



**Universidade de São Paulo**  
**Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas**  
**Departamento de Ciências Atmosféricas**  
**Pós-Graduação em Meteorologia**

# **TESE DE DOUTORADO**

**IMPACTO DOS AEROSSÓIS ATMOSFÉRICOS NA FORMAÇÃO  
DE NUVENS E PRECIPITAÇÃO SOBRE A REGIÃO  
METROPOLITANA DE SÃO PAULO**

**Aluno: Marcio Gledson Lopes Oliveira**

**Orientadora: Prof.<sup>a</sup> Dra. Maria de Fátima Andrade**

**Co-orientador: Prof. Dr. Augusto José Pereira Filho**

**São Paulo, SP.  
Junho de 2012**

**Aos meus pais, Antônio e Fátima, e irmãos.**

## **AGRADECIMENTOS**

À professora e amiga Dra. Maria de Fátima Andrade, pela orientação, confiança, sabedoria passada durante todo o trabalho, e paciência.

A todos os professores do IAG que contribuíram direta ou indiretamente na minha formação.

A todos do LAPAt, em especial a Rosana, pela grande ajuda durante os experimentos, e aos amigos que de alguma forma contribuíram para a realização deste trabalho.

A todos os funcionários do IAG, em especial ao Samuel e Sebastião pelo suporte na informática.

À FAPESP pelo auxílio financeiro, tornando possível a realização deste trabalho.

À CAPES pelo auxílio financeiro, tornando possível a realização deste trabalho.

A todos os meus familiares, pais e irmãos, que sempre me apoiaram e incentivaram.

## RESUMO

Este trabalho teve como tema de estudo o impacto do aerossol atmosférico presente na Região Metropolitana de São Paulo (RMSP) na formação de nuvens e precipitação. São discutidas nesta tese questões relacionadas com a interação dos aerossóis atmosféricos e os processos microfísicos de formação da precipitação sobre a RMSP. Entre as questões abordadas estão o impacto das concentrações em massa de aerossóis de origem antropogênica para a formação da precipitação, e ainda os aspectos ligados com a topografia da região e a distribuição das precipitações e chuvas mais intensas. A metodologia proposta para a realização do projeto é dividida em duas componentes principais: amostragens do material particulado, e modelagem numérica da atmosfera. A segunda e principal componente do projeto é a modelagem numérica da atmosfera com o modelo *Weather Research and Forecasting model/Chemistry* - WRF/Chem. O WRF/Chem é um modelo numérico de previsão de tempo e de poluentes atmosféricos. Para a descrição do aerossol pelo WRF/Chem foi utilizado módulo MADE/SORGAM, que está acoplado com o módulo de microfísica de nuvens. As simulações contemplaram testes de sensibilidade que consideraram variações nos esquemas de microfísica, a inclusão do módulo de química, resolução da topografia e de concentração de material particulado. Os resultados indicaram que a concentração de material particulado tem um impacto na formação da precipitação, tanto no conteúdo total de água líquida, quanto de gelo e de posição do mínimo de temperatura da nuvem. Observou-se ainda que nas simulações com variações nas emissões de partículas houve uma diminuição na chuva total acumulada na área central da RMSP na medida em que se aumentavam as concentrações de partículas, foi observado que para os dias 01 e 02/01/2010 as altas concentrações de partículas contribuíram para a redução na quantidade total de chuva acumulada na RMSP.



## **ABSTRACT**

This project has the objective of studying the impact of the atmospheric aerosol present in the Metropolitan Area of São Paulo (MASP) in the formation of clouds and precipitation. Many different issues are discussed in this thesis related to the interaction of atmospheric aerosols and the microphysical processes of hydrometeor formation. Among the issues addressed are the impacts of the mass concentrations of aerosols for the formation of precipitation, and connected with the topography of the region and the distribution of rainfall over the MASP. The proposed methodology for the realization of the project is divided into two main components: sampling of the particulate matter, and numerical modeling of the atmosphere. The second and main component of the project is the numerical modeling of the atmosphere with the model Weather Research and Forecasting model/Chemistry - WRF/Chem. The WRF/Chem model is a numerical weather prediction and atmospheric pollutants. For the description of the aerosol in the WRF/Chem was used the MADE/SORGAM aerosol model, which is coupled with the cloud microphysics module. The results indicated that the concentration of particulate material has an impact on the formation of precipitation. It was observed that in the simulations with variations in particle emissions was observed a reduction in total accumulated precipitation in the central area of MASP, it was observed that for 01 and 02/01/2010 high concentrations of particles contributed to the reduction in the total amount of rain accumulated in the MASP.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Estimativa do balanço médio anual e global da energia na Terra. Fonte: IPCC (2007), AR4-WG1-capítulo 1.

Figura 2. a) Distribuição de tamanho para massa, b) evolução da distribuição de número de partículas, e c) distribuições médias de número de partículas considerando intervalos de 3 horas ao longo do dia 30 de agosto de 2005. Experimento realizado no IAG/USP no inverno e início da primavera de 2005. Fonte: Oliveira (2007).

Figura 3. Emissões relativas de poluentes por tipo de fonte na RMSP. Fonte: CETESB, 2009.

Figura 4. Diagrama esquemático mostrando os vários mecanismos radiativos associados com os efeitos dos aerossóis nas nuvens. Fonte: Adaptado do IPCC, 2007.

Figura 5. Curvas de Kohler para partículas de sulfato de amônio  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ .

Figura 6. Esquema de classificação dos efeitos dos aerossóis sobre a precipitação. Fonte: Adaptado de Khain, 2009.

Figura 7. Imagem de satélite (Landsat 7) destacando a RMSP no centro da figura (a esquerda) e uma foto da iluminação noturna da RMSP retirada da estação espacial internacional no dia 04/05/2003 (a direita).

Figura 8. A esquerda tem-se uma imagem na banda termal do satélite Landsat 7 (temperatura aparente da superfície para o dia 03/09/1999), no centro tem-se uma imagem do uso do solo (área urbanizada e com cobertura de vegetação), e a direita tem-se uma imagem dos diferentes climas encontrados (centrais e periféricos), todas as imagens, para o município de São Paulo. Fonte: Tarifa e Armani (2000).

Figura 9. Sistema  $\eta$  de coordenadas verticais.

Figura 10. Grade horizontal (esquerda) e vertical (direita) do tipo C de Arakawa.

Figura 11. Exemplo de possíveis aninhamentos de grades no WRF, grades telescópicas (a esquerda) e grades com o mesmo nível com relação à grade “mãe” (a direita).

Figura 12. Grades aninhadas do tipo C.

Figura 13. Esquema de funcionamento do módulo MADE/SORGAM.

Figura 14. Modas utilizadas pelo modelo MADE.

Figura 15. Exemplo de emissões de monóxido de carbono em São Paulo (esquerda) e concentrações de NCN na supersaturação de 0,1% simulados pelo WRF/Chem para o mesmo intervalo (direita), e ambos para o dia 03/01/2008.

Figura 16. Fluxograma indicando a utilização do programa ndown.exe para a realização de *downscaling* (1-way) no WRF/Chem. Fonte: Manual do WRF.

Figura 17. Valores máximos absolutos para a precipitação mensal e o respectivo ano de sua ocorrência medidos na estação meteorológica do IAG/USP, durante o período de 1933 a 2008. Fonte: Boletim Climatológico, 2008, IAG/USP.

Figura 18. Precipitação acumulada durante o trimestre DJF ao longo de toda a série (1934-2012) parte superior da figura, e número de dias de chuva no trimestre DJF ao longo de toda a série (1934-2012), parte inferior da figura. Fonte: Boletim climatológico DJF da EM-IAG-USP, 2011/2012.

Figura 19. Anomalias de temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ ) da superfície do mar (TSM) medidas por satélite para 7 e 21 de janeiro de 2010 (esquerda e direita, respectivamente). Fonte: NOAA/NESDIS.

Figura 20. Variação horária (UTC) da chuva acumulada (esquerda) e Frequência horária de ocorrência de eventos de chuva (direita) no mês de janeiro de 2010 na estação meteorológica do IAG/USP.

Figura 21. Imagem da RMSP com localização das estações meteorológicas do INMET e IAG/USP. Fonte: Google.

Figura 22. Variação horária (UTC) da umidade relativa nas estações meteorológicas do IAG e INMET para 02, 08, 11, 18, 21 e 28 de janeiro de 2010.

Figura 23. Variação horária (UTC) da temperatura do ar nas estações meteorológicas do IAG e INMET para 02, 08, 11, 18, 21 e 28 de janeiro de 2010.

Figura 24. Variação horária (UTC) da chuva (mm) nas estações meteorológicas do IAG e INMET para 02, 08, 11, 18, 21 e 28 de janeiro de 2010.

Figura 25. Variação horária da concentração de  $\text{PM}_{10}$  ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) para o dia 02 de janeiro de 2010 medidas por estações de monitoramento da CETESB.

Figura 26. Médias horárias da concentração de  $\text{PM}_{10}$  ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) para o mês de janeiro de 2010 para sete estações de monitoramento automático da CETESB. Fonte: CETESB.

Figura 27. Gráficos de dispersão entre o CO e concentrações de partículas (à esquerda) e  $\text{NO}_x$  (à direita), os diâmetros estão aumentando de cima para baixo na página.

Figura 28. Evolução espectral horária da concentração em número de partículas na RMSP.

Figura 29. Comparação entre os valores observados de temperatura, umidade relativa e velocidade do vento para as estações do INMET (esquerda) e IAG (direita) e os valores simulados pelo modelo WRF/Chem para 01 e 02 de janeiro de 2010.

Figura 30. Comparação da chuva observada com a simulada pelo WRF/Chem (somente meteorologia) para as estações do IAG (à esquerda) e INMET (à direita) e para o dia 02 de janeiro de 2010.

Figura 31. Chuva acumulada observada: (a) Estação do IAG; (b) Estação do INMET; simulações com o WRF/Chem para 02 de janeiro de 2010 nas estações do IAG (c) e

INMET (d) considerando a parametrização urbana ligada. Na parte (e) e (f) da Figura apresentam-se os resultados para as simulações com a parametrização urbana desligada, para o IAG e o INMET, respectivamente.

Figura 32. Diferença na precipitação das simulações com e sem a parametrização urbana e com o efeito radiativo dos aerossóis “desligado” (a) e diferença na precipitação das simulações com e sem a parametrização urbana e com o efeito radiativo dos aerossóis “ligado” (b).

Figura 33. Diferença na precipitação das simulações sem e com o efeito radiativo dos aerossóis e a parametrização urbana “ligada” (à esquerda) e diferença na precipitação das simulações com e sem o efeito radiativo dos aerossóis e a parametrização urbana “desligada” (à direita).

Figura 34. Corte vertical da atmosfera na direção Leste-Oeste e sobre a RMSP mostrando a comparação da chuva produzida pela parametrização de microfísica de nuvens (g/kg) para simulações com opção de *1-way* (à esquerda) e *2-way nesting* (à direita) para alguns horários do dia 02 de janeiro de 2010 (18Z, 18:30Z, 19Z, 19:30Z, 20Z, 20:30Z).

Figura 35. Max CAPPI medido pelo radar MXPOL do IAG/USP para o dia 02 de janeiro de 2010 das 18 e das 19:30Z.

Figura 36. Corte vertical da atmosfera na direção Norte-Sul e sobre a RMSP mostrando a comparação da chuva produzida considerando a parametrização de microfísica de nuvens (g/kg) para simulações sem química acoplada (à esquerda) e com química (à direita) para os horários 17Z, 17:30Z, 18Z, 18:30Z, 19Z, 19:30Z, 20Z, 20:30Z.

Figura 37. Resultados das comparações entre simulações com ambiente limpo (esquerda) e poluído (direita),  $PM_{2.5}$  (a e b) e chuva total acumulada (c e d) respectivamente e para os dias 01 e 02 de janeiro de 2010.

Figura 38. Chuva resolvida pelo esquema de microfísica de nuvens (em mm) para as simulações com ambiente limpo (figura a) e poluído (figura b) e simulação sem química (figura c) acumulada as 23Z de 02 de janeiro de 2010.

Figura 39. Chuva total calculada pela microfísica de nuvens e acumulada durante todo o período de simulação (01 e 02 de janeiro de 2010) apresentada para simulações com química (limpo e poluído) e sem química para o centro da grade e nas direções Leste-Oeste e Norte-Sul.

Figura 40. Comparação da chuva observada na estação do IAG no bairro da Água Funda (à esquerda) e na estação do INMET em Santana (à direita) com a chuva simulada pelo modelo WRF/chem para as condições de ambiente limpo e poluído no dia 02 de janeiro de 2010.

Figura 41. Imagens de topografia geradas com dados do SRTM para área da RMSP e regiões vizinhas (a RMSP encontra-se na área central das figuras).

Figura 42. Topografia (elevação em metros) utilizada no modelo WRF/Chem com dados do USGS (à esquerda) e com dados do SRTM (à direita) representando a área da RMSP no centro das figuras.

Figura 43. Comparações entre os valores de temperatura e umidade relativa medidos nas estações do IAG (Água Funda) e INMET (Santana) e simulados com o WRF para o intervalo das 16 às 24Z de 02/01/10.

Figura 44. Diferença (em metros) da topografia utilizada nas simulações com dados do SRTM menos topografia com dados do USGS (esquerda), e diferença (em °C) da temperatura média de 24h (direita) entre as duas simulações (SRTM-USGS).

Figura 45. Diferenças na umidade relativa (em %, à esquerda) e chuva total acumulada (em mm, à direita) para simulações com dados do SRTM e USGS (SRTM-USGS).

Figura 46. Corte vertical da atmosfera na direção Leste-Oeste e sobre a RMSP mostrando a comparação da chuva produzida pela parametrização de microfísica de nuvens (g/kg) para simulações com química acoplada e utilizando topografia do SRTM para ambiente limpo (à esquerda) e poluído (à direita) para diferentes horários (17Z, 17:30Z, 18Z, 18:30Z, 19Z, 19:30Z, 20Z e 20:30Z).

Figura 47. Concentrações de  $PM_{2.5}$  ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) às 19Z do dia 02/01/2010 para quatro diferentes taxas de emissões: 0,1PM (a), 1PM (b), 10PM (c), e 20PM (d).

Figura 48. Variação na concentração de  $PM_{2.5}$  ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) para as quatro diferentes taxas de emissões e durante o dia 02/01/2010 para o ponto correspondente à estação do INMET.

Figura 49. Da esquerda para direita e de cima para baixo: Simulações da precipitação com alterações nas emissões de 0,1PM (a), 1PM (b), 10PM (c), e 20PM (d), (chuva acumulada nos dias 01 e 02/01/2010).

Figura 50. Perfil vertical das variáveis microfísicas para as quatro diferentes taxas de emissões de partículas as 19Z, e para o ponto: Lat -23.59; Lon -46.77.

Figura 51. Perfil vertical das variáveis microfísicas para as quatro diferentes taxas de emissões de partículas as 17:30Z, e para o ponto: Lat -23.60; Lon -46.40.

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Correlações entre CO e NO<sub>x</sub> com as concentrações em número de partículas em diferentes faixas de tamanho.

Tabela 2. Opções de configurações utilizadas nas simulações com o WRF/Chem.

Tabela 3. Tabela descritiva dos códigos utilizados para a identificação dos testes de sensibilidade realizados.

## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA
  - 2.1 AEROSSÓIS ATMOSFÉRICOS
    - 2.1.1 O aerossol atmosférico da RMSP
    - 2.1.2 Efeitos dos aerossóis no clima
  - 2.2 ATIVAÇÃO DE NÚCLEOS DE CONDENSAÇÃO DE NUVENS (NCN)
    - 2.2.1 Equações para o crescimento de gotículas
  - 2.3 INTERAÇÃO AEROSSOL-NUVEM-PRECIPITAÇÃO
    - 2.3.1 Propriedades físico-químicas da interação aerossol-nuvem
    - 2.3.2 Efeitos dos aerossóis urbanos na precipitação
    - 2.3.3 O estado atual sobre o entendimento da interação aerossol-nuvem-precipitação
  - 2.4 OBJETIVOS
3. METODOLOGIA
  - 3.1 Área de estudo
  - 3.2 Período de estudo
  - 3.3 Dados utilizados
  - 3.4 O modelo WRF – *Weather Research and Forecasting*
    - 3.4.1 Coordenada vertical
    - 3.4.2 Equações governantes
    - 3.4.3 Discretização temporal
    - 3.4.4 Discretização espacial
    - 3.4.5 Aninhamento de grades
    - 3.4.6 O WRF/Chem
    - 3.4.7 Parametrizações utilizadas nas simulações
  - 3.5 Inventário de emissões utilizado nas simulações
  - 3.6 Metodologia para as simulações com química acoplada
4. RESULTADOS EXPERIMENTAIS
  - 4.1 Resultados para as correlações entre partículas e emissões veiculares na RMSP.
  - 4.2 RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES NUMÉRICAS
    - 4.2.1 Validação das simulações meteorológicas com o WRF/Chem e dados observados
    - 4.2.2 Resultados dos testes de sensibilidade para as simulações com o WRF/Chem
    - 4.2.3 Resultados das comparações entre as simulações e as imagens de RADAR
    - 4.2.4 Comparações entre resultados de simulações com módulo de química e sem química acoplado
    - 4.2.5 Comparações entre resultados de simulações com ambiente limpo e poluído
    - 4.2.6 Comparações entre resultados de simulações com dados topográficos de alta resolução

4.2.7 Resultados dos testes de sensibilidade para as simulações com diferentes concentrações de partículas

5. DISCUSSÕES E CONCLUSÕES

6. REFERÊNCIAS



# 1. Introdução

A quantidade de partículas atmosféricas originárias da atividade humana tem aumentado substancialmente desde os tempos pré-industriais até os dias de hoje. Essas partículas podem, por exemplo, agir de forma a causar impactos significativos sobre o clima da Terra. Sendo higroscópicas elas podem modificar o albedo médio das nuvens, a formação da precipitação e o ciclo de vida dessas nuvens. Sendo eficientes em espalhar ou absorver a radiação solar podem ser determinantes nas condições de estabilidade da atmosfera, e ainda modificar localmente a cobertura de nuvens.

Os aerossóis, partículas sólidas ou líquidas em suspensão na atmosfera, são produzidos pela injeção direta, ou formados pela nucleação de precursores gasosos. Pelo fato de possuírem um tempo de residência relativamente curto na atmosfera, as concentrações são altamente variáveis no tempo e no espaço. Para levar em conta essa variabilidade dos aerossóis, modelos climáticos têm evoluído na direção de incluir códigos numéricos capazes de descrever ciclos de elementos predominantes na constituição (Feichter et al., 1997) bem como na microfísica da distribuição de aerossóis (Stier et al., 2005). Desde os trabalhos de Paul-Jean Coulier (1875) e John Aitken (1880, 1881), vários estudos têm mostrado que os aerossóis atmosféricos funcionam como embriões para a formação das gotículas nas nuvens, os chamados Núcleos de Condensação de Nuvens (NCN), e por isso impactam diretamente a microfísica de nuvens e, portanto a precipitação. Desse modo, os aerossóis podem ser considerados como parte do ciclo hidrológico e, portanto, parte fundamental do sistema climático.

Aproximadamente metade da radiação solar que atinge a superfície terrestre é consumida pela evaporação de água dos oceanos, rios e lagos. E principalmente quando há formação de nuvens e a precipitação ocorre esta água retorna a superfície, e como consequência da condensação há grande liberação de calor latente para a atmosfera, aquecendo o ar e fornecendo energia para os sistemas meteorológicos.

As nuvens possuem um importante papel no balanço energético do sistema climático. De acordo com resultados publicados no quarto relatório do

IPCC (IPCC, 2007) as nuvens, os aerossóis, e os gases na atmosfera refletem de volta para o espaço 22,5% da radiação solar incidente no planeta (Figura 1). Juntamente com os 8,8% que são refletidos diretamente pela superfície, resultam em 31,3% da radiação solar voltando ao espaço sem causar aquecimento. Dos 68,7% restantes, 19,6% são absorvidos pela atmosfera e a aquecem diretamente, e 49,1% são absorvidos pela superfície. A evaporação de água na superfície consome 22,8% da energia solar que atinge o planeta e conseqüentemente aquece a atmosfera quando a condensação, ressublimação (passagem do vapor d'água diretamente para cristais de gelo em nuvens frias), e precipitação ocorrem. 18,7% são usados para o aquecimento direto da atmosfera por condução e através das térmicas (7%), e por radiação térmica (11,7%). O restante, 7,6%, escapa da superfície para o espaço como radiação térmica. Este balanço fornece uma boa visão sobre a importância da formação de nuvens e precipitação no sistema climático, sendo 22,8% de toda a radiação solar que atingiu o planeta e que foi consumida pela evaporação na superfície, depositada na atmosfera onde e quando a formação de nuvens e precipitação acontece.

