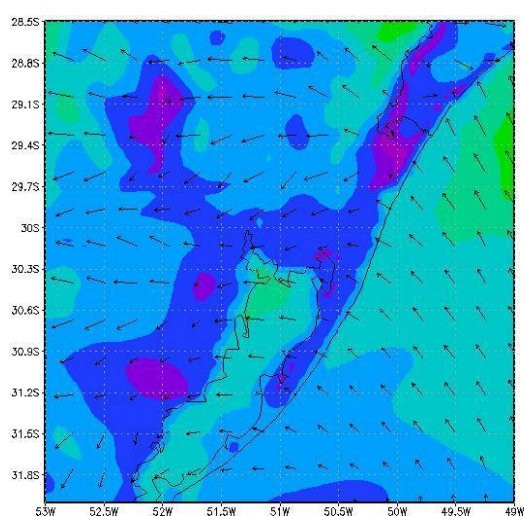


Figura 114 – Vento em superfície simulado pelo modelo WRF às 00 HL no dia 05 de janeiro de 2009.

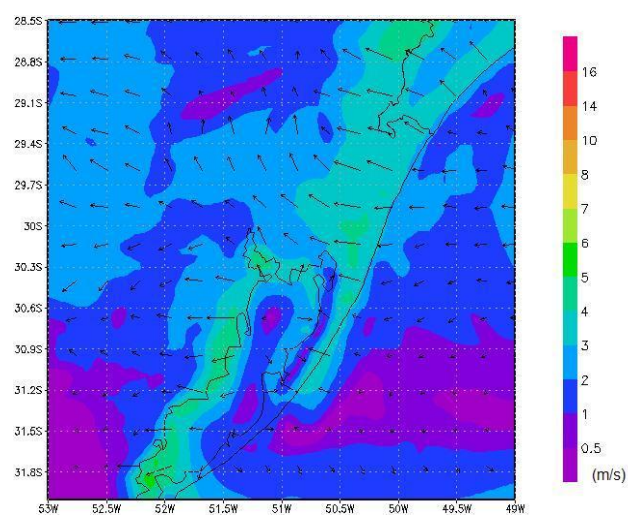


Figura 115 – Vento em superfície simulado pelo modelo WRF às 12 HL no dia 05 de janeiro de 2009.

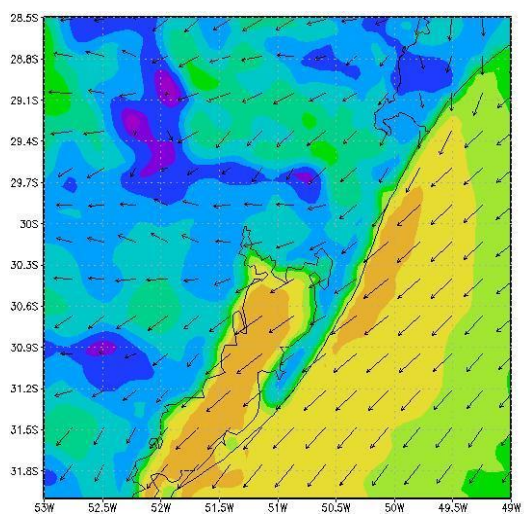


Figura 116 – Vento em superfície simulado pelo modelo WRF às 00 HL no dia 06 de janeiro de 2009.

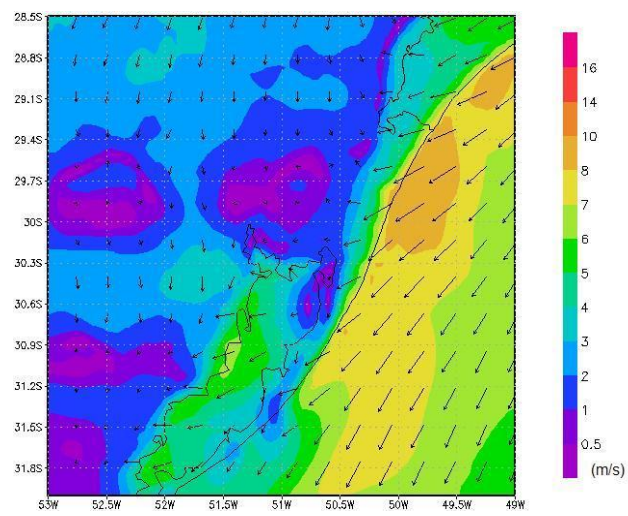


Figura 117 – Vento em superfície simulado pelo modelo WRF às 12 HL no dia 06 de janeiro de 2009.



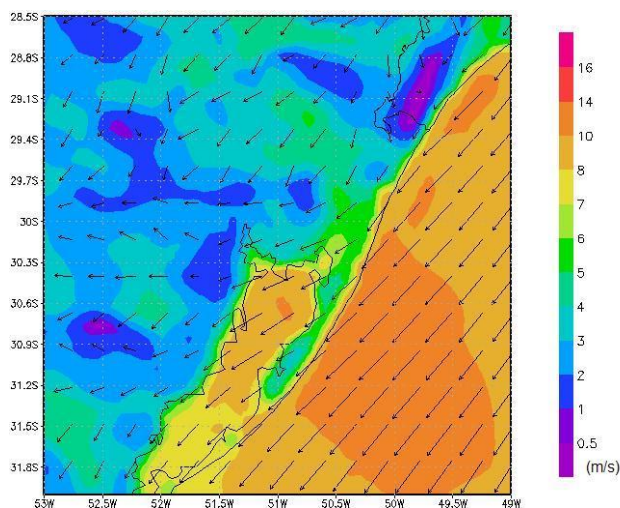


Figura 118 – Vento em superfície simulado pelo modelo WRF às 00 HL no dia 07 de janeiro de 2009.

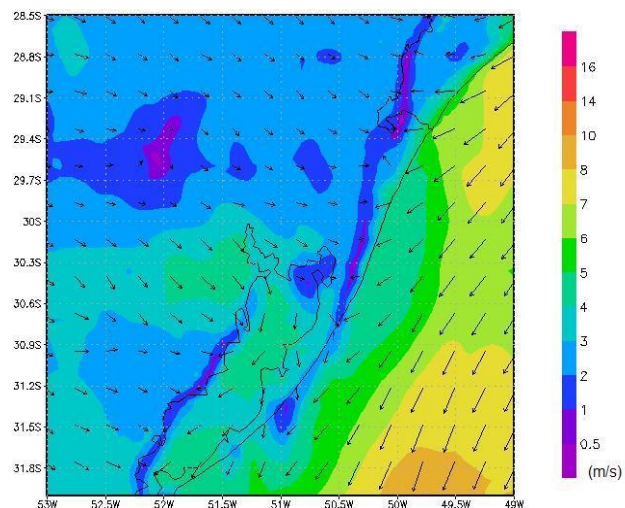


Figura 119 – Vento em superfície simulado pelo modelo WRF às 12 HL no dia 07 de janeiro de 2009.

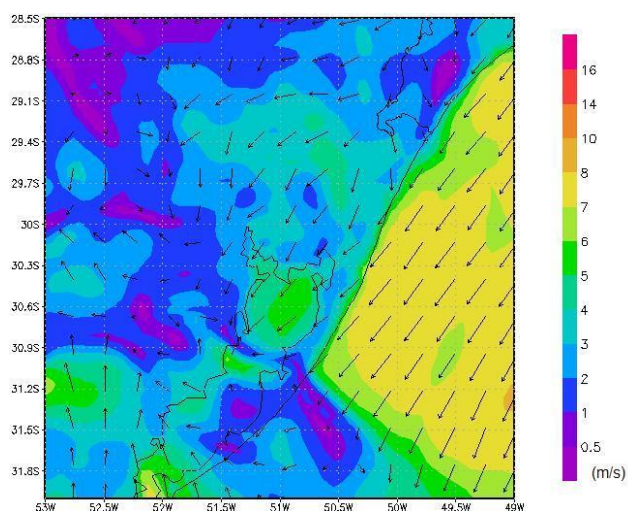


Figura 120 – Vento em superfície simulado pelo modelo WRF às 00 HL no dia 08 de janeiro de 2009.

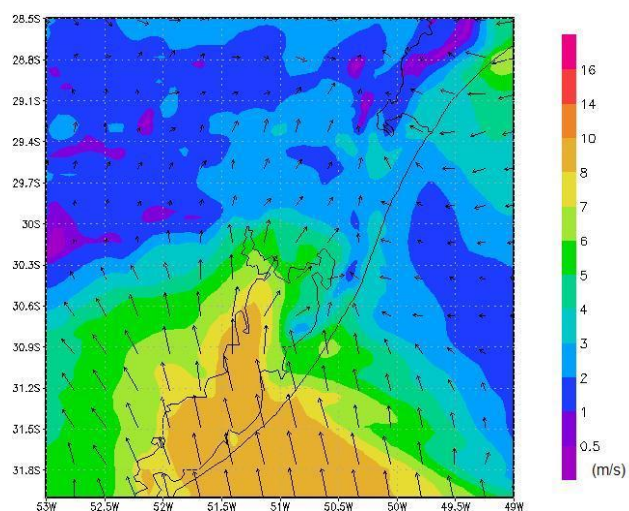


Figura 121 – Vento em superfície simulado pelo modelo WRF às 12 HL no dia 08 de janeiro de 2009.

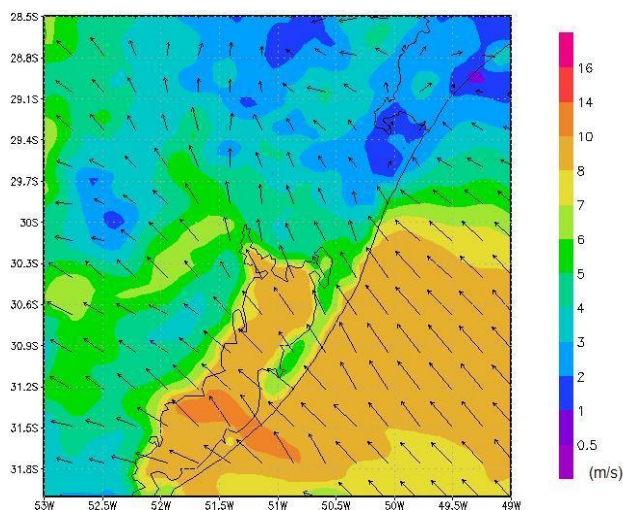


Figura 122 – Vento em superfície simulado pelo modelo WRF às 00 HL no dia 09 de janeiro de 2009.

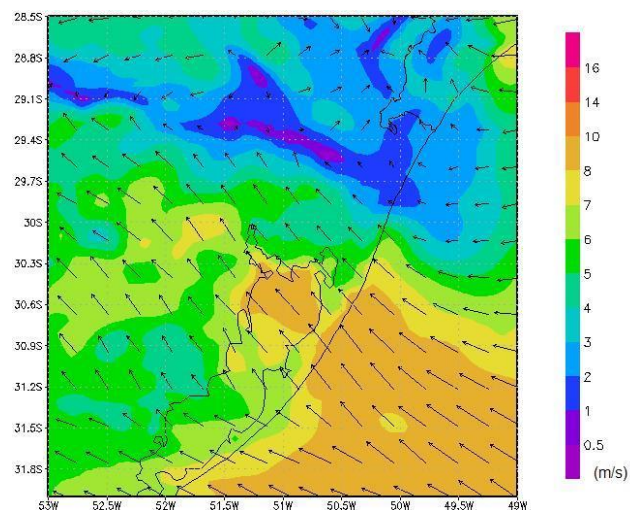


Figura 123 – Vento em superfície simulado pelo modelo WRF às 12 HL no dia 09 de janeiro de 2009.

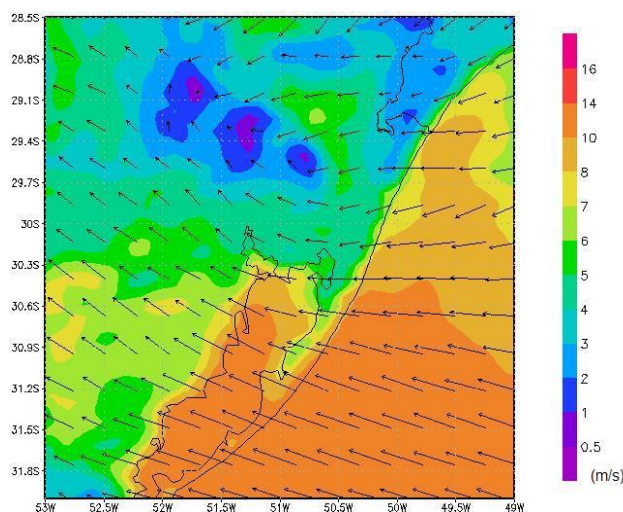


Figura 124 – Vento em superfície simulado pelo modelo WRF às 00 HL no dia 10 de janeiro de 2009.

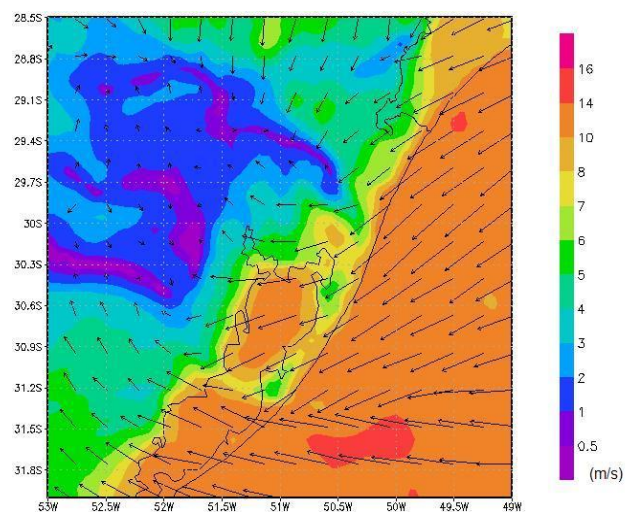


Figura 125 – Vento em superfície simulado pelo modelo WRF às 12 HL no dia 10 de janeiro de 2009.



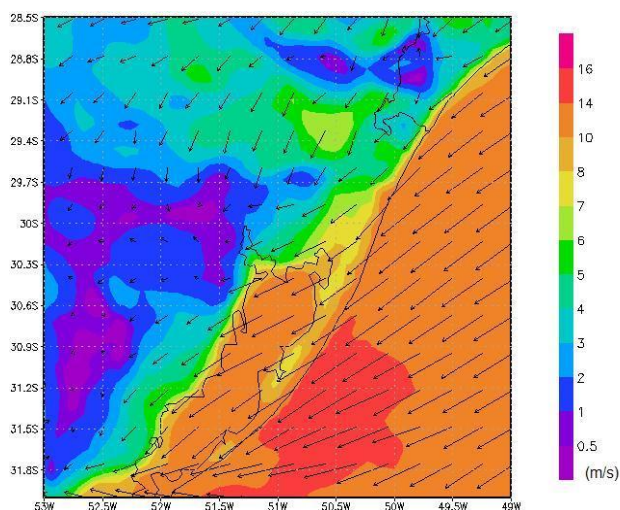


Figura 126 – Vento em superfície simulado pelo modelo WRF às 00 HL no dia 11 de janeiro de 2009.

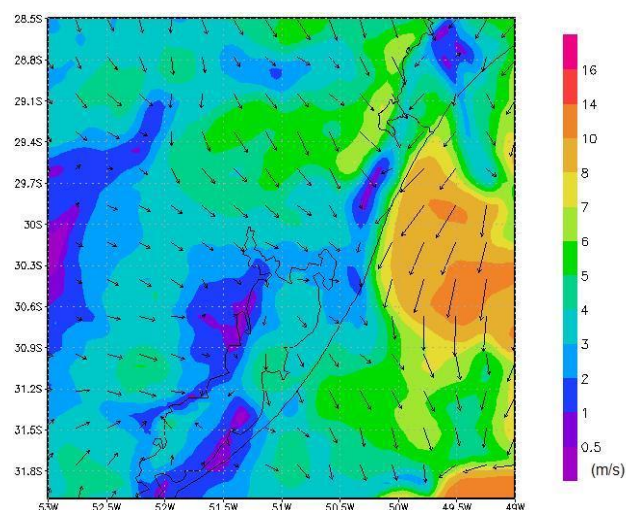


Figura 127 – Vento em superfície simulado pelo modelo WRF às 12 HL no dia 11 de janeiro de 2009.

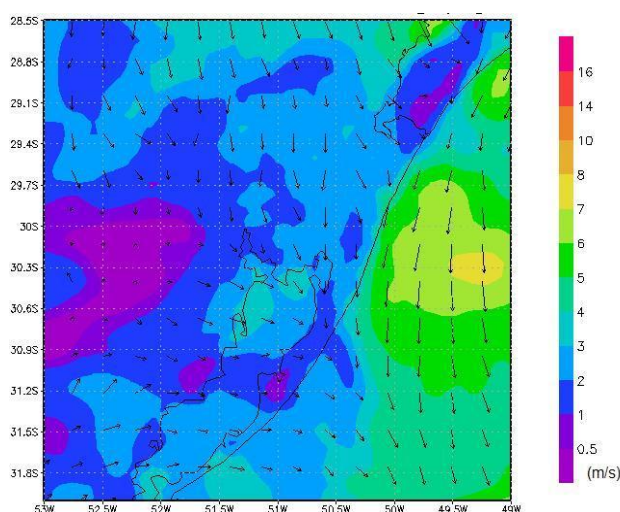


Figura 128 – Vento em superfície simulado pelo modelo WRF às 00 HL no dia 12 de janeiro de 2009.

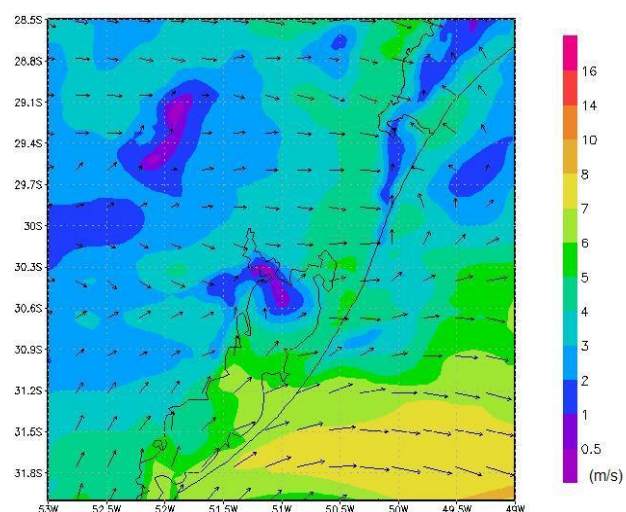


Figura 129 – Vento em superfície simulado pelo modelo WRF às 12 HL no dia 12 de janeiro de 2009.

### 5.3.2 Simulação das espécies químicas

Nessa seção são apresentados os resultados da simulação do tempo químico sobre a RMPA, utilizando o modelo WRF/Chem. Nas Figs. 130 a 145 são mostrados os campos de razão de mistura de  $O_3$ , às 03 HL e 15 HL. De um modo geral, observam-se diferenças entre os campos de razão de mistura no dia e na noite, mas

não são diferenças consideráveis. Nota-se que mínimos e máximos não apresentam grande diferenças, como deve acontecer para as condições meteorológicas do período selecionado.

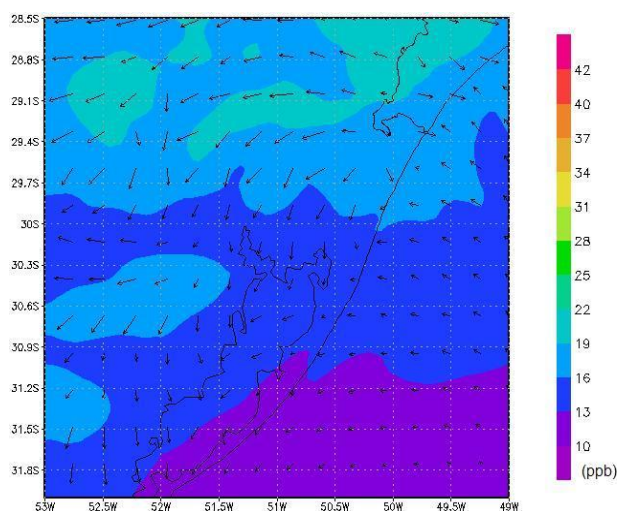


Figura 130 – Razão de mistura de  $O_3$  simulada pelo modelo WRF/Chem às 03 HL no dia 05 de janeiro de 2009.

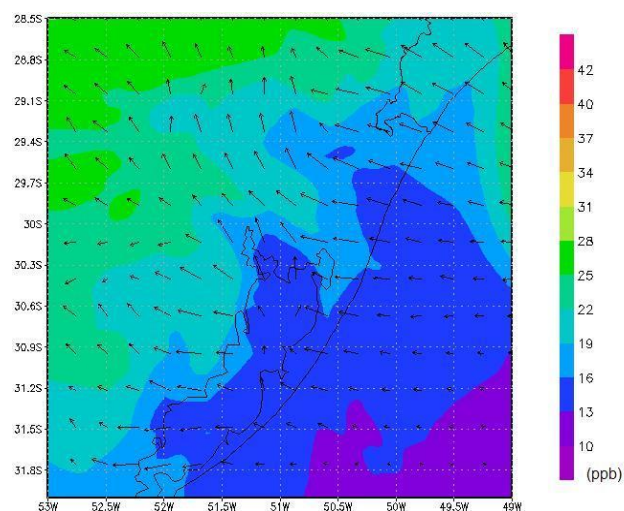


Figura 131 – Razão de mistura de  $O_3$  simulada pelo modelo WRF/Chem às 15 HL no dia 05 de janeiro de 2009.

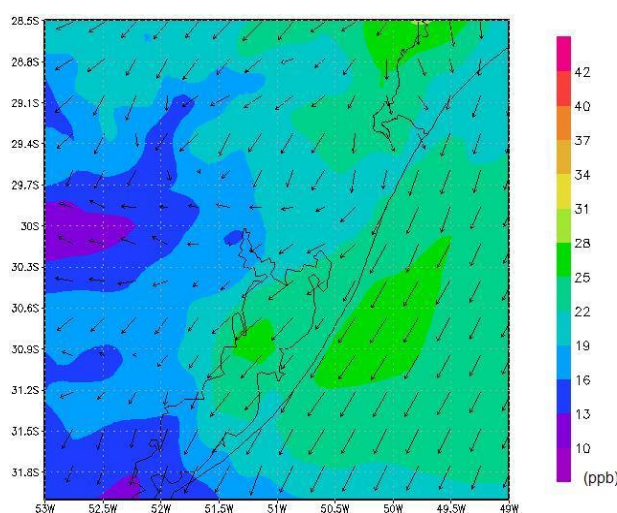


Figura 132 – Razão de mistura de  $O_3$  simulada pelo modelo WRF/Chem às 03 HL no dia 06 de janeiro de 2009.

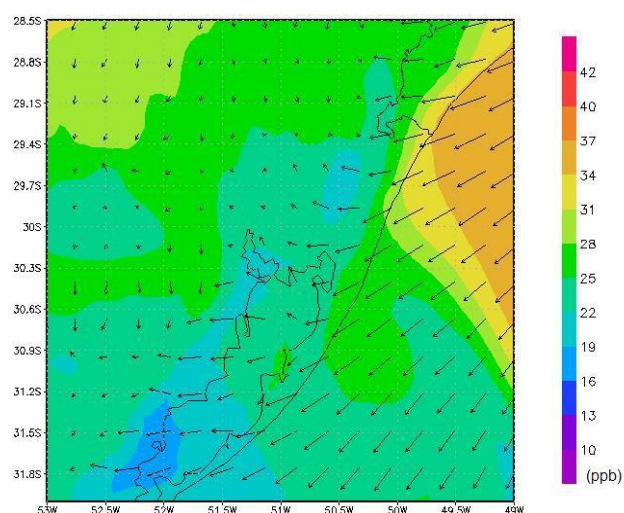


Figura 133 – Razão de mistura de  $O_3$  simulada pelo modelo WRF/Chem às 15 HL no dia 06 de janeiro de 2009.



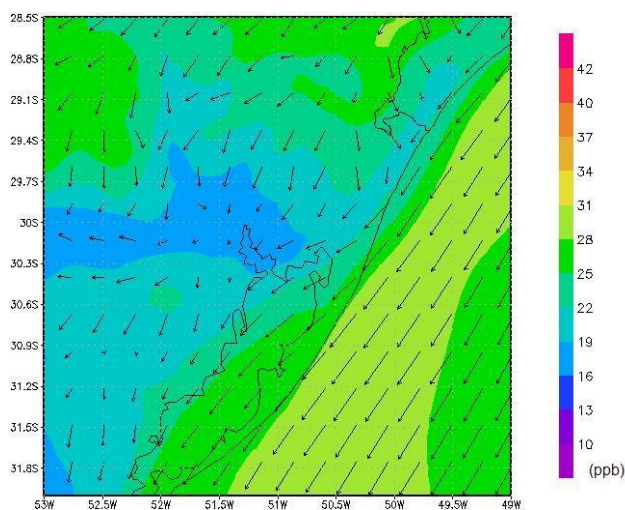


Figura 134 – Razão de mistura de  $O_3$  simulada pelo modelo WRF/Chem às 03 HL no dia 07 de janeiro de 2009.