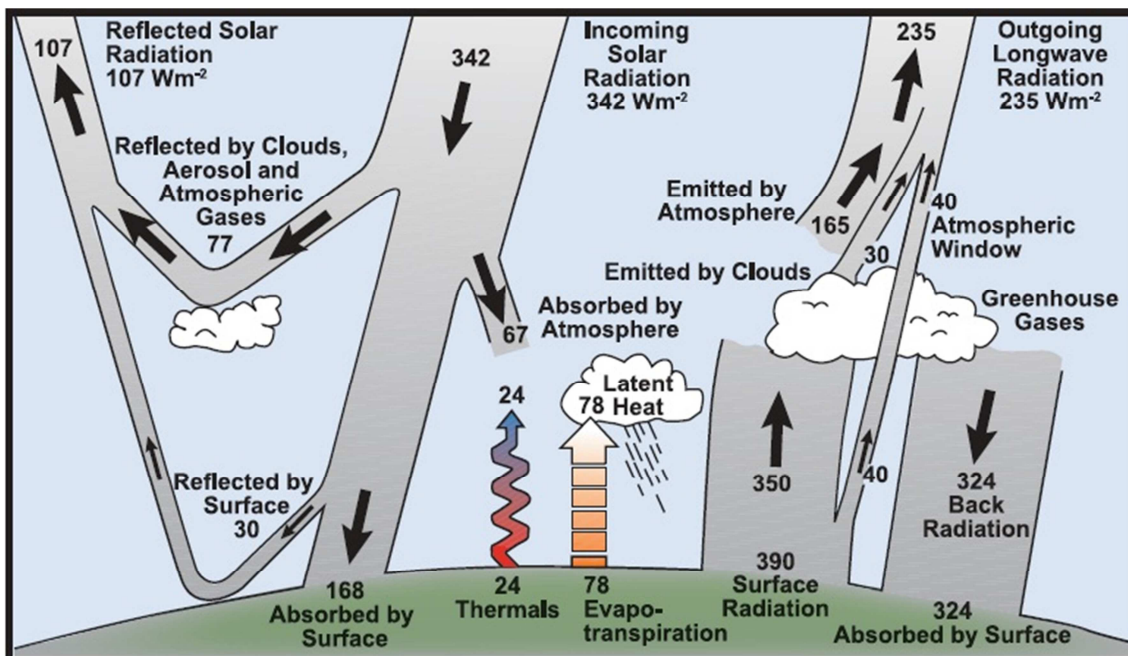


Figura 1. Estimativa do balanço médio anual e global da energia na Terra.  
 Fonte: IPCC (2007), AR4-WG1-capítulo 1.

Entender como as características das nuvens respondem aos efeitos dos aerossóis e vice-versa, ainda permanece como um tema não conclusivo, em um estágio de acumulação de conhecimentos, e não compreendido completamente. As interações entre aerossóis e nuvens são as maiores fontes de incertezas na quantificação da forçante antropogênica sobre o clima na Terra. Isso já constitui em si uma justificativa para que esforços sejam feitos na busca por um melhor entendimento da questão. Esta tese teve como foco analisar os possíveis impactos que os aerossóis atmosféricos produzidos na Região Metropolitana de São Paulo podem causar na formação de nuvens e precipitação, ao mesmo tempo, este trabalho adotou a modelagem atmosférica regional como principal ferramenta nesse estudo.

## **2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### **2.1 AEROSSÓIS ATMOSFÉRICOS**

O aerossol atmosférico é constituído por partículas sólidas ou líquidas em suspensão na atmosfera, que variam de alguns nanômetros a dezenas de micrômetros (Seinfeld e Pandis, 1998). Sua composição e tamanho dependem das fontes de emissão e de processos físico-químicos que ocorrem na atmosfera. O tamanho das partículas é, em geral, expresso em relação ao seu tamanho aerodinâmico, definido como o diâmetro de uma esfera que possui densidade unitária e mesma velocidade de sedimentação que a partícula em questão (Hinds, 1982). O aerossol pode ser de origem primária, isto é, aquele diretamente emitido por uma fonte na forma de partículas sólidas ou líquidas, ou pode ser de origem secundária, isto é, a sua formação se dá a partir de transformações físico-químicas na atmosfera, principalmente da conversão gás-partícula. A origem do aerossol está associada com o fato das fontes serem naturais ou antropogênicas. Os processos naturais de geração do aerossol estão associados com a ação do vento no solo e nas rochas (gerando poeira), no mar (produzindo spray marinho), com emissão biogênica (incluindo a vegetação) e ainda com vulcões e queimadas. Esses processos mecânicos originam, em geral, aerossol primário. Processos industriais e de queima de

combustíveis, levam a emissões de gases que na atmosfera se convertem para material particulado, sendo, portanto esse particulado de origem secundária (Andrade, 1993).

De acordo com Seinfeld e Pandis (1998), o aerossol atmosférico é dividido em dois grupos de diferentes tamanhos: a moda das partículas finas, com diâmetro aerodinâmico menor que  $2,5\mu\text{m}$  ( $d_a < 2,5\mu\text{m}$ ), e a moda das partículas grossas, com diâmetro aerodinâmico maior ou igual a  $2,5\mu\text{m}$  ( $d_a \geq 2,5\mu\text{m}$ ) e menor ou igual a  $10\mu\text{m}$ . A diferença entre as partículas finas e grossas é fundamental, pois as duas modas têm origens diferentes, sofrem processos diferentes na atmosfera e em geral são removidas de maneira distinta. Segundo a EPA (Agência de Proteção Ambiental norte-americana) o controle das partículas menores ou iguais a  $10\mu\text{m}$  ( $\text{PM}_{10}$ ), também chamadas de partículas inaláveis, baseou-se no fato de que estas são as partículas que podem atingir as vias respiratórias inferiores, e não na sua composição química. Este material particulado inalável apresenta uma característica importante que é a de transportar gases adsorvidos em sua superfície até as porções mais distais das vias aéreas, onde ocorrem as trocas de gases no pulmão (Braga et al., 2002). Após estudos do impacto dos aerossóis à saúde humana foram estabelecidos novos padrões para o  $\text{PM}_{10}$  e criado padrão para o  $\text{PM}_{2,5}$ , partículas finas que tem acesso ao aparelho respiratório inferior.

### **2.1.1 O aerossol atmosférico da RMSP**

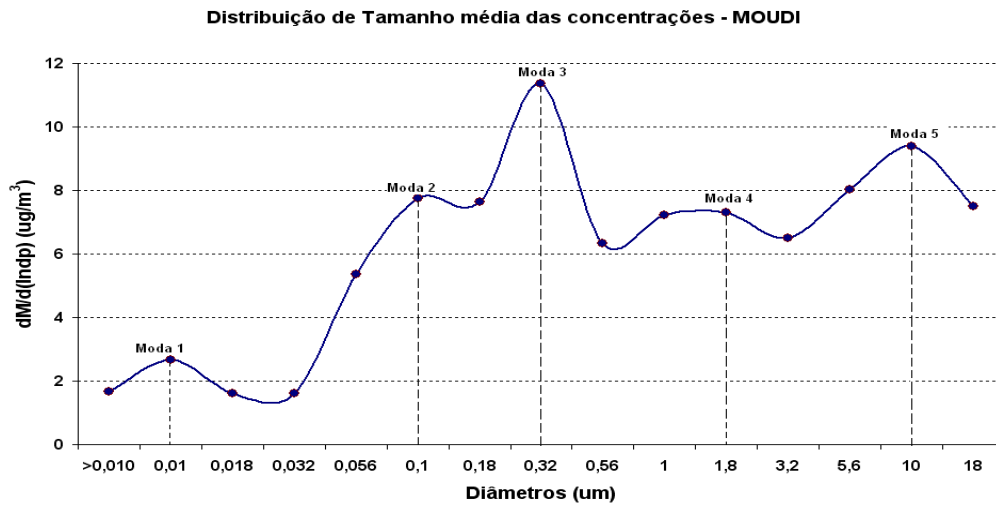
O aerossol atmosférico de São Paulo (AASP) vem sendo estudado há vários anos, tanto para a caracterização quanto à composição quanto para a determinação das fontes geradoras desse aerossol. A preocupação inicial era com a caracterização do aerossol do ponto de vista de sua composição química elementar e distribuição de tamanho. Inicialmente os grandes avanços foram alcançados nas metodologias de amostragem e metodologias analíticas. Essas metodologias foram aplicadas para várias regiões urbanas e remotas. Como exemplo podem ser citados os trabalhos do GEPA em áreas remotas (Artaxo et al., 1990), em São Paulo (Andrade, 1993 e Andrade et al., 1994), Cubatão (Kerr, 1996) e em outras cidades brasileiras (Orsini et al., 1986).

Os primeiros trabalhos concentraram-se em um levantamento da composição elementar desse aerossol como em Orsini e Bouéres (1977), Orsini et al. (1984), numa segunda etapa foram buscadas as fontes desse particulado como em Andrade (1986), Andrade et al. (1994) e em Sanchez-Ccoyllo e Andrade (2002) foram estudadas as relações entre a concentração de aerossóis e as condições meteorológicas. Nos trabalhos mais recentes foram determinadas as relações entre o aerossol e a radiação como em Miranda et al. (2002), a descrição dos processos de formação de partículas por nucleação, condensação e aglutinação em Ynoue (2004), o estudo das distribuições de tamanho em massa e número do aerossol juntamente com a composição química e identificação de fontes em Albuquerque (2005) e Oliveira (2007). Em Oliveira (2007) também foi estudado (através de modelo numérico) o equilíbrio termodinâmico dos aerossóis, discutindo o papel da umidade relativa como fator determinante nas possíveis fases que se encontra o AASP no período de inverno e início da primavera.

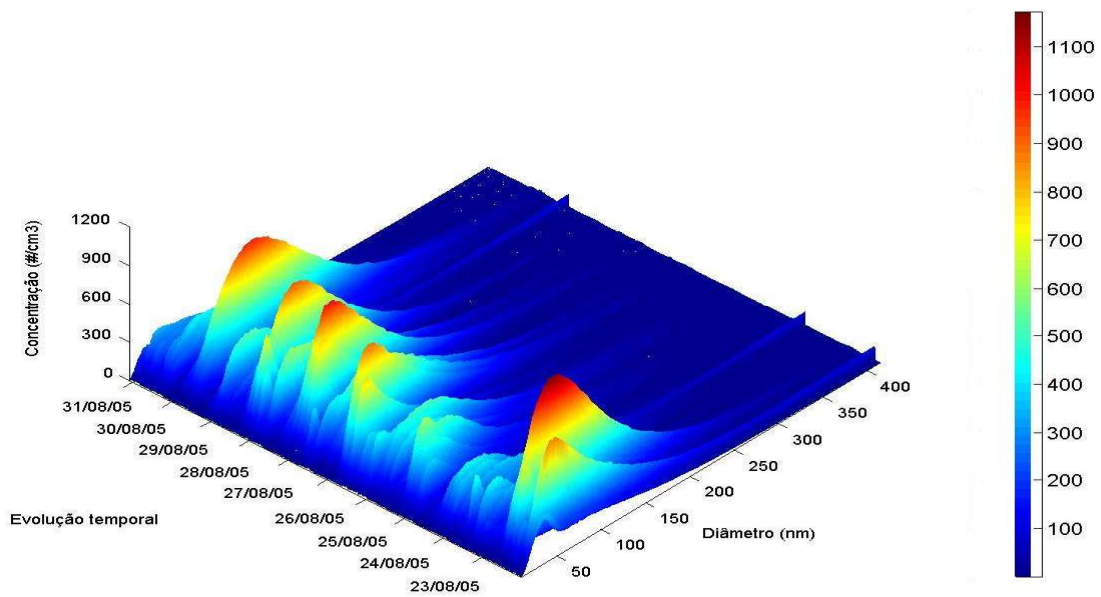
Wexler e Seinfeld (1991) afirmam que os componentes inorgânicos predominantes do aerossol atmosférico no intervalo de tamanho de  $1\mu\text{m}$  ou menor são sódio, amônio, cloro, nitrato e sulfato (o sódio no caso de estar-se analisando o aerossol próximo ao mar), e os sais inorgânicos constituem de 25% a 50% da massa de aerossol fino. Hoje sabe-se que partículas carbonáceas explicam boa parte da massa das partículas ultra-finas, especialmente em São Paulo (Miranda et al., 2012). Sabe-se ainda que as concentrações dos aerossóis inorgânicos junto com a umidade relativa do ambiente determinam o conteúdo de água do aerossol que constitui uma porção significativa da massa total deste. Para São Paulo, uma grande parte da massa do aerossol é devido a compostos de carbono, tanto orgânico quanto elementar (Castanho e Artaxo, 2001; Miranda, 2002).

Na Figura 2 apresenta-se a distribuição de tamanho para massa (em a) e número de partículas (b e c) referente a um experimento realizado no Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da Universidade de São Paulo (IAG-USP) localizado a  $46,733\text{W}$  e  $23,559\text{S}$ , no período de inverno e início da primavera de 2005. Esses resultados fazem parte do trabalho de mestrado de Oliveira (2007). Os dados de distribuição de tamanho em número

foram obtidos com um SMPS (*Scanning Mobility Particle Sizer*) cedido pelo Prof. Dr. Paulo Artaxo, em colaboração nesse experimento.



a)



b)

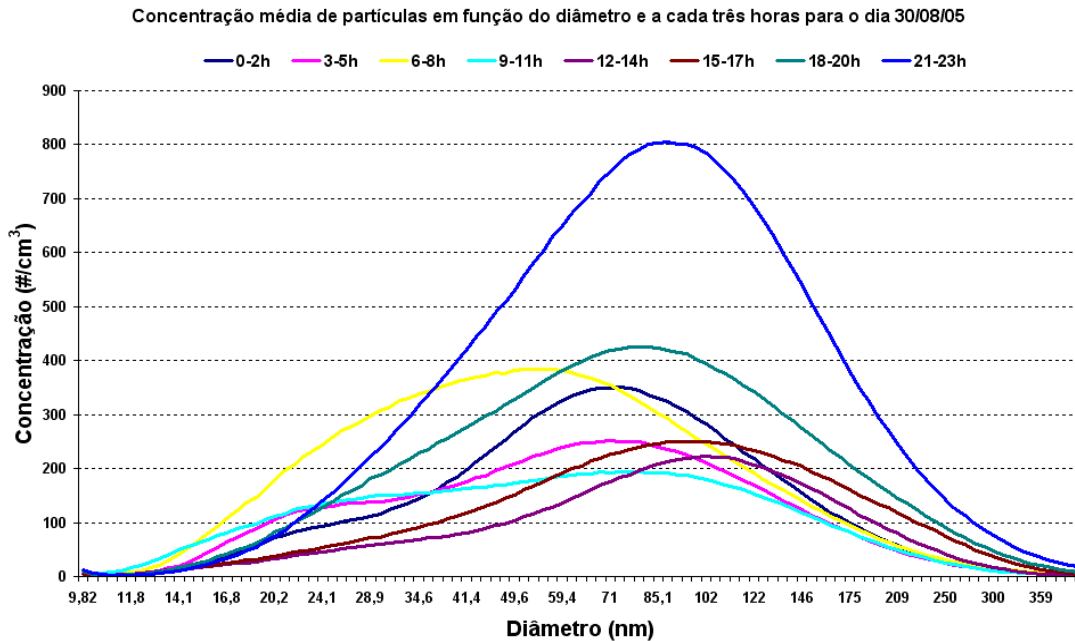


Figura 2. a) Distribuição de tamanho para massa, b) evolução da distribuição de número de partículas, e c) distribuições médias de número de partículas considerando intervalos de 3 horas ao longo do dia 30 de agosto de 2005. Experimento realizado no IAG/USP no inverno e início da primavera de 2005. Fonte: Oliveira (2007).

De acordo com dados da CETESB (2009), a poluição do ar na RMSP é decorrente das emissões atmosféricas de cerca de 2000 indústrias de alto potencial poluidor e da frota veicular registrada de aproximadamente 9,7 milhões de veículos (PRODESP, dez/2009). Esta é composta por 7,9 milhões de veículos do ciclo Otto, 515 mil veículos a diesel e 1,3 milhões de motos, que representam cerca de 1/5 do total nacional. De acordo com as estimativas da CETESB (2009), essas fontes de poluição são responsáveis pela emissão para a atmosfera de 63 mil t/ano de material particulado total. A contribuição relativa de emissão por tipo de fonte, que é uma representação do inventário de fontes para a RMSP, é mostrada na Figura 3. Percebe-se que os veículos automotores contribuem diretamente com 40% das emissões de  $MP_{10}$  (Material Particulado menor que  $10 \mu m$ ) e se for considerado que grande parte dos aerossóis secundários (25% da contribuição) são formados principalmente por gases oriundos dos escapamentos, então pode-se supor que os maiores responsáveis pelas emissões de aerossóis para a atmosfera na RMSP são os veículos automotores. Estudos recentes (Andrade et al., 2012) mostram que as

contribuições veiculares em São Paulo são responsáveis por mais de 50% da massa de material particulado fino (PM2.5).

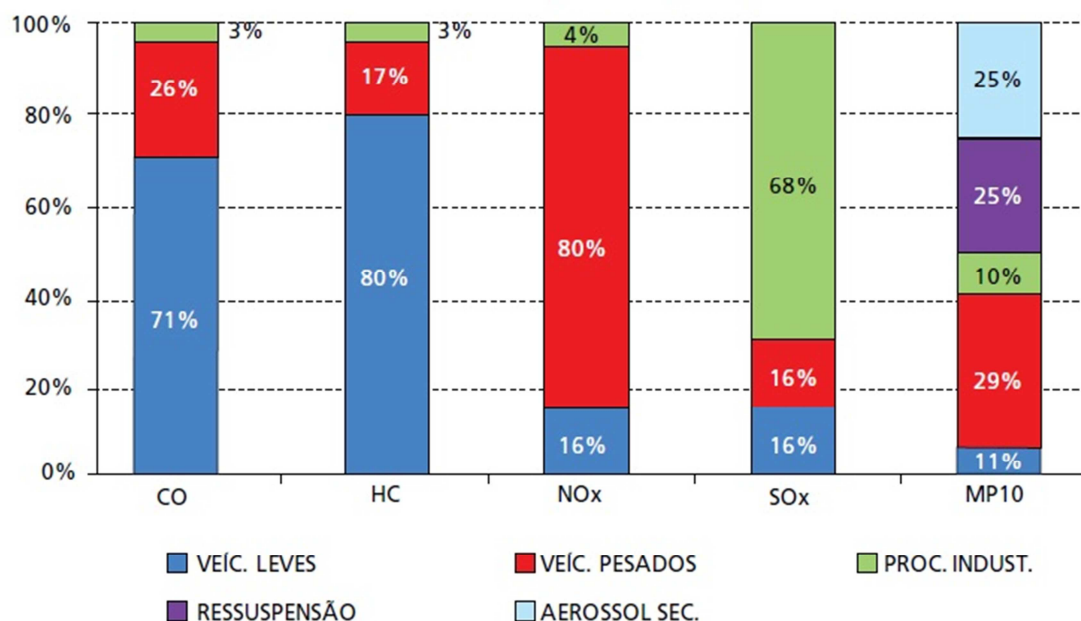


Figura 3. Emissões relativas de poluentes por tipo de fonte na RMSP. Fonte: CETESB, 2009.

### 2.1.2 Efeitos dos aerossóis no clima

Os aerossóis podem alterar o balanço de energia terrestre diretamente através do espalhamento e absorção de radiação, chamado efeito direto, indiretamente através da modificação na microfísica das nuvens, chamado efeito indireto (Twomey, 1977; Albrecht, 1989; Pincus e Baker, 1994), e o chamado efeito semi-direto (Ackerman et al., 2000), quando os aerossóis alteram a termodinâmica atmosférica e o padrão de cobertura de nuvens (Figura 4).

Desde os primeiros estudos sobre a sua influência no clima, o efeito dos aerossóis foi considerado importante principalmente para nuvens rasas, por agir como núcleo de condensação de nuvem (NCN) e então determinar as concentrações iniciais de gotas de nuvens. A consideração principal é que a mesma quantidade de água de nuvem é redistribuída para um grande número de gotas pequenas em ar mais poluído e com elevadas concentrações de



NCN. Twomey (1977) mostrou que por esse mecanismo os aerossóis aumentam o albedo das nuvens (fração da radiação solar que é refletida de volta para o espaço), e então esfriam o sistema climático. Este efeito está restrito (ou pelo menos mais bem entendido) a nuvens rasas porque as nuvens profundas refletem/absorvem a maior parte da radiação solar sem considerar o tamanho de suas gotículas (Twomey, 1977). Albrecht (1989) observou que as gotículas pequenas nucleadas pelos aerossóis são mais lentas para coalescer para gotas de chuva e então menos perda de água de nuvem ocorre. Com base neste resultado, Albrecht sugeriu que os aerossóis deveriam aumentar o tempo de vida das nuvens e a cobertura de nuvens. Novamente, este efeito foi considerado principalmente para nuvens rasas porque se pensava que em nuvens profundas o tempo para a ocorrência da precipitação independia deste processo. O efeito semi-direto (Hansen et al., 1997; Ackerman et al., 2000) é o mecanismo pelo qual os aerossóis troposféricos absorvem a radiação solar de onda curta e levam a um aquecimento na troposfera causando mudanças na umidade relativa, na estabilidade atmosférica, e influenciando a formação e o tempo de vida das nuvens.

Todos esses efeitos modificam o balanço radiativo no globo, e influenciam qualquer sistema meteorológico que se forme sobre a superfície terrestre. Sendo, portanto bastante importante o papel dos aerossóis no balanço energético da atmosfera, e conseqüentemente nos sistemas climáticos regionais e globais.

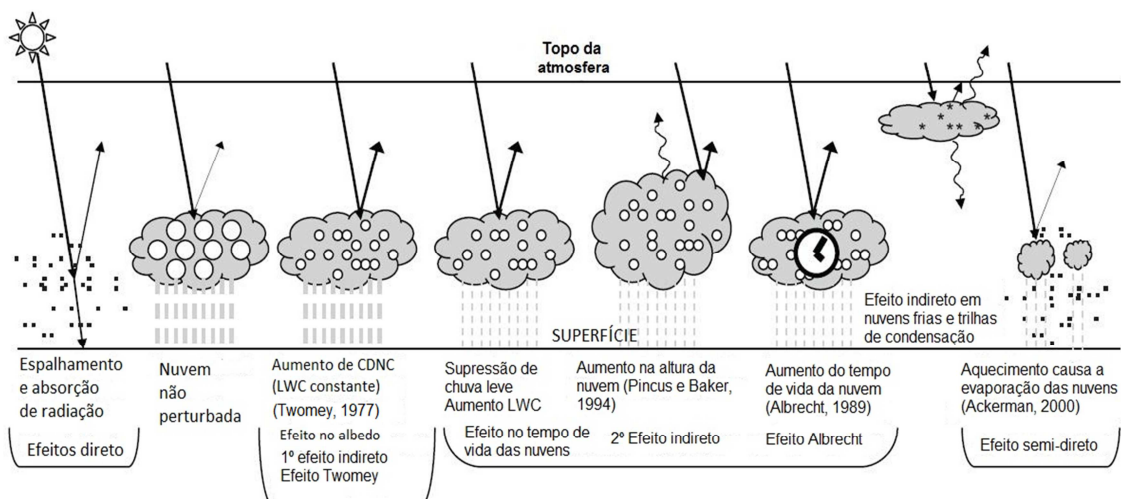


Figura 4. Diagrama esquemático mostrando os vários mecanismos radiativos associados com os efeitos dos aerossóis nas nuvens. Fonte: Adaptado do IPCC, 2007.

## 2.2 ATIVAÇÃO DE NÚCLEOS DE CONDENSAÇÃO DE NUVENS (NCN)

Na atmosfera as nuvens somente se formam quando o ar se torna supersaturado em relação à água líquida, ou em relação a cristais de gelo, ou seja, a pressão de vapor de saturação do ar deve ser maior que a pressão de vapor de saturação sobre a superfície esférica da gotícula. A supersaturação pode ser atingida a partir do resfriamento adiabático, que na atmosfera é decorrente, entre outros processos, da ascensão e conseqüentemente expansão da parcela de ar úmido (processo adiabático). A supersaturação na atmosfera pode ainda ser atingida por processos de mistura e por remoção de calor da parcela de ar (processo diabático). A distribuição de massa de aerossóis troposféricos é constituída em grande parte por partículas sólidas. Estas partículas podem ser dissolvidas pelas moléculas de água, através de um processo conhecido na literatura química como solvatação (fenômeno que ocorre quando um composto iônico ou polar se dissolve em uma substância polar, sem formar uma nova substância). Com a dissolução das partículas sólidas, surgem soluções aquosas, na forma de pequenas gotículas esféricas que agem como núcleos de condensação de nuvem (NCN), os quais são ativados quando a supersaturação do meio apresenta-se maior que um determinado valor crítico. Este valor crítico depende do tamanho e das

características químicas da partícula. Nestas condições o vapor d'água condensa-se sobre estes núcleos, formando pequenas gotículas d'água, que crescem por coalescência e que juntas formam a precipitação.

### 2.2.1 Equações para o crescimento de gotículas

Considerando-se os diferentes valores de supersaturação que podem ocorrer no ambiente, haverá um raio crítico no qual a gotícula mantém-se em equilíbrio com o campo de vapor de água que a envolve. O raio crítico define o tamanho mínimo de um embrião para que o mesmo se mantenha no estado líquido e sobreviva na atmosfera. Quando há um processo de formação de gotículas de água pura, sem a presença de um núcleo de condensação (aerossol), este é denominado de nucleação homogênea ou espontânea. A expressão que define o raio crítico é determinada por:

$$\frac{e_r}{e_\infty} = a_a \exp\left[\frac{2M_a\sigma}{\rho_a RT_r r}\right] \quad (2.2.1)$$

Em que,  $a_a$  é a atividade da água em solução aquosa,  $M_a$  é a massa de um mol de água,  $\sigma$  é a tensão superficial,  $\rho_a$  é a massa específica da água,  $R$  é a constante universal dos gases,  $T_r$  é a temperatura na superfície da gotícula,  $r$  é o raio da gotícula,  $e_\infty$  é a pressão de saturação em relação a superfície plana de água pura à temperatura  $T_r$ , e  $e_r$  é a pressão de saturação de vapor d'água na superfície da gotícula. Se a gotícula é assumida como uma solução ideal (então,  $a_a = 1$ ), a equação anterior pode ser reescrita, e sendo mais comumente conhecida como equação de Kelvin:

$$\frac{e_r}{e_\infty} = \exp\left[\frac{2M_a\sigma}{\rho_a RT_r r}\right] \quad (2.2.2)$$

Em uma parcela de ar sem a presença de partículas o vapor d'água somente condensa para formar gotículas a uma supersaturação muito alta (em

torno de 300-400%). O que nos permite concluir que a probabilidade de formação espontânea de um núcleo de condensação na atmosfera é praticamente nula, pois requer uma supersaturação bastante elevada, o que não é observado na atmosfera terrestre. A supersaturação na nossa atmosfera raramente fica acima de 1%. Então, para que haja a formação de gotículas de nuvens na nossa atmosfera outro processo deve existir.

De fato, a presença de inúmeras partículas sólidas e líquidas (aerossóis) na atmosfera terrestre possibilita que a condensação de vapor d'água ocorra (processo chamado de nucleação heterogênea). Algumas destas partículas são solúveis em água (higroscópicas) e são as que mais favorecem a condensação, e conseqüentemente a formação das gotículas em nuvens. A pressão de saturação de vapor d'água sobre uma gotícula de solução (gotícula d'água contendo algum sal dissolvido) é menor que a pressão de vapor de saturação sobre uma gotícula de água pura de mesmo tamanho. Isto se deve ao fato de que a pressão de vapor de saturação d'água é proporcional a concentração de moléculas de água na superfície da gotícula, ou seja, quanto maior o número de moléculas puras de água na superfície da gotícula, maior será a resultante das forças que contribui para expulsar as moléculas da superfície. Se há a presença de um sal dissolvido, então a resultante das forças será menor e menos moléculas deixam a superfície da gotícula. A solubilidade de partículas sólidas pode ser expressa pela seguinte equação:

$$a_a = \exp \left[ - \frac{3v\Phi_s m_s M_a}{M_s (4\pi\rho r^3 - 3m_s)} \right] \quad (2.2.3)$$

Em que,  $v$  é o número máximo de íons dissociáveis,  $\Phi_s$  é o coeficiente osmótico para solução aquosa,  $m_s$  é a massa do soluto,  $M_s$  é a massa de um mol do soluto e  $\rho$  é a massa específica da gotícula solução. As equações 2.2.1 e 2.2.3 são de fundamental importância no surgimento e crescimento de gotículas de nuvem. Se considerarmos  $a_a \neq 1$ , então pode-se substituir 2.2.3 em 2.2.1 e teremos:

$$\frac{e_r}{e_\infty} = \exp \left[ \frac{2M_a \sigma}{\rho_a RT_r r} - \frac{3v\Phi_s m_s M_a}{M_s (4\pi\rho r^3 - 3m_s)} \right] \quad (2.2.4)$$

Os valores dos termos na exponencial acima são muito pequenos, de maneira que teremos uma boa aproximação numérica se expandirmos a expressão em série de Taylor e considerarmos somente os termos de primeira ordem. Assim, a expressão 2.2.4 pode ser reescrita na forma:

$$\frac{e_r}{e_\infty} \cong 1 + \frac{2M_a \sigma}{\rho_a RT_r r} - \frac{3v\Phi_s m_s M_a}{M_s (4\pi\rho r^3 - 3m_s)} \quad (2.2.5)$$

Ou ainda de uma forma mais simplificada:

$$s_c(r) = b(r) + c(r) \quad (2.2.6)$$

Em que,

$$s_c(r) = e_r / e - 1 \quad (2.2.7)$$

$$b(r) = 2M_a \sigma / \rho_a RT_r r \quad (2.2.8)$$

$$c(r) = -3v\Phi_s m_s M_a / M_s (4\pi\rho r^3 - 3m_s) \quad (2.2.9)$$

A relação  $S_c(r) = b(r) + c(r)$ , é conhecida na literatura como equação de Kohler e apresenta a supersaturação crítica para o crescimento de diferentes NCN, ou seja, expressa valores a partir dos quais núcleos de condensação podem ser ativados e passam a crescer como parte de uma distribuição de gotículas. Esta relação, dada pela equação 2.2.6, mostra os efeitos combinados da curvatura e do soluto para o crescimento das gotículas. Ambos os efeitos diminuem em importância com o aumento do raio da gotícula. A Figura 5 ilustra diferentes curvas de Kohler para partículas de sulfato de

amônio  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ , sendo  $r_s$  o raio da partícula sólida. De acordo com resultados de vários trabalhos estudando o aerossol na RMSP (Andrade, 1993; Albuquerque, 2005; Oliveira, 2007), pode-se afirmar que o sulfato de amônio é um dos principais componentes inorgânicos presente no aerossol da RMSP, e se considerarmos as curvas de Kohler na Figura 5, então pode-se supor que praticamente todas as partículas de  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$  presentes na moda de acumulação serão ativadas (transformadas em NCN) para supersaturações da ordem de 0,1%.

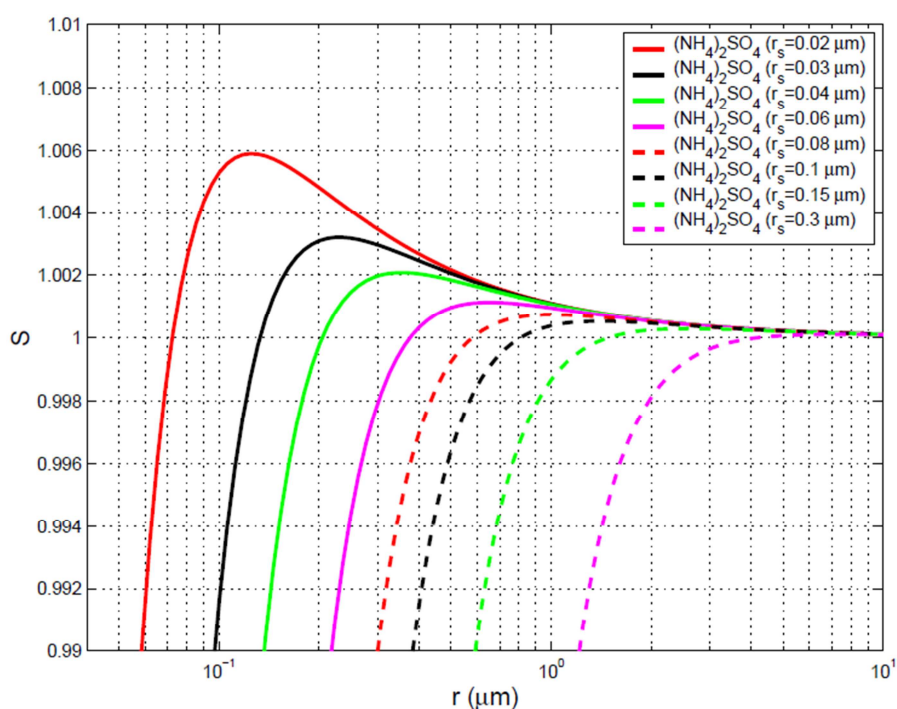


Figura 5. Curvas de Kohler para partículas de sulfato de amônio  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ .

## 2.3 INTERAÇÃO AEROSSOL-NUVEM-PRECIPITAÇÃO

### 2.3.1 Propriedades físico-químicas da interação aerossol-nuvem

Normalmente assume-se que o parâmetro de maior influência na concentração de gotículas de nuvem é a concentração em número de aerossóis. Todavia, existem parâmetros intrínsecos à natureza físico-química dos aerossóis que desempenham papel de grande relevância, como será discutido na sequência. Nenes et al. (2002) demonstram que a existência de

fatores químicos que não têm sido levados em conta na modelagem atmosférica pode ter impacto significativo no desenvolvimento da precipitação. Estes fatores resultam da atividade antropogênica e podem produzir variações da mesma ordem dos efeitos tradicionalmente considerados. A dissolução de gases solúveis (ácido nítrico, por exemplo) e espécies parcialmente solúveis na gotícula em crescimento, a depressão na tensão superficial por substâncias orgânicas solúveis em água, mudanças no coeficiente de acomodação a partir de filmes orgânicos na superfície da gotícula são fatores químicos analisados pelos autores e que mostram efeitos da mesma ordem e até maiores em comparação, por exemplo, ao efeito indireto (Twomey, 1974; Twomey, 1977).

Jacobson (2002), com base em resultados de modelagem global em que 12 efeitos dos aerossóis são representados, sugere que a redução na emissão de BC (*Black Carbon*) e OC (*Organic Carbon*) pode ser mais eficiente em reduzir o aquecimento global do que uma redução similar de CO<sub>2</sub> e CH<sub>4</sub> num determinado período. Isso demonstra não apenas a importância dos aerossóis, mas também a dimensão em que está envolvida a questão das mudanças climáticas.

Trabalhos descrevendo experimentos envolvendo a queima de biomassa têm indicado que as partículas inicialmente emitidas durante a combustão sofrem transformações que afetam tanto a composição química quanto o tamanho das partículas. Por exemplo, de acordo com Bruintjes (2003), KCl predomina em partículas recém produzidas na queima de biomassa enquanto que K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> e KNO<sub>3</sub> predominam em plumas de fumaça produzidas há mais tempo. Esta mudança indica reações de KCl com compostos de N e S produzidos durante a queimada, em um processo similar ao descrito por McInnes et al. (1994) em ambientes marinhos poluídos. Transformações sofridas no decorrer do tempo devido à interação das partículas recém emitidas com gases presentes na atmosfera podem modificar a eficiência das partículas como núcleos de condensação de nuvem (NCN). Roberts e colaboradores (2001) consideram a deposição de sulfatos com origem na decomposição de matéria orgânica na floresta como uma provável explicação para as diferenças na composição das partículas após certo tempo de envelhecimento.

No que diz respeito aos núcleos de gelo (NG), estes são constituídos basicamente por partículas insolúveis de solo e minerais, com uma composição mista de elementos químicos, principalmente Al, Si e O. A maior parte dessas partículas é produzida pelas regiões áridas do planeta (Pruppacher e Klett, 1997). Partículas orgânicas aparecem com uma importância menor. As propriedades dessas partículas podem ser alteradas ao sofrer interação com gases como dióxido de enxofre ou amônia, reduzindo o potencial de nucleação de gelo pelo aumento do potencial de NCN.

Ao estudar a composição química de partículas residuais de núcleos de gelo em nuvens Cirrus, DeMott et al. (1994) observaram que estas partículas se agrupam em seis principais categorias estatísticas. Partículas a base de sulfato e compostos orgânicos representando 86% do total, seguidas daquelas de potássio e carbono, normalmente associadas à queima de biomassa, em torno de 9%. Carbono e vanádio que estão normalmente associados à combustão representaram pouco mais de 2%. Por outro lado, quando a análise envolveu partículas de gelo nucleadas heterogeneamente, a participação dos componentes de sulfato e carbono reduziu-se consideravelmente, em torno de 25%, mesmo patamar dos compostos metálicos e, um pouco menor que compostos associados à poeira do solo (33%).

Outro fator relevante é o possível papel do bioaerossol como agente nucleador de gotas de nuvem e na formação do gelo. Em trabalhos iniciais, como Schnell e Vali (1972), foi evidenciada a presença da bactéria *Pseudomonas syringae pv. syringae* como agente nucleador de gelo. Lindow et al. (1976) descobriram outra bactéria como nucleadora de gelo, a *Erwinia herbicola*, com o mesmo papel. Levin e Yankosky (1983) levaram gotículas suspensas em correntes de ar em um túnel com células destas bactérias levantando a possibilidade de aplicação destas na chuva artificial. Schnell e Vali (1972) estudaram o papel dos nucleadores de gelo em folhas em decomposição, mostrando que tanto fungos como bactérias podem ser bons nucleadores. Quase nada se sabe a cerca de núcleos de congelamento proveniente de bioaerossóis (bactérias, esporos de fungos, etc.) no Brasil, à exceção de poucos trabalhos efetuados na área com as bactérias



*Pseudomonas syringae* pv. *garceae* e os uredinosporos de *Hemileia vastatrix* (Gonçalves, 1993 e Gonçalves e Massambani, 1993).

### **2.3.2 Efeitos dos aerossóis urbanos na precipitação**

Medidas de satélite têm mostrado que a formação da chuva começa em níveis de maior altitude quando o desenvolvimento ocorre em ambiente com alta concentração de aerossóis (Rosenfeld e Woodley, 2000). Este aspecto é importante pelo fato de que a modificação na estrutura de desenvolvimento da precipitação também implica em mudança na distribuição vertical de liberação de calor latente durante o processo de condensação. Esta redistribuição de energia pode acarretar modificação na estrutura dinâmica da atmosfera, pelo menos em uma escala regional.

Rosenfeld (2000), também a partir de dados de satélite, encontrou evidências diretas de que a poluição urbana e industrial pode inibir completamente a formação da precipitação. Os estudos envolveram diferentes regiões continentais como Turquia, Canadá e Austrália. Os dados revelaram que, tanto o processo de colisão e coalescência de gotículas, quanto à formação de gelo, são inibidos em nuvens contaminadas pela poluição.

Fitzgerald e Spyers-Duran (1973) encontraram elevadas concentrações de gotículas pequenas vento abaixo de St. Louis, Missouri (EUA). Alkezweeny e colaboradores (1992) analisaram o efeito da pluma urbana das cidades de Denver e Kansas City (EUA) sobre nuvens estratiformes. A identificação do tipo de massa de ar deu-se através da avaliação da concentração de NO<sub>2</sub>, em que concentrações acima de 1,0 ppb foram assumidas como indicativas de ar urbano poluído. Os dados mostraram que o espectro de gotículas é muito dependente da história do ar ascendente na região de formação da nuvem. Em nuvens formadas a partir de ar não poluído, o diâmetro volumétrico médio das gotículas foi de  $21,9 \pm 7,4 \mu\text{m}$ , enquanto que nuvens formadas a partir de ar poluído apresentaram  $13,6 \pm 1,9 \mu\text{m}$ . A concentração de gotículas apresentou diferença de cerca de uma ordem de grandeza,  $22 \text{ cm}^{-3}$  em condições não poluídas e  $226 \text{ cm}^{-3}$  sob efeito da poluição.

Evidências contrárias à diminuição da precipitação também existem. Hobbs et al. (1970) afirmam que indústrias de papel, entre outras, são importantes fontes de NCN. Nuvens que se formaram na direção de propagação dos resíduos industriais mostraram-se mais eficientes em produzir precipitação, quando comparadas a outras nuvens da região. Análise de dados feita por Hobbs et al. (1970), comparando o período que antecede à instalação das indústrias com o período subsequente, indica taxa de precipitação chegando a mais de 30% em alguns casos para o período posterior a entrada em operação das mesmas. O aumento foi mais acentuado nas regiões mais elevadas e em regiões adjacentes ou vento abaixo das grandes fontes industriais de NCN. Segundo os autores, aumento semelhante também foi identificado na vazão dos rios.

Posteriormente, Hindman et al. (1977a e b) estudaram o impacto das emissões de NCN por indústrias de papel na região noroeste dos EUA. As medidas dentro e fora da pluma visível mostraram que a concentração de partículas maiores que  $0,2 \mu\text{m}$  na pluma foi 5 vezes maior que no ambiente fora da pluma. A concentração de partículas pequenas ( $0,07 - 0,20 \mu\text{m}$ ) não apresentou diferença. Os resultados indicaram que o principal impacto dos NCN emitidos em nuvens quentes pequenas (não precipitantes) é um alargamento na distribuição de tamanho das gotículas. Este alargamento foi verificado através do aumento na concentração de gotículas maiores que  $30 \mu\text{m}$  por um fator 4 em relação às nuvens da vizinhança, não influenciadas pelas emissões. Os resultados destas observações levaram à conclusão de que os núcleos grandes e gigantes aumentaram a eficiência do processo de colisão e coalescência, conduzindo a uma maior taxa de precipitação. A presença dos NCN emitidos não afetou a concentração total de gotículas, o tamanho médio e o conteúdo de água líquida.