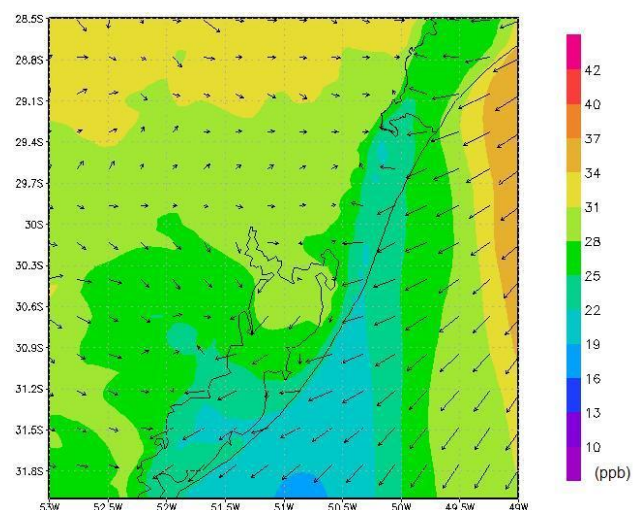


Figura 135 – Razão de mistura de  $O_3$  simulada pelo modelo WRF/Chem às 15 HL no dia 07 de janeiro de 2009.

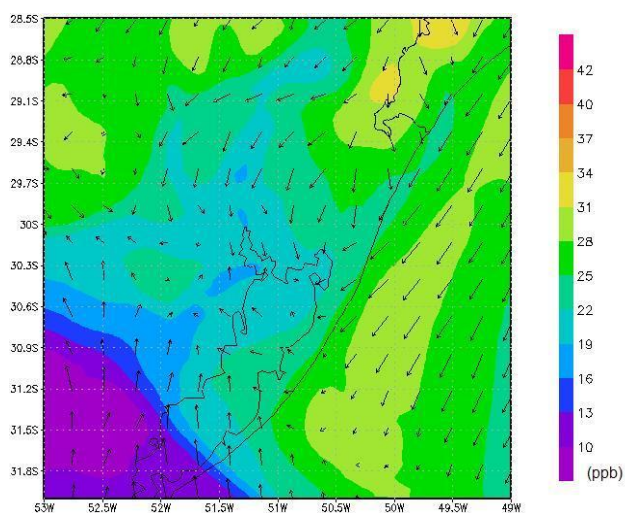


Figura 136 – Razão de mistura de  $O_3$  simulada pelo modelo WRF/Chem às 03 HL no dia 08 de janeiro de 2009.

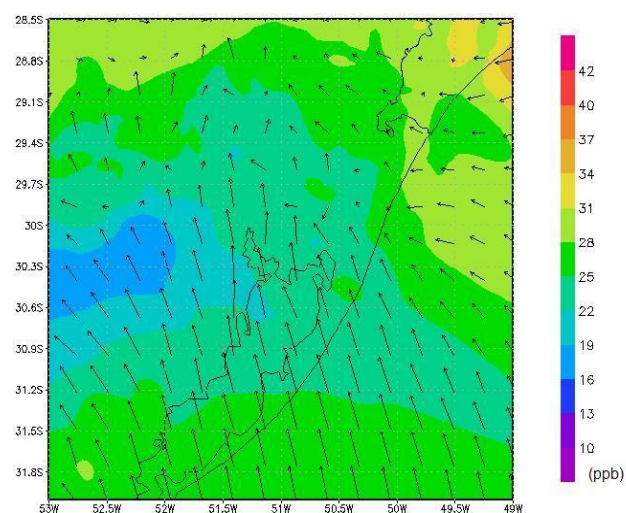


Figura 137 – Razão de mistura de  $O_3$  simulada pelo modelo WRF/Chem às 15 HL no dia 08 de janeiro de 2009.

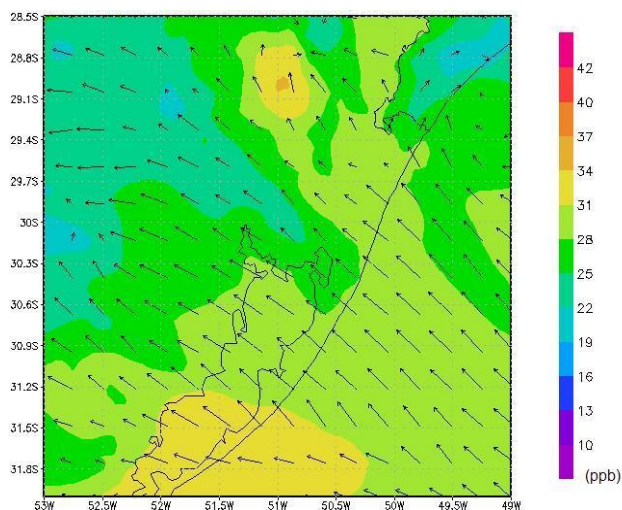


Figura 138 – Razão de mistura de  $O_3$  simulada pelo modelo WRF/Chem às 03 HL no dia 09 de janeiro de 2009.

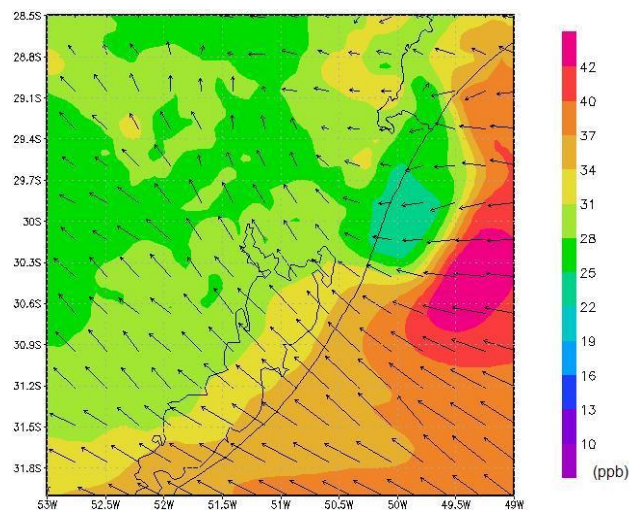


Figura 139 – Razão de mistura de  $O_3$  simulada pelo modelo WRF/Chem às 15 HL no dia 09 de janeiro de 2009.

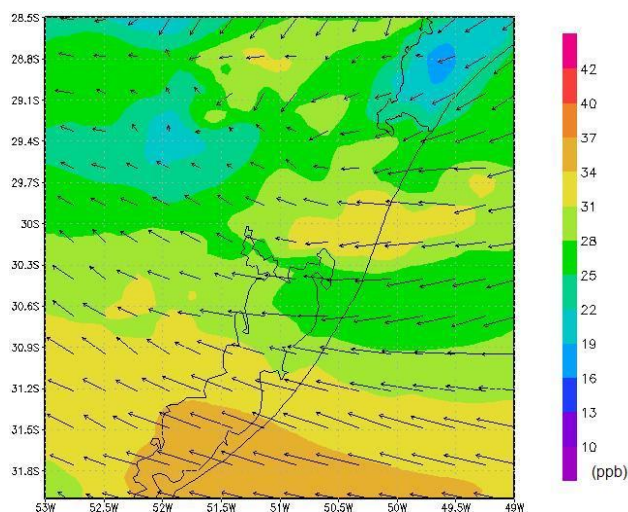


Figura 140 – Razão de mistura de  $O_3$  simulada pelo modelo WRF/Chem às 03 HL no dia 10 de janeiro de 2009.

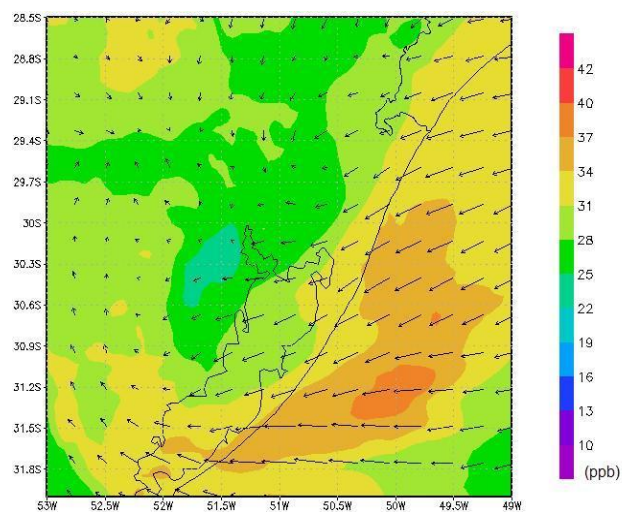


Figura 141 – Razão de mistura de  $O_3$  simulada pelo modelo WRF/Chem às 15 HL no dia 10 de janeiro de 2009.



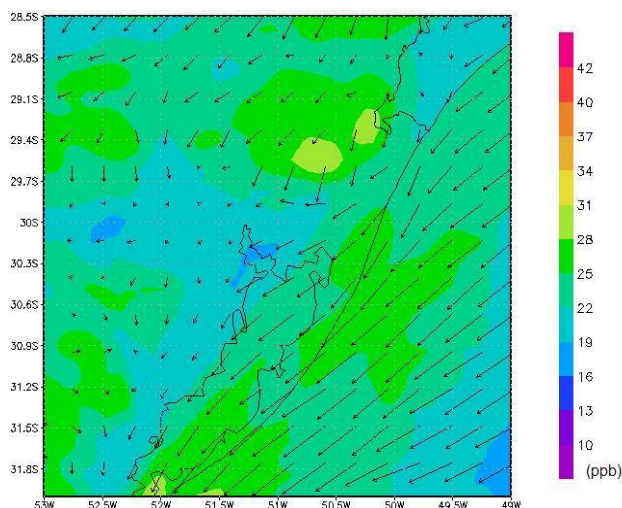


Figura 142 – Razão de mistura de  $O_3$  simulada pelo modelo WRF/Chem às 03 HL no dia 11 de janeiro de 2009.

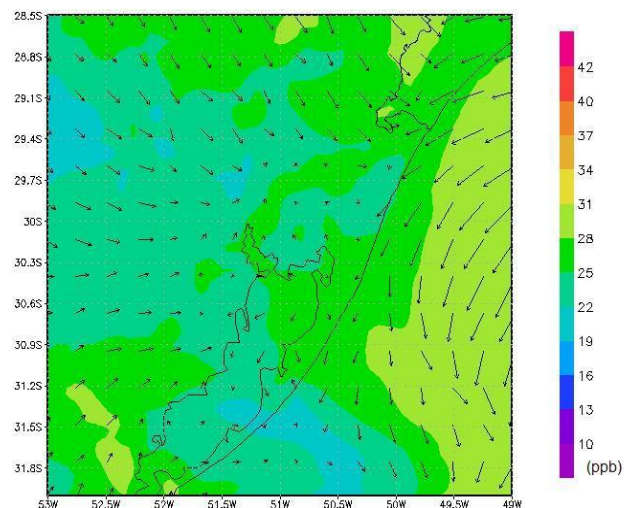


Figura 143 – Razão de mistura de  $O_3$  simulada pelo modelo WRF/Chem às 15 HL no dia 11 de janeiro de 2009.

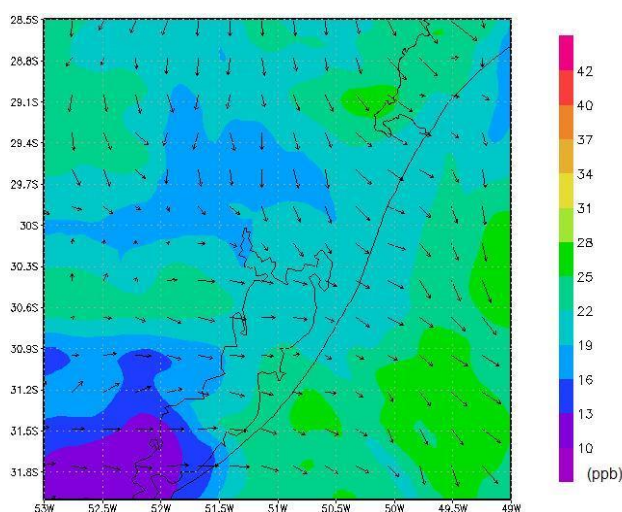


Figura 144 – Razão de mistura de  $O_3$  simulada pelo modelo WRF/Chem às 03 HL no dia 12 de janeiro de 2009.

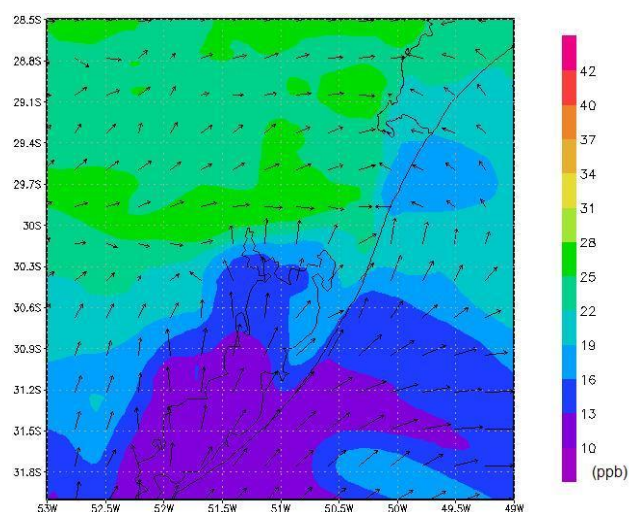


Figura 145 – Razão de mistura de  $O_3$  simulada pelo modelo WRF/Chem às 15 HL no dia 12 de janeiro de 2009.

Nas Figs. 146 a 161 são plotados os campos de razão de mistura de monóxido de carbono (CO) simulados pelo WRF/Chem no período do dia 05 a 12 de janeiro de 2009. Pode-se observar que o modelo simula coerentemente os campos de razão de mistura. Destaca-se que a simulação gerou concentrações máximas diárias as 06 HL e mínimas as 18 HL.

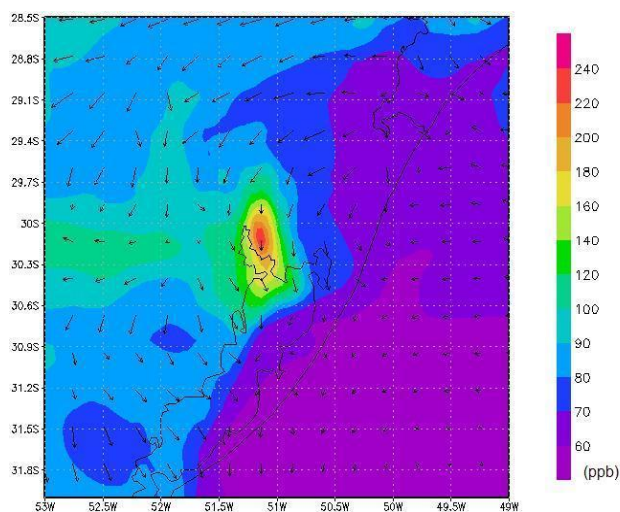


Figura 146 – Razão de mistura de CO simulada pelo modelo WRF/Chem às 06 HL no dia 05 de janeiro de 2009.

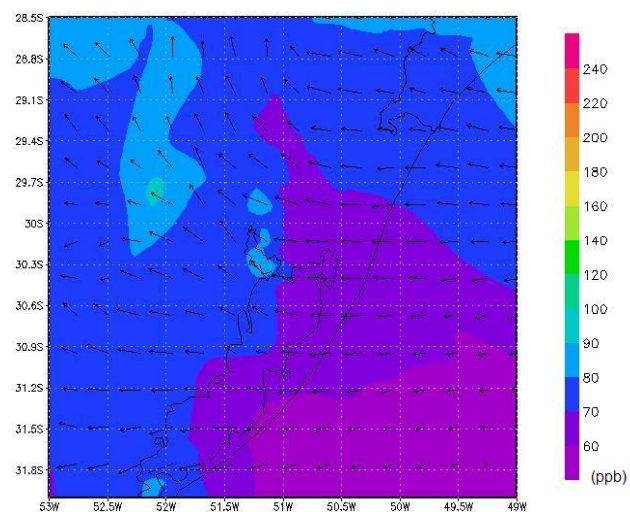


Figura 147 – Razão de mistura de CO simulada pelo modelo WRF/Chem às 18 HL no dia 05 de janeiro de 2009.

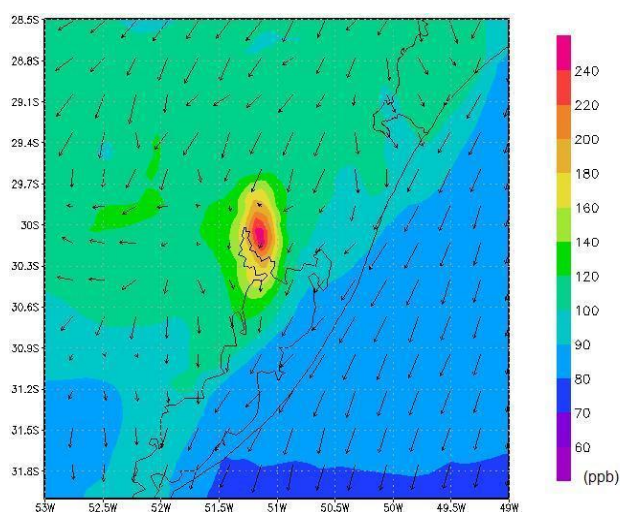


Figura 148 – Razão de mistura de CO simulada pelo modelo WRF/Chem às 06 HL no dia 06 de janeiro de 2009.

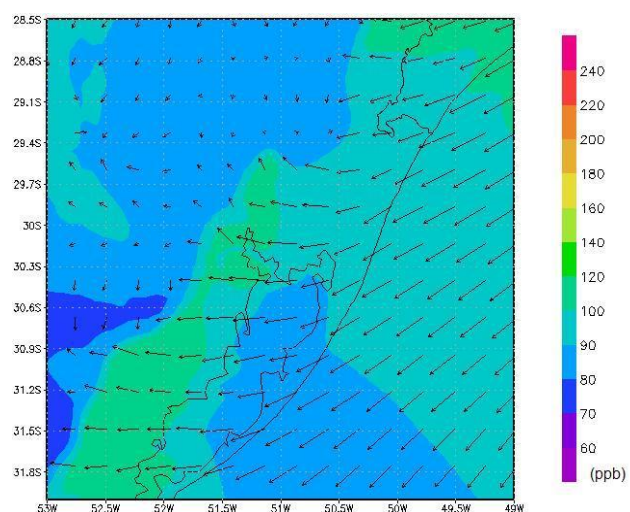


Figura 149 – Razão de mistura de CO simulada pelo modelo WRF/Chem às 18 HL no dia 06 de janeiro de 2009.



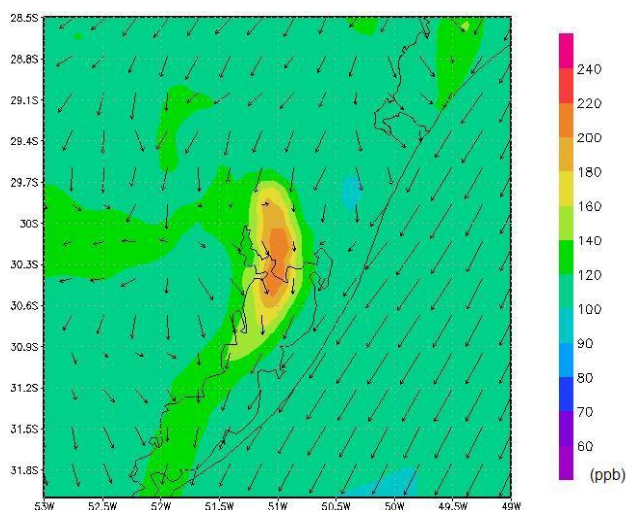


Figura 150 – Razão de mistura de CO simulada pelo modelo WRF/Chem às 06 HL no dia 07 de janeiro de 2009.

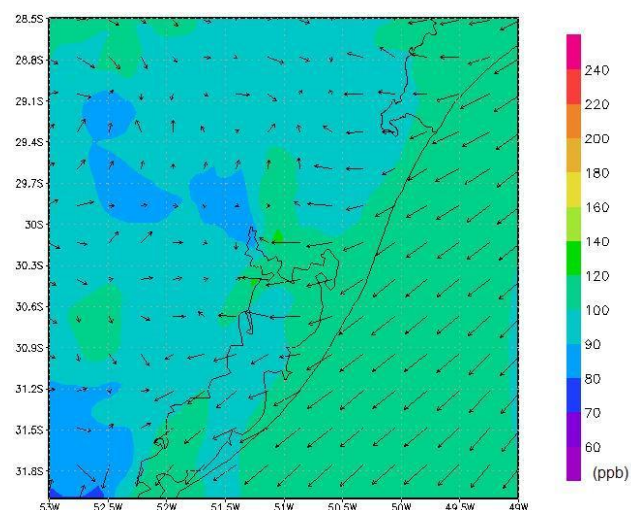


Figura 151 – Razão de mistura de CO simulada pelo modelo WRF/Chem às 18 HL no dia 07 de janeiro de 2009.

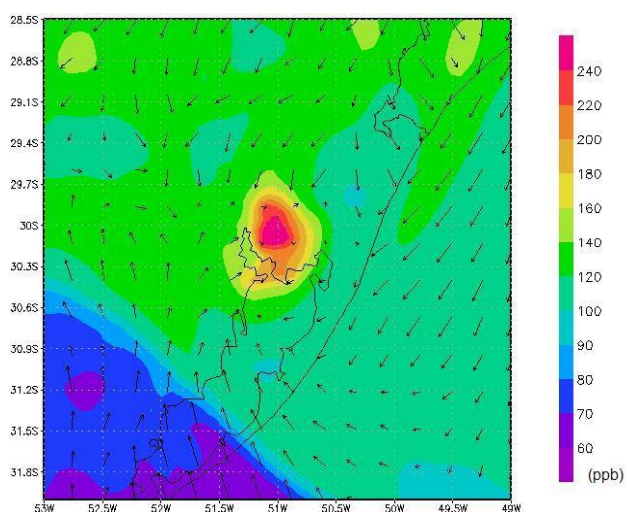


Figura 152 – Razão de mistura de CO simulada pelo modelo WRF/Chem às 06 HL no dia 08 de janeiro de 2009.

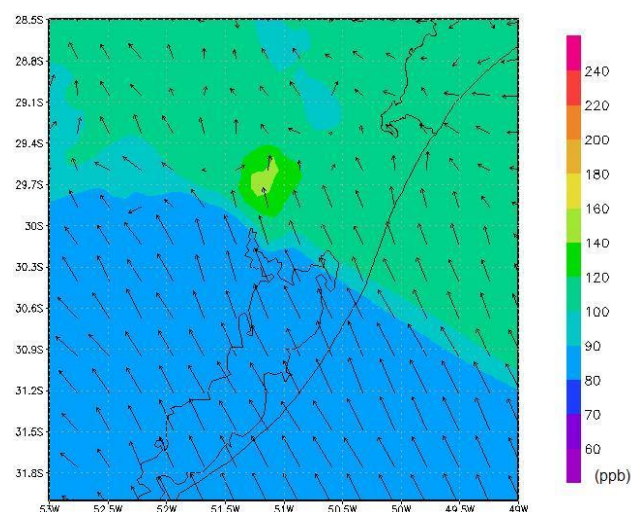


Figura 153 – Razão de mistura de CO simulada pelo modelo WRF/Chem às 18 HL no dia 08 de janeiro de 2009.

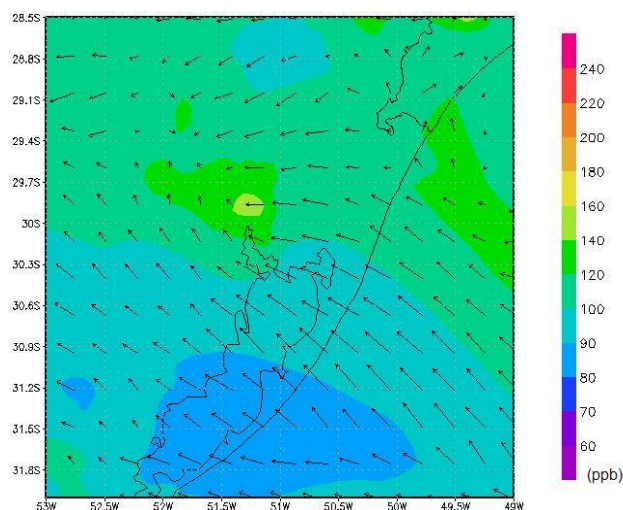


Figura 154 – Razão de mistura de CO simulada pelo modelo WRF/Chem às 06 HL no dia 09 de janeiro de 2009.

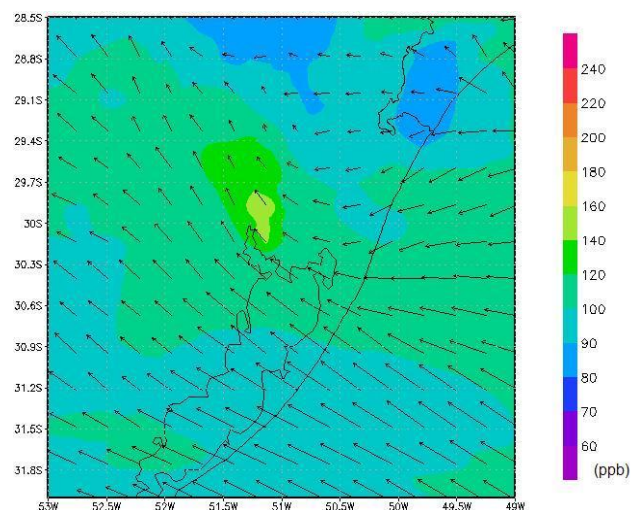


Figura 155 – Razão de mistura de CO simulada pelo modelo WRF/Chem às 18 HL no dia 09 de janeiro de 2009.