Eagan et al. (1974) estudando o impacto das emissões de indústria de papel observou que a contagem total de partículas atingiu um pico cerca de 18 a 20 km vento abaixo da fonte industrial, sugerindo a existência de um mecanismo de amplificação na concentração total de partículas e NCN após a emissão, respectivamente, de cerca de 2 e 4h. Considerando que altas concentrações de  $\text{SO}_2$  e compostos higroscópicos estão presentes na pluma, a

conversão gás-partícula seguida de coagulação é considerada pelos autores como explicação para a concentração de NCN estar acima do esperado. A análise das distribuições de gotículas mostrou que estas são muito mais largas para as nuvens que se formaram dentro da pluma do que para aquelas formadas fora da mesma. Em particular, para nuvens sob efeito das emissões, concentrações significativas de gotículas com diâmetro maior que 30  $\mu\text{m}$  foram medidas, assim como gotículas menores. Em razão disso, gotas em tamanhos precipitáveis podem ter sido formadas de forma eficiente pelo mecanismo de coalescência, podendo explicar a anomalia positiva na precipitação identificada por Hobbs et al. (1970) na vizinhança das mesmas indústrias de papel. Comportamento similar também foi identificado por Kocmond e Mack (1972) observando significativo aumento na concentração de NCN a 0,3% de supersaturação 30 a 35 km vento abaixo de Buffalo, NY, EUA.

Mather (1991) conduziu medidas em tempestades que se desenvolveram próximas a uma indústria de papel em Nelspruit (África do Sul). As medidas ocorreram em torno do nível de  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$  e revelaram a presença de gotas líquidas e parcialmente congeladas excedendo os 4 mm em diâmetro, alta concentração de gotículas de nuvem e uma quase completa conversão de água de nuvem em precipitação. Em um caso específico a célula convectiva era caracterizada por um diâmetro típico de 6 km. A velocidade vertical de 11,9 m/s é semelhante à velocidade terminal das gotas de 4,7 mm encontradas na ocasião, indicando assim a ocorrência de uma zona de acumulação de gotas grandes, excedendo localmente o conteúdo adiabático de água líquida. Mather conclui que as emissões das indústrias de papel afetam drasticamente as grandes células convectivas da vizinhança, acelerando o crescimento por coalescência, evidente pelo aparecimento (não usual) de gotas grandes em torno de  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Isso ocorre concomitantemente com a eficiente conversão de água de nuvem em precipitação, numa relação de causa e efeito facilmente compreensível: o alargamento do espectro de gotículas na base da nuvem pela injeção de núcleos higroscópicos determina o rumo de um processo já em movimento. A idéia de que o processo de precipitação em uma grande tempestade pode ser substancialmente alterado foi algo realmente inovador no trabalho de Mather.

A sugestão de Mather (1991) é de que uma tempestade em que o processo de formação de gelo está ativado pode estar muito próximo a um limiar de coalescência, podendo saltar para o modo de coalescência pela injeção de núcleos higroscópicos. O tempo é o fator crucial que frequentemente limita o crescimento das partículas nos vigorosos movimentos ascendentes em muitas tempestades na África do Sul. Em muito pouco tempo a maior parte da água de nuvem pode acabar na bigorna da célula convectiva, convertendo pouca ou nenhuma água de nuvem em precipitação. Por outro lado, o processo de coalescência parece produzir partículas que crescem a tamanhos e com rapidez suficientes para coletar a maior parte da água de nuvem disponível, reduzindo o potencial residual de água na atmosfera.

Medidas de sulfato em água de nuvem e concentração de gotículas foram conduzidas no leste da América do Norte entre os anos de 1982 e 1984 por Leitch et al (1992). Observou-se um aumento médio de 56% na concentração de gotículas em nuvens poluídas em comparação com nuvens limpas. Em uma avaliação complementar através de modelagem concluiu-se que o potencial aumento no albedo das nuvens pode ser responsável por um decréscimo de 2 a 3  $W.m^{-2}$  para esta região da América do Norte.

### **2.3.3 O estado atual sobre o entendimento da interação aerossol-nuvem-precipitação**

Na última década muitos estudos foram realizados sobre a interação aerossol-nuvem-precipitação e de acordo com Khain A. P. (2009), não há concordância entre os diferentes estudos considerando as avaliações quantitativas e mesmo as qualitativas dos efeitos dos aerossóis sobre a precipitação. Enquanto alguns estudos observacionais e numéricos reportam um decréscimo na precipitação em áreas poluídas, em outras observações e estudos numéricos foi reportado que a influência dos aerossóis induz um aumento na precipitação. Por causa das várias incertezas nos estudos com observações e em trabalhos usando a modelagem numérica da atmosfera, o estágio atual das investigações no tema, pode ser definido como num momento

de acumulação de conhecimentos, especialmente considerando as avaliações quantitativas (Khain, 2009).

No trabalho de Khain et al., (2004), foi utilizado um modelo espectral (*bins*) para se estudar o efeito dos aerossóis na microfísica, dinâmica, e evolução de nuvens convectivas profundas que se formaram sob condições termodinâmicas continentais. Os experimentos numéricos mostraram que as diferentes concentrações de aerossóis têm um efeito crucial sobre ambas as precipitações produzidas por nuvens quentes e nuvens com fase fria. Quando as concentrações de NCN eram baixas havia um crescimento eficiente de gotículas de nuvens a tamanhos suficientes para disparar o processo de colisão-coalescência e assim, gotas de chuva eram formadas e precipitavam, ou eram levadas para as camadas mais frias da atmosfera e contribuía para a formação de grandes partículas de gelo. Os autores observaram que os processos que levavam à precipitação formada por ambos os tipos de nuvens (quentes e com fase fria) eram bastante eficientes. Já para o caso onde houve um aumento nas concentrações de aerossóis, foi observado nos experimentos uma diminuição na quantidade de chuva acumulada na superfície. Os autores reportaram que um aumento nas concentrações de partículas levou a uma intensificação nos *updrafts* internos na nuvem, e como consequência a precipitação se formou em níveis mais elevados, e também houve uma diminuição nos tamanhos das partículas precipitantes (gotas e cristais de gelo). Com um tamanho menor, e caindo de altitudes mais elevadas, as partículas possuíam uma velocidade terminal menor, se comparada ao ambiente limpo, e sofriam uma maior evaporação durante o tempo de queda. Esse acoplamento de processos microfísicos e dinâmicos explicavam a diminuição na precipitação simulada.

Khain et al., (2005), encontraram resultados similares ao trabalho anterior, sendo que nesse estudo os autores reportaram que no caso de uma atmosfera continental o aumento nas concentrações de aerossóis levou a um atraso e diminuição na precipitação. Foi observado que os conteúdos de água de nuvem e água de chuva (para a atmosfera continental) eram mais elevados do que aqueles simulados para o ambiente com condições marítimas, mas a conversão desse conteúdo de água para precipitação era ineficiente. Já para

as simulações no ambiente marítimo, onde o conteúdo de vapor d'água no ar é maior (umidade mais elevada), os autores encontraram um resultado interessante, onde os aumentos nas concentrações de aerossóis podiam levar a um aumento na precipitação, se as perdas de água condensada pela evaporação fossem menores. Esse trabalho (de Khain et al., 2005) foi importante por ressaltar a relevância das condições atmosféricas quando se estuda os efeitos das concentrações de partículas nas nuvens profundas.

Van den Heever e Cotton, (2007), utilizaram o modelo *Regional Atmospheric Modeling System* (RAMS) para estudar os efeitos das concentrações de aerossóis urbanos em nuvens convectivas profundas que se desenvolveram sobre áreas urbanas. Os autores consideraram duas concentrações iniciais diferentes de NCN para as simulações realizadas, uma com  $1200/\text{cm}^3$  (para uma atmosfera rural) e outra com  $2000/\text{cm}^3$  (para atmosfera urbana). Os resultados mostraram que as concentrações de partículas modulavam as características dinâmicas e microfísicas das nuvens a medida que as nuvens de convecção profunda se desenvolviam. Quando as concentrações de NCN variavam de ambiente rural para urbano, havia um atraso na formação de nuvens e chuva, a água líquida e gelo condensado eram menores e foi observada uma diminuição na precipitação. Quando eram adicionados núcleos gigantes na simulação, as nuvens duravam mais tempo e um aumento na precipitação foi observado.

Muitos estudos sobre os impactos dos aerossóis nas nuvens abordam apenas duas situações de concentrações de partículas, uma para ambiente poluído e outra para ambiente limpo, e já observam algumas diferenças claras. No trabalho de Wang, (2005), foram realizadas trinta simulações onde as concentrações de NCN variaram de  $50/\text{cm}^3$  para  $6000/\text{cm}^3$ . Wang observou nas simulações que a razão da concentração de gotículas de nuvem com o aumento na concentração de NCN caiu quando a concentração de NCN ultrapassava os  $2000/\text{cm}^3$  e permanecia constante para concentrações maiores. De uma forma geral, houve uma intensificação na convecção devido ao aumento no número de gotículas de nuvem e aumento na liberação de calor latente, sendo observado um relativo aumento na precipitação devido a um acréscimo nas quantidades de gelo de nuvem e *graupel*. Outro resultado

interessante do trabalho de Wang foi a constatação de um aumento na eficiência da precipitação para um aumento na concentração de NCN até cerca de  $1500/\text{cm}^3$  e permanecendo praticamente constante a eficiência na precipitação para concentrações maiores.

Li et al., (2008), implementaram um esquema de microfísica de nuvens “bulk” dois-momentos (considerando número e massa das partículas) no modelo *Weather Research and Forecasting* (WRF) para investigar as interações aerossol-nuvem. Testes de sensibilidade foram realizados usando-se diferentes concentrações de partículas e variando o número de 200 a  $50000/\text{cm}^3$ , e a massa de 1 a  $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$  ao nível da superfície. Os autores encontraram que a resposta da precipitação para o aumento nas concentrações de partículas não era linear, principalmente por causa das complicadas interações entre a dinâmica e a microfísica das nuvens. A precipitação aumentou com o aumento nas concentrações de aerossóis (de um ambiente marinho limpo para continental), mas foi consideravelmente reduzida e completamente suprimida sob condições altamente poluídas, indicando que as concentrações de aerossóis exibem distintos efeitos sobre a eficiência na precipitação. Os autores observaram respostas similares a da precipitação para a máxima cobertura de nuvens, núcleos de *updrafts*, e máximas velocidades verticais.

Fan et al., (2007), usaram um modelo de nuvens desenvolvido na Universidade de Hebrew para simular um evento de convecção profunda observado em 24/08/2000 em Houston, no Texas. Os autores observaram que um aumento nas partículas ativadas (NCN) resultou em um aumento no tempo de vida da nuvem, maiores tamanhos de nuvens, e que a formação de nuvens secundárias e precipitação foram aumentadas.

No trabalho de Teller e Levin, (2006), foi utilizado um modelo bidimensional (2D) para se estudar o efeito das concentrações de aerossóis sobre os processos de crescimento de gotas de nuvens e precipitação. Os autores consideraram concentrações iniciais de 100, 300, 600, 900 e  $1370/\text{cm}^3$ . Os resultados mostraram que com o aumento nas concentrações de aerossóis de 100 para  $1370/\text{cm}^3$  houve uma diminuição na precipitação simulada e

também um atraso no início da chuva. A introdução de NCN gigantes contribuiu para um aumento da precipitação na superfície sob condição poluída, mas não causou resposta para a precipitação simulada em ambiente limpo. Os autores também observaram que a resposta da precipitação ao aumento na concentração de NCN (redução na precipitação) é muito maior se comparada a resposta da adição de NCN gigantes (aumento na chuva).

No trabalho de Rosenfeld et al., (2008), os efeitos radiativos e microfísicos do aerossol são representados por uma mesma métrica, a qual foi denominada pelos autores de Forçante Termodinâmica dos aerossóis (FT). A FT representa a mudança no balanço de energia atmosférica induzida pelo aerossol e de natureza não diretamente radiativa, tendo como principal fonte a quantidade de calor latente liberada pelas mudanças de fase induzidas pelo aerossol nas nuvens e precipitação, e que pode ser expressa como a mudança do fluxo de calor latente na coluna atmosférica. Os autores mostraram que um máximo valor de CAPE (*Convective Available Potential Energy*) ocorre com  $NCN_{0,4}$  aproximadamente igual a  $1200/cm^3$ , o qual corresponde a máxima intensificação do desenvolvimento da nuvem, e a AOT (*Aerosol Optical Thickness*) correspondente a  $NCN_{0,4}$  no ótimo desenvolvimento microfísico de 0,25. Os autores afirmam que se forem adicionados aerossóis além deste ponto, haverá um decréscimo substancial no desenvolvimento da nuvem, pois os efeitos microfísicos e radiativos trabalharão na mesma direção, ou seja, menor liberação de energia convectiva do ar e menos aquecimento na superfície.

Martins (2006) utilizou o modelo numérico RAMS para estudar o efeito dos núcleos de condensação na formação de nuvens e o desenvolvimento da precipitação na região amazônica durante a estação seca. O autor simulou a formação de nuvens em diferentes valores iniciais de NCN, NG (núcleos de gelo) e parâmetros de forma da distribuição. Os resultados mostraram que o valor máximo de conteúdo de água de nuvem, integrado na coluna atmosférica, foi até quatro vezes maior nas simulações em que o ambiente era poluído (concentrações de NCN quadruplicadas), se comparado a simulação com ambiente limpo. As simulações com altas concentrações de NCN apresentaram



taxas de precipitação máximas superiores as taxas simuladas para atmosfera limpa, mas com acumulados totais de precipitações na superfície menores.

Como foi discutido anteriormente, vários estudos reportaram um decréscimo na precipitação em áreas poluídas, e em outros foi reportado que a influência dos aerossóis induz um aumento na precipitação. Khain (2009) analisou as possíveis razões para as diferenças entre os resultados. A análise dos efeitos do aerossol na precipitação é realizada usando-se os balanços de massa e calor. A análise de Khain (2009) foi concentrada em nuvens e sistemas de nuvens desenvolvendo-se em ambientes com níveis de congelamento relativamente altos. Foi mostrado que para estas nuvens os aerossóis aumentam ambas a geração e a perda de massa condensada. O efeito líquido dos aerossóis na precipitação depende das condições do ambiente (umidade do ar, estabilidade atmosférica, e cisalhamento do vento), bem como do tipo de nuvem, determinando se o aumento da geração de massa condensada ou a perda de massa condensada irá dominar com o aumento das concentrações de aerossóis (Khain, 2009). No caso em que a perda de massa condensada aumenta mais do que a geração, um decréscimo na precipitação será observado. No caso contrário, se um aumento na massa condensada dominar, um aumento na precipitação será observado. Na Figura 6 pode-se observar o esquema de classificação do efeito dos aerossóis na precipitação que foi apresentado no trabalho de Khain (2009).

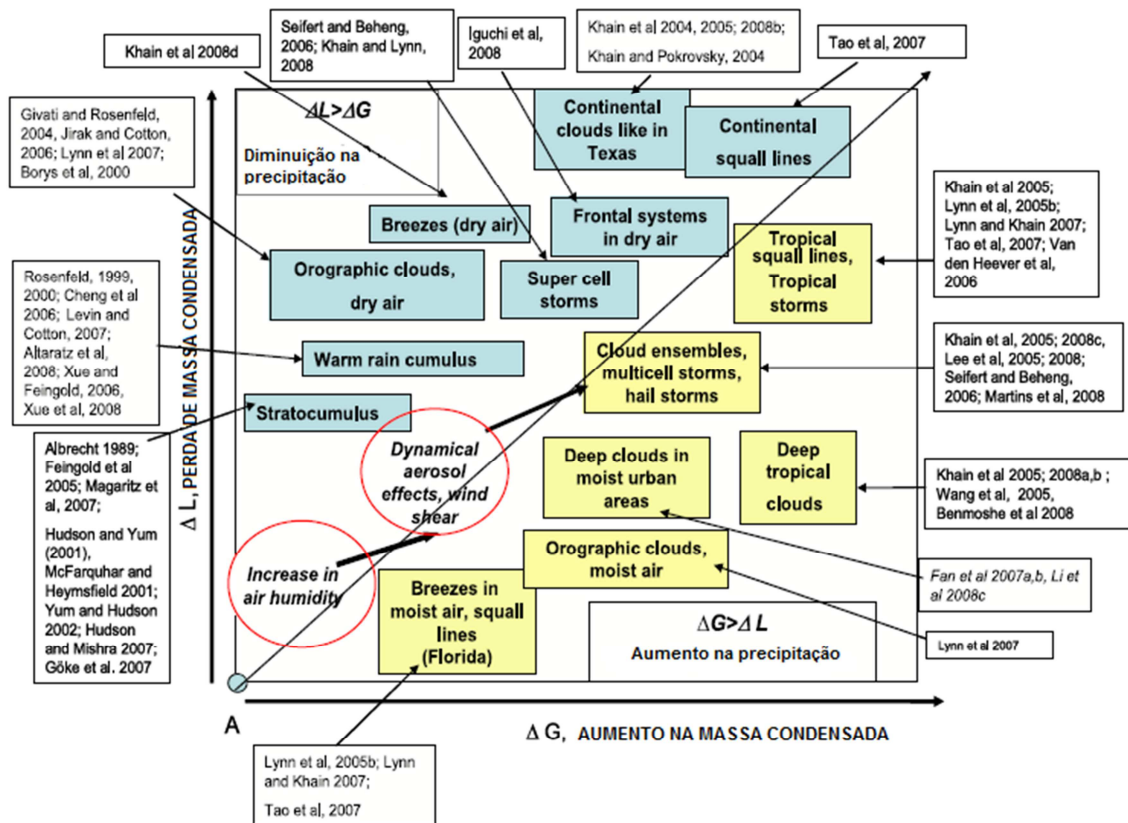


Figura 6. Esquema de classificação dos efeitos dos aerossóis sobre a precipitação. Fonte: Adaptado de Khain, 2009.

## 2.4 OBJETIVOS

Dentro da temática discutida anteriormente, onde a ação antropogênica produz partículas com propriedades estreitamente relacionadas ao fenômeno da precipitação, e de que a atenção dada ao tema na RMSP não tinha sido ainda foco de intenso estudo, o presente trabalho teve como proposta discutir e tentar responder a algumas questões totalmente em aberto no contexto da interação aerossol-nuvem-precipitação na RMSP. Algumas questões levantadas foram:

a) De uma forma mais geral, quais mudanças no processo de formação de nuvens sobre a RMSP podem estar associadas ao aumento ou diminuição

na concentração de aerossóis de origem antropogênica e quais são as dimensões espacial e temporal decorrentes dessas variações?

b) Como a distribuição de hidrometeoros (variáveis microfísicas) se comporta em condições de alta concentração de NCN e NG e quais as consequências para o total de precipitação acumulado na superfície?

c) Qual o real impacto dos aerossóis urbanos na formação de nuvens e precipitação sobre a RMSP?

## 2. METODOLOGIA

### 2.1 ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo corresponde a Região Metropolitana de São Paulo (RMSP) e seu entorno. A Região Metropolitana de São Paulo está localizada a 23,5°S e 46,6°W, na porção sudeste do Brasil e é constituída de 39 municípios altamente urbanizados e industrializados, entre os quais se inclui a cidade de São Paulo. Possui uma área de 7.947 km<sup>2</sup> com uma população superior a 19,8 milhões de habitantes, distribuída em uma área urbanizada e de maneira desordenada, e com uma densidade populacional de aproximadamente 2.494 pessoas/km<sup>2</sup>. O sítio urbano situa-se, praticamente todo, na Bacia Sedimentar de São Paulo cujo vale principal é o do Rio Tietê, orientado no sentido leste-oeste, com uma altitude média de 720 metros e uma extensa planície de inundação. Essa bacia é cercada ao norte pela Serra da Cantareira, também orientada no sentido leste-oeste e com altitudes que atingem até 1.200 metros e a leste-sul pelo reverso da Serra do Mar com altitudes que, em geral, ultrapassam os 800 metros. Está distante aproximadamente 45 km do Oceano Atlântico. A RMSP ocupa cerca de 0,1% do território brasileiro e é o quarto maior conglomerado urbano do mundo. Na Figura 7 é apresentada uma imagem da RMSP captada pelo satélite Landsat 7 (a esquerda) e uma foto da iluminação noturna da RMSP tirada por um dos tripulantes da estação espacial internacional no dia 04/05/2003 (a direita). Imagem disponível em: (<http://earthobservatory.nasa.gov/IOTD/view.php?id=3427>).

O clima de São Paulo pode ser dividido em duas estações: uma chuvosa que vai de outubro a abril e outra seca de maio a setembro. A estação chuvosa é influenciada pela entrada de sistemas extratropicais (sistemas frontais) e por áreas de instabilidade atmosférica, favorecendo a ocorrência de chuvas abundantes, como a Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS). Na estação seca o clima é influenciado pela entrada de rápidas frentes frias vindas do sul do continente, diminuição da precipitação e da temperatura, períodos de alta estabilidade atmosférica e desintensificação dos movimentos verticais da Camada Limite Planetária (CLP), o que contribui para que haja frequentemente

inversões térmicas muito próximas à superfície. Estas condições são desfavoráveis à dispersão de poluentes (CETESB 2009). O estado de São Paulo apresenta uma grande variabilidade na ocupação do solo e no relevo, gerando fenômenos que influenciam o clima regional e local como as brisas marítimas e terrestres e as circulações vale-montanha (FREITAS, 2003).

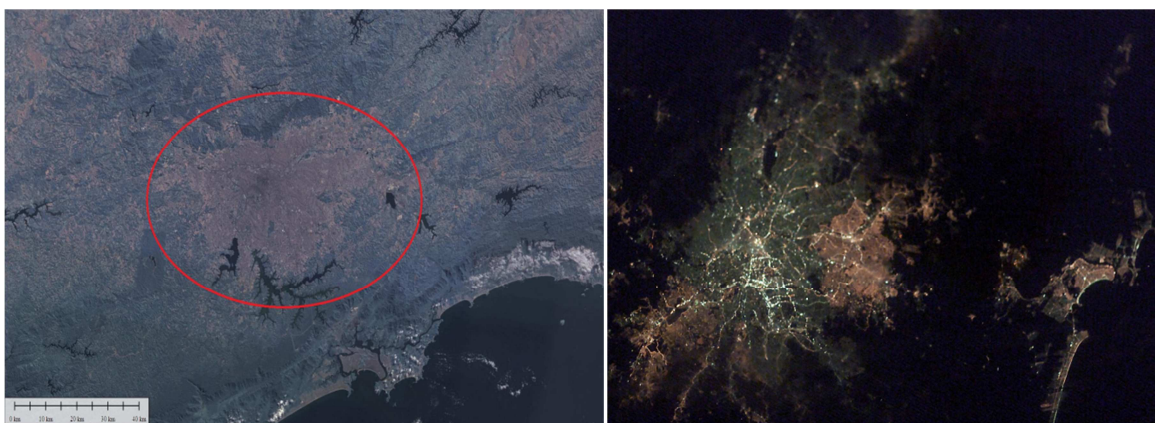


Figura 7. Imagem de satélite (Landsat 7) destacando a RMSP no centro da figura (a esquerda) e uma foto da iluminação noturna da RMSP retirada da estação espacial internacional no dia 04/05/2003 (a direita).

O clima urbano é um sistema sob influência de um dado espaço terrestre, ou seja, é composto de um microclima derivado dos efeitos influenciados pela proximidade do solo e dos espaços urbanos, como a impermeabilização dos solos, alterações na cobertura vegetal, concentração de edifícios que interferem nos efeitos dos ventos e a contaminação da atmosfera através da emissão de gases e partículas de diversas ordens. O aumento da temperatura e a grande concentração de poluentes podem ser vistos como expressões significativas das alterações microclimáticas em centros urbanos. As condições climáticas de uma área urbana extensa e com uma grande densidade de construções são fortemente distintas dos espaços naturais que as cercam. Dessa forma, as cidades contribuem para a alteração do balanço de energia, gerando bolsões de calor sobre as áreas urbanas. A esse fenômeno é dado o nome de ilhas de calor (LOMBARDO, 1985). Na Figura 8 tem-se um exemplo de ilha de calor tipicamente caracterizada na RMSP (imagem da esquerda), obtido a partir de uma imagem na banda termal do satélite Landsat 7 (temperatura aparente da superfície para o dia 03/09/1999) e do trabalho de Tarifa e Armani (2000). A diferença de temperatura da superfície

para esse dia entre a periferia (em azul escuro) e o centro da cidade (em vermelho) foi próximo dos 7°C. Também se observa na Figura 8 (ao centro) uma imagem do uso do solo para o município de São Paulo, destacando as áreas densamente urbanizadas das áreas com cobertura de vegetação, e a direita tem-se uma imagem das diferentes unidades climáticas urbanas (centrais e periféricas), também para o município de São Paulo. Imagens disponíveis em:

(<http://atlasambiental.prefeitura.sp.gov.br/pagina.php?id=21&B=mapas>).

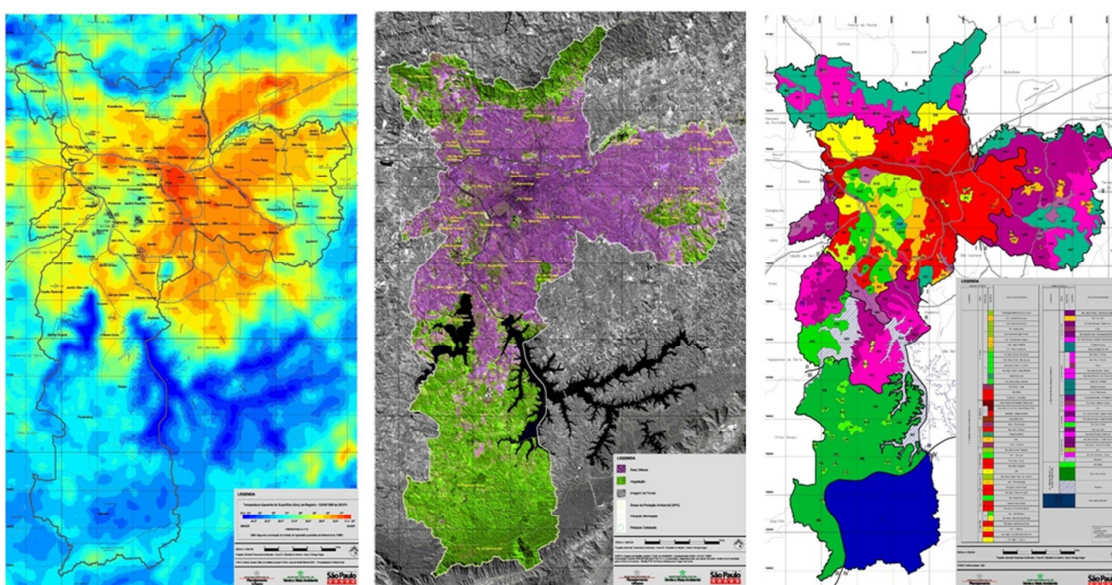


Figura 8. A esquerda tem-se uma imagem na banda termal do satélite Landsat 7 (temperatura aparente da superfície para o dia 03/09/1999), no centro tem-se uma imagem do uso do solo (área urbanizada e com cobertura de vegetação), e a direita tem-se uma imagem dos diferentes climas encontrados (centrais e periféricos), todas as imagens, para o município de São Paulo. Fonte: Tarifa e Armani (2000).

## 2.2 PERÍODO DE ESTUDO

Os resultados estão divididos em análises de dados coletados durante um experimento na RMSP e períodos escolhidos para a simulação atmosférica. O grupo de pesquisa LAPAt (Laboratório de Análise dos Processos Atmosféricos) do IAG/USP realizou um experimento que fez parte do trabalho de mestrado de Oliveira (2007) e vários dados sobre as partículas de aerossol sobre a RMSP foram coletados. As amostragens iniciaram-se em 15 de agosto

e terminaram em 17 de outubro de 2005, com coleta de dados a cada dois minutos por um equipamento SMPS (*Scanning Mobility Particle Sizer*), que mede a distribuição de tamanho em número das partículas, e pertencente ao grupo LFA (Laboratório de Física da Atmosfera) do IFUSP. Também para as análises com resultados experimentais foram utilizados dados de concentrações de CO (ppm) e NO<sub>x</sub> (ug/m<sup>3</sup>) para todo o mês de setembro de 2005 medidos na estação de monitoramento automático da CETESB em Pinheiros.

Os dias escolhidos para as simulações atmosféricas foram reduzidos a principalmente: 03 de janeiro de 2008, e 01 e 02 de janeiro de 2010. Embora outros dias tenham sido simulados e contribuído para as validações do modelo, não serão apresentados nesta tese. Adiante serão mostradas detalhadamente as condições atmosféricas que predominaram no mês de janeiro de 2010.

## **2.3 DADOS UTILIZADOS**

Foram utilizados diferentes conjuntos de dados para o desenvolvimento da tese. Desde os dados coletados por experimento realizado na RMSP (como descrito acima), como dados de CO (ppm), NO<sub>x</sub> (ug/m<sup>3</sup>) e PM<sub>10</sub> (ug/m<sup>3</sup>) coletados por estações de monitoramento da CETESB, bem como valores de fatores de emissões dos relatórios da mesma, que foram utilizados no programa que calcula as emissões de poluentes na RMSP. Foram utilizados dados da estação meteorológica do IAG/USP na Água Funda e dados da estação automática do INMET localizada no bairro de Santana na capital para as validações das simulações com o modelo WRF/chem. Também para as validações das simulações foram utilizados dados medidos pelo radar meteorológico polarimétrico banda-X Doppler móvel (MXPOL) do Laboratório de Hidrometeorologia do DCA/IAG/USP (Pereira Filho et al., 2007), e utilizado para a caracterização dos sistemas precipitantes escolhidos para este estudo.

Para as simulações com o modelo WRF/chem foram utilizadas as condições atmosféricas iniciais e de fronteiras oriundas do NCEP GFS/FNL (Global Forecast System / Final Global Analysis), que é uma base de dados livremente disponível. Basicamente, os dados são fornecidos por um modelo



global espectral utilizado para previsão e com um módulo de assimilação de dados (GFS), e a cada 6 horas (00, 06, 12 e 18 UTC), com 27 níveis na vertical e com resolução de 1 grau. A versão final FNL usa o mesmo modelo GFS, mas com uma janela de assimilação de dados mais longa e de 9 horas, assim permitindo que mais dados possam ser assimilados a nova análise que é criada.

#### **2.40 MODELO NUMÉRICO WRF – *WEATHER RESEARCH AND FORECASTING***

O *Weather Research and Forecasting model* – WRF (Skamarock et al., 2005) é um modelo de mesoescala não-hidrostático de previsão numérica do tempo. O seu desenvolvimento está sob a coordenação do NCAR (*National Center for Atmospheric Research*), que conta com a colaboração de diversas universidades e outros institutos de pesquisa. O modelo WRF foi desenvolvido para ser flexível, com código portátil e eficiente em ambientes de computação paralela. Oferece uma diversidade de opções físicas, além de sistemas avançados de assimilação de dados que foram desenvolvidos e testados em conjunto com o modelo. Pode ser usado em aplicações de diferentes escalas espaciais, desde alguns metros até milhares de quilômetros. Estas aplicações incluem previsões numéricas do tempo operacionais e voltadas para a pesquisa, pesquisas de parametrizações físicas e assimilação de dados, simulações do clima, modelagem da química atmosférica e qualidade do ar (WRF/Chem), acoplamento oceano-atmosfera, simulações idealizadas (ondas baroclínicas, convecção, etc.), e até mesmo para o estudo da atmosfera em outros planetas (PlanetWRF).

Dentro do pré-processamento dos dados de entrada do modelo (WPS) são utilizados três programas descritos a seguir. Os dados de superfície (topografia, cobertura de solo, albedo e etc) são tratados pelo programa *geogrid.exe*, ajustados ao domínio e espaçamento de grade escolhidos. Os dados meteorológicos vindos do modelo global GFS são interpolados horizontalmente pelo programa *ungrib.exe* e finalmente é utilizado o programa *metgrid.exe* para unir os dois arquivos gerados anteriormente e a partir da escolha das grades de interesse para um domínio retangular que pode usar as



projeções mercator, lambert, lat-lon ou polar. Na parte de execução do modelo (WRFV3) o programa real.exe executa a interpolação vertical de níveis de pressão para o sistema de coordenadas sigma e após esse procedimento são criadas as condições iniciais e de fronteiras necessárias para a execução do modelo. Finalmente, para a execução do modelo o programa wrf.exe é acionado. O WRF foi desenvolvido com uma arquitetura de programação que permite a execução do modelo em paralelo, e é altamente recomendado que se utilize desse processamento em paralelo para a diminuição do tempo de processamento do WRF/Chem, visto que a inclusão da química aumenta muito o número de variáveis e conseqüentemente a necessidade de processamento.

#### 2.4.1 Coordenadas Verticais

O sistema de coordenadas verticais utilizado pelo WRF é denominado  $\eta$ . Entretanto, não é o mesmo sistema  $\eta$  que utiliza o nível médio do mar como base, e sim uma modificação do sistema  $\sigma$ . As equações do WRF são formuladas empregando a coordenada vertical  $\eta$ , representada na Figura 9 e definida como:

$$\eta = (p_h - p_{ht})/\mu \quad 3.4.1$$

Em que,  $\mu = P_{hs} - P_{ht}$  é a componente hidrostática da pressão,  $P_{ht}$  é o valor no topo e  $P_{hs}$  o valor na superfície.

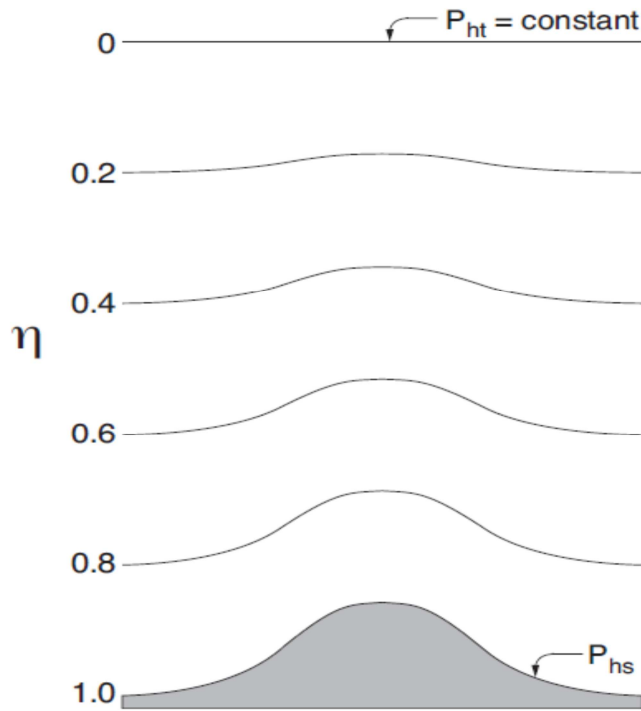


Figura 9. Sistema  $\eta$  de coordenadas verticais.

Vale ressaltar que as variáveis calculadas não representam um valor sobre as superfícies verticais e sim uma média para a parcela entre duas superfícies.

### 2.4.2 Equações Governantes

Todos os cálculos executados pelo WRF com a finalidade de simular as condições da atmosfera são baseados em um conjunto de equações que controlam o comportamento da atmosfera. O sistema de equações diferenciais parciais por elas composto não pode ser resolvido analiticamente, a menos que várias aproximações sejam feitas. Entretanto, com essas aproximações a capacidade de representar fenômenos reais é praticamente nula. As equações são definidas na forma diferencial como:

$$\partial_t U + (\nabla \cdot \mathbf{V}u) - \partial_x(p\partial_\eta\phi) + \partial_\eta(p\partial_x\phi) = F_U \quad 3.4.2$$

$$\partial_t V + (\nabla \cdot \mathbf{V}v) - \partial_y(p\partial_\eta\phi) + \partial_\eta(p\partial_y\phi) = F_V \quad 3.4.3$$

$$\partial_t W + (\nabla \cdot \mathbf{V}w) - g(\partial_\eta p - \mu) = F_W \quad 3.4.4$$

$$\partial_t \Theta + (\nabla \cdot \mathbf{V} \theta) = F_\Theta \quad 3.4.5$$

$$\partial_t \mu + (\nabla \cdot \mathbf{V}) = 0 \quad 3.4.6$$

$$\partial_t \phi + \mu^{-1} [(\mathbf{V} \cdot \nabla \phi) - gW] = 0 \quad 3.4.7$$

$$\partial_\eta \phi = -\alpha \mu \quad 3.4.8$$

$$p = p_0 (R_d \theta / p_0 \alpha)^\gamma \quad 3.4.9$$

Em que,  $v = (u, v, w)$ ,  $\theta$  é a temperatura potencial,  $\Phi = gz$  é o geopotencial,  $p$  é a pressão,  $\alpha = 1/\rho$  é o inverso da densidade,  $\square = c_p/c_v$ ,  $R_d$  é a constante dos gases para o ar seco,  $p_0$  é a pressão de referência,  $V = \mu v = (U, V, W)$ ,  $\Omega = \mu \square$  e  $\Theta = \mu \theta$ .  $F_U$ ,  $F_V$ ,  $F_W$  e  $F_\Theta$  representam os termos forçantes devido à física do modelo, mistura turbulenta, projeções esféricas e a rotação da Terra.

As equações 3.4.2 à 3.4.4 representam a conservação da quantidade de movimento, 3.4.5 a conservação de energia termodinâmica, 3.4.6 a conservação da massa, 3.4.7 a equação geopotencial e 3.4.9 a equação de estado termodinâmico. Entretanto, na forma apresentada acima, as equações são aplicáveis apenas para situações idealizadas. O sistema realmente utilizado no WRF possui termos que levam em conta o efeito da força de Coriolis, umidade do ar e a projeção cartográfica que está sendo utilizada. Além disso, as equações diferenciais parciais possuem variáveis de perturbação, pois isso diminui os erros de truncamento e arredondamento no cálculo do gradiente de pressão horizontal e vertical, respectivamente. Essas novas variáveis (denotadas por  $a'$ ) representam desvios em termos que estão hidrostaticamente balanceados (denotados por  $\bar{a}$ ). Basicamente a nova representação para uma variável qualquer é  $a = \bar{a} + a'$ . A forma final das equações é:

$$\begin{aligned} \partial_t U + m[\partial_x(Uu) + \partial_y(Vu)] + \partial_\eta(\Omega u) + (\mu_d \alpha \partial_x p' + \mu_d \alpha' \partial_x \bar{p}) \\ + (\alpha/\alpha_d)(\mu_d \partial_x \phi' + \partial_\eta p' \partial_x \phi - \mu_d' \partial_x \phi) = F_U \end{aligned} \quad 3.4.10$$

$$\begin{aligned} \partial_t V + m[\partial_x(Uv) + \partial_y(Vv)] + \partial_\eta(\Omega v) + (\mu_d \alpha \partial_y p' + \mu_d \alpha' \partial_y \bar{p}) \\ + (\alpha/\alpha_d)(\mu_d \partial_y \phi' + \partial_\eta p' \partial_y \phi - \mu_d' \partial_y \phi) = F_V \end{aligned} \quad 3.4.11$$

$$\begin{aligned} & \partial_t W + m[\partial_x(Uw) + \partial_y(Vw)] + \partial_\eta(\Omega w) \\ & -m^{-1}g(\alpha/\alpha_d)[\partial_\eta p' - \bar{\mu}_d(q_v + q_c + q_r)] + m^{-1}\mu'_d g = F_W \end{aligned} \quad 3.4.12$$

$$\partial_t \Theta + m^2[\partial_x(U\theta) + \partial_y(V\theta)] + m\partial_\eta(\Omega\theta) = F_\Theta \quad 3.4.13$$

$$\partial_t \mu'_d + m^2[\partial_x U + \partial_y V] + m\partial_\eta \Omega = 0 \quad 3.4.14$$

$$\partial_t \phi' + \mu_d^{-1}[m^2(U\phi_x + V\phi_y) + m\Omega\phi_\eta - gW] = 0 \quad 3.4.15$$

$$\partial_\eta \phi' = -\bar{\mu}_d \alpha'_d - \alpha_d \mu'_d \quad 3.4.16$$

$$\partial_t Q_m + m^2[\partial_x(Uq_m) + \partial_y(Vq_m)] + m\partial_\eta(\Omega q_m) = F_{Q_m} \quad 3.4.17$$

Em que,  $U = \mu_d u/m$ ,  $V = \mu_d v/m$ ,  $W = \mu_d w/m$ ,  $\Omega = \mu_d \square/m$ . A equação de estado não pode ser escrita em forma de perturbação devido ao expoente, ficando com a mesma forma apresentada em 3.4.9.