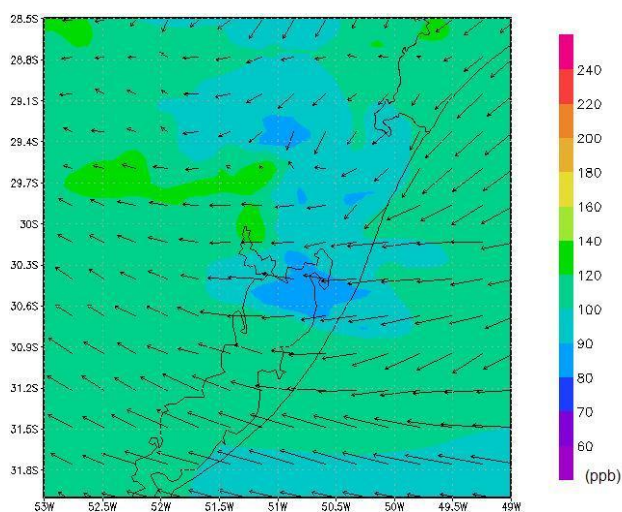


Figura 156 – Razão de mistura de CO simulada pelo modelo WRF/Chem às 06 HL no dia 10 de janeiro de 2009.

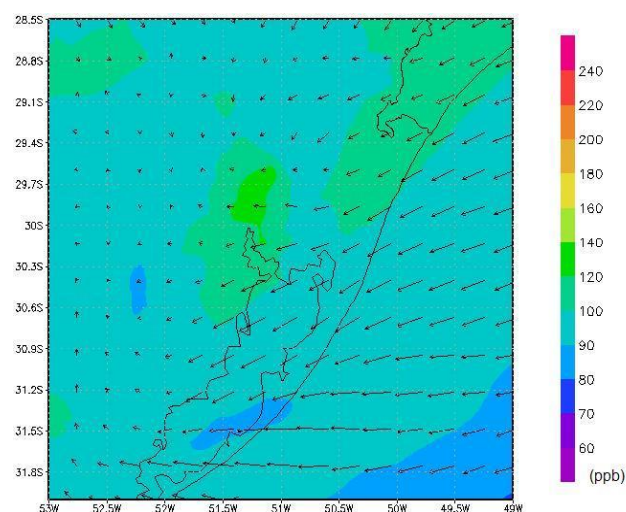


Figura 157 – Razão de mistura de CO simulada pelo modelo WRF/Chem às 18 HL no dia 10 de janeiro de 2009.



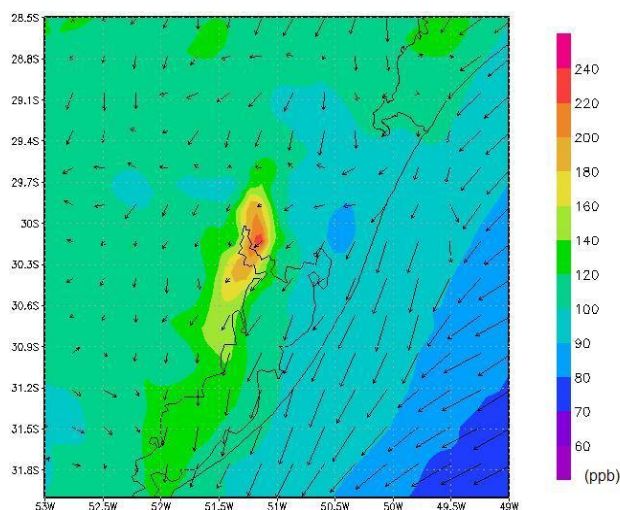


Figura 158 – Razão de mistura de CO simulada pelo modelo WRF/Chem às 06 HL no dia 11 de janeiro de 2009.

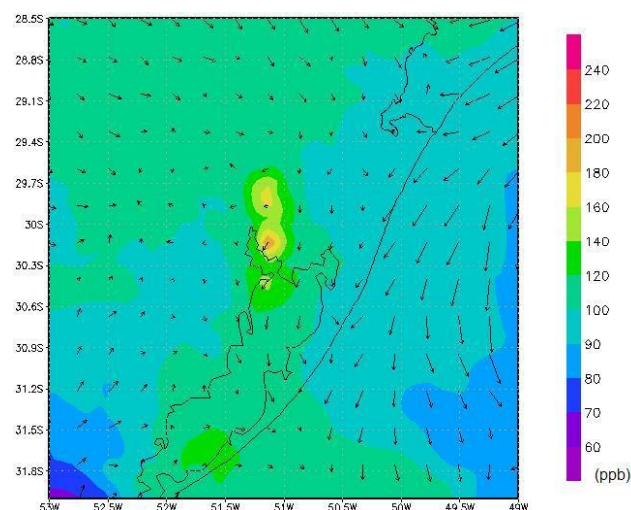


Figura 159 – Razão de mistura de CO simulada pelo modelo WRF/Chem às 18 HL no dia 11 de janeiro de 2009.

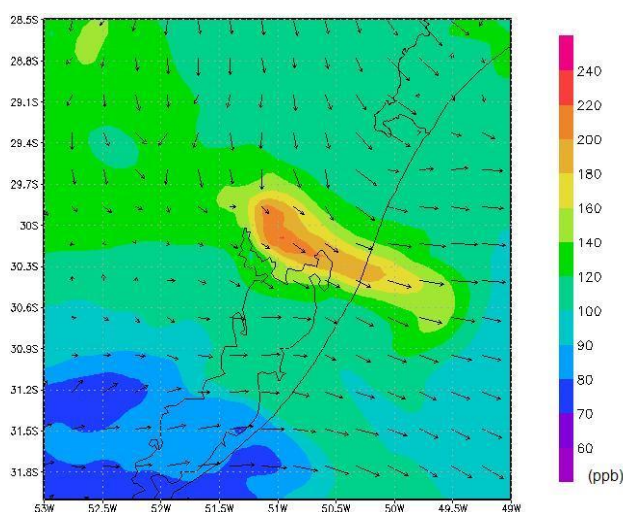


Figura 160 – Razão de mistura de CO simulada pelo modelo WRF/Chem às 06 HL no dia 12 de janeiro de 2009.

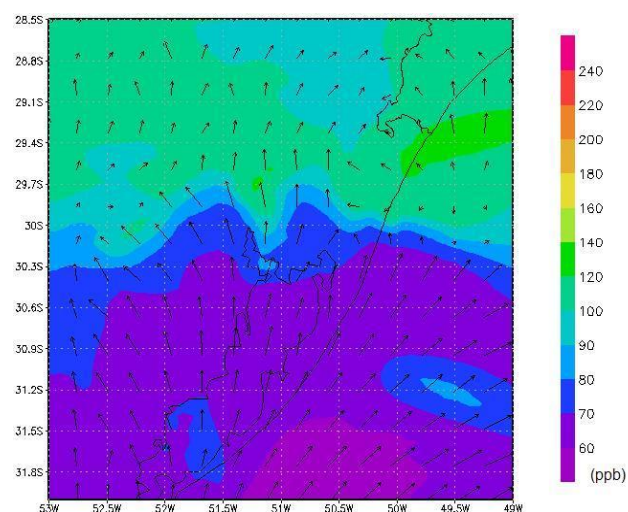


Figura 161 – Razão de mistura de CO simulada pelo modelo WRF/Chem às 18 HL no dia 12 de janeiro de 2009.

Nas Figs. 162 a 177 são apresentados os campos de razão de mistura em superfície de hidrocarbonetos (HC) no período de 05 a 12 de janeiro de 2009. Os valores máximos de razão de mistura de HC ocorrem as 08 HL enquanto os valores mínimos ocorrem as 18 HL. As imagens mostram o transporte da pluma para o sul do estado nos dias 06 e 07 de janeiro. Também é possível notar que nos dias 07 e 08 ocorre o transporte de HC de leste para oeste, atingido a RMPA. Por fim,

observa-se na Fig. 177 que, no dia 12 as 08 HL, a divergência no campo de vento simulado provoca uma divisão da pluma no domínio de simulação.

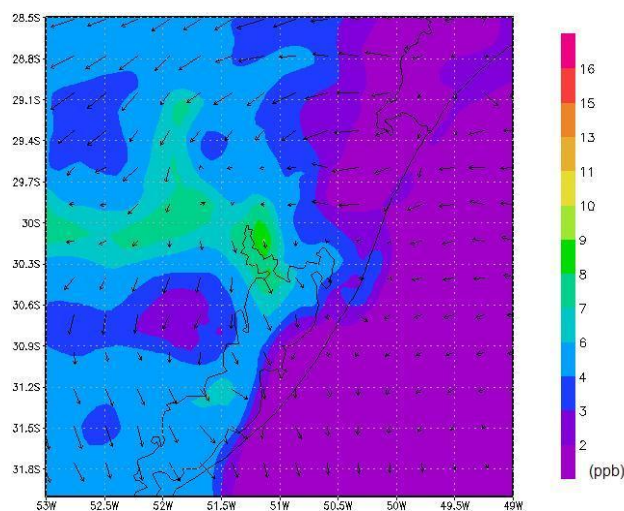


Figura 162 – Razão de mistura de HC simulada pelo modelo WRF/Chem às 08HL no dia 05 de janeiro de 2009.

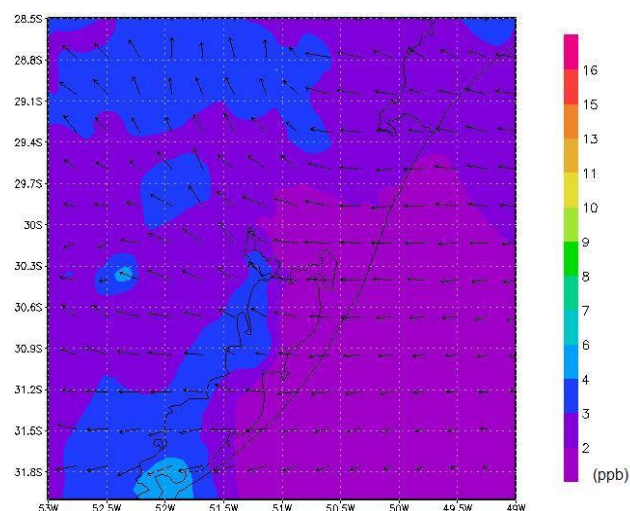


Figura 163 – Razão de mistura de HC simulada pelo modelo WRF/Chem às 18HL no dia 05 de janeiro de 2009.

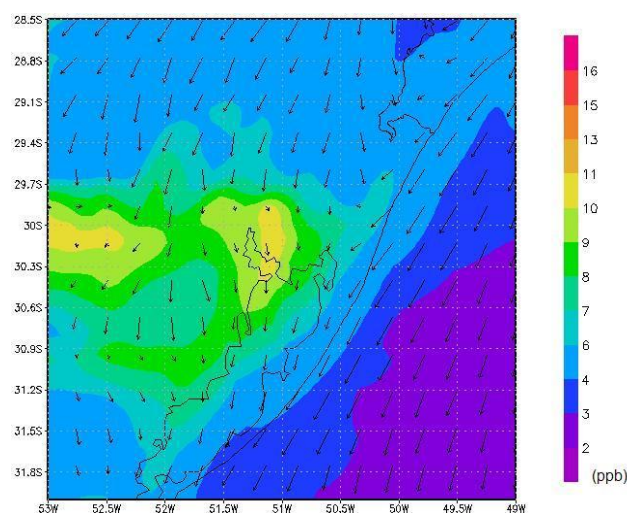


Figura 164 – Razão de mistura de HC simulada pelo modelo WRF/Chem às 08HL no dia 06 de janeiro de 2009.

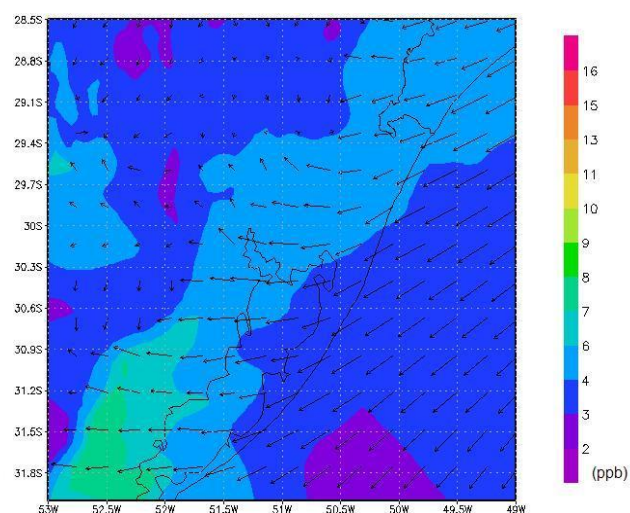


Figura 165 – Razão de mistura de HC simulada pelo modelo WRF/Chem às 18HL no dia 06 de janeiro de 2009.



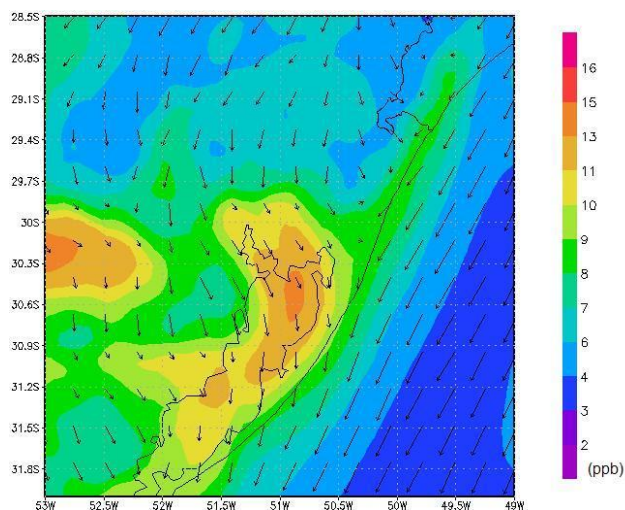


Figura 166 – Razão de mistura de HC simulada pelo modelo WRF/Chem às 08 HL no dia 07 de janeiro de 2009.

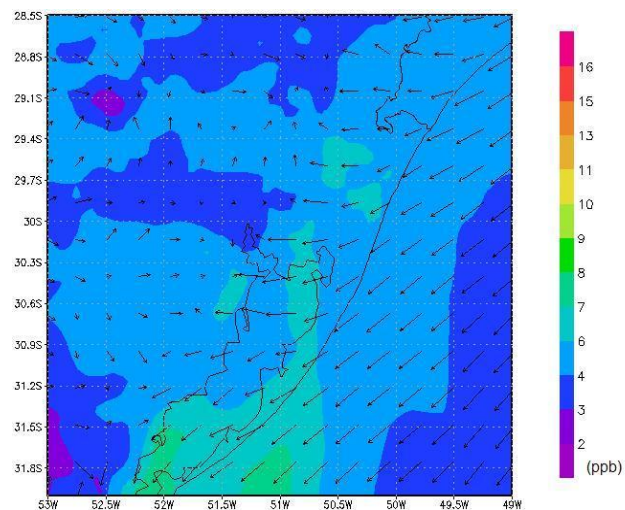


Figura 167 – Razão de mistura de HC simulada pelo modelo WRF/Chem às 18 HL no dia 07 de janeiro de 2009.

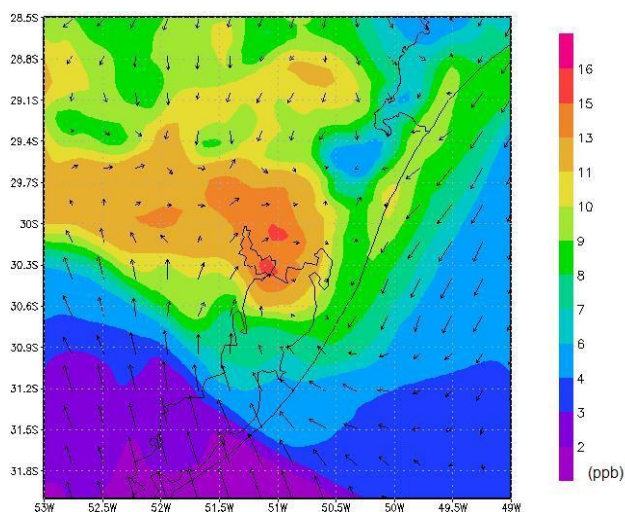


Figura 168 – Razão de mistura de HC simulada pelo modelo WRF/Chem às 08 HL no dia 08 de janeiro de 2009.

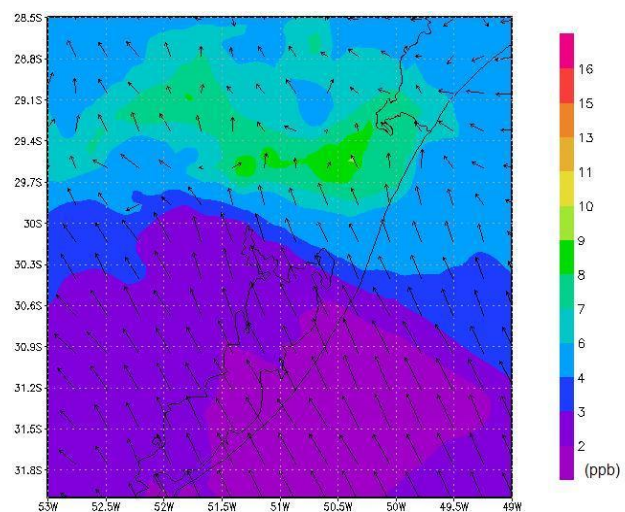


Figura 169 – Razão de mistura de HC simulada pelo modelo WRF/Chem às 18 HL no dia 08 de janeiro de 2009.

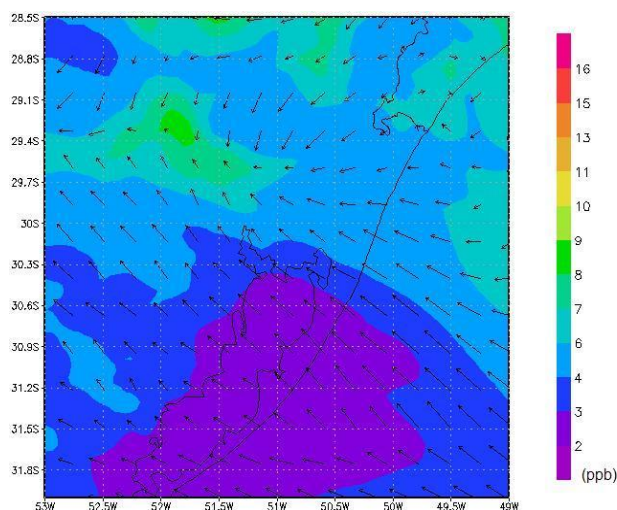


Figura 170 – Razão de mistura de HC simulada pelo modelo WRF/Chem às 08 HL no dia 09 de janeiro de 2009.

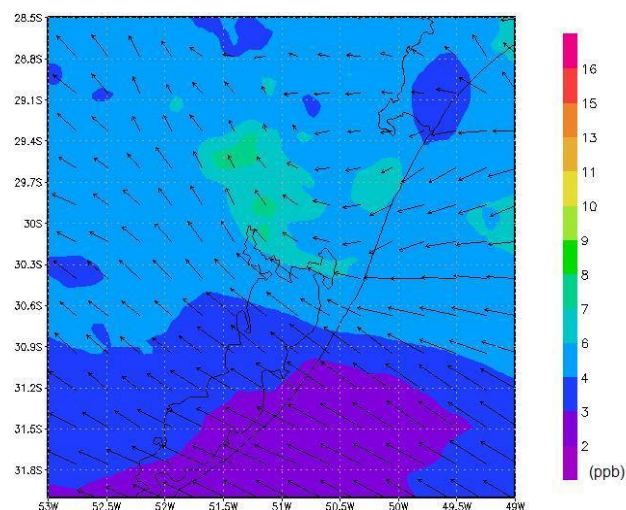


Figura 171 – Razão de mistura de HC simulada pelo modelo WRF/Chem às 18 HL no dia 09 de janeiro de 2009.

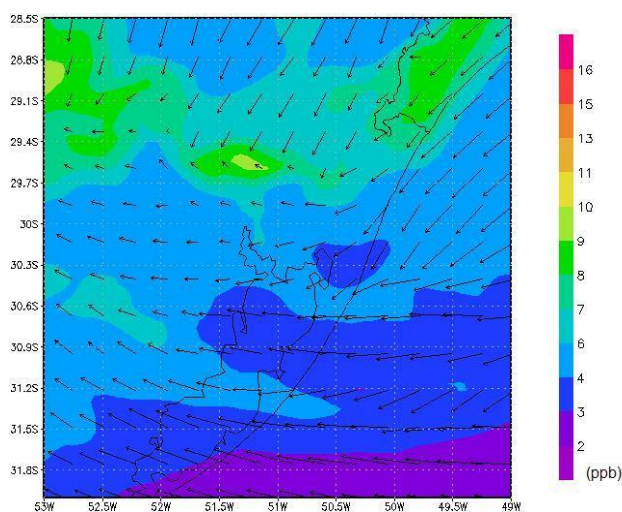


Figura 172 – Razão de mistura de HC simulada pelo modelo WRF/Chem às 08 HL no dia 10 de janeiro de 2009.

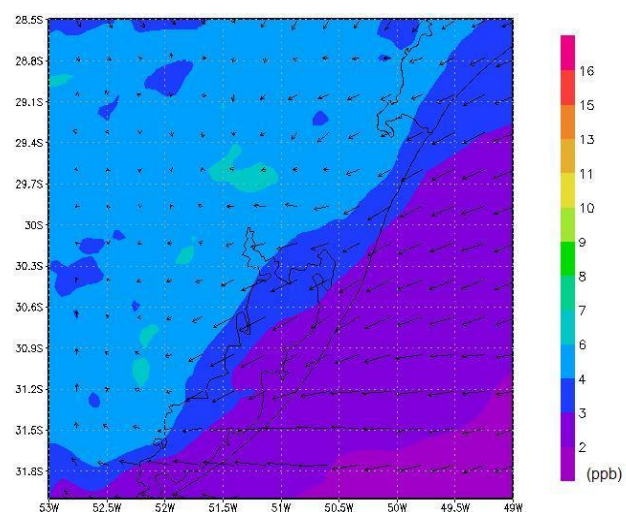


Figura 173 – Razão de mistura de HC simulada pelo modelo WRF/Chem às 18 HL no dia 10 de janeiro de 2009.



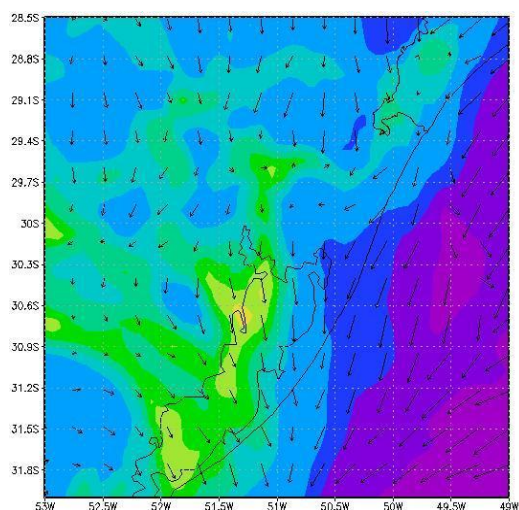


Figura 174 – Razão de mistura de HC simulada pelo modelo WRF/Chem às 08 HL no dia 11 de janeiro de 2009.

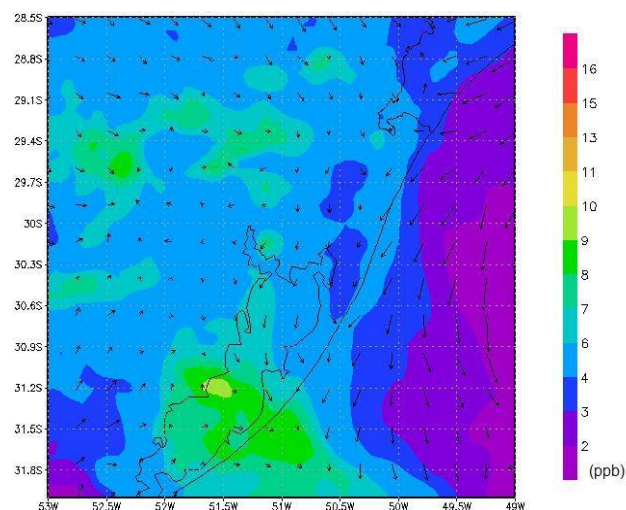


Figura 175 – Razão de mistura de HC simulada pelo modelo WRF/Chem às 18 HL no dia 11 de janeiro de 2009.

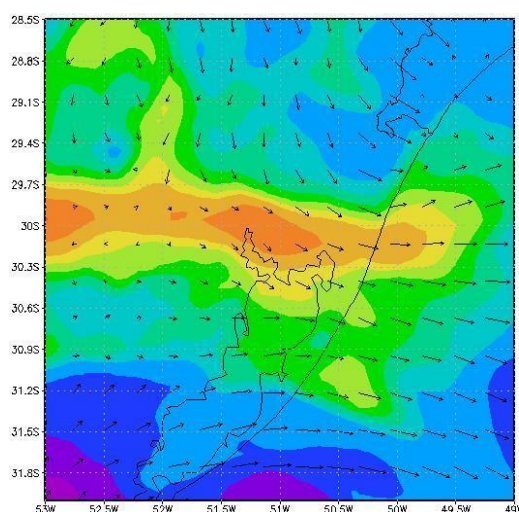


Figura 176 – Razão de mistura de HC simulada pelo modelo WRF/Chem às 08 HL no dia 12 de janeiro de 2009.

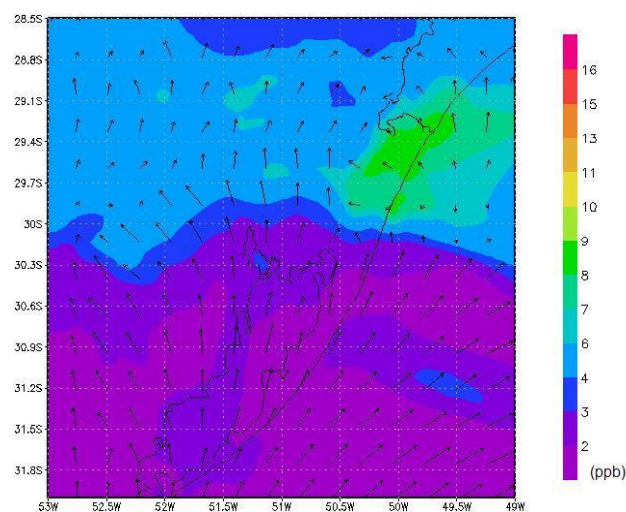


Figura 177 – Razão de mistura de HC simulada pelo modelo WRF/Chem às 18 HL no dia 12 de janeiro de 2009.