### 2.4.3 Discretização Temporal

A solução das equações do modelo é na forma de ondas, entretanto na solução existem tanto ondas lentas, que representam os fenômenos meteorológicos de interesse, quanto rápidas, ondas sonoras. As ondas sonoras são de pouco ou nenhum interesse para a meteorologia, entretanto precisam ser resolvidas para se manter a estabilidade da solução. Como possuem alta frequência, elas exigem um  $\Delta t$  (passo de tempo) menor do que as ondas meteorológicas. Entretanto, caso todos os cálculos do modelo tivessem que ser realizados utilizando-se esse  $\Delta t$  pequeno, o custo computacional/temporal seria muito alto, inviabilizando a previsão. Assim, várias técnicas foram desenvolvidas para resolver as ondas acústicas separadamente das demais ondas, as quais podem então utilizar um  $\Delta t$  apropriado. O WRF utiliza uma dessas técnicas, um esquema de integração por passos de tempo. Enquanto ondas lentas são resolvidas utilizando o esquema Runge-Kutta de 3ª ordem (RK3), o modo horizontal de propagação das ondas acústicas é resolvido com um esquema de integração *forward-backward* e, o modo vertical, com um

esquema implícito utilizando o  $\Delta t$  para ondas rápidas. A solução das ondas sonoras é aplicada como uma correção no RK3.

O esquema de Runge-Kutta de 3ª ordem integra um sistema de equações diferenciais usando um preditor-corretor. As variáveis são definidas como  $\Phi = (U, V, W, \Theta, \Phi', \mu', Q_m)$  e as equações do modelo,  $\Phi_t = R(\Phi)$ . São necessários três passos para avançar a solução de  $\Phi(t)$  a  $\Phi(t + \Delta t)$ :

$$\Phi^* = \Phi^t + \frac{\Delta t}{3} R(\Phi^t) \quad 3.4.18$$

$$\Phi^{**} = \Phi^t + \frac{\Delta t}{2} R(\Phi^*) \quad 3.4.19$$

$$\Phi^{t+\Delta t} = \Phi^t + \Delta t R(\Phi^{**}), \quad 3.4.20$$

Em que,  $\Delta t$  é o passo de tempo utilizado para ondas lentas. Aplicado às equações 3.4.10 a 3.4.17,  $\Phi_t$  representa os termos derivados no tempo e  $R(\Phi)$  os termos restantes. Apesar de ser denominado Runge-Kutta de 3ª ordem, o esquema tem precisão de 3ª ordem apenas para equações lineares, para equações não-lineares o esquema possui precisão de 2ª ordem. Para resolver as ondas sonoras, as equações governantes são integradas utilizando um passo de tempo menor ( $\Delta_{\square}$ ) dentro do passo de tempo do RK3 ( $\Delta t$ ). Representando em termos de programação, existe um laço de repetição acústico que é executado ( $\Delta t/\Delta_{\square}$ ) vezes dentro do laço de repetição do RK3. As equações são novamente escritas na forma de perturbação, mas dessa vez a perturbação é a influência da solução das ondas sonoras na solução geral. Assume-se que :

$$\begin{aligned} \mathbf{V}'' &= \mathbf{V} - \mathbf{V}^{t^*}, & \Omega'' &= \Omega - \Omega^{t^*}, & \Theta'' &= \Theta - \Theta^{t^*}, \\ \phi'' &= \phi' - \phi'^{t^*}, & \alpha_d'' &= \alpha_d' - \alpha_d'^{t^*}, & \mu_d'' &= \mu_d' - \mu_d'^{t^*} \end{aligned}$$

Em que,  $t^*$  denota os desvios no preditor calculado pelo RK3 ( $\Phi^t$ ,  $\Phi^*$  ou  $\Phi^{**}$  nas equações 3.4.18 a 3.4.20). Reescrevendo as variáveis em função de  $t^*$ , o sistema que resolve as ondas acústicas fica da seguinte forma:

$$\delta_\tau U'' + \mu^{t^*} \alpha^{t^*} \partial_x p''^\tau + (\mu^{t^*} \partial_x \bar{p}) \alpha''^\tau + (\alpha/\alpha_d) [\mu^{t^*} \partial_x \phi''^\tau + (\partial_x \phi^{t^*}) (\partial_\eta p'' - \mu'')^\tau] = R_U^{t^*} \quad 3.4.21$$

$$\delta_\tau V'' + \mu^{t^*} \alpha^{t^*} \partial_y p''^\tau + (\mu^{t^*} \partial_y \bar{p}) \alpha''^\tau + (\alpha/\alpha_d) [\mu^{t^*} \partial_y \phi''^\tau + (\partial_y \phi^{t^*}) (\partial_\eta p'' - \mu'')^\tau] = R_V^{t^*} \quad 3.4.22$$

$$\delta_\tau \mu_d'' + m^2 [\partial_x U'' + \partial_y V'']^{\tau+\Delta\tau} + m \partial_\eta \Omega''^{\tau+\Delta\tau} = R_\mu^{t^*} \quad 3.4.23$$

$$\delta_\tau \Theta'' + m^2 [\partial_x (U'' \theta^{t^*}) + \partial_y (V'' \theta^{t^*})]^{\tau+\Delta\tau} + m \partial_\eta (\Omega''^{\tau+\Delta\tau} \theta^{t^*}) = R_\Theta^{t^*} \quad 3.4.24$$

$$\delta_\tau W'' - m^{-1} g \left[ (\alpha/\alpha_d)^{t^*} \partial_\eta (C \partial_\eta \phi'') + \partial_\eta \left( \frac{c_s^2}{\alpha^{t^*}} \frac{\Theta''}{\Theta^{t^*}} \right) - \mu_d'' \right]^\tau = R_W^{t^*} \quad 3.4.25$$

$$\delta_\tau \phi'' + \frac{1}{\mu_d^{t^*}} [m \Omega^{\tau+\Delta\tau} \phi_\eta - \overline{g W''^\tau}] = R_\phi^{t^*} \quad 3.4.26$$

#### 2.4.4 Discretização Espacial

O WRF utiliza uma grade do tipo C (ARAKAWA; LAMB, 1977) na discretização espacial de variáveis (Figura 10). A vantagem em utilizar uma grade alternada é evitar o desacoplamento entre os termos da equação diferencial parcial, que ocorre quando variáveis interdependentes são resolvidas no mesmo ponto de grade. Quando esse desacoplamento aparece, grande imprecisão é introduzida no cálculo pelo módulo computacional gerado, tornando-se necessário aplicar uma difusão computacional nas ondas mais curtas. Além disso, grades alternadas do tipo C ainda têm a vantagem de necessitar do cálculo de médias na equação discretizada apenas para o termo de Coriolis. Isso se prova uma grande vantagem, pois o WRF é primariamente um modelo de mesoescala. Como a influência da força de Coriolis em fenômenos representados nessa escala é pouco relevante, a grade do tipo C torna-se a mais recomendável.

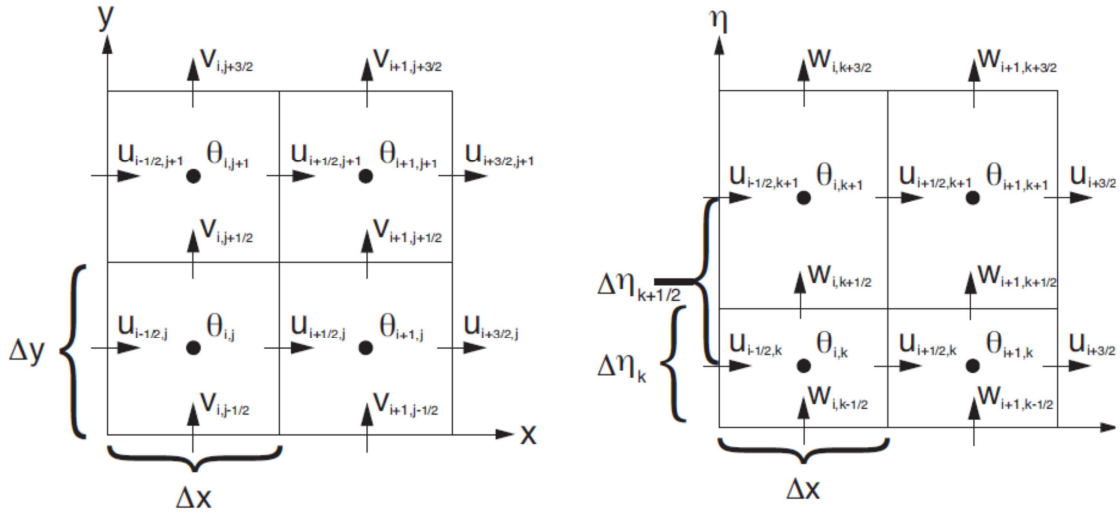


Figura 10. Grade horizontal (esquerda) e vertical (direita) do tipo C de Arakawa.

Enquanto na integração no tempo é utilizado Runge-Kutta de 3ª ordem, os esquemas que resolvem as equações de advecção na horizontal e vertical podem utilizar RK de 2ª a 6ª ordem.

### 2.4.5 Aninhamento de Grades

Quando se deseja analisar mais detalhadamente uma região de interesse que está inserida na grade original utilizada, é possível fazer um aninhamento de grades. A vantagem em utilizar grades aninhadas é ter dados de uma área com uma alta resolução espacial, sem que toda a grade tenha que ser rodada (processada) com um  $\Delta x$  menor. A Figura 11 mostra exemplos de possíveis aninhamentos de grade no WRF.

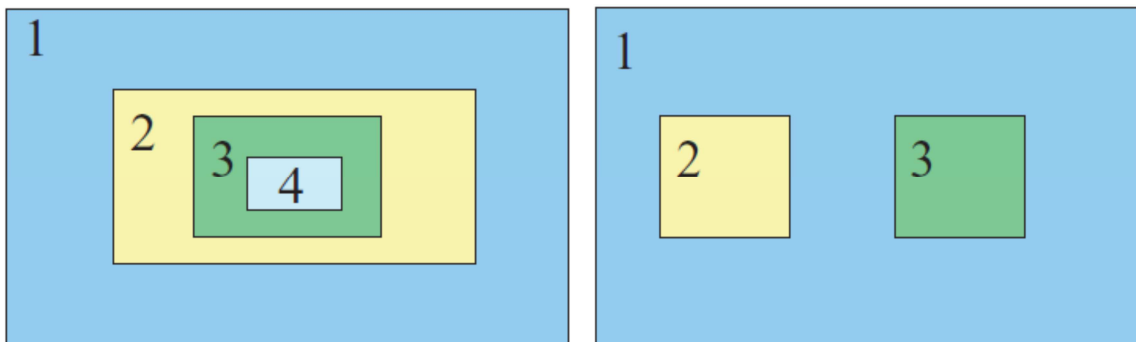


Figura 11. Exemplo de possíveis aninhamentos de grades no WRF, grades telescópicas (a esquerda) e grades com o mesmo nível com relação à grade “mãe” (a direita).

Em ambos os casos apresentados, as condições de contorno (CC) da grade menor (GF, Grade Fina) são interpoladas a partir da previsão fornecida pela grade maior (GG, Grade Grossa), ou seja, na Figura 11 (esquerda)  $1 \rightarrow 2 \rightarrow 3 \rightarrow 4$ , e na imagem da direita  $1 \rightarrow 2$  e  $1 \rightarrow 3$ . Os dados calculados nas grades podem fluir (entre as grades) em apenas um sentido (chamado de 1-way nesting) ou em ambos (chamado 2-way nesting): no modo unidirecional, os valores da GG são simplesmente utilizados como condições de contorno na GF, no modo bidirecional, ocorre o mesmo processo, entretanto, os pontos da GG que estão dentro da GF, têm seus valores alterados para aqueles obtidos pela GF. A Figura 12 mostra exemplos da disposição das variáveis em grades aninhadas. A alternância dessas variáveis na grade define como a GF é colocada sobre a GG e influencia os resultados quando o modo 2-way está ligado. Se a razão entre o  $\Delta x_{GG}$  e  $\Delta x_{GF}$  for ímpar (lado esquerdo da Figura 12), os pontos que contêm determinada variável na GG e GF coincidem. Caso contrário, o ponto da GG fica equidistante dos quatro pontos da GF, e simplesmente recebe o valor do canto inferior esquerdo.

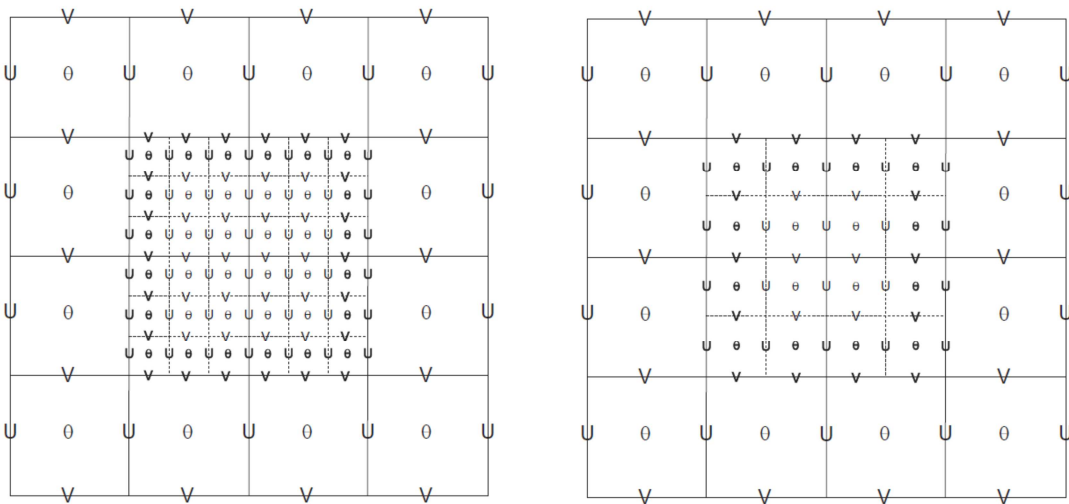


Figura 12. Grades aninhadas do tipo C.



### 3.4.6 Esquemas de microfísica de nuvens

Os processos de precipitação, vapor d'água e nuvens são resolvidos pelo modelo WRF explicitamente, na forma de esquemas de parametrizações. Nesses esquemas são construídas, no lugar dos complexos modelos teóricos, fórmulas alternativas simplificadas para resolver os termos associados aos fluxos turbulentos de momento, calor e umidade que aparecem devido à integração das equações. Na atual versão do WRF, o esquema de microfísica é chamado no final do *time-step* (chamado no final do ciclo) como um processo de ajuste, e não fornece tendências. A razão para isso é que o ajuste da condensação deve ser no final do *time-step* para garantir que o balanço final na saturação seja o mais acurado possível para a atualização dos valores de temperatura e umidade. Dentre os vários esquemas de microfísica disponíveis no modelo WRF, abaixo são apresentados três deles.

- Kessler (Kessler, 1969): é um esquema simples que trata nuvens quentes, e representa o vapor d'água, água de nuvem, e chuva. Inclui os processos microfísicos de produção, queda e evaporação da chuva; acreção e autoconversão de água de nuvem; e a produção de água de nuvem por condensação.
- Purdue Lin: é um esquema microfísico bastante sofisticado, e mais indicado para o uso em pesquisas. Todas as parametrizações dos hidrometeoros são baseadas nos trabalhos de Lin et al. (1983) e Rutledge e Hobbs (1984) com algumas modificações, incluindo o ajuste da saturação, como em Tao et al. (1989) e a sedimentação de gelo. Inclui seis classes de hidrometeoros: vapor d'água, água de nuvem, chuva, gelo de nuvem, neve e *graupel*. Este esquema de microfísica de nuvens foi adaptado do modelo de nuvens da Universidade de Purdue. Detalhes sobre o esquema podem ser encontrados no trabalho de Chen e Sun (2002). Este esquema foi escolhido para o uso na tese, principalmente por estar acoplado ao módulo de aerossóis na versão do WRF/Chem (3.1.1) aqui utilizada.
- Thompson (Thompson et al., 2004): este esquema foi desenvolvido para melhorar a previsão de eventos de congelamento de precipitações para avisos de segurança na aviação. Foi extensivamente testado e comparado tanto com casos idealizados quanto com casos de estudos reais documentados

(observações em períodos de inverno, para latitudes médias). Este esquema utiliza funções espectrais clássicas para representar cada classe de hidrometeoros em um conjunto de equações explícitas. Utiliza representações simplificadas de um parâmetro para água de nuvem, chuva, neve, *graupel* e uma função de dois parâmetros para gelo de nuvem.

#### **2.4.6 Esquemas de parametrização de cúmulos**

Estes esquemas são responsáveis pelos efeitos de escala de sub-grade convectivos e/ou de nuvens rasas. Os esquemas se desenvolveram para representar os fluxos verticais devido a *updrafts* e *downdrafts* não resolvidos, e a compensação de movimento fora das nuvens. Eles operam apenas em colunas individuais (exceto o esquema Grell-3), onde o esquema é disparado e fornecem os perfis verticais de calor e umidade e a componente convectiva da chuva superficial. As parametrizações de cúmulos são teoricamente válidas para grades grossas (espaçamentos maiores que 10 km), mas algumas vezes esses esquemas se mostraram úteis em disparar convecção em aplicações com 5-10 km de espaçamento (principalmente se for utilizado o novo esquema Grell-3). A seguir estão listadas algumas parametrizações cúmulos disponíveis no WRF.

- Esquema Kain-Fritsch (Kain e Fritsch, 1993; Kain, 2004): utiliza um modelo de nuvem simples, com correntes de umidade ascendentes e descendentes e inclui efeitos de troca (entranhamento) com a coluna atmosférica. A taxa de entranhamento pode variar como uma função da convergência em baixos níveis. Este esquema foi formulado para assegurar a conservação de massa, energia térmica, umidade total e momento e considera que toda a CAPE (*Convective Available Potential Energy*) num elemento da malha é removido em um determinado tempo de ajustamento.
- Esquema BMJ - Betts-Miller-Janjic (Janjic, 2000): apesar de ser baseado no esquema de Bets-Miller, apresenta algumas diferenças em aspectos importantes, como o perfil de convecção que é variável e depende da eficiência da nuvem (parâmetro adimensional que caracteriza o regime de convecção). A eficiência da nuvem depende das variações de entropia, precipitação e temperatura média da nuvem. O esquema BMJ tem sido otimizado ao longo

dos anos de aplicações operacionais no NCEP, diferindo assim no valor de alguns parâmetros recomendados. Recentemente, esforços têm sido feitos para refinar o esquema em altas resoluções, principalmente através de modificações nos mecanismos de disparo da convecção.

- Esquema por conjunto (*ensemble*) Grell-Devenyi (Grell e Devenyi, 2002): para cada ponto de grade são rodados múltiplos esquemas cúmulos (*ensemble*) e sendo devolvida para o modelo uma média dos resultados. A princípio os pesos dados a cada membro do conjunto podem ser diferentes, mas o padrão (*default*) é que os pesos sejam iguais. Os esquemas são todos do tipo fluxo de massa, mas com diferentes parâmetros de entranhamento devido os *updrafts* e  *downdrafts*, e eficiência de precipitação. Normalmente, esta parametrização é composta por 144 membros.

- Esquema Grell-3: Este esquema é considerado novo dentro do WRF e foi baseado no esquema apresentado anteriormente, sendo usada também uma abordagem por conjunto (*ensemble*), mas a abordagem de quase-equilíbrio não é mais incluída entre os membros. Esse esquema se diferencia dos demais esquemas de cúmulos por permitir que efeitos de subsidência se espalhem por colunas vizinhas, fazendo com que o esquema seja mais utilizável em grades com tamanhos menores que 10 km de espaçamento, enquanto continua podendo ser usado em grades com espaçamentos maiores, onde a subsidência ocorre dentro da mesma coluna.

## **2.50 WRF/CHEM**

O WRF/Chem (Grell et al., 2005) é um modelo de previsão numérica de tempo e de poluentes atmosféricos criado sob um sistema operacional flexível e eficiente computacionalmente, oferecendo uma avançada descrição física, química e numérica da atmosfera. O desenvolvimento da parte meteorológica do WRF se assemelha ao MM5 (O WRF foi o sucessor do MM5 em diversas instituições de pesquisas e centros operacionais, como exemplo pode-se citar NOAA, NCEP e NCAR) e a inclusão da parte química tem por base o modelo CMAQ. O WRF/Chem é essencialmente o modelo WRF com o acoplamento on-line da parte que trata da química atmosférica.

O WRF/Chem conta com sofisticados módulos que tratam a química da atmosfera e vários processos físicos associados às essas variáveis químicas. Abaixo são mostradas várias opções de módulos disponíveis com a nova versão do WRF/Chem: 1) Deposição seca acoplada ao modelo de solo/vegetação; 2) Quatro escolhas para as emissões biogênicas; 3) Três escolhas para as emissões antropogênicas (nas simulações aqui apresentadas foi utilizado um inventário de emissões desenvolvido pelo próprio grupo LAPAt/IAG/USP e já utilizado em outros trabalhos descritos por Martins et al., 2006 e Sanchez-Ccoyllo et al., 2008); 4) Quatro escolhas para os mecanismos químicos (*gas-phase*) que podem ser utilizados (RADM2, RACM, CBM-Z, CB-4); 5) Três escolhas para o esquema de fotólise; 6) Três escolhas para os esquemas de aerossóis (MADE/SORGAM, MOSAIC, GOCART); 7) Os efeitos direto e indireto dos aerossóis podem interagir diretamente com o esquema de radiação; 8) Um modelo de plumas que pode tratar o transporte de poluentes vindos de queimadas; 9) A possibilidade de se estudar a interação aerossol-nuvem com o acoplamento dos módulos de aerossóis com a microfísica de nuvens (utilizado na tese). Detalhes desses módulos podem ser consultados em <http://ruc.noaa.gov/wrf/WG11/>.

Na Figura 13 é mostrado o esquema de funcionamento do módulo de simulação de aerossóis inorgânicos e orgânicos MADE/SORGAM (Ackermann et al., 1998). Este esquema está acoplado com a microfísica de nuvens sendo adicionada a fase aerossol-nuvem acompanhando um mecanismo de ativação, também foram adicionados a remoção úmida de aerossóis, a química aquosa e o primeiro e segundo efeito indireto dos aerossóis (Gustafson et al. 2006). A ativação dos aerossóis para a fase de nuvem é determinada baseando-se na supersaturação dos “updrafts” e na supersaturação crítica de cada tipo e tamanho de aerossol. Os aerossóis são transferidos para a fase de nuvem quando a supersaturação do ambiente excede a supersaturação crítica. Da mesma forma, quando gotículas são evaporadas elas retornam para a fase aerossol. O método implementado no WRF/Chem é similar ao usado no modelo de circulação geral MIRAGE (Ghan et al., 2001).

# MADE/SORGAM

SHELL ET AL.: SOA MODELING WITHIN A COMPREHENSIVE AQM

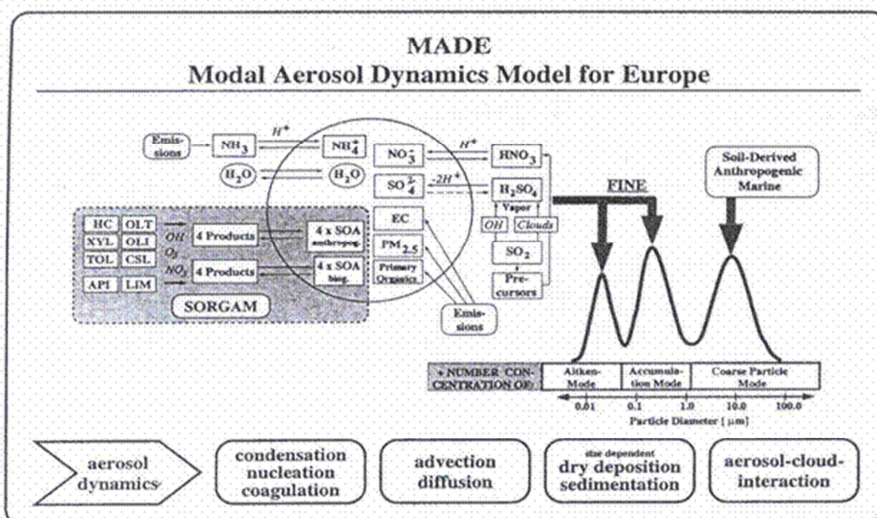


Figura 13. Esquema de funcionamento do módulo MADE/SORGAM.

## 2.5.1 O modelo de aerossóis *Modal Aerosol Dynamics model for Europe* – MADE

O *Modal Aerosol Dynamics model for Europe* – MADE (Ackermann et al., 1998) foi desenvolvido como uma extensão dos modelos de transporte de química em mesoescala, permitindo um maior detalhamento no tratamento dos efeitos do aerossol nesses modelos. No modelo MADE, o qual foi desenvolvido com base no *Regional Particulate Model* – RPM (Binkowski e Shankar, 1995), as distribuições de tamanho das partículas sub-micrométricas são representadas por duas modas log-normais e parcialmente sobrepostas (Figura 14). Também se pode observar na Figura 14 uma terceira moda referente às partículas grossas. A composição química dos aerossóis inorgânicos é tratada como sistema aquoso sulfato-nitrato-amônio. Fontes de partículas de aerossóis são modeladas através da nucleação e emissão. Coagulação, condensação, transporte e deposição são considerados como processos modificando a população de aerossóis atmosféricos. Os cálculos da dinâmica do aerossol são

executados “on-line” (ao mesmo tempo) com o modelo de transporte da química (Ackermann et al., 1998).

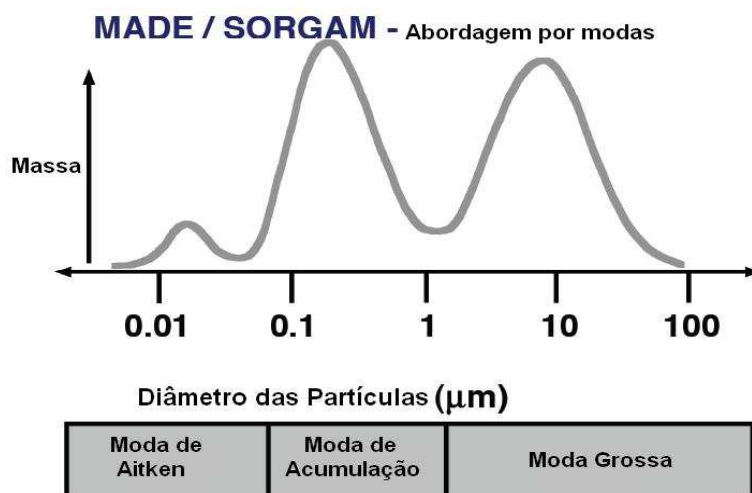


Figura 14. Modas utilizadas pelo modelo MADE.

A escolha por uma estrutura modal (abordagem por modas) permite um significativo ganho nos cálculos computacionais quando comparado com outras representações de distribuições de tamanho, e fornece vantagem adicional para as exigências operacionais.

De acordo com Asmi et al.(2002), o tratamento da nucleação é uma parte extremamente importante em qualquer modelo de aerossol atmosférico. Também, as formulações por “bins” das taxas de nucleação do sistema água - ácido sulfúrico não tem apresentado boa concordância com as taxas de nucleação medidas. Adicionalmente, a compreensão da importância da nucleação sobre uma escala regional ainda é limitada. Ainda no trabalho citado acima, é acrescentado um módulo de dinâmica das partículas ultrafinas no modelo MADE. Resultados preliminares das simulações mostraram que diversas mudanças para o método de solução numérica e a estrutura modal foram necessárias para uma melhor representação das taxas de nucleação (Asmi et al.,2002).

## 2.6 METODOLOGIA PARA AS SIMULAÇÕES COM A QUÍMICA ACOPLADA

O WRF/Chem é um modelo numérico relativamente novo na área de modelagem regional da química atmosférica. Com o início das simulações para a RMSP, foi observado que seria necessário o desenvolvimento de uma metodologia para a melhor utilização do modelo WRF/Chem com base nas limitações computacionais existentes e de input de dados no modelo. Um grande desafio na simulação do comportamento dos poluentes atmosféricos é a descrição das fontes de emissões. Para a RMSP é conhecido que a principal fonte de emissões é a frota veicular. Mas há muitas incertezas tanto do ponto de vista de inventário quanto de distribuição espacial da fonte. Na ausência desse inventário espaço-temporal das emissões foram desenvolvidas metodologias alternativas para contornar essa lacuna. O primeiro passo para o desenvolvimento dessa metodologia foi dado com o desenvolvimento de um inventário de emissões veiculares baseado em intensidades de luzes noturnas (Martins et al., 2008, 2010), onde foi possível se obter uma melhor representação espacial das emissões sobre a RMSP.

A espacialização das emissões foi realizada com base na intensidade de luzes noturnas. Este tipo de informação pode ser entendido como essencialmente associada a áreas urbanas. Os dados são obtidos a partir de uma série de satélites em operação pelo *Defense Meteorological Satellite Program – Operational Linescan System* (DMSP-OLS). Os dados são de acesso livre e podem ser acessados em <http://www.ngdc.noaa.gov/dmsp/dmsp.html>. Os dados representam composições anuais, livres da presença de nuvens, disponíveis entre 1992 e 2009. O produto está disponível na resolução de 30 segundos de arco, de -180 a +180 graus de longitude e -65 a +65 graus de latitude. Os dados de luzes noturnas apresentam-se parcialmente disperso em torno das áreas urbanizadas, aspecto coerente com o que se espera de uma área urbana quando analisada do ponto de vista de circulação de veículos.

O número de veículos em cada ponto de grade é depois associado com a emissão de poluentes, correspondendo no final à emissão para cada poluente no ponto de grade.

Também foi incluída a especificação veicular no programa de emissões para a RMSP, sendo incorporadas as contribuições individuais dos seis tipos diferentes de veículos encontrados na região, bem como ajustes nos fatores de emissões e variações horárias no perfil de emissões baseados em experimentos em túneis. Estes possibilitaram o cálculo dos fatores de emissão dos poluentes e a determinação da especificação dos compostos orgânicos voláteis. Os fatores de emissão para os gases e partículas podem ser consultados em Martins et al., 2006 (para os gases) e em Sanchez-Ccoyllo et al., 2008 (para o material particulado e *Black Carbon*).

Sabendo-se que em modelagem numérica da atmosfera a correta representação das condições iniciais é um fator extremamente importante para uma boa previsão, foi incorporada uma modificação no programa que calcula as emissões de poluentes para o formato do WRF/Chem com o objetivo de melhorar não só as condições iniciais, mas também as emissões de poluentes em cada ponto de grade durante as simulações. Essa modificação consistiu na melhoria da representação do material particulado e da inclusão dos seis tipos de veículos que estão presentes na RMSP: Gasolina C, Álcool, Flex (álcool), Diesel, Táxis (movidos a gás natural) e Motocicletas. Os veículos a diesel receberam uma subclassificação de acordo com o tipo: Caminhões e ônibus de fretamento, ônibus urbano municipal na fase IV (EURO II), ônibus urbano municipal na fase V (EURO III). Todas as informações necessárias para a inclusão das seis categorias (fatores de emissões, frações da frota, e quilometragem diária) foram retiradas ou estimadas com base no relatório da CETESB em 2008 (relativo ao ano de 2007) e da SPTrans.

Na Figura 15 pode-se observar (à esquerda) um exemplo de emissões de monóxido de carbono as 19:00 Z do dia 03 de janeiro de 2008 em São Paulo. Esta configuração de emissões de CO é baseada no trabalho de Martins et al. (2008), que recupera a informação do número de veículos em cada ponto de grade baseado em imagem de satélite com focos de luz. Na Figura 15 (a direita), observa-se os valores de concentração de NCN a 0,1% de supersaturação simulados pelo modelo para o mesmo intervalo das emissões a esquerda, o espaçamento de grade é de 3 km com 200 x 200 pontos em x e y. Pode-se observar que há uma relação muito boa na representação espacial



dos NCN's comparativamente a posição dos pontos com maiores emissões, e uma coerente medida nas concentrações sobre a RMSP (chegando a 680 núcleos/cm<sup>3</sup> para a supersaturação considerada).

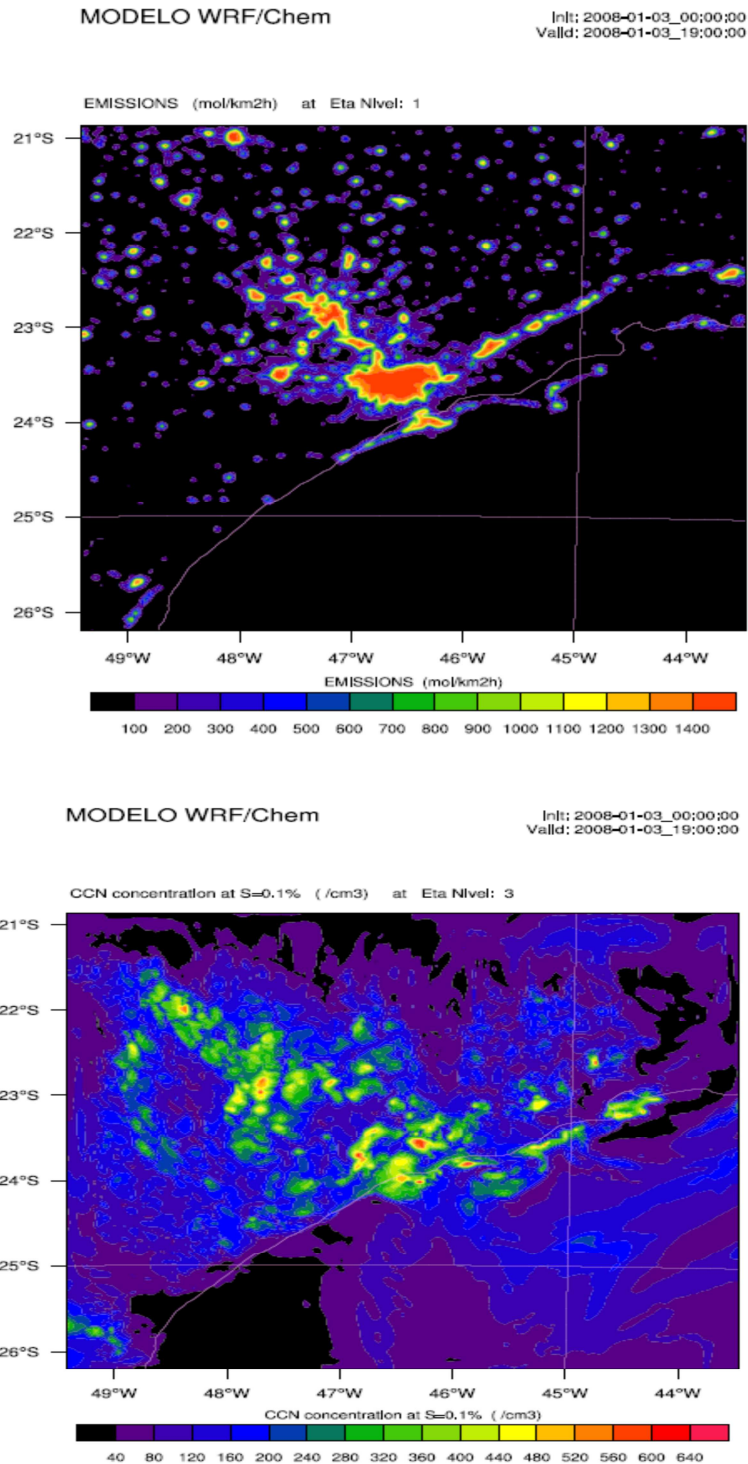


Figura 15. Exemplo de emissões de monóxido de carbono em São Paulo (a cima) e concentrações de NCN na supersaturação de 0,1% simulados pelo WRF/Chem para o mesmo intervalo (a baixo), e ambos para o dia 03/01/2008.

Um segundo passo importante para a correta utilização do modelo WRF/Chem foi o desenvolvimento de condições iniciais e de fronteiras adequadas para a utilização no estudo específico que se pretendia. Foi observado que mesmo possuindo-se um bom inventário de emissões, este não seria suficiente para a representação das concentrações de  $PM_{10}$  e  $PM_{2.5}$  em 24h. O inventário de emissões utilizado considera emissões no primeiro nível do modelo e é necessário um tempo razoável de simulação para que os poluentes se distribuam no domínio considerado e atinjam concentrações mais próximas das observadas. Este procedimento de *spin-up* com o modelo geralmente leva de três a quatro dias para se obter concentrações mais representativas para as condições iniciais dos aerossóis, sendo realizadas simulações de 24h e utilizando-se as concentrações acumuladas no último passo de tempo (do dia anterior) como condição inicial para o dia seguinte.

O terceiro passo no desenvolvimento da metodologia para melhor utilização do WRF/Chem foi adequar as limitações computacionais de processamento com o desejo de se obter resultados para simulações com química e em alta resolução. As simulações realizadas com todas as opções químicas necessárias resultavam em um número expressivo de variáveis a serem calculadas e “advectadas” em cada ponto de grade (geralmente mais de 200 variáveis por ponto de grade), sendo inviável do ponto de vista de memória e processamento computacional a execução simultânea de todas as grades aninhadas que foram utilizadas (27, 9, 3 e 1 km de espaçamento). Sendo assim, foi necessário “rodar” cada grade separadamente e utilizar um programa (ndown.exe) para realizar o *downscaling* entre as grades. A Figura 16 apresenta o fluxograma indicando a utilização do programa ndown.exe para a realização de *downscaling* (1-way) no WRF/Chem. A descrição detalhada da utilização desse programa está descrita no manual do usuário do modelo, disponível em:

[http://www.mmm.ucar.edu/wrf/users/docs/user\\_guide\\_V3/contents.html](http://www.mmm.ucar.edu/wrf/users/docs/user_guide_V3/contents.html).

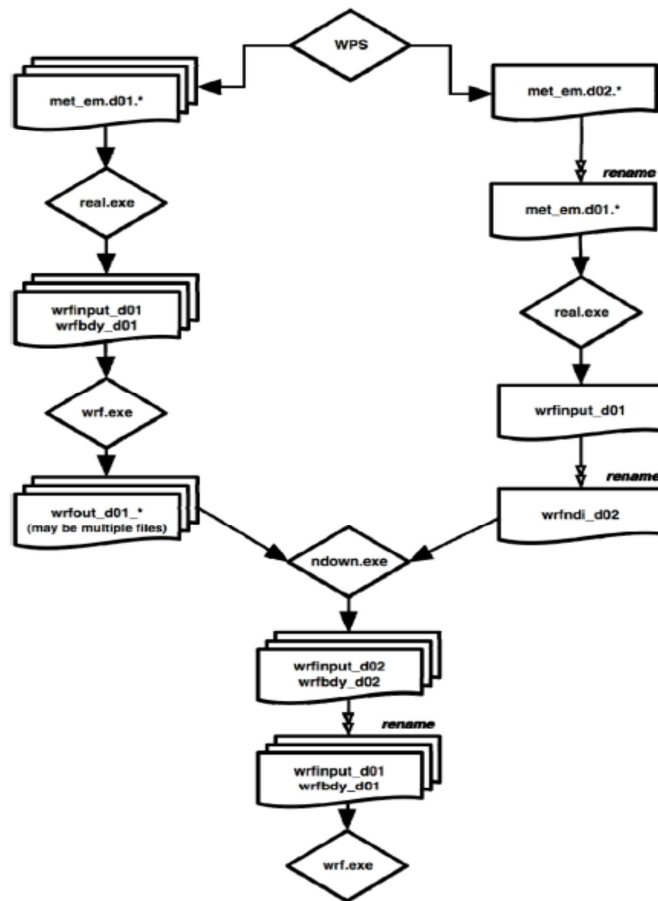


Figura 16. Fluxograma indicando a utilização do programa ndown.exe para a realização de *downscaling* (1-way) no WRF/Chem. Fonte: Manual do WRF.

Após este procedimento apresentado acima foi possível a realização de simulações mais realísticas e representativas das concentrações de partículas para a RMSP e suas relações com a formação de nuvens e precipitação.

## 4. RESULTADOS

### 4.1 ANÁLISES METEOROLÓGICAS NA RMSP PARA O PERÍODO ESTUDADO

O mês de janeiro de 2010 foi intensamente chuvoso na RMSP, o acumulado mensal de chuva para esse mês foi o maior de toda a série histórica de dados (desde 1933) da estação meteorológica do IAG/USP na Água Funda. O recorde anterior para esse mês era de 424,9 mm de chuva acumulada em 1989, já para 2010 o valor acumulado em janeiro foi de 653,2 mm, o que é aproximadamente três vezes maior do que a média climatológica (Figura 17). Ainda na Figura 17, pode-se observar o ciclo anual dos máximos de precipitação para a RMSP, onde os meses de dezembro, janeiro e fevereiro são os mais chuvosos, também podem-se observar os anos onde houve os maiores acumulados de chuva correspondente para cada mês.

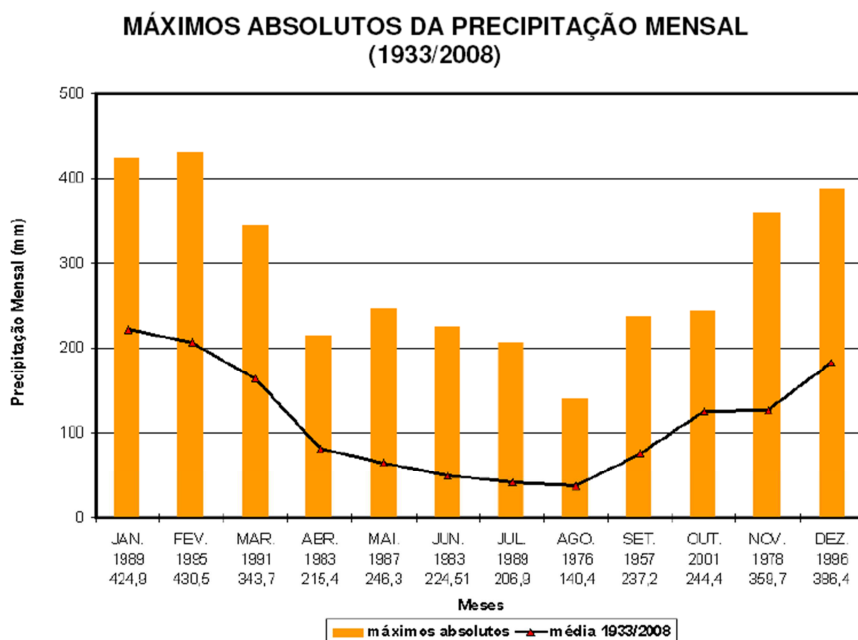


Figura 17. Valores máximos absolutos para a precipitação mensal e o respectivo ano de sua ocorrência medidos na estação meteorológica do IAG/USP, durante o período de 1933 a 2008. Fonte: Boletim Climatológico, 2008, IAG/USP.