As Figs. 178 a 193 apresentam a evolução da pluma de  $\text{NO}_x$  simulada pelo modelo WRF/Chem no período de 05 a 12 de janeiro de 2009. Os maiores valores ocorrem as 06 HL e os menores as 15 HL, corroborando com o horário em que o  $\text{NO}_x$  é consumido para formação do ozônio troposférico. Nos dias 06, 07 e 08 a pluma sobre na RMPA é transportada para oeste e nos dias 09 a 10 quando, a atmosfera está saturada e com ocorrência de chuva, o modelo indica perfeitamente a atmosfera com baixa concentração de  $\text{NO}$  e  $\text{NO}_2$ .

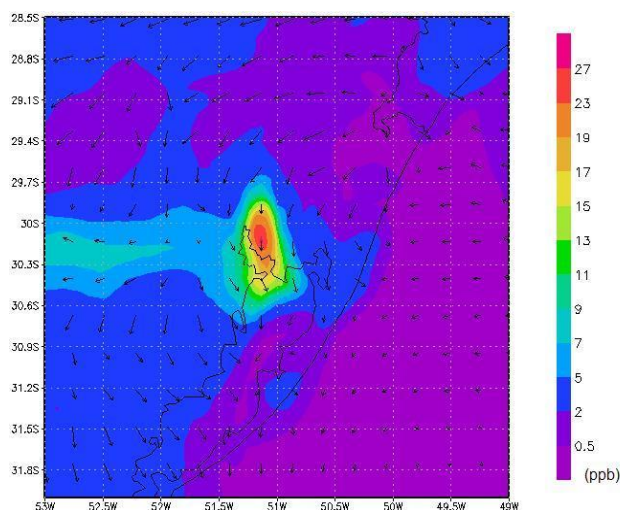


Figura 178 – Razão de mistura de  $\text{NO}_x$  simulada pelo modelo WRF/Chem às 06 HL no dia 05 de janeiro de 2009.

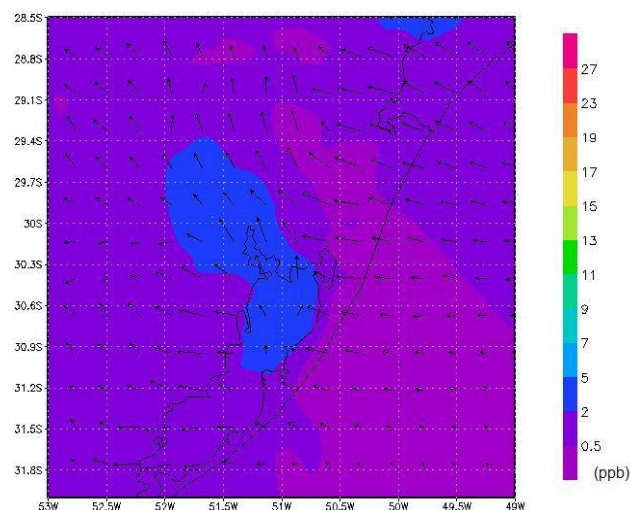


Figura 179 – Razão de mistura de  $\text{NO}_x$  simulada pelo modelo WRF/Chem às 15 HL no dia 05 de janeiro de 2009.

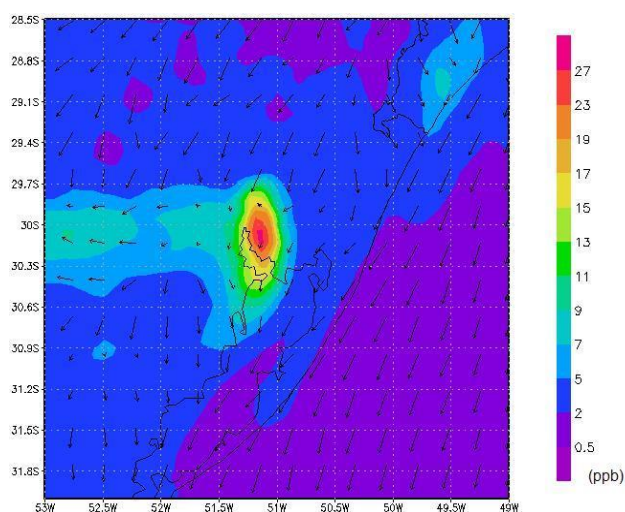


Figura 180 – Razão de mistura de  $\text{NO}_x$  simulada pelo modelo WRF/Chem às 06 HL no dia 06 de janeiro de 2009.

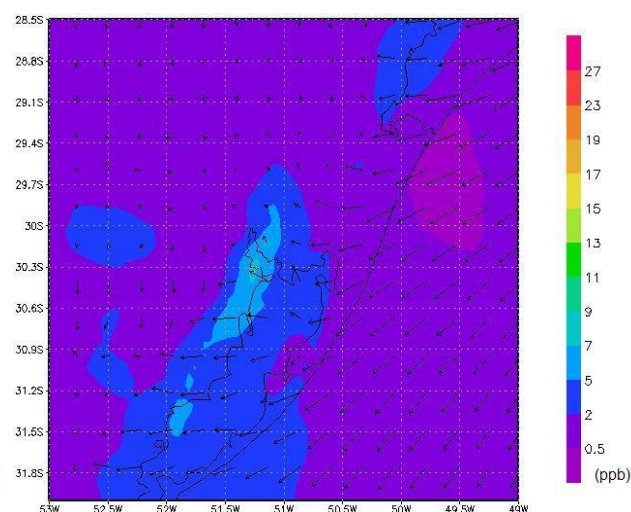


Figura 181 – Razão de mistura de  $\text{NO}_x$  simulada pelo modelo WRF/Chem às 15 HL no dia 06 de janeiro de 2009.



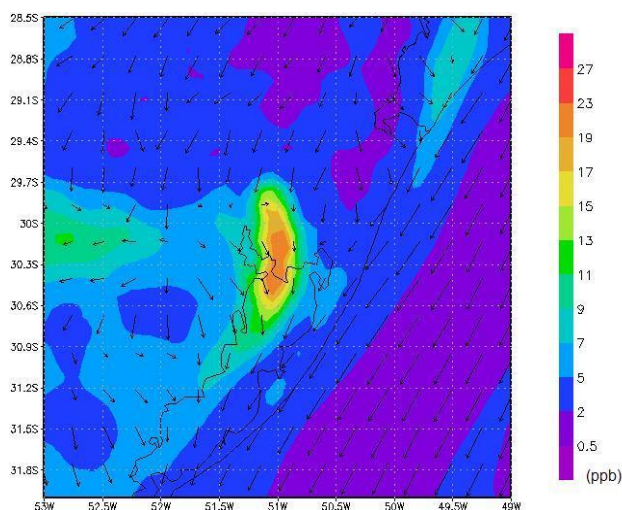


Figura 182– Razão de mistura de  $\text{NO}_x$  simulada pelo modelo WRF/Chem às 06 HL no dia 07 de janeiro de 2009.

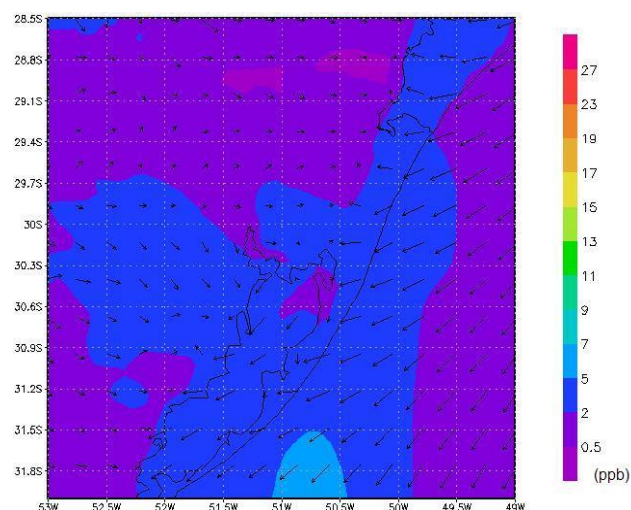


Figura 183 – Razão de mistura de  $\text{NO}_x$  simulada pelo modelo WRF/Chem às 15 HL no dia 07 de janeiro de 2009.

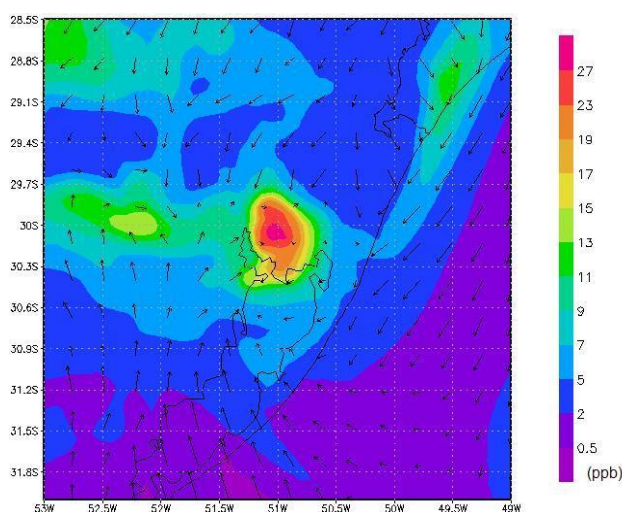


Figura 184 – Razão de mistura de  $\text{NO}_x$  simulada pelo modelo WRF/Chem às 06 HL no dia 08 de janeiro de 2009.

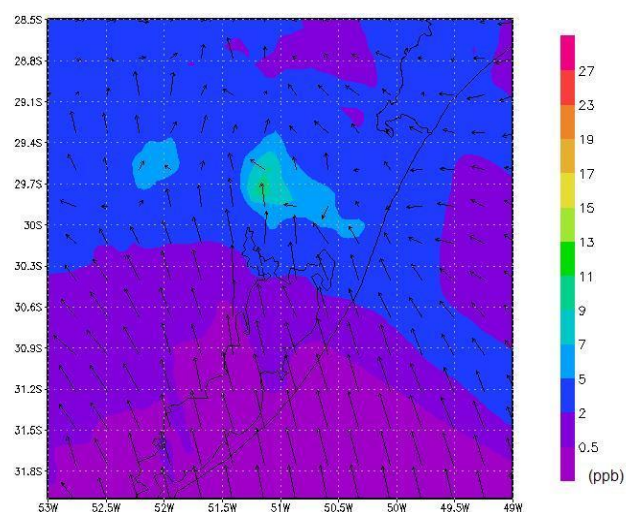


Figura 185 – Razão de mistura de  $\text{NO}_x$  simulada pelo modelo WRF/Chem às 15 HL no dia 08 de janeiro de 2009.

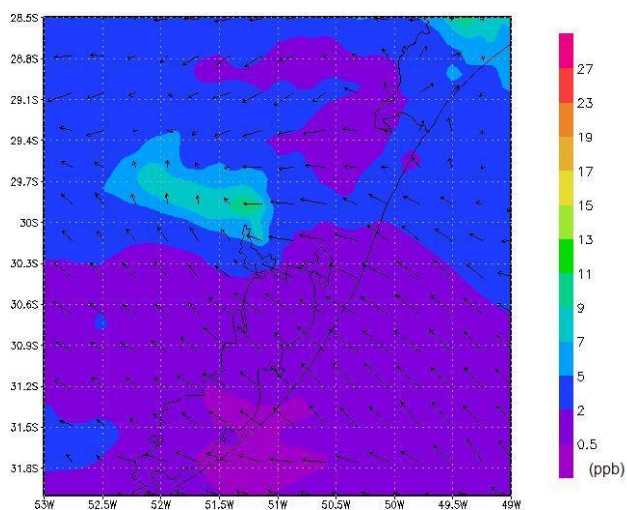


Figura 186 – Razão de mistura de NO<sub>x</sub> simulada pelo modelo WRF/Chem às 06 HL no dia 09 de janeiro de 2009.

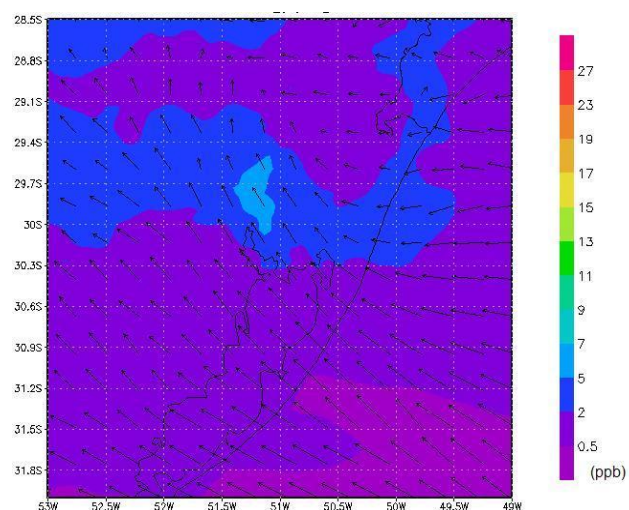


Figura 187 – Razão de mistura de NO<sub>x</sub> simulada pelo modelo WRF/Chem às 15 HL no dia 09 de janeiro de 2009.

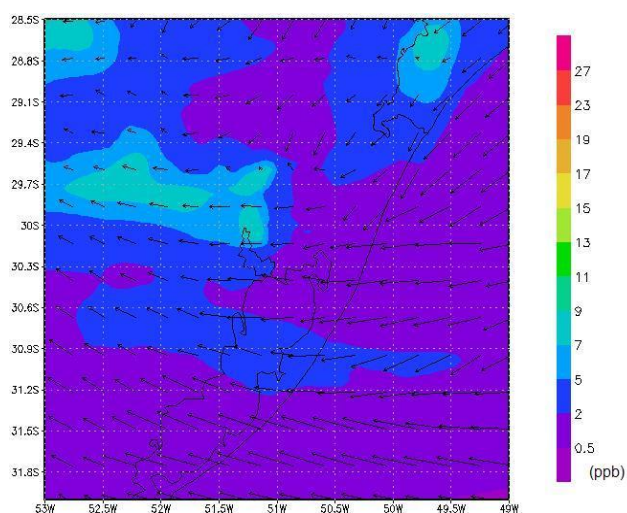


Figura 188 – Razão de mistura de NO<sub>x</sub> simulada pelo modelo WRF/Chem às 06 HL no dia 10 de janeiro de 2009.

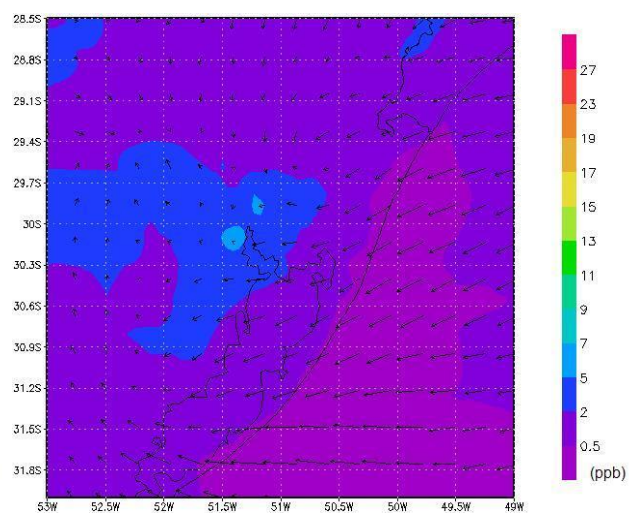


Figura 189 – Razão de mistura de NO<sub>x</sub> simulada pelo modelo WRF/Chem às 15 HL no dia 10 de janeiro de 2009.



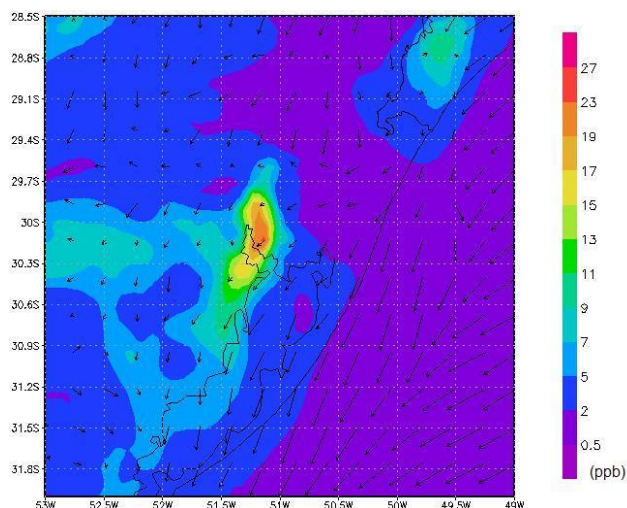


Figura 190 – Razão de mistura de NO<sub>x</sub> simulada pelo modelo WRF/Chem às 06 HL no dia 11 de janeiro de 2009.

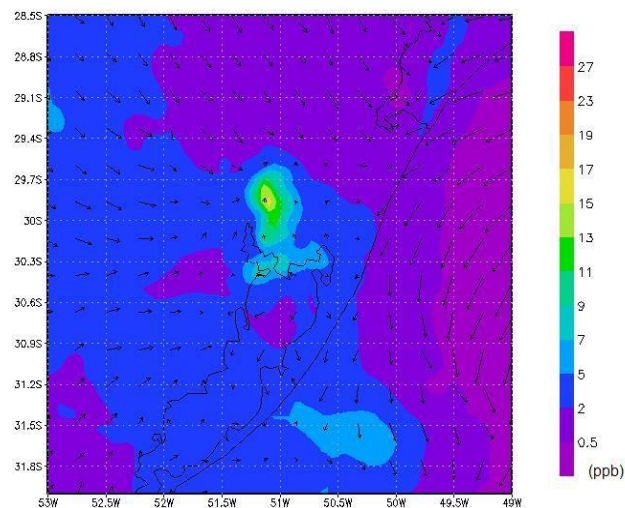


Figura 191 – Razão de mistura de NO<sub>x</sub> simulada pelo modelo WRF/Chem às 15 HL no dia 11 de janeiro de 2009.

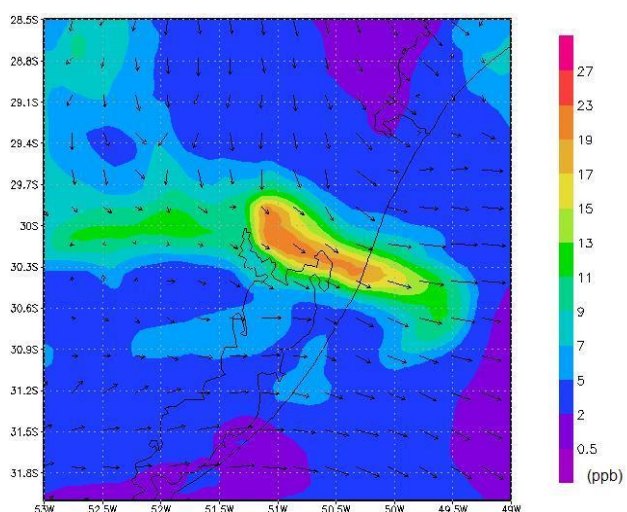


Figura 192 – Razão de mistura de NO<sub>x</sub> simulada pelo modelo WRF/Chem às 06 HL no dia 12 de janeiro de 2009.

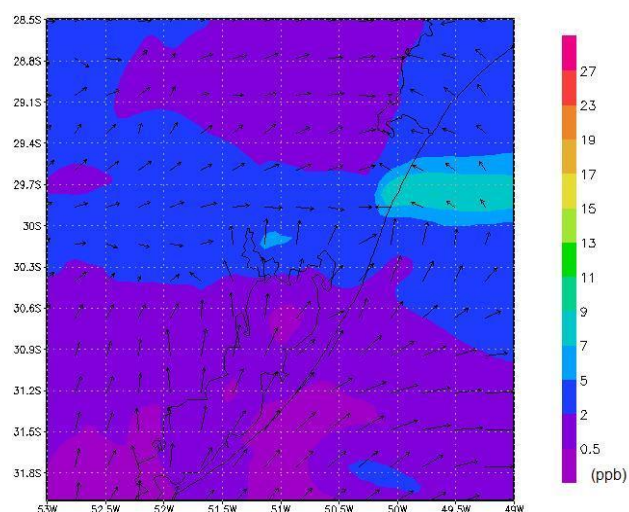


Figura 193 – Razão de mistura de NO<sub>x</sub> simulada pelo modelo WRF/Chem às 15 HL no dia 12 de janeiro de 2009.

As Figs. 194 a 199 apresentam a comparação das simulações de razão de mistura com dados observados. Dados de razão de mistura foram observados por estações de qualidade do ar instaladas pela FEPAM em Esteio e Porto Alegre. As comparações são efetuadas entre os dias 5 e 12 de janeiro de 2009 para o O<sub>3</sub> e para seus precursores (CO, HC e NO<sub>x</sub>).

As Figs. 194 e 195 apresentam as comparações entre a razão de mistura simulada e observada de  $O_3$ . O modelo WRF/Chem simula a evolução do ciclo diurno do  $O_3$ , mas mantém uma pequena amplitude ao longo do tempo, tal que existe pouca diferença entre os valores máximos e mínimos. Acredita-se que, para formação e destruição do  $O_3$ , o modelo tenha encontrado dificuldades no cálculo das interações fotoquímicas através da utilização do mecanismo RADM no PREP-CHEM, ou seja, mesmo tendo simulado de maneira satisfatória os precursores do ozônio, houve falhas na hora de realizar o cálculo das transformações e interações químicas de  $O_3$ .

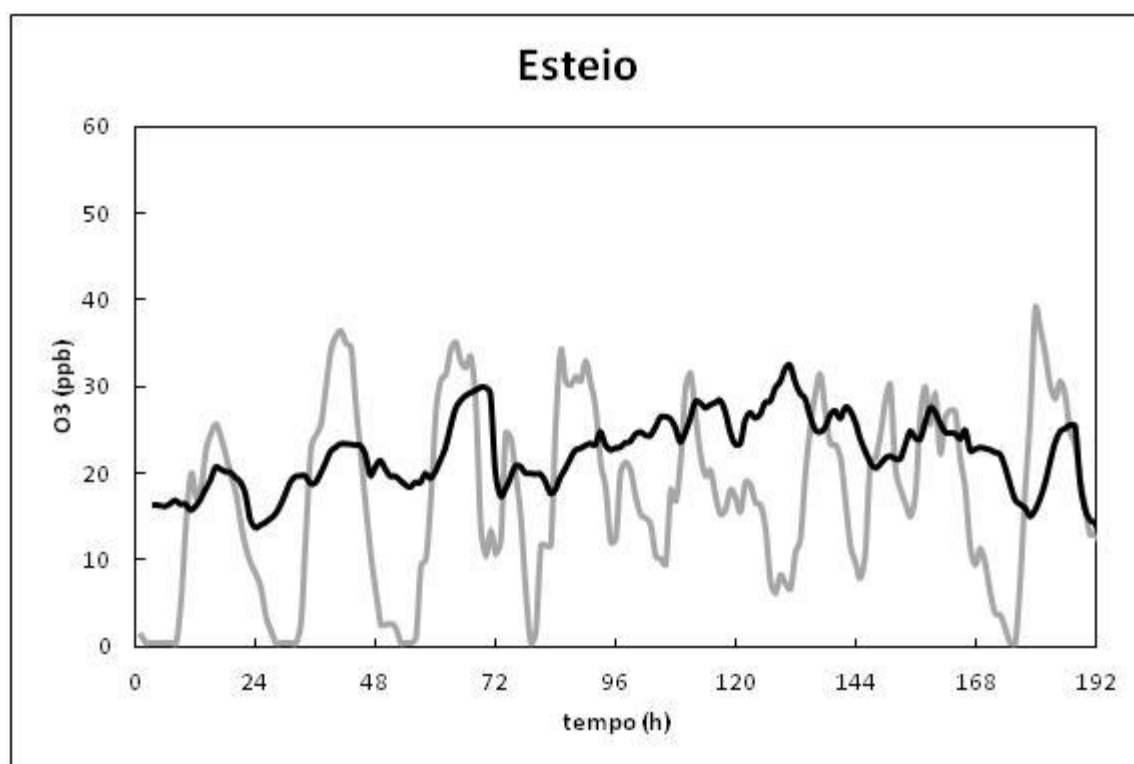


Figura 194 – Razão de mistura de ozônio simulada pelo modelo WRF/Chem (preto) e observada (cinza) e na estação Porto Alegre.

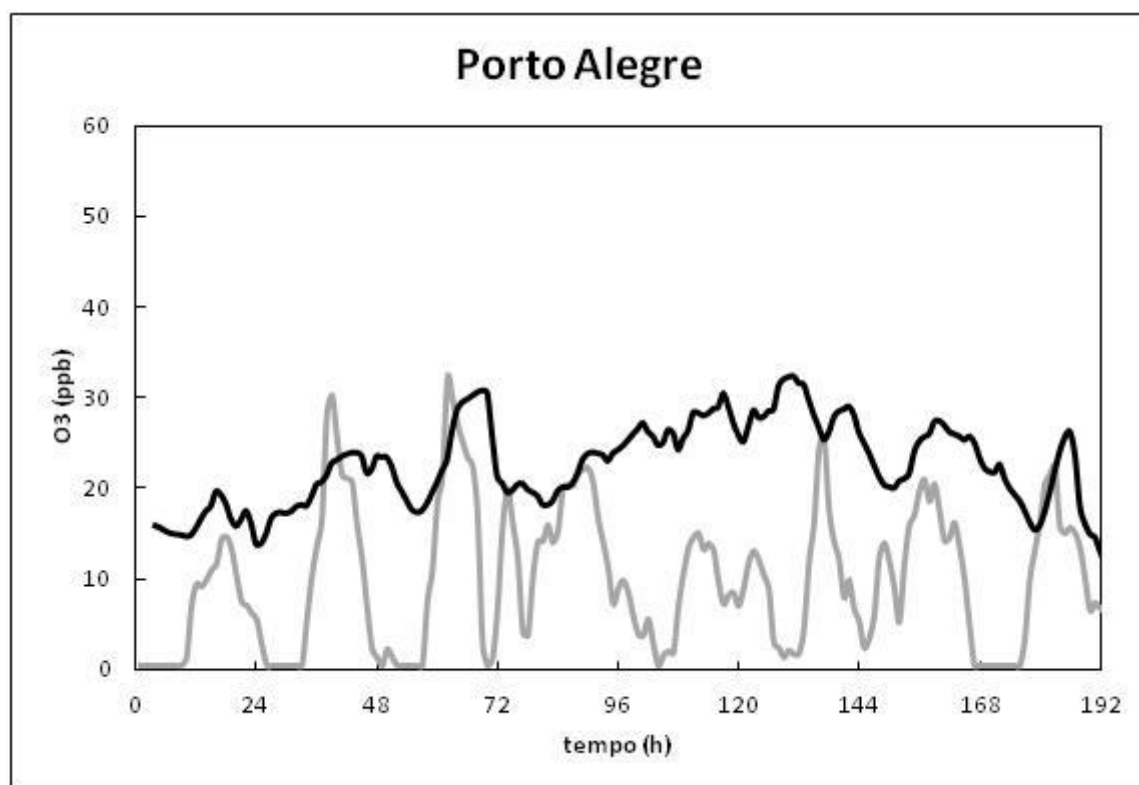


Figura 195 – Razão de mistura de ozônio simulada pelo modelo WRF/Chem (preto) e observada (cinza) e na estação Esteio.

As Figs. 196 e 197 apresentam as comparações entre a razão de mistura simulada e observada de monóxido de carbono (CO) nas estações de qualidade do ar de Esteio e Porto Alegre, respectivamente. Nota-se que a simulação do WRF/Chem para cidade de Esteio, obteve bons resultados e, para Porto Alegre, mesmo tendo subestimado os valores, o modelo tende a simular o ciclo diurno observado.

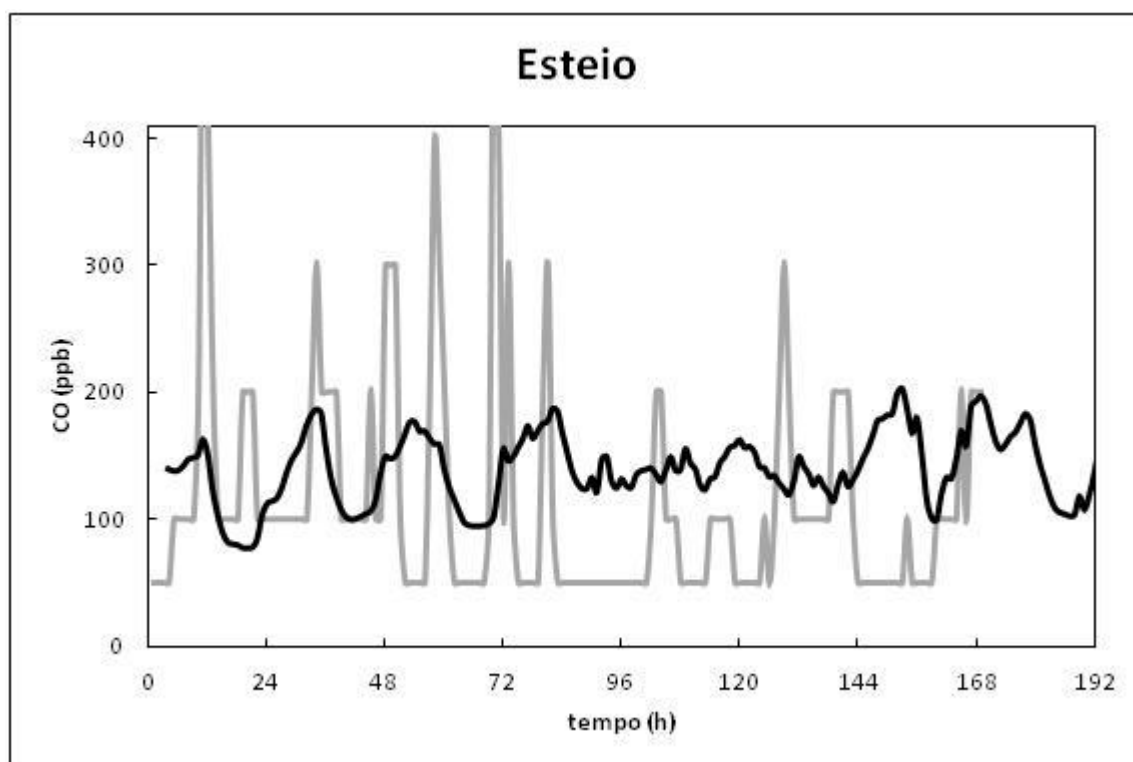


Figura 196 – Razão de mistura de monóxido de carbono simulada pelo modelo WRF/Chem (preto) e observada (cinza) e na estação Esteio.

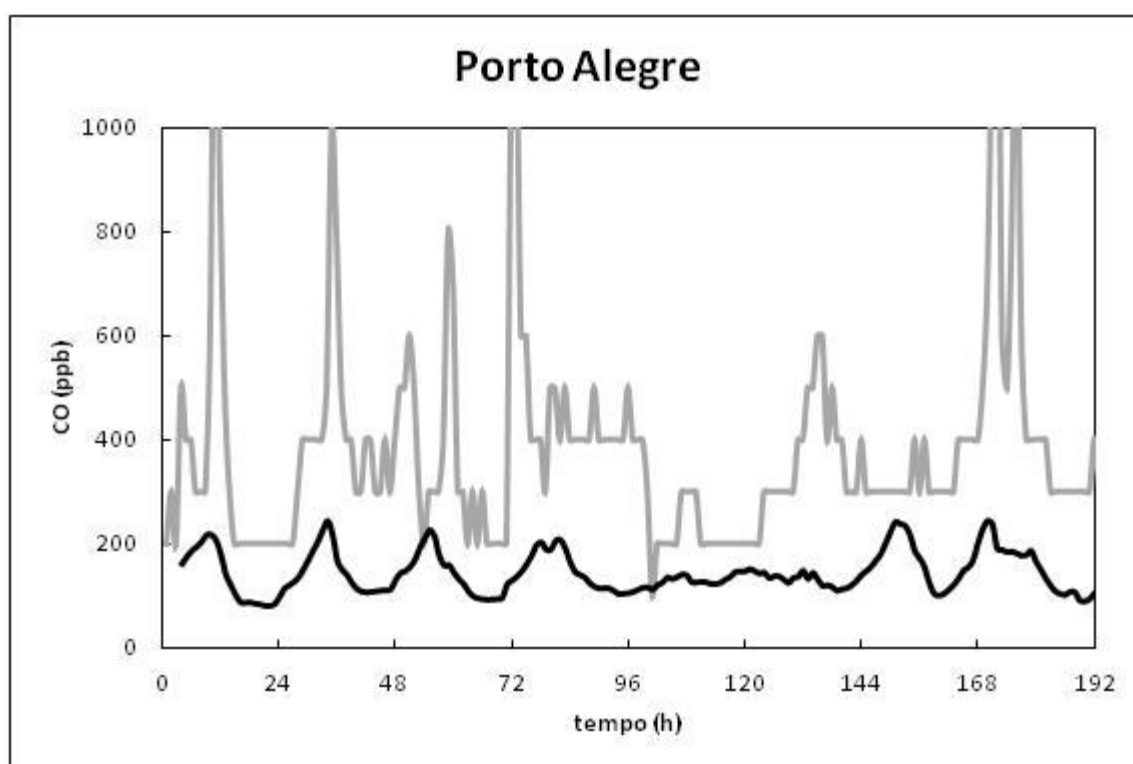


Figura 197 – Razão de mistura de monóxido de carbono simulada pelo modelo WRF/Chem (preto) e observada (cinza) e na estação Porto Alegre.



Em função da inexistência de dados observados de HC para cidade de Esteio, apresenta-se somente o resultado de comparação para a cidade de Porto Alegre (Fig. 198). Dentre todos os poluentes precursores estudados neste trabalho, os HC simulados pelo modelo WRF/Chem foram os que obtiveram melhores resultados. Pode-se observar que encontramos discrepâncias nos dias 08, 11 e 12 de janeiro de 2009, onde o modelo superestima em apenas 7 ppb as concentrações reais observadas.

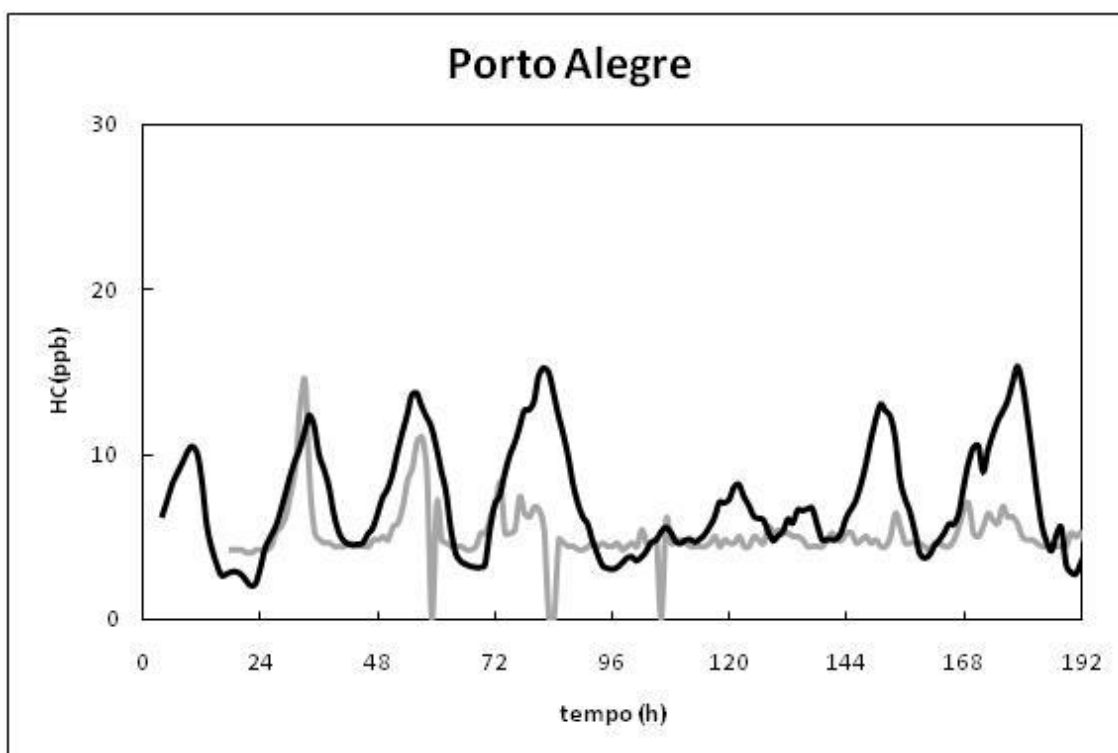


Figura 198 – Razão de mistura de hidrocarbonetos simulada pelo modelo WRF/Chem (preto) e observada (cinza) e na estação Porto Alegre.

Na Fig. 199 é apresentada a comparação entre simulação e observação de razão de mistura de  $\text{NO}_x$  para a estação de Esteio. É possível notar que o modelo WRF/Chem simula razoavelmente bem a tendência evolutiva de NO e  $\text{NO}_2$  em quase todo o período de simulação, mas apresenta algumas discrepâncias em relação aos valores observados, superestimando-os em torno de 7 ppb na maioria dos dias. A comparação com a estação de Porto Alegre não é apresentada por falta de dados observados.

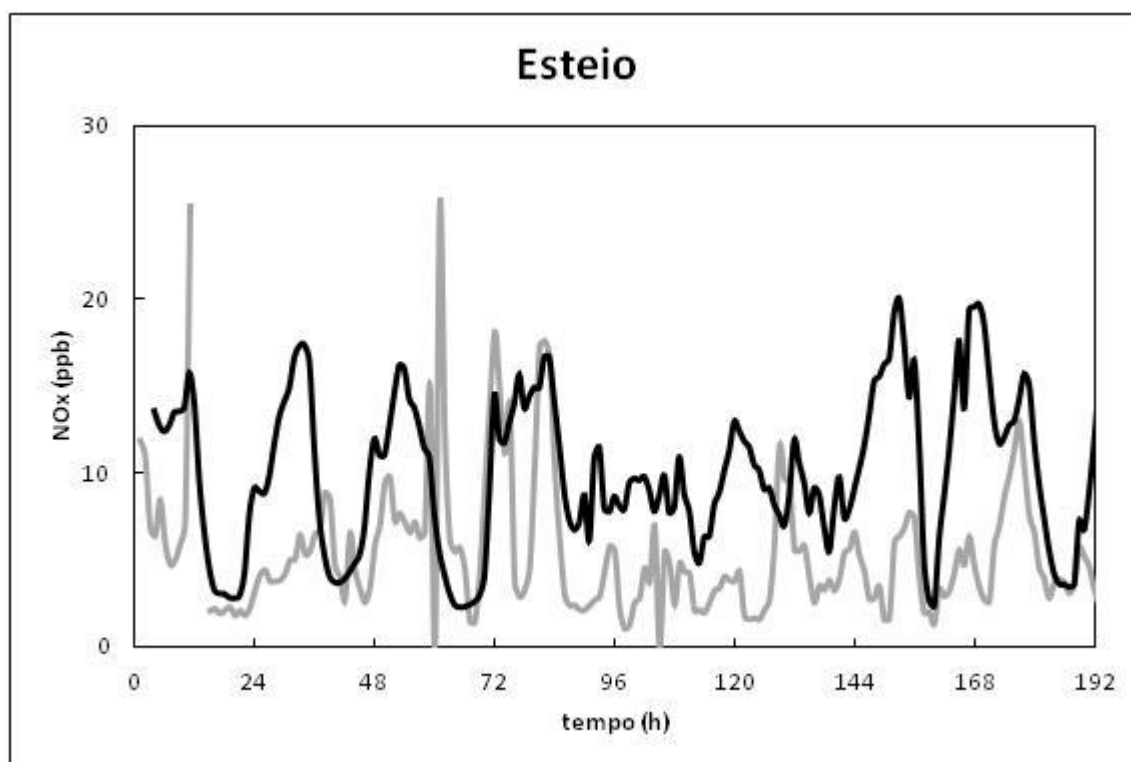


Figura 199 – Razão de mistura de óxidos de nitrogênio simulada pelo modelo WRF/Chem (preto) e observada (cinza) e na estação Esteio.

Na tab.10 está organizada a análise estatística das concentrações de  $O_3$ , CO,  $NO_x$  e HC simuladas pelo WRF/Chem, para as estações de Esteio e Porto Alegre (PA). Iniciando pelo índice de concordância (d), todos os poluentes considerados obtiveram bons resultados. Salienta-se que para o ozônio, mesmo que o modelo não tenha conseguido demonstrar uma amplitude razoável entre máximos e mínimos, os índices de concordância foram muito bons, sendo de 0,81 para Porto Alegre e 0,93 para Esteio. Dentre os três precursores do  $O_3$  estudados, o HC foi o que obteve melhores resultados para o índice de concordância, ou seja, 0,91. A correlação (R) para o ozônio apresentou resultados que não superaram 0,54. Para o CO,  $NO_x$  e HC, os valores de correlação não foram superiores a 0,37. Por fim, nas duas últimas colunas da tabela, pode-se ter uma noção quantitativa dos erros do modelo.

Tabela 10 – Análise estatística das concentrações de O<sub>3</sub>, CO, NO<sub>x</sub> e HC simuladas pelo WRF/Chem, para as estações de Esteio e Porto Alegre (PA).

		d		R		RMSE (ppb)	
Poluen- te	Dias de simula- ção	Esteio	PA	Esteio	PA	Esteio	PA
O <sub>3</sub>	7 dias	0,93	0,81	0,28	0,19	10,99	14,88
	4 dias	0,91	0,82	0,54	0,48	10,98	12,41
CO	7 dias	0,87	0,70	0,01	0,37	97,51	317,83
	4 dias	0,87	0,67	0,11	0,37	108,31	333,75
NO <sub>x</sub>	7 dias	0,83	X	0,26	X	6,81	X
	4 dias	0,85	X	0,34	X	6,15	X
HC	7 dias	X	0,92	X	0,36	X	3,78
	4 dias	X	0,95	X	0,36	X	4,22

## 6 Conclusões

Este estudo foi realizado em decorrência do aumento populacional em áreas urbanas, do crescimento industrial e pelo intenso tráfego de veículos, terem gerado um acréscimo nas emissões de poluentes atmosféricos, que ocasionam impactos sobre o meio ambiente e o meio vegetal nessas áreas, podendo ainda sofrer transporte em grande escala. Destaca-se como sendo uma das mais alarmantes consequências dessas emissões a formação do ozônio troposférico através de reações fotoquímicas. Logo este trabalho, como outros anteriores, teve como objetivo principal, analisar através de dados observados e com auxílio de modelos numéricos de previsão de tempo e química atmosférica, a emissão e dispersão dos principais precursores do ozônio ( $O_3$ ) em superfície sendo eles, o monóxido de carbono (CO), os óxidos de nitrogênio ( $NO+NO_2$ ) e os hidrocarbonetos (HC) em uma das regiões mais desenvolvidas do Brasil, a Região Metropolitana de Porto Alegre, localizada no Estado do Rio Grande do Sul.

As análises foram feitas em um período de 192 horas (de 5 a 12 de Janeiro de 2009), onde as condições meteorológicas nesses dias estiveram caracterizadas por duas condições distintas, para formação e destruição do  $O_3$ . Utilizaram-se simulações de dois modelos numéricos de previsão de tempo e qualidade do ar, o CCATT-BRAMS (*Coupled Chemistry Aerosol and Tracer Transport model to the Brazilian developments on the Regional Atmospheric Modeling System*) e WRF/Chem (*Weather Research and Forecasting model coupled with Chemistry*) para compreensão da formação, variação diurna, dispersão e destruição dos poluentes em escala local e regional e para ambos a mesma ferramenta de pré-processamento de emissões, o PREP-CHEM (*Preprocessor of trace gas and aerosol emission fields for regional and global atmospheric chemistry models*).

Em uma primeira etapa, foi realizada a avaliação de algumas variáveis meteorológicas simuladas, utilizando-se dados observados de duas estações na RMPA, uma instalada pela Fundação Estadual de Proteção Ambiental Henrique Luiz Roessler (FEPAM) na cidade de Esteio e a outra instalada pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) em Porto Alegre. Estas avaliações revelaram que os modelos simulam satisfatoriamente a evolução diurna da pressão, temperatura do ar e da velocidade do vento.

Em uma segunda etapa, foi realizada a inclusão de dados de emissões de espécies químicas específicas para RMPA, também a especificação dos HC feita por Cuchiara (2011) e o ciclo diurno específico para a RMPA, no PREP-CHEM. Esta informação foi preparada externamente, e a metodologia escolhida permitiu que os dados de emissão fossem gerados em um domínio de simulação georeferenciado para cada um dos 33 municípios que constituem a RMPA.

Por fim, em uma terceira etapa, foi analisada a capacidade dos modelos CCATT-BRAMS e WRF/Chem em simular a formação de  $O_3$  a partir da emissão dos precursores, através da comparação com dados observados de duas estações de qualidade do ar instaladas pela FEPAM a de Esteio, instalada no município de Esteio e a de Porto Alegre, localizada na Escola Superior de Educação Física/UFRGS (ESEF). Com relação aos dados ambientais observados nas estações da FEPAM analisadas:

O modelo CCATT-BRAMS simula o padrão de ciclo diurno de  $O_3$  e de seus precursores ( $CO$ ,  $HC$  e  $NO_x$ ), mostrando que a inclusão de dados estimados relativos ao ciclo diurno na rotina do modelo foi de fundamental importância no resultado final. Sendo que o modelo CCATT-BRAMS superestima os valores observados de  $O_3$  e  $HC$ . E subestima os valores observados de  $CO$ . Os melhores resultados foram vistos na simulação da razão de mistura de  $NO_x$ .

Em relação ao modelo WRF/Chem, quando comparados os resultados da simulação para o ozônio, o modelo obtém resultados mais próximos aos valores reais observados, mas não demonstra uma boa amplitude de variação do ciclo diurno do poluente. E para seus precursores ( $CO$ ,  $HC$  e  $NO_x$ ), o WRF/Chem realiza um cálculo também considerado satisfatório, principalmente em relação aos valores de  $HC$ .

Com base nos resultados, é possível concluir que entre os fatores que podem estar impedindo um melhor desempenho do modelo CCATT-BRAMS está a

especiação dos HC feita no PREP-CHEM. Acredita-se que a especiação não contemplou todas as espécies de HC do mecanismo RACM, fazendo com que os valores de O<sub>3</sub> fossem superestimados para RMPA. Já para o modelo WRF/Chem, salienta-se a necessidade de testes adicionais quanto ao uso do PREP-CHEM na preparação dos campos de emissões. Também se sugere investir na inserção de novos mecanismos químicos na ferramenta, como o RACM, por exemplo, (mesmo utilizado no PREP-CHEM para o CCATT-BRAMS). E em geral, os problemas encontrados nas comparações dos resultados dos dois modelos, estão nas incertezas com relação às estimativas das emissões a partir das fontes móveis. Tal fato acaba limitando o entendimento da relação entre emissões e razão de mistura de poluentes.

Um aspecto fundamental a ser considerado em pesquisas atmosféricas envolvendo a dispersão de poluentes é a preservação da saúde humana, ou seja, o desenvolvimento do conhecimento com vistas à aplicação em benefício da saúde e bem-estar do ser humano. Considerando o exposto, pode-se afirmar que o uso de uma ferramenta de simulação de dispersão de poluentes em meio atmosférico é bastante útil na medida em que permite fazer simulações e previsões das concentrações de um determinado poluente, podendo oferecer à população a oportunidade de evitar exposições a concentrações elevadas; às empresas, condições de prever investimentos em equipamentos que permitam reduzir emissões na atmosfera; e aos órgãos públicos, a possibilidade de realizar questionamentos acerca de novos empreendimentos, cujos efluentes atmosféricos contribuam para a degradação das condições de qualidade do ar.

Existe a certeza que os resultados terão grande repercussão, por uma série de fatores:

- Este trabalho é considerado pioneiro em relação a utilização de análises utilizando os dois modelos que são considerados o “estado-da-arte” na modelagem química atmosférica internacional.
- O estudo feito, pode auxiliar na futura implementação operacional no Centro de Pesquisas e Previsões Meteorológicas da Universidade Federal de Pelotas (CPPMet-UFPel) do modelo de qualidade do ar CCATT-BRAMS para o RS.
- É importante aprofundar o conhecimento da dinâmica da dispersão e do transporte de poluentes na atmosfera para a definição de estratégias de controle e a prevenção de acidentes ambientais;



- O impacto ocasionado pela poluição do ar sobre a saúde tem sido divulgado através de diversos estudos dentro e fora do país. Entre os sintomas mais comuns estão alergias, redução das funções pulmonares, asma, bronquite, envelhecimento precoce da pele, câncer, mutação genética. O monitoramento e a modelagem numérica da poluição do ar podem prever e atentar para possíveis riscos à saúde pública;
- A RMPA é formada por 33 municípios e tem aproximadamente 4 milhões de habitantes; toda esta população pode ser beneficiária deste projeto. O monitoramento e a modelagem numérica serão importantes como ferramentas de gestão da qualidade do ar na RMPA.
- Auxiliar no Plano de Controle de Poluição Veicular (PCPV), que prevê Inspeção Verde para despoluir ambiente. Lançado na Assembléia Legislativa dia 18 de novembro de 2010, o PCPV começou a ser implantado no Estado em janeiro de 2012. Este trabalho pode auxiliar no conhecimento das fontes e na importância delas. Seu principal destaque é a Inspeção Verde, prevista na Resolução 418/2009 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), que identifica veículos em desconformidade com os níveis de emissão de poluentes, ruídos e parâmetros de segurança estabelecidos pela Normativa 06/2010 do Instituto Nacional do Meio Ambiente e Recursos Naturais Renováveis (IBAMA). O Plano tem como base pesquisa recente que estimou em 532 mil toneladas o total de gases poluentes liberados pela frota gaúcha a cada ano, sendo 430 mil somente de monóxido de carbono. Os automóveis de passeio representam 64% da frota do RS, cujo crescimento, no patamar de 5% ao ano, tornará os índices do Estado críticos, exigindo desde já medidas preventivas de peso.

Finalizando, é sempre válido ressaltar que esta estimativa teórica procura aproximar-se da emissão de fato já que a emissão real de poluentes depende de diversos outros fatores que não foram levados em consideração. Sendo assim, a metodologia utilizada para avaliar a quantidade de poluentes emitidos é eficaz e pode ser utilizada como uma forma mais simples e rápida de se ter uma noção dos impactos que uma mudança na matriz energética poderá causar ao meio ambiente.

## Referências

- ABELSOHN, A.; STIED, D.; SANBORN, M.D.; WEIR, E. Identifying and managing adverse environmental health effects: 2. Outdoor air pollution. *Can. Med. Assoc. J.* 166:1.161-1.167,2002.
- ALONSO, M. F., Previsão do tempo químico para a América do Sul: Impacto relativo das emissões urbanas nas escalas local e regional. (Tese de Doutorado). Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE, 2011.
- ARYA, P. S. Air Pollution, Meteorology and Dispersion, Oxford University Press, New York, 1999.
- ATKINSON-PALOMBO, C.; MILLER,J.A.; BALLING JR.; ROBERT, C. QUANTIFYING the ozone " weekend effect " at various locations in Phoenix, Arizona. **Atmospheric Environment.**, n 40, p. 7644–7658, 2006.
- BENJAMIN, M.; SUDOL, M.; VORSATZ, D.; WINER, A. Low-emitting urban forest: a taxonomic methodology for assigning isoprene and monoterpenes emission rate. **Atmospheric Environment.**, n 30, p.1437-1452, 1996.
- BERKOWICZ R., WINTHER M., KETZEL M.. Traffic pollution modelling and emission data. **Environmental Modelling & Software.**, n 21, p. 454–460, 2006.
- BOIAN, C; ANDRADE, M.F.; Characterization of ozone transport among metropolitan regions. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.27, n.2, 229 - 242, 2012.
- BORREGO, C.; MONTEIRO A.; FERREIRA J.; MORAES M.R.; CARVALHO, A.; RIBEIRO L.; MIRANDA A.I.; MOREIRA, D.M.. Modelling the photochemical pollution over the metropolitan area of Porto Alegre, Brazil. **Atmospheric Environment.**, n.44, p.370-380, 2010.
- BUTLER, T.M.; LAWRENCE, M.G.; GURJAR, B.R.; VAN AARDENNE, J.; SCHULTZ, M.; LELIEVELD, J.. The representation of emissions from megacities in global emission inventories. **Atmospheric Environment.**, n 42, p. 703 – 719, 2008.
- CARVALHO, J.; ANFOSSI, D.; TRINI, CASTELLI S.; DEGRAZIA, G.. Transport and diffusion processes in the PBL over complex terrain using a model system: application to the TRACT experiment. **Atmospheric Environment.**, n 36, p. 1147-1161, 2002.

CENTRO DE PREVISÃO DE TEMPO E ESTUDOS CLIMÁTICOS (CPTEC/INPE). Disponível em: <http://www.cptec.inpe.br>. Acesso em: 20 de out. 2012.

CHANG, K.H.; CHEN, T.F.; HUANG, H. C.. Estimation of biogenic organic volatile organic compounds emissions in subtropical island. Taiwan. **Science of Total Environment**, n 346, p.184-199, 2005.

CUCHIARA, G.C.; Modelagem da poluição do ar por reações fotoquímicas associada à fontes veiculares na região metropolitana de Porto Alegre. Dissertação de Mestrado do PPGMET –UFPeI, 2011.

DALLAROSA, J.B.; TEIXEIRA, E.C.; ALVES, R.C.M.. Application of Numerical Models in the Formation of Ozone and its Precursors in Areas of Influence of Coal-Fired Power Station – Brazil. **Water Air Soil Pollut.**, n 178, p. 385-399. 2007.

DEPARTAMENTO ESTADUAL DE TRÂNSITO (DETRAN/RS). Disponível em: <http://www.detran.rs.gov.br>. Acesso em: 23 de set. 2012.

DERWENT, R.G.; JENKIN, M.E.; SAUNDERS, S.M.; PILLING, M.J.; SIMMONDS, P.G.; PASSANT, N.R.; DOLLARD, G.J.; DUMITREAN,P.; KENT, A.. Photochemical ozone formation in north west Europe and its control. **Atmospheric Environment**, n 37, p.1983. 2003.

EPA. Compilation of Air Pollutant Emission Factors, volume I, 5ªedição, AP-42, 1999.

FUNDAÇÃO ESTADUAL DE PROTEÇÃO AMBIENTAL HENRIQUE LUIZ ROESSLER – RS (FEPAM). Disponível em: <http://www.fepam.rs.gov.br>. Acesso em: 25 de ago. 2013.

FREITAS, E. D.; MARTINS, L. D.; DIAS, P. L. S.; ANDRADE, M. F.. A simple photochemical module implemented in RAMS for tropospheric ozone concentration forecast in the metropolitan area of São Paulo, Brazil: Coupling and validation. **Atmospheric Environment**, 39 6352–6361. 2005.

FREITAS, S. R.; LONGO, K. M.; CHATFIELD, R.; LATHAM, D.; SILVA DIAS, M. A. F.; ANDREAE, M. O. ; PRINS, E.; SANTOS J. C.; GIELOW R.; CARVALHO J. A. JR. Including the sub-grid scale plume rise of vegetation fires in low resolution atmospheric transport models. **Atmospheric Chemistry and Physics** ,n.7,p.3385-3398, 2007.

FREITAS, S. R.; LONGO, K. M.; SILVA DIAS, M. A. F.; CHATFIELD, R.; SILVA DIAS, P.; ARTAXO, P.; ANDREAE, M. O; GRELL, G.; RODRIGUES L. F.; FAZENDA, A.; PANETTA, J.. The Coupled Aerosol and Tracer Transport model to the Brazilian developments of the Regional Atmospheric Modeling System (CATT-BRAMS). Part 1: Model description and evaluation, **Atmos. Chem. Phys.**, n 9, p. 2843-2861, 2009.

FREITAS, S. R.; LONGO, K. M.; RODRIGUES, L. F.. Modelagem numérica da composição química da atmosfera e seus impactos no tempo, clima e qualidade do ar, **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 24, n.2, p. 188-207, 2009.

FREITAS, S. R.; LONGO, K. M.; ALONSO, M. F.; PIRRE, M., MARÉCAL, V., GRELL, G.; STOCKLER, R.; DA FONSECA, R.M.; SÁNCHEZ GÁCITA, M.. A pre-processor of trace gases and aerosols emission fields for regional and global atmospheric chemistry models, *Geosci. Model Dev.*, n 4, p. 419-433, doi:10.5194/gmd-4-419- 2011, 2011.

GENG, F.; ZHAO, C.; TANG, X.; LU, G.; TIE, X.. Analysis of ozone and VOCs measured in Shanghai: A case study. **Atmospheric Environment.**, n. 41, p. 989-1001, 2007.

GIODA, A; GIODA, F.R.. A influência da qualidade do ar nas doenças respiratórias. **Revista Saúde e Ambiente / Health and Environment Journal**, v. 7, n. 1,p. 15 -23; 2006.

GRELL, G.A.; PECKHAM, S.E.; SCHMITZ, R.; MCKEEN, S.A.; WILCZAK, J.; EDER, B. Fully coupled “online” chemistry within the WRF model. **Atmospheric Environment** n.39, p.6957–6975, 2005.

GUENTHER, A.B.; HEWITT, C.N.; ERICKSON, D.; FALL, R.; GERON, C.; GRAEDEL, T.; HARLEY, P.; KLINGER, L.; LERDAU, M.; MCKAY, W.A.; PIERCE, T.; SCHOLLES, B.; STEINBRECHER, R.; TALLAMRAJU, R.; TAYLOR, J.; ZIMMERMAN, P. A global model of natural volatile organic compound emissions. **Journal of Geophysical Research** , v.100, n.5, p.8873-8892, 1995.

GUENTHER, A.; KARL, T.; HARLEY, P.; WIEDINMER, C.; PALMER, P. I.; and GERON, C.. Estimates of global terrestrial isoprene emissions using MEGAN (Model of Emissions of Gases and Aerosols from Nature), **Atmos. Chem. Phys.**, n 6, p. 3181–3210, doi:10.5194/acp-6-3181-2006.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). Disponível em: <http://www.ibge.gov.br>. Acesso em: 28 out. 2012.

KAVOURAS, I.G.; MIHALOPOULOS, N.; STEPHANOU, E.G. Formation of atmospheric particles from organic acids produced by forests. **Nature**, v.395, p. 683-686, 1998.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA (INMET). Disponível em: <http://www.inmet.gov.br>. Acesso em: 04 de set. 2012.

JIANG, F.; WANG, T.; WANG, T.; XIE, M.; ZHAO, H. Numerical modeling of a continuous photochemical pollution episode in Hong Kong using WRF–chem. **Atmospheric Environment**, n 42, p. 8717–8727, 2008.

LAWRENCE, M.G., BUTLER, T.M., STEINKAMP, J., GURJAR, B.R. and LELIEVELD, J. Regional pollution potentials of megacities and other major population centers, **Atmos. Chem. Phys.**, n 7, p. 3969 – 3987, 2007.

LIN, C. A.; Pereira, L. A. A.; Braga, A. L. F.; Conceição, G. M. S.; Kishi, H. S.; Milani, R.. Association Between Air Pollution and Ischemic Cardiovascular Emergency Room Visits. *Env Res.*; 92:53-63, 2003.

LONGO, K. M. ; FREITAS, S. R. ; PIRRE, M. O. ; MARÉCAL, V. ; RODRIGUES, L. F. ; ALONSO, M. F.; FONSECA, R. M., SANCHEZ Gácita, M., STOCKLER R.. The Chemistry CATT-BRAMS model: a new tool for local and regional atmospheric chemistry modeling studies. Em fase de submissão para a Geosci. Model Dev, 2011.

MOREIRA, C.M.. Inventário de emissões biogênicas (COVB) com apoio em SIGA's . 2003. Dissertação (Mestrado) - Universidade de Aveiro, Aveiro, 2003.

LONGO, K. M.; FREITAS, S. R.; SETZER, A.; PRINS, E.; ARTAXO, P.; and ANDREAE, M. O.. The Coupled Aerosol and Tracer Transport model to the Brazilian developments on the Regional Atmospheric Modeling System (CATTBRAMS) – Part 2: Model sensitivity to the biomass burning inventories, **Atmos. Chem. Phys.**, Discuss., p. 8571–8595, doi:10.5194/acpd-7-8571-2007.

LONGO, K. M.; FREITAS, S. R.; ANDREAE, M. O.; SETZER, A.; PRINS, E.; ARTAXO, P.. The Coupled Aerosol and Tracer Transport model to the Brazilian developments on the Regional Atmospheric Modeling System (CATT-BRAMS) – Part 2: Model sensitivity to the biomass burning inventories. **Atmos. Chem. Phys.**, n 10, p. 5785–5795, doi:10.5194/acp-10-5785-2010, 2010.

LONGO, K. M.; FREITAS, S. R.; PIRRE, M.; MARECAL, V.; RODRIGUES, L. F.; PANETTA, J.; ALONSO, M. F.; ROSARIO, N. E.; MOREIRA, D. S.; GACITA, M. S.; ARTETA, J.; FONSECA, R.; STOCKLER, R.; KATSURAYAMA, D. M.; FAZENDA, A.; BELA, M.. The chemistry CATT–BRAMS model (CCATT–BRAMS 4.5): a regional atmospheric model system for integrated air quality and weather forecasting and research. Geosci. Model Dev. Discuss., 6, 1173–1222, 2013.

MOREIRA, C.M. Inventário de emissões biogênicas (COVB) com apoio em SIG's. 2003. Dissertação (Mestrado) - Universidade de Aveiro, Aveiro, 2003.

NETO, V.S.; SILVA, C.; MOREIRA, C.M.; MARQUES, M.C.. Inventário de emissões de compostos orgânicos voláteis biogênicos pela floresta de Trás-os-Montes e Alto Douro, Norte de Portugal. **Scientia. Forestalis**, Piracicaba, n. 76, p. 35-44, dez. 2007.

OLIVIER, J.G.J.; BERDOWSKI, J.J.M.. Global emissions sources and sinks. In: Berdowski, J., Guicherit, R. and B.J. Heij (eds.) "The Climate System", pp. 33-78. A.A. Balkema Publishers/Swets & Zeitlinger Publishers, Lisse, The Netherlands. [ISBN 90 5809 255 0](#). 2001.

PARRA, R.; GASSÓ, S.; BALDASANO, J. M. Estimating the biogenic emissions of non-methane volatile organic compounds from the North Western Mediterranean vegetation of Catalonia, Spain. **The Science of the Total Environment** , v.329, p.241-259, 2004.

PEUCH, V.H.; AMODEI, M.; BARTHET, T.; CATHALA, M.L.; JOSSE, B.; MICHOU, M.; SIMON, P.. MOCAGE, MOdèle de Chimie Atmosphérique à Grande Echelle, Proceedings of Météo-France workshop on atmospheric modelling, Toulouse, France, 33–36, December 1999.

PIO, C.A.; ALVES, C.A.; DUARTE, A.C. *Organic components of aerosols in a forest area of central Greece*. **Atmospheric Environment**, v.35, p.389-401, 2001.

PUDASAINEE, D.; SAPKOTA, B.; SHRESTHA, M. L.; KAGA, A.; KONDO, A.; INOUE, Y. Ground level ozone concentrations and its association with NO<sub>x</sub> and meteorological parameters in Kathmandu valley, Nepal. **Atmospheric Environment**. v.40, 8081– 8087.2006.

SALDIVA, P. H. N.; LICHTENFELS, A. J. F. C.; PAIVA, P. S. O.; BARONE, I. A.; MARTINS, M.A.; MASSAD, E.; PEREIRA, J. C. R.; XAVIER, V.P.; SINGER, J. M.; BOHM, G. M.. Association between air pollution and mortality due to respiratory diseases in children in São Paulo, Brazil: a preliminary report. **Environ. Research**, n 65, p. 218- 225, 1994.

SALDIVA, P. H. N.; POPE, C. A.; SCHWARTZ, J.; DOCKERY, D. W.; LICHTENFELS, A. J.; SALGE, J. M.; BARONE, I.; BOHM, G. M.. Air pollution and mortality in elderly People: a time-series study in São Paulo, Brazil. *Arch. Environ. Health*, n 50(2), p. 159-163, 1995.

SEINFELD, J.H.; PANDIS, S.N. **Atmospheric Chemistry and Physics**. From Air Pollution to Climate Changes. Wiley, New York 1998, 1326p.

SILLMAN, S., The relation between ozone, NO<sub>x</sub> and hydrocarbons in urban and polluted rural environments. Millenial Review series, **Atmospheric Environment**. v.33, n 12, p. 1821-1845, 1999.

STOCKWELL, W. R.; KIRCHNER, F.; KUHN, M.. A new mechanism for regional chemistry modeling, **J. Geophys. Res.**, 102, 25847–25879, 1997.

TAO, Z.; LARSON, S. M.; WILLIAMS, A.; CAUGHEY, M.; WUEBBLES, D. J.. Area, mobile, and point source contributions to ground level ozone : a summer simulation across the continental USA. **Atmospheric Environment**, n 39, p. 1869-1877, 2005.  
TIE, X.; BRASSEUR, G.; ZHAO, C.; GRANIER, C.; MASSIE, S.; QIN, Y.; WANG, P.C.; WANG, G.L.; YANG, P.C.. Chemical Characterization of Air Pollution in Eastern China and the Eastern United States. **Atmospheric Environment**., n. 40, p. 2607-2625, 2006.

TIE, X.; MADRONICH, S.; LI, G.; YING, Z.; ZHANG, R.; GARCIA, A.R.; LEE-TAYLOR, J.; LIU, Y.. Characterizations of chemical oxidants in Mexico City: A regional chemical dynamical model (WRF/Chem) study. **Atmospheric Environment**., n 41, p. 1989-2008, 2007.

TIE, X.; GENG, F.; PENG, L.; GAO, W.; ZHAO, C.. Measurement and modeling of O<sub>3</sub> variability in Shanghai, China: Application of the WRF/Chem model. **Atmospheric Environment**., p. 1-14, 2009.

TIE, X.; BRASSEUR, G.; YING, Z.. *Impact of model resolution on chemical ozone formation in Mexico City: application of the WRF/Chem model*. **Atmos. Chem. Phys.**, n 10, p. 8983–8995, 2010.



TSIGARIDIS, K.; KANAKIDOU, M.. Importance of volatile organic compounds photochemistry over a forested area in central Greece. **Atmospheric Environment**, v.36, p. 3137-3146, 2002.

UNIVERSIDADE DE WYOMING. Disponível em: <http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html>. Acesso em: 19 de out. 2012.

WILD, O.; AKIMOTO, H.. Intercontinental transport ozone and its precursors in a three-dimensional global CTM, **J. Geophys.**, n 27, p. 729-744, 2001.

WRF ARW Online Tutorial. Disponível em: <http://www.mmm.ucar.edu/wrf/OnLineTutorial/Basics/index.html>. Acesso em: 20 de jun. 2013.

YEVICH, R.; LOGAN, J. A.. *An assesment of biofuel use and burning of agricultural waste in the developing world*, Global Biogeochem. Cycles, 17(4), 1095, doi:10.1029/2002GB001952, 2003.

YOSHINO, A.; NAKASHIMA, Y.; MIYAZAKI, K.; KATO, S.; SUTHAWAREE, J.; SHIMO, N.; MATSUNAGA, S.; CHATANI, S.; APEL, E.; GREENBERG, J.; GUENTHER, A.; UENO, H.; SASAKI, H.; HOSHI, J.; YOKOTA, H.; ISHII, K.; KAJII, Y.. Air quality diagnosis from comprehensive observations of total OH reactivity and reactive trace species in urban central Tokyo. **Atmospheric Environment**, v 49 p.51 – 59, 2012.

## **Anexos**

## Anexo A – Cartas sinóticas de superfície.

Site da divisão do tempo do CPTEC/INPE:

<http://tempo.cptec.inpe.br>

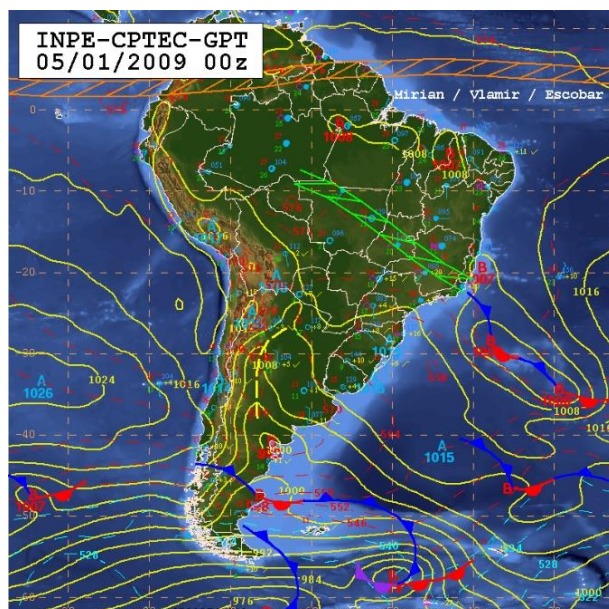


Figura A1 - Carta sinótica do dia 05 de janeiro às 00Z (21 HL).

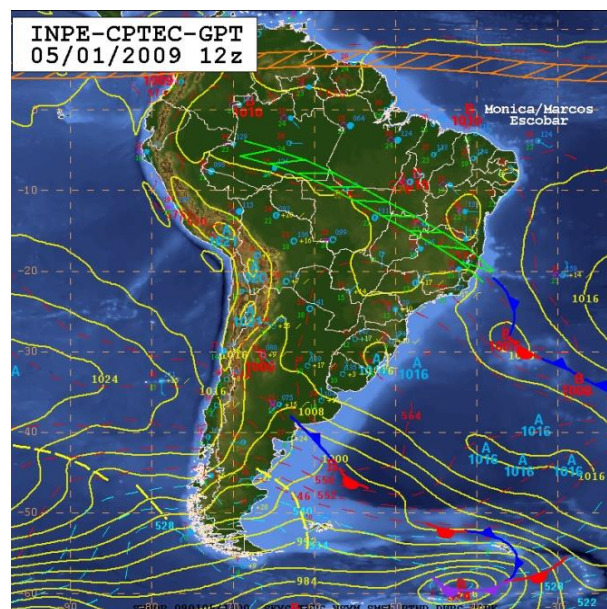


Figura A2 – Carta sinótica do dia 05 de janeiro às 12Z (09 HL).

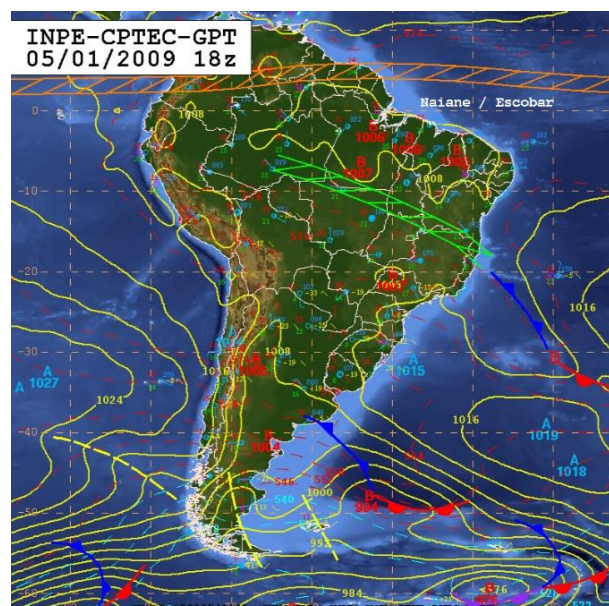


Figura A3 - Carta sinótica do dia 05 de janeiro às 18Z (15 HL).

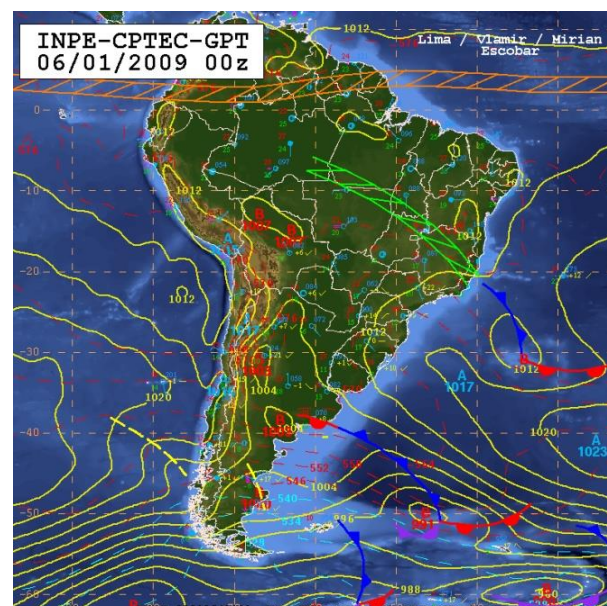


Figura A4 - Carta sinótica do dia 06 de janeiro às 00Z (21 HL).



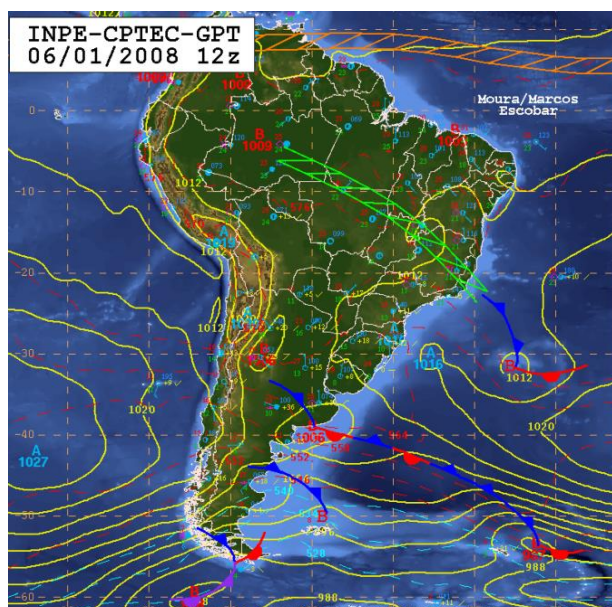


Figura A5 - Carta sinótica do dia 06 de janeiro às 12Z (09 HL).

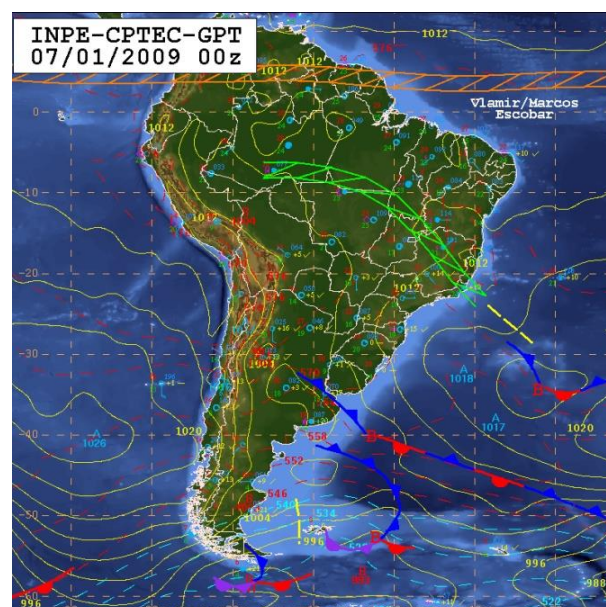


Figura A6 - Carta sinótica do dia 07 de janeiro às 00Z (21 HL).

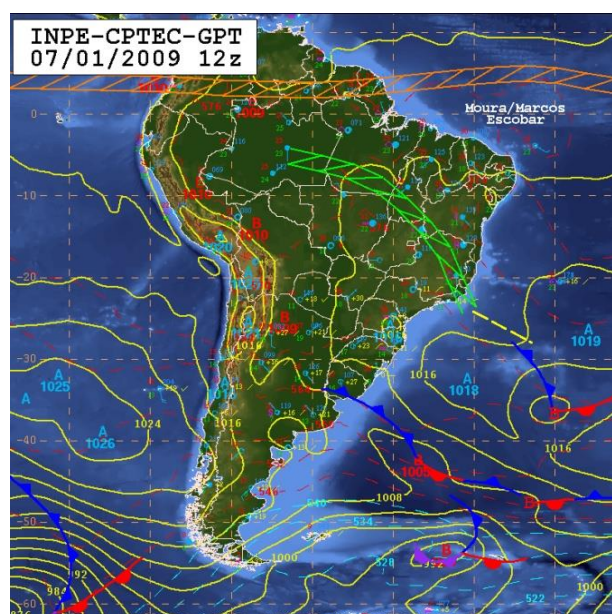


Figura A7 - Carta sinótica do dia 07 de janeiro às 12Z (09 HL).

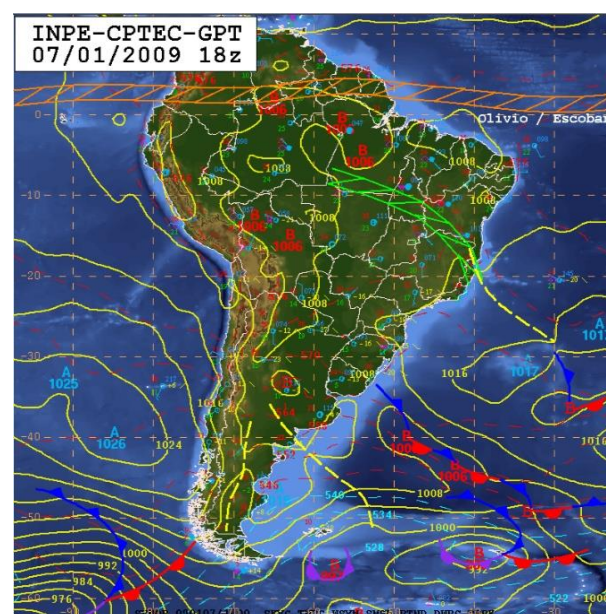


Figura A8 - Carta sinótica do dia 07 de janeiro às 18Z (15 HL).







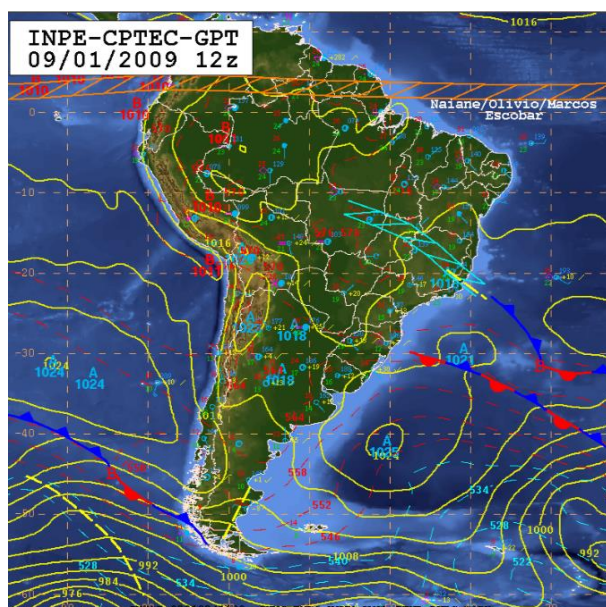


Figura A13 - Carta sinótica do dia 09 de janeiro às 12Z (09 HL).

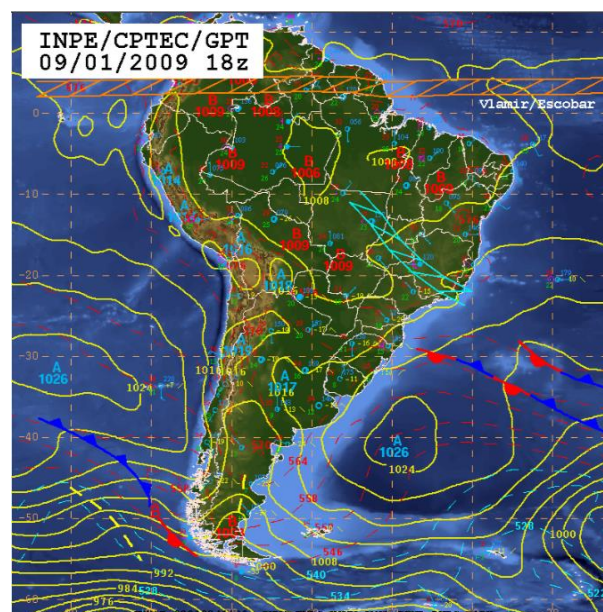


Figura A14 - Carta sinótica do dia 09 de janeiro às 18Z (15 HL).

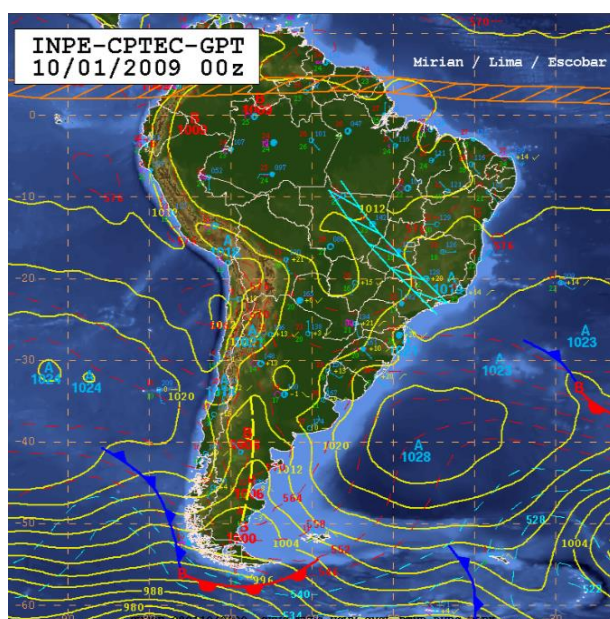


Figura A15 - Carta sinótica do dia 10 de janeiro às 00Z (21 HL).

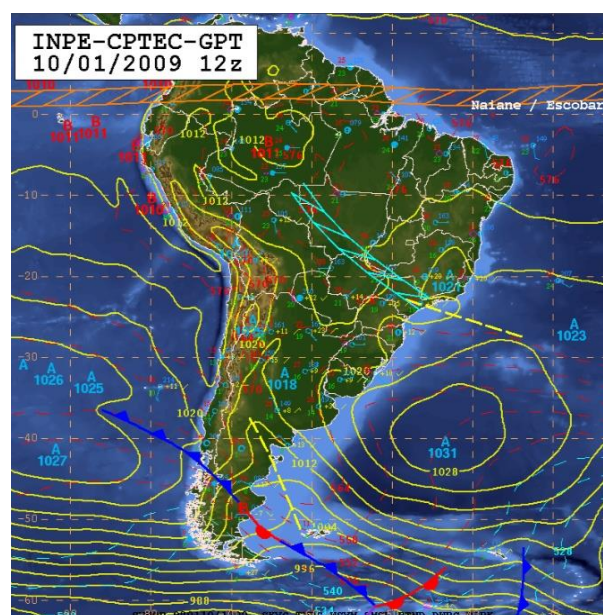


Figura A16 - Carta sinótica do dia 10 de janeiro às 12Z (09 HL).



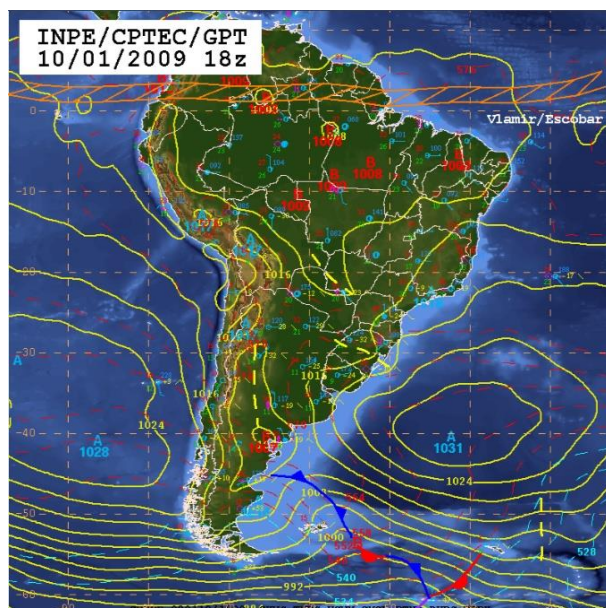


Figura A17 - Carta sinótica do dia 10 de janeiro às 18Z (15 HL).

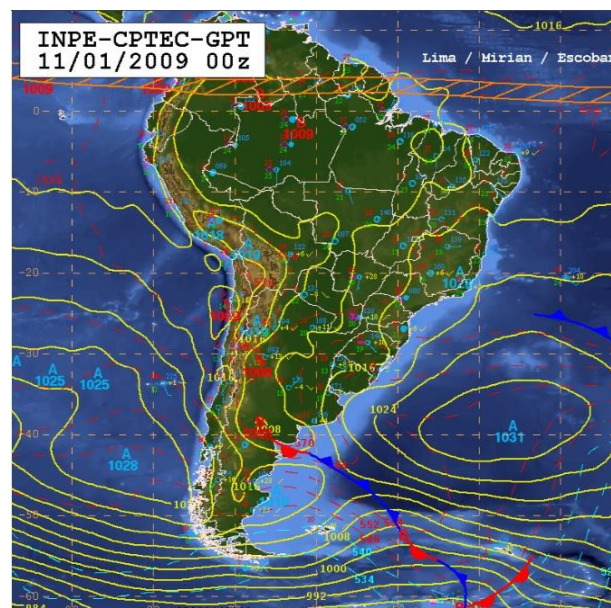


Figura A18 - Carta sinótica do dia 11 de janeiro às 00Z (21 HL).

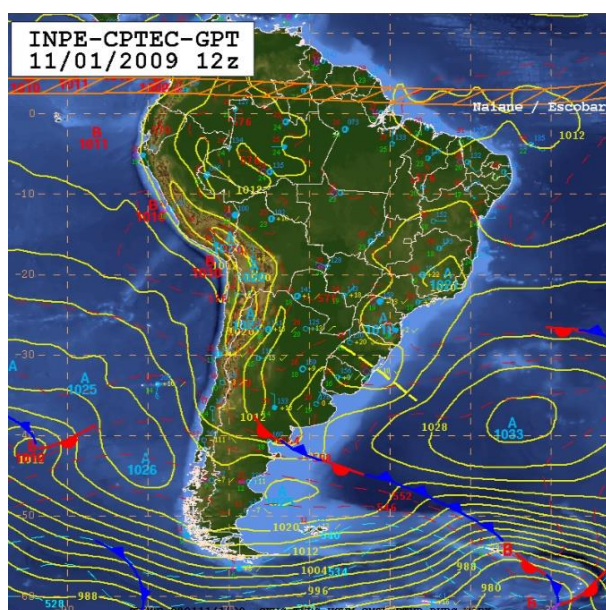


Figura A19 - Carta sinótica do dia 11 de janeiro às 12Z (09 HL).

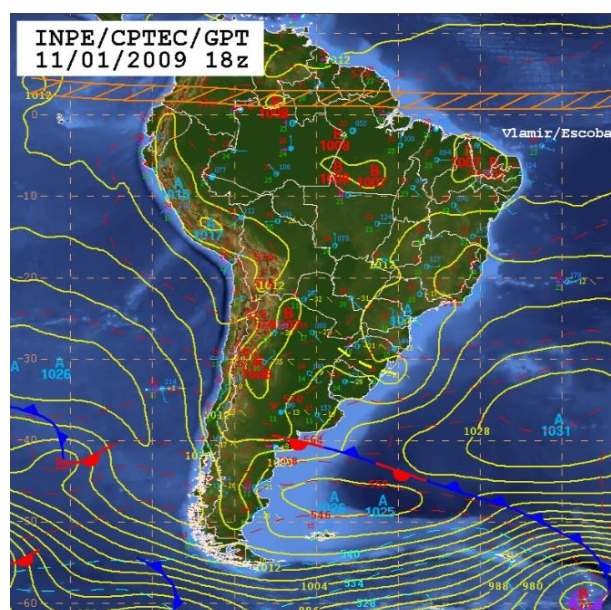


Figura A20 - Carta sinótica do dia 11 de janeiro às 18Z (15 HL).



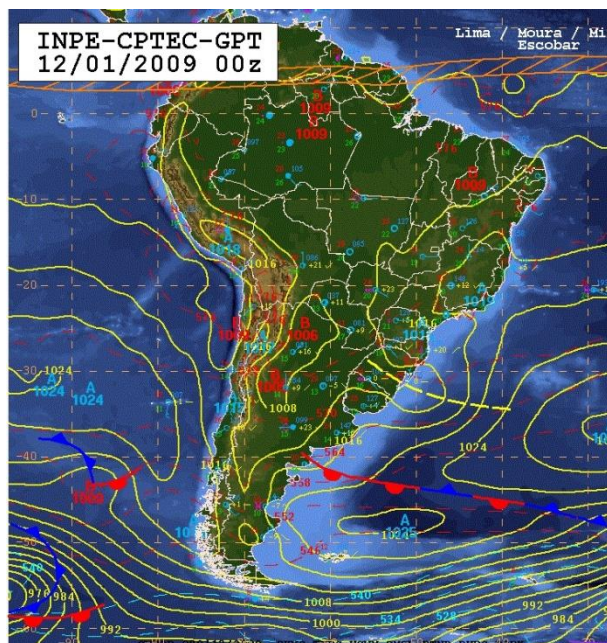


Figura A19 - Carta sinótica do dia 12 de janeiro às 00Z (21 HL).

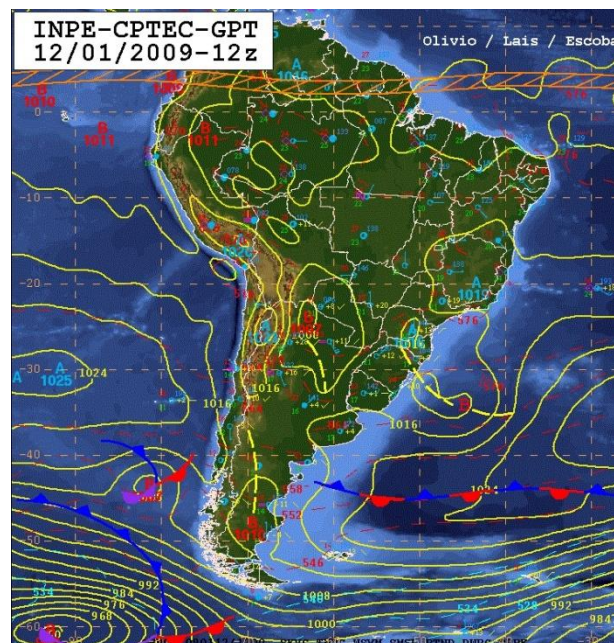


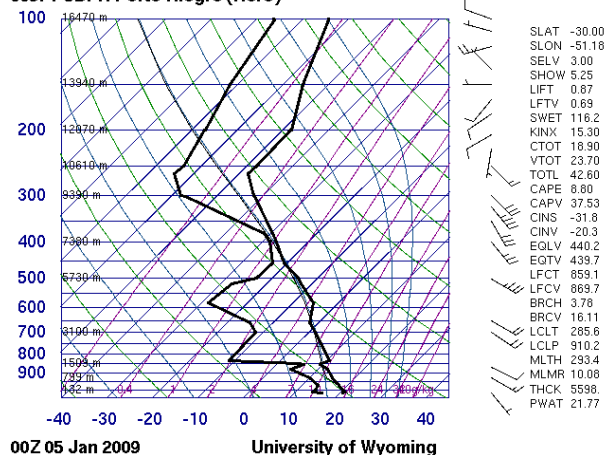
Figura A20 - Carta sinótica do dia 12 de janeiro às 12Z (09 HL).

## Anexo B – Radiosondagens.

Site da divisão Universidade de Wyoming:

<http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html>

83971 SBPA Porto Alegre (Aero)

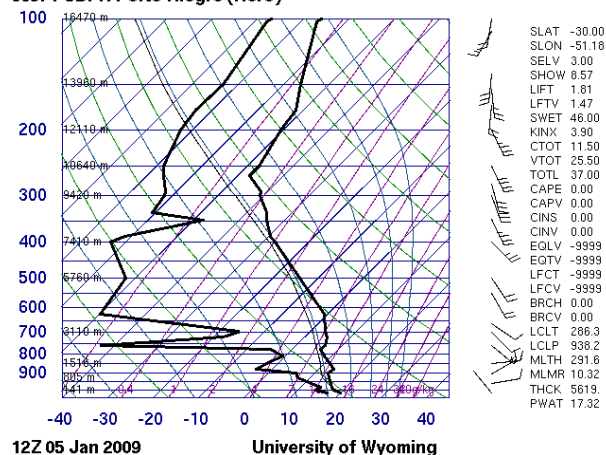


00Z 05 Jan 2009

University of Wyoming

Figura B1 - Radiossondagem do dia 05 de janeiro às 00Z (21 HL).

83971 SBPA Porto Alegre (Aero)

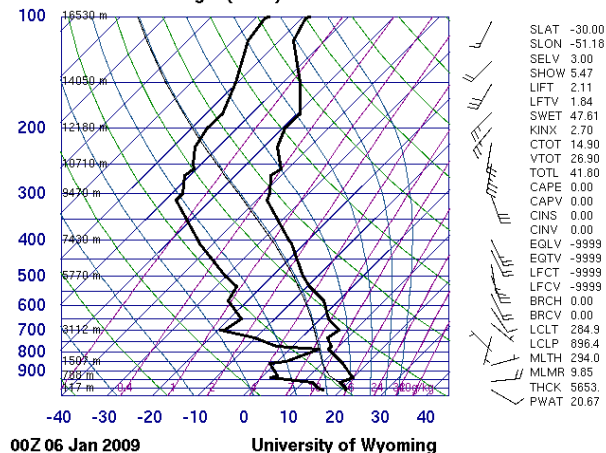


12Z 05 Jan 2009

University of Wyoming

Figura B2 – Radiossondagem do dia 05 de janeiro às 12Z (09 HL).

83971 SBPA Porto Alegre (Aero)

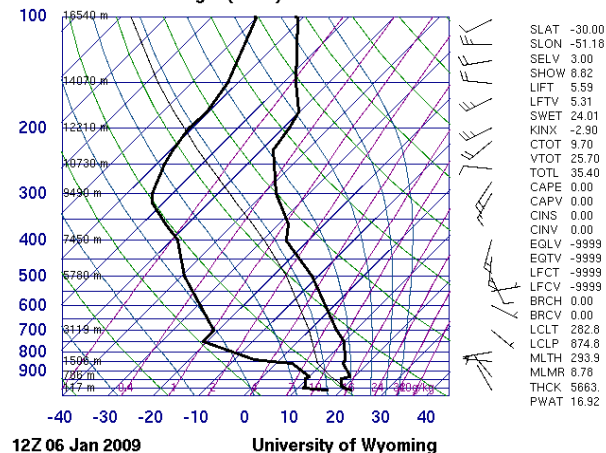


00Z 06 Jan 2009

University of Wyoming

Figura B3 - Radiossondagem do dia 06 de janeiro às 00Z (21 HL).

83971 SBPA Porto Alegre (Aero)



12Z 06 Jan 2009

University of Wyoming

Figura B4 - Radiossondagem do dia 06 de janeiro às 12Z (09 HL).

83971 SBPA Porto Alegre (Aero)

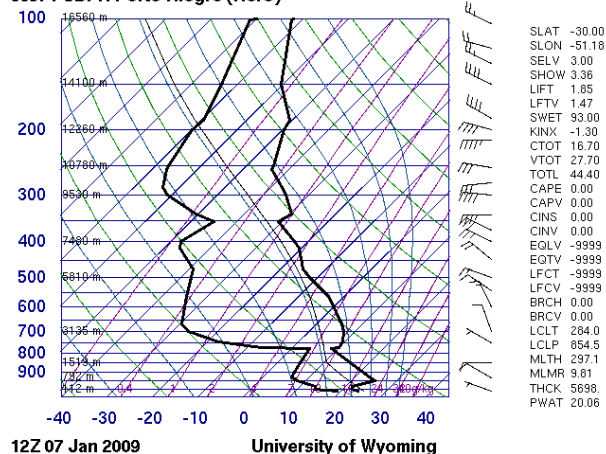


Figura B5 - Radiossondagem do dia 07 de janeiro às 12Z (09 HL).

83971 SBPA Porto Alegre (Aero)

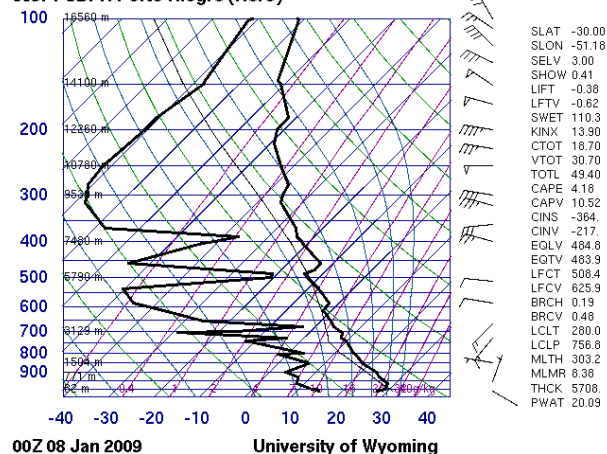


Figura B6 - Radiossondagem do dia 08 de janeiro às 00Z (21 HL).

83971 SBPA Porto Alegre (Aero)

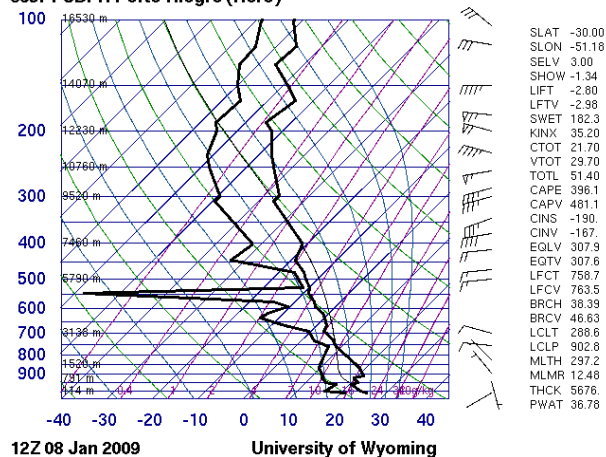


Figura B7 - Radiossondagem do dia 08 de janeiro às 12Z (09 HL).

83971 SBPA Porto Alegre (Aero)

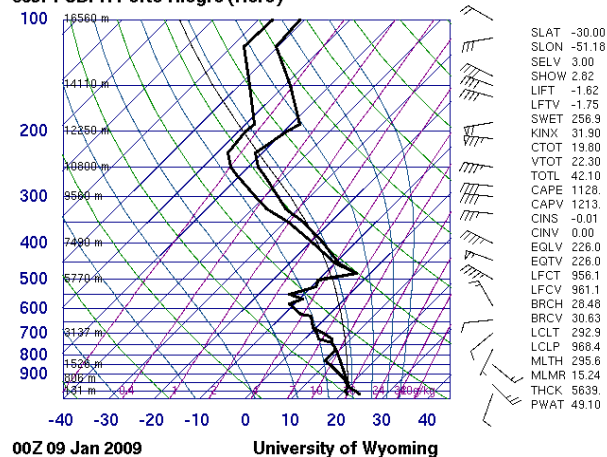


Figura B8 - Radiossondagem do dia 09 de janeiro às 00Z (21 HL).



83971 SBPA Porto Alegre (Aero)

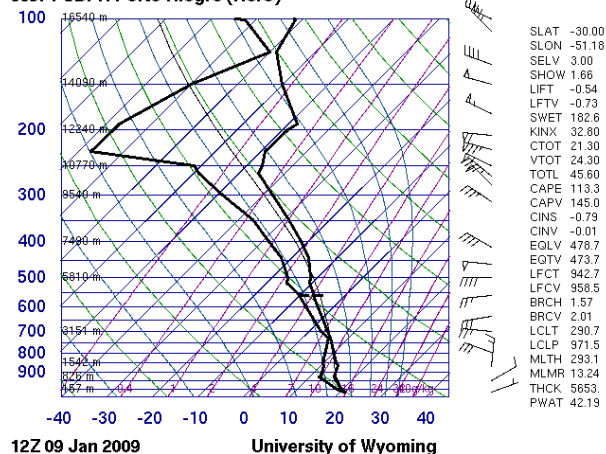


Figura B9 - Radiossondagem do dia 09 de janeiro às 12Z (09 HL).

83971 SBPA Porto Alegre (Aero)

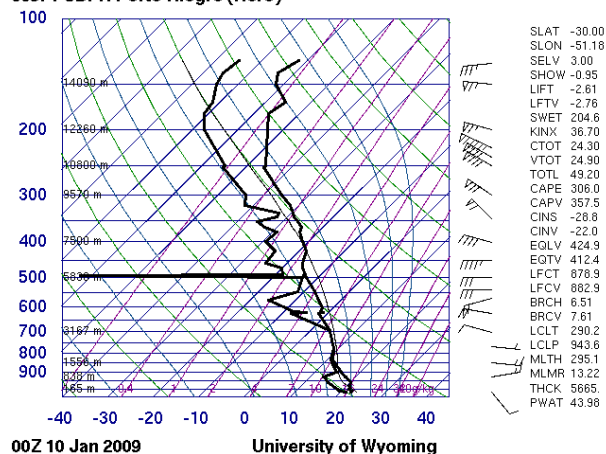


Figura B10 - Radiossondagem do dia 10 de janeiro às 00Z (21 HL).

83971 SBPA Porto Alegre (Aero)

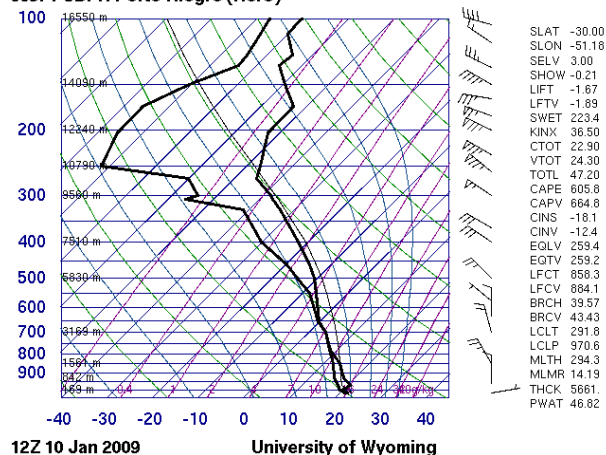


Figura B11 - Radiossondagem do dia 10 de janeiro às 12Z (09 HL).

83971 SBPA Porto Alegre (Aero)

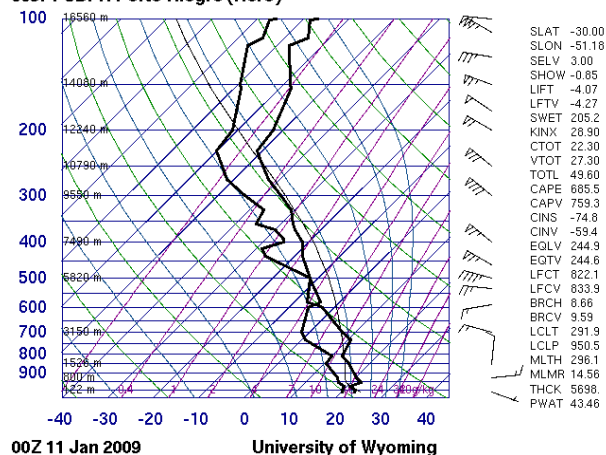


Figura B12 - Radiossondagem do dia 11 de janeiro às 00Z (21 HL).

83971 SBPA Porto Alegre (Aero)

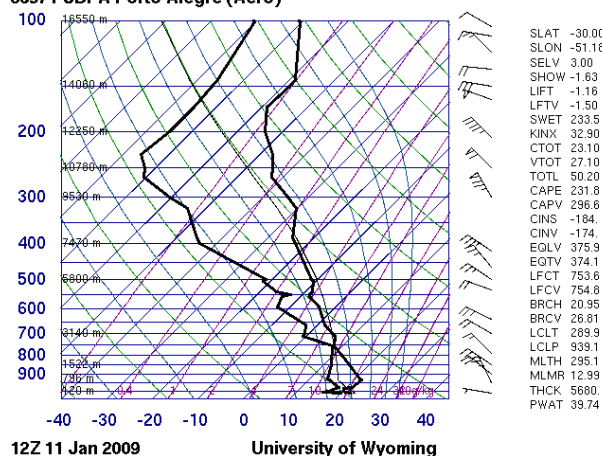


Figura B13 - Radiossonagem do dia 11 de janeiro às 12Z (09 HL).

83971 SBPA Porto Alegre (Aero)

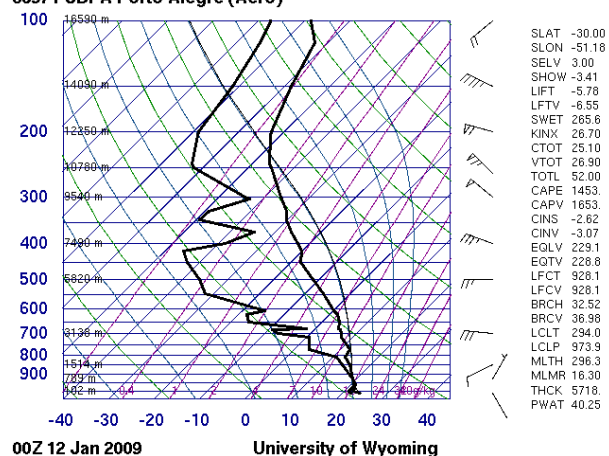


Figura B14 - Radiossonagem do dia 12 de janeiro às 00Z (21 HL).

83971 SBPA Porto Alegre (Aero)

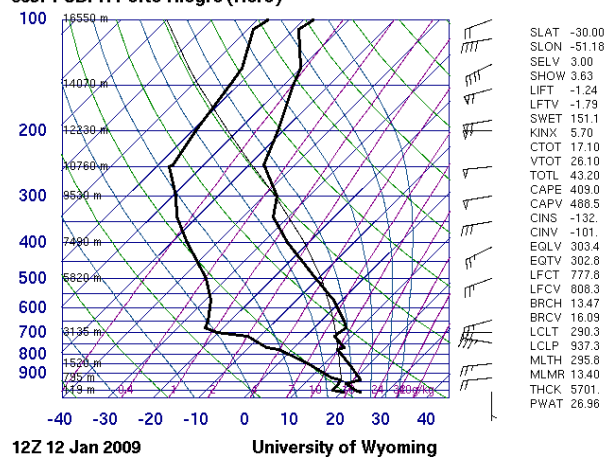


Figura B15 - Radiossonagem do dia 12 de janeiro às 12Z (09 HL).

## Anexo C – Imagens do satélite GOES 10.

Site da Divisão de Satélites e Sistemas Ambientais do

CPTEC/INPE: <http://satelite.cptec.inpe.br>

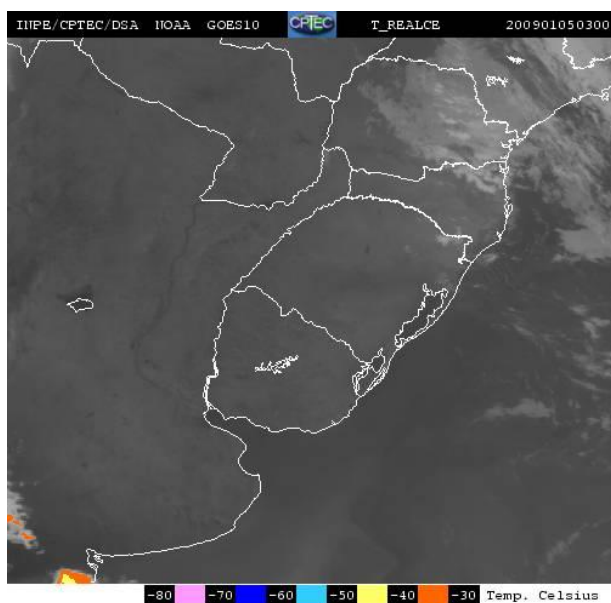


Figura C1 – Imagem de satélite do dia 05 de janeiro às 03Z (00 HL).

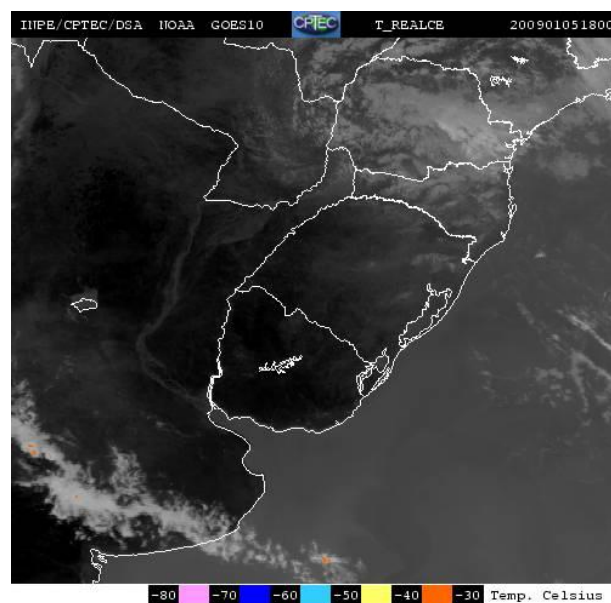


Figura C2 - Imagem de satélite do dia 05 de janeiro às 18Z (15 HL).

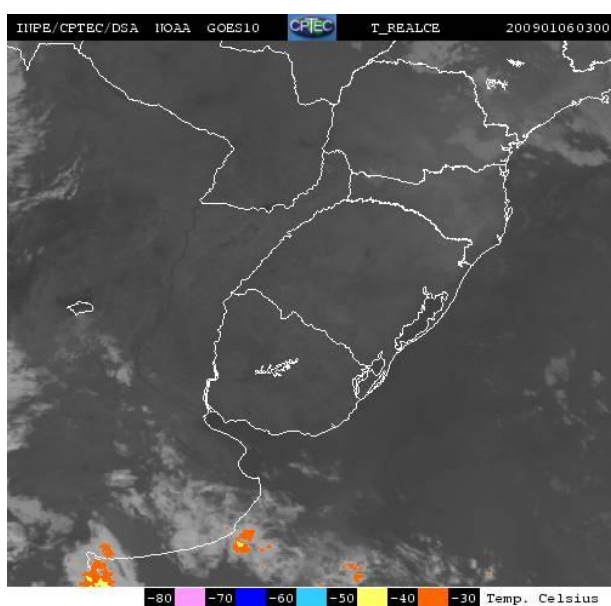


Figura C3 - Imagem de satélite do dia 06 de janeiro às 03Z (00 HL).

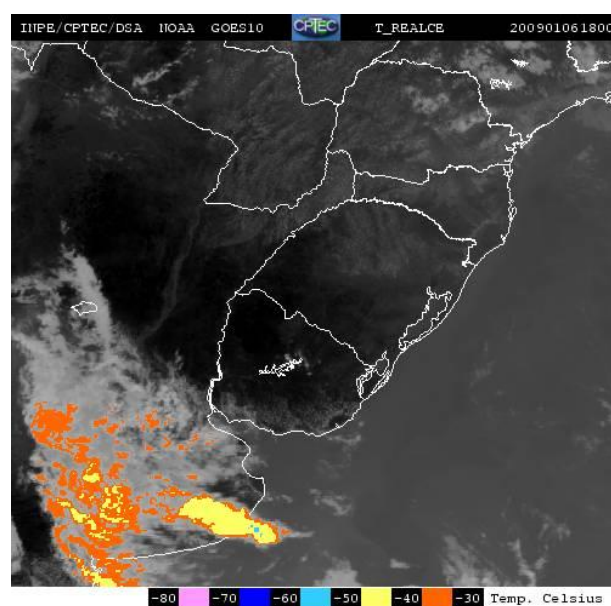


Figura C4 - Imagem de satélite do dia 06 de janeiro às 18Z (15 HL).

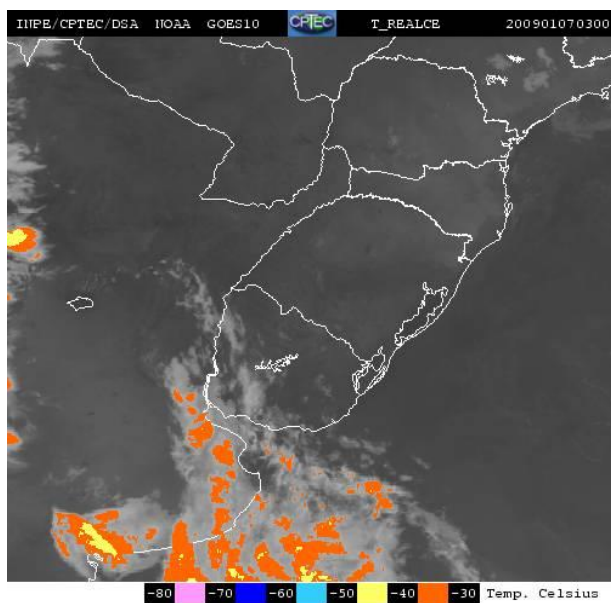


Figura C5 - Imagem de satélite do dia 07 de janeiro às 03Z (00 HL).

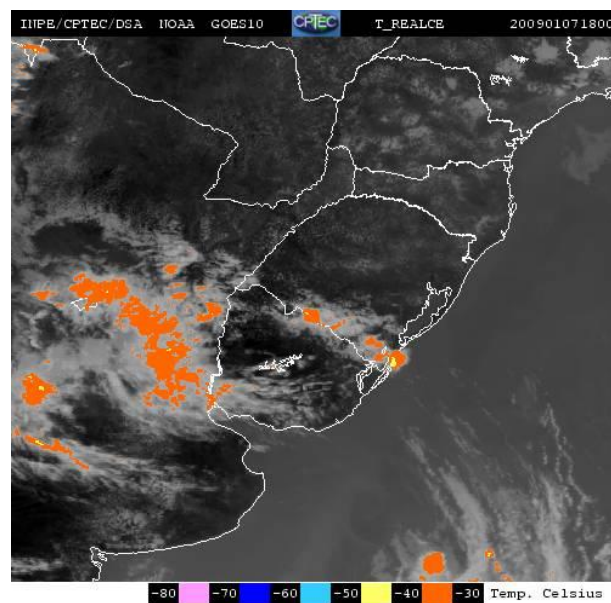


Figura C6 - Imagem de satélite do dia 07 de janeiro às 18Z (15 HL).

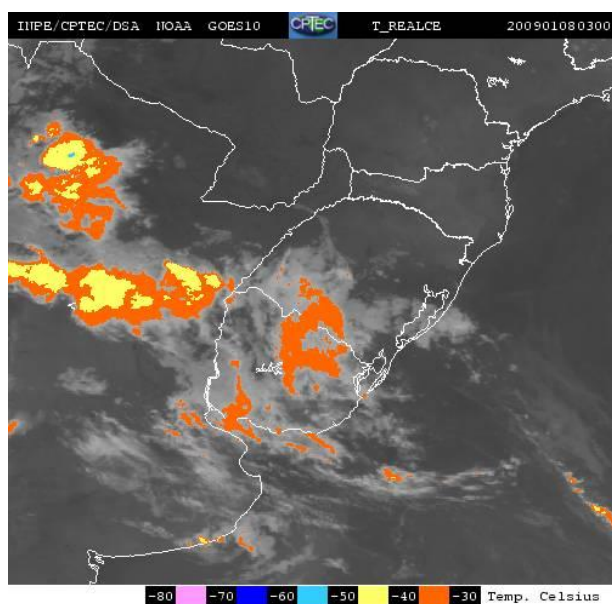


Figura C7 - Imagem de satélite do dia 08 de janeiro às 03Z (00 HL).

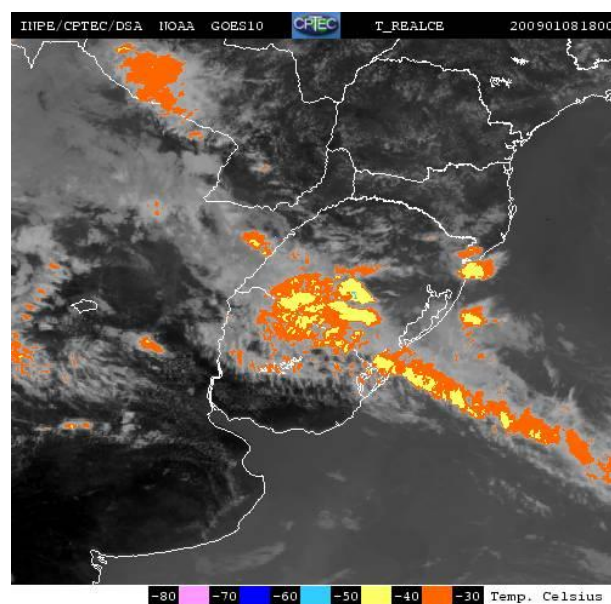


Figura C8 - Imagem de satélite do dia 08 de janeiro às 18Z (15 HL).



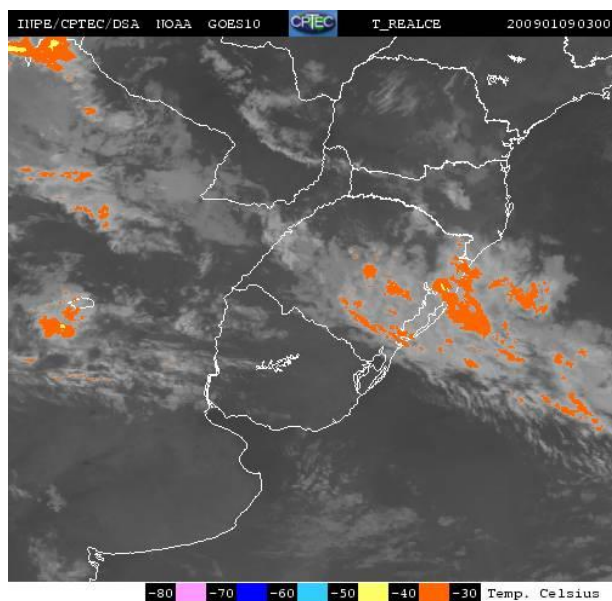


Figura C9 - Imagem de satélite do dia 09 de janeiro às 03Z (00 HL).

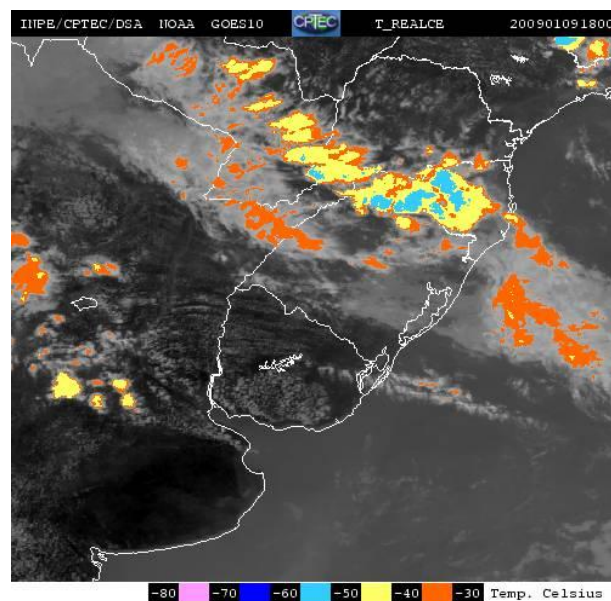


Figura C10 - Imagem de satélite do dia 09 de janeiro às 18Z (15 HL).

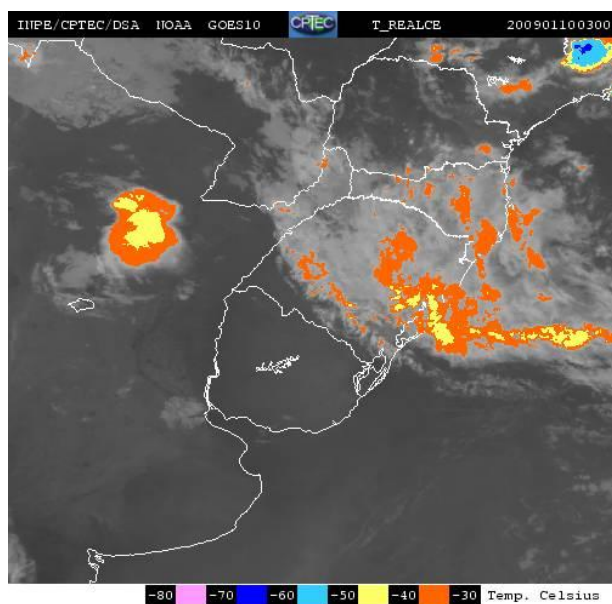


Figura C11 - Imagem de satélite do dia 10 de janeiro às 03Z (00 HL).

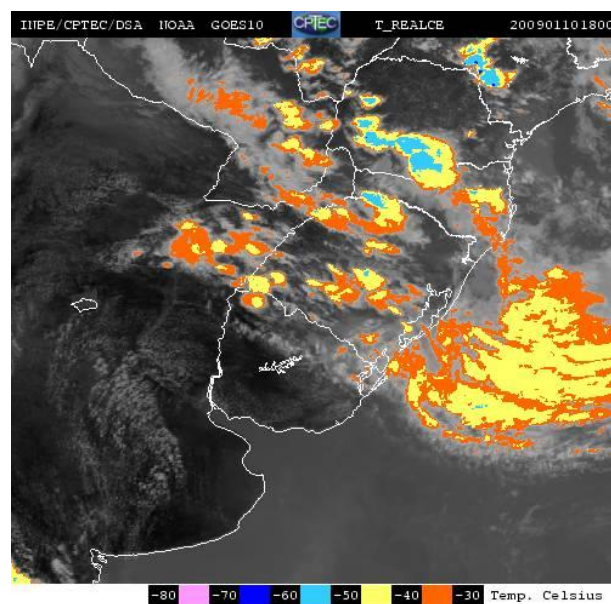


Figura C12 - Imagem de satélite do dia 10 de janeiro às 18Z (15 HL).



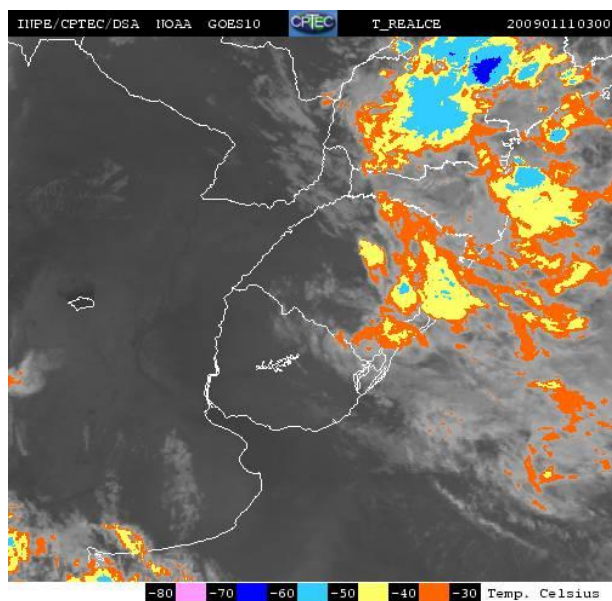


Figura C13 - Imagem de satélite do dia 11 de janeiro às 03Z (00 HL).

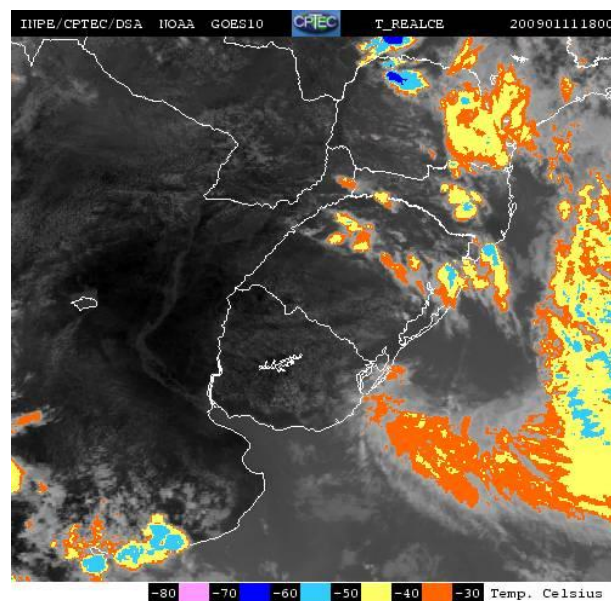


Figura C14 - Imagem de satélite do dia 11 de janeiro às 18Z (15 HL).

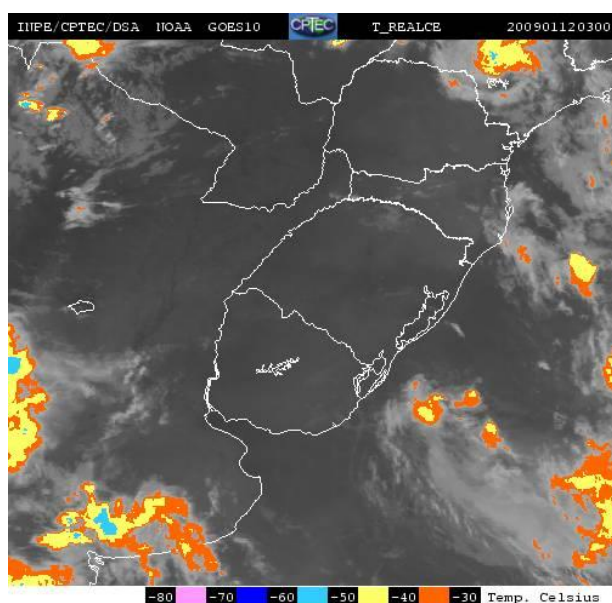


Figura C15 - Imagem de satélite do dia 12 de janeiro às 03Z (00 HL).

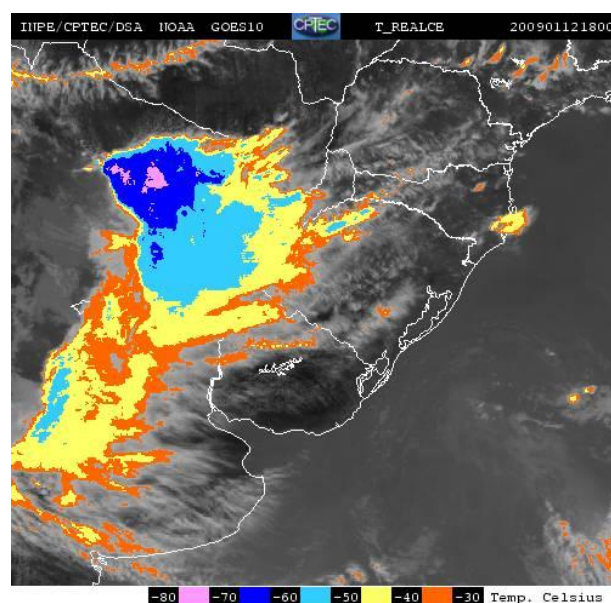


Figura C16 - Imagem de satélite do dia 12 de janeiro às 18Z (15 HL).