Em termos climatológicos, a Figura 18 (parte superior) apresenta a evolução da precipitação acumulada no trimestre DJF ao longo de toda série climatológica medida na estação do IAG/USP, sendo clara a tendência de aumento na precipitação ao longo dos anos. No total, de DJF (1933-1934) até DJF (2010-2011) houve um aumento de 271,2 mm nos acumulados de chuva. Observando-se a Figura 18 e considerando todos os verões de toda a série climatológica, é possível notar que o trimestre DJF (2009/2010) está destacado com o maior valor da série para o acumulado de precipitação, sendo que esse valor elevado foi atribuído principalmente ao recorde histórico medido no mês de janeiro de 2010. Já para a análise da quantidade de dias de chuva (Figura 18, parte inferior), não há tendência significativa que possa ser interpretada, ou seja, o número de dias com chuva permaneceu dentro do esperado.

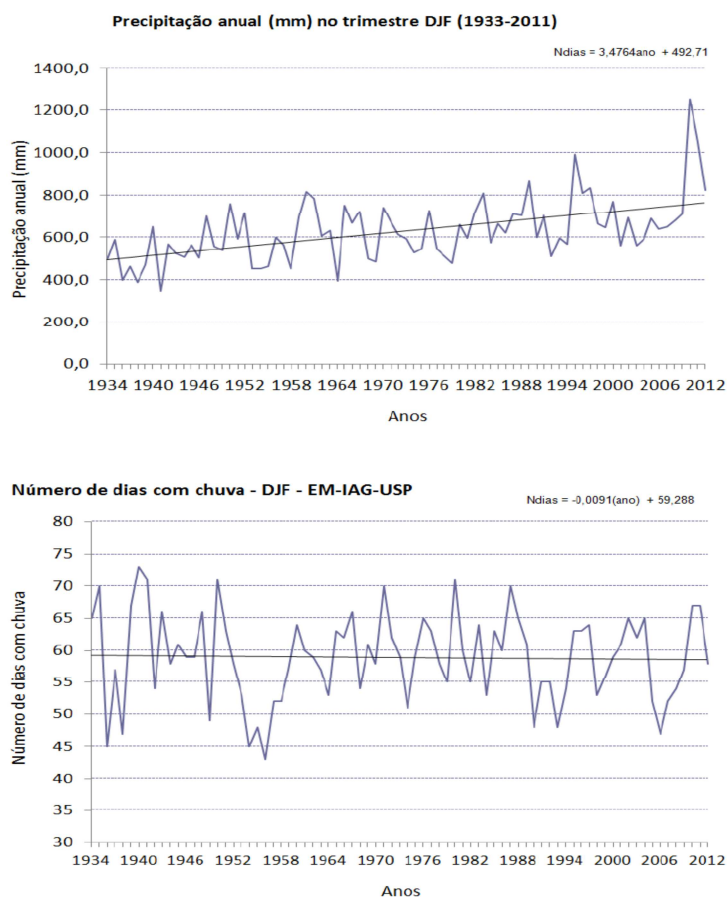


Figura 18. Precipitação acumulada durante o trimestre DJF ao longo de toda a série (1934-2012) parte superior da figura, e número de dias de chuva no trimestre DJF ao longo de toda a série (1934-2012), parte inferior da figura. Fonte: Boletim climatológico DJF da EM-IAG-USP, 2011/2012.

Uma possível causa dessa elevada acumulação de chuva em janeiro é a própria condição meteorológica de grande escala que pode ter contribuído para o aumento das chuvas. Por exemplo, a intensificação do *El nino* em janeiro de 2010 pode ter contribuído para o aumento de temperaturas médias no sudeste, por outro lado, não há um padrão característico de mudança nas chuvas no sudeste relacionado com o *El Nino*. Outro fator que isoladamente, ou ainda somado ao efeito do *El Nino*, pode ter contribuído de forma bastante significativa para o aumento de chuvas neste período foi a elevada temperatura da superfície do mar (TSM) observada no Atlântico Sul e principalmente na costa do Brasil. Na Figura 19, pode-se observar as anomalias de TSM medidas por satélite (produto da NOAA/NESDIS) para os dias 7 e 21 de janeiro de 2010. Percebe-se um aumento na TSM, junto à costa do Brasil e principalmente perto da região sudeste, de até 2,5 °C em relação à média climatológica. Esse incremento na TSM aumentou a disponibilidade de umidade sobre o oceano e conseqüentemente intensificou o fornecimento de mais vapor d'água para o continente.

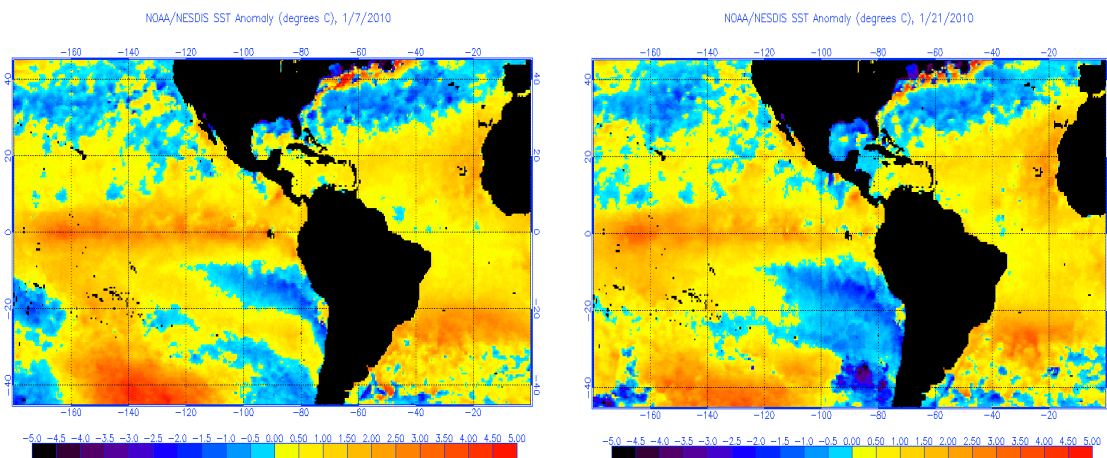


Figura 19. Anomalias de temperatura (°C) da superfície do mar (TSM) medidas por satélite para 7 e 21 de janeiro de 2010 (esquerda e direita, respectivamente). Fonte: NOAA/NESDIS.

Sabendo-se que a condição de grande escala favorecia um aumento nas temperaturas médias para a região sudeste (devido à formação do *El nino*) e que com o aumento da TSM no litoral de São Paulo haveria uma maior disponibilidade de umidade para a região, pode-se supor que os ciclos diurnos das brisas terrestres e marítimas estão entre os principais fatores que

contribuíram para as intensificações de chuvas no período. Na figura 20 pode-se ver claramente que a afirmativa anterior é coerente, pois nela estão apresentados os acumulados horários de chuva (à esquerda) e a frequência de ocorrência de eventos de chuva (à direita), ambos para o mês de janeiro de 2010. Pode-se perceber um ciclo bem definido de acumulação de chuvas no decorrer das 24 horas do dia, onde os máximos de chuva ocorrem no período da tarde e da noite, com alguns eventos ocorrendo na madrugada. São bastante baixos os acumulados de chuva no intervalo de 09 a 15 Z (de 06 as 12 hora local) indicando que praticamente não choveu na parte da manhã na RMSP em janeiro de 2010.

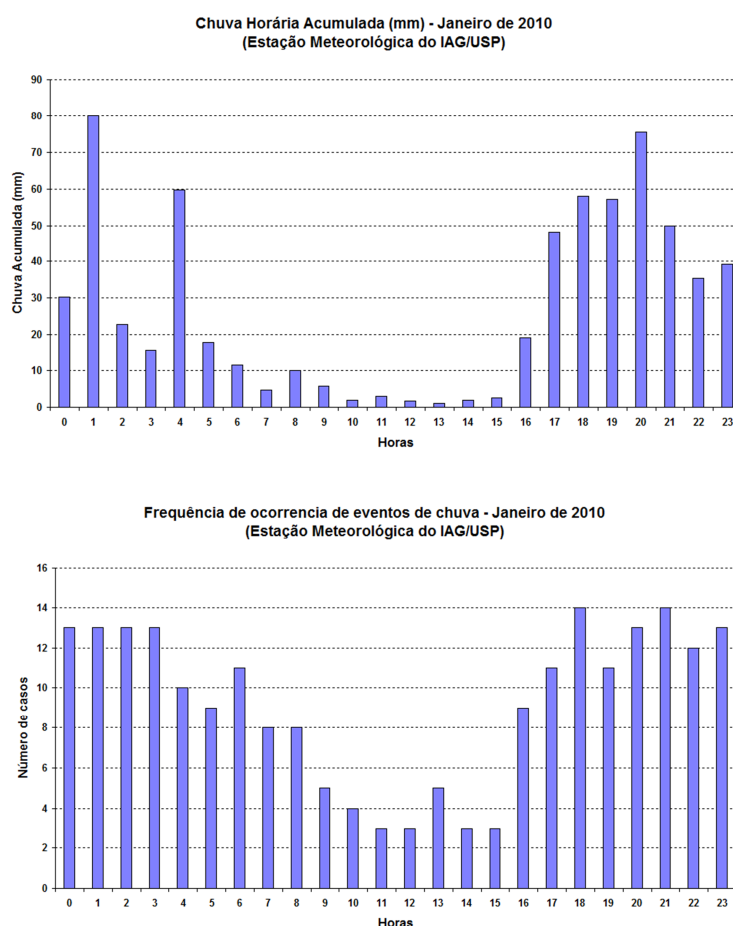


Figura 20. Variação horária (UTC) da chuva acumulada (esquerda) e Frequência horária de ocorrência de eventos de chuva (direita) no mês de janeiro de 2010 na estação meteorológica do IAG/USP.

O ciclo bem definido de chuvas na RMSP para o mês de janeiro indica que as circulações locais podem ter contribuído de forma a intensificar as

chuvas e somar-se com as influências de grande escala. Pode-se pensar que as elevadas temperaturas na superfície do mar poderiam desintensificar a brisa marítima que estaria entrando no continente e conseqüentemente podendo até diminuir as chuvas na RMSP, mas o que se percebe é que apesar de ser possível certa desintensificação da brisa marítima não há indícios de que a circulação local (mar-terra) tenha sido bloqueada. Na verdade, se as temperaturas médias sobre o continente também estavam elevadas, então se pode imaginar uma situação de balanço, onde o ciclo diurno local de massas de ar seguiria o aquecimento e resfriamento das superfícies como é comum se observar para esta região no verão. Uma componente adicional a este ciclo de circulação é a alta disponibilidade de vapor d'água que estaria entrando no continente com a brisa marítima, e esse fator pode ter sido determinante nas elevadas acumulações de chuva durante todo o mês de janeiro de 2010.

Com a finalidade de melhorar o entendimento sobre a meteorologia na RMSP foi escolhida outra estação meteorológica para estudo. A estação automática de medidas do Instituto Nacional de Meteorologia – INMET situada no bairro de Santana, na capital foi escolhida para comparação com a estação do IAG/USP no bairro da Água Funda, também na capital. A ideia era investigar possíveis diferenças nos padrões de temperatura, umidade relativa e chuva para essas diferentes regiões da capital. A localização das estações do INMET (23° 29' 47"S, 46° 37' 12"W) e IAG/USP (23° 39' 04"S, 46° 37' 20"W) podem ser observadas na Figura 21.



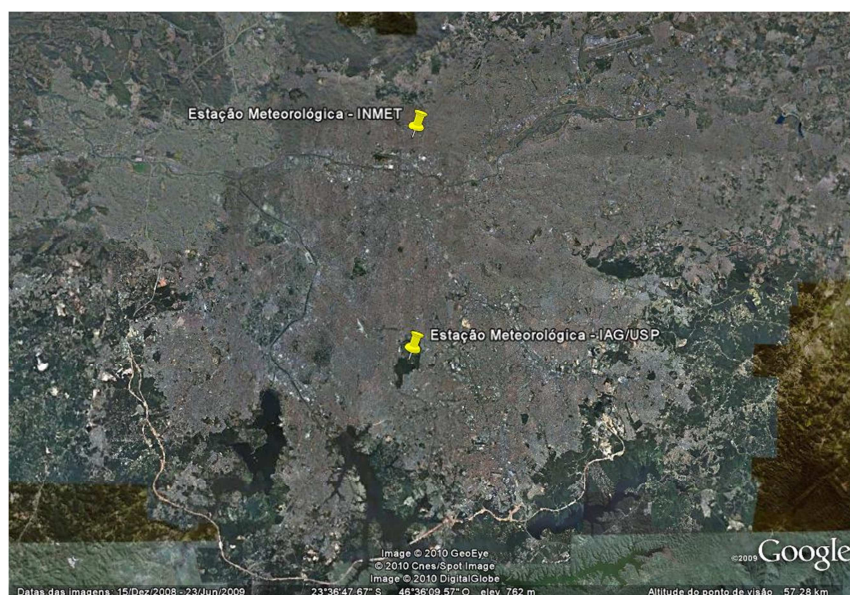


Figura 21. Imagem da RMSP com localização das estações meteorológicas do INMET e IAG/USP. Fonte: Google.

Na Figura 22 é apresentado um estudo comparativo para a variação horária (em UTC) da umidade relativa, medida nas estações meteorológicas do INMET (em azul) e IAG/USP (em vermelho), para os dias 02, 08, 11, 18, 21 e 28 de janeiro de 2010. Pode-se observar que de uma maneira geral a umidade relativa na estação do IAG/USP se apresentou mais elevada do que na estação do INMET, e que há um ciclo diurno bem definido. Este resultado para a comparação da umidade relativa muito provavelmente evidencia o efeito da ilha de calor urbana mais intensa na área da estação do INMET. O dia 02 de janeiro apresentou as maiores diferenças nas umidades relativas para o período diurno, observam-se diferenças de 20% ou mais em alguns horários do dia. Os dias 08 e 18 desse mês apresentam uma variabilidade muito parecida nos horários entre 15 e 18 Z, onde há um aumento seguido por uma queda na umidade relativa e depois desses horários há um aumento seguido de estabilidade nos valores para o período noturno.

Foi observado na Figura 22 que o ciclo diurno da umidade relativa possui um crescimento no período da tarde e início da noite praticamente para todos os dias aqui analisados, e que os horários de variação da umidade relativa seguem um comportamento semelhante para as duas estações, exceto

para o dia 11 de janeiro. Esperar-se-ia um aumento da umidade relativa com a passagem da brisa marítima sobre a estação de medidas, e que este aumento fosse primeiro observado na estação do IAG/USP, mais ao sul e conseqüentemente seria a primeira a receber a umidade vinda do oceano com a entrada da brisa. Percebe-se na Figura 22 que apenas para o dia 11 de janeiro de 2010 é observada uma variação significativa na umidade para as duas estações. Pode-se observar que às 18 Z a umidade relativa na estação do IAG/USP começa a se elevar e que os valores para a estação do INMET permanecem praticamente os mesmos até as 20 Z. Essa brisa marítima que chegou a RMSP foi medida pelo radar MXPOL e confirma os mesmos horários de passagens sobre as regiões das estações.

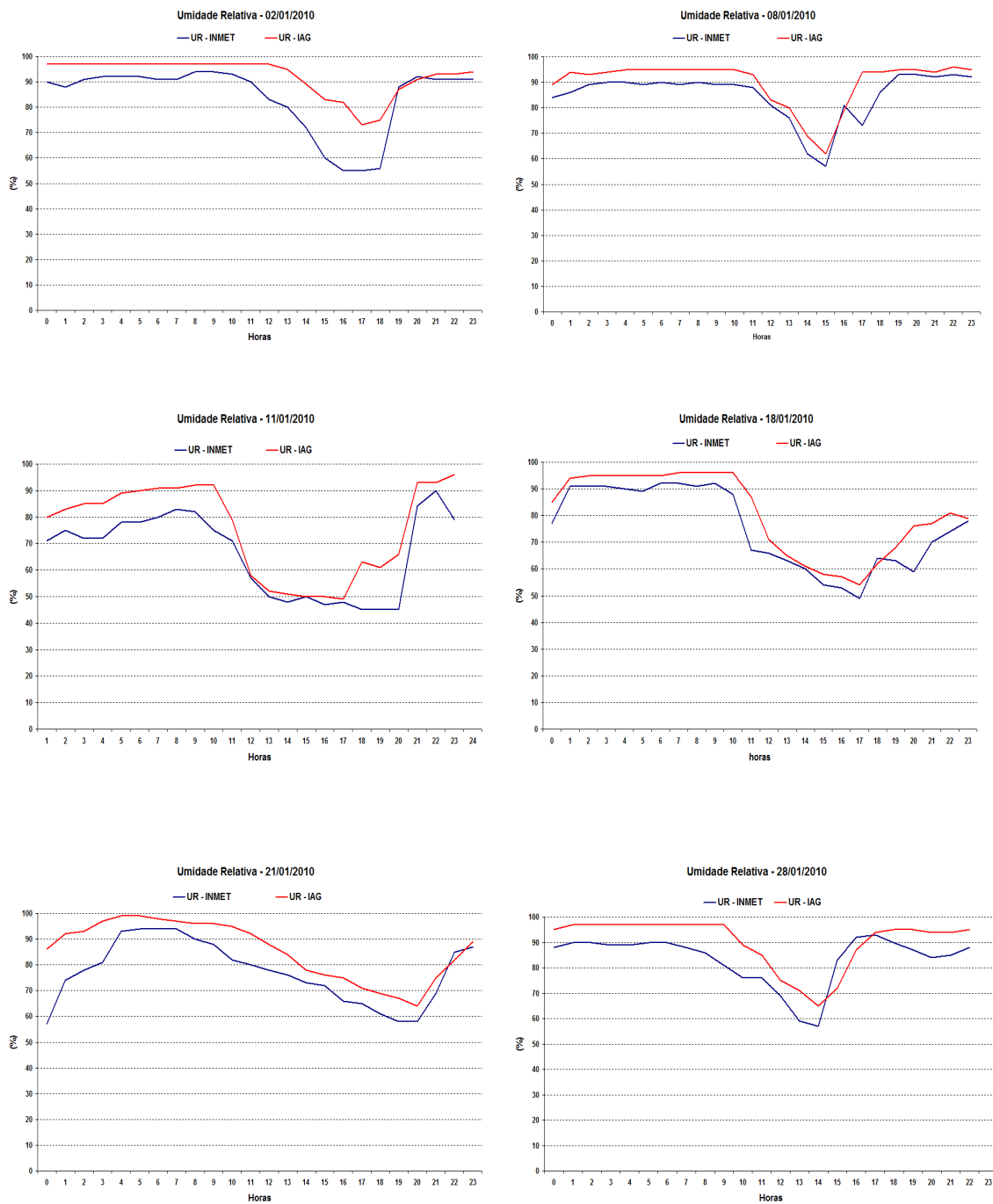


Figura 22. Variação horária (UTC) da umidade relativa nas estações meteorológicas do IAG e INMET para 02, 08, 11, 18, 21 e 28 de janeiro de 2010.

A região onde se encontra a estação meteorológica do INMET fica mais próxima do centro da capital paulista do que a estação do IAG/USP e se encontra em uma área densamente habitada (bastante urbanizada), o que pode explicar as diferenças na umidade relativa observadas, visto que pode haver um efeito de ilha de calor urbano influenciando os valores de umidade

relativa na estação do INMET (conforme apresentado anteriormente na Figura 8). Já para a temperatura o comportamento não é o mesmo para todos os dias aqui analisados. Na Figura 23 observa-se a variação horária da temperatura do ar para os mesmos dias anteriores e para as estações do INMET e IAG/USP. Observa-se que apenas os dias 02 e 21 de janeiro apresentam claramente diferenças nas temperaturas, possuindo valores maiores para a estação do INMET e no período diurno. A variação diária de temperatura para os dias aqui analisados ficou entre 20 e 30 °C, exceto para as 19 Z do dia 21 de janeiro que atingiu 32,8 °C, e para o dia 11, que apresentou a noite mais quente de todos os dias aqui analisados.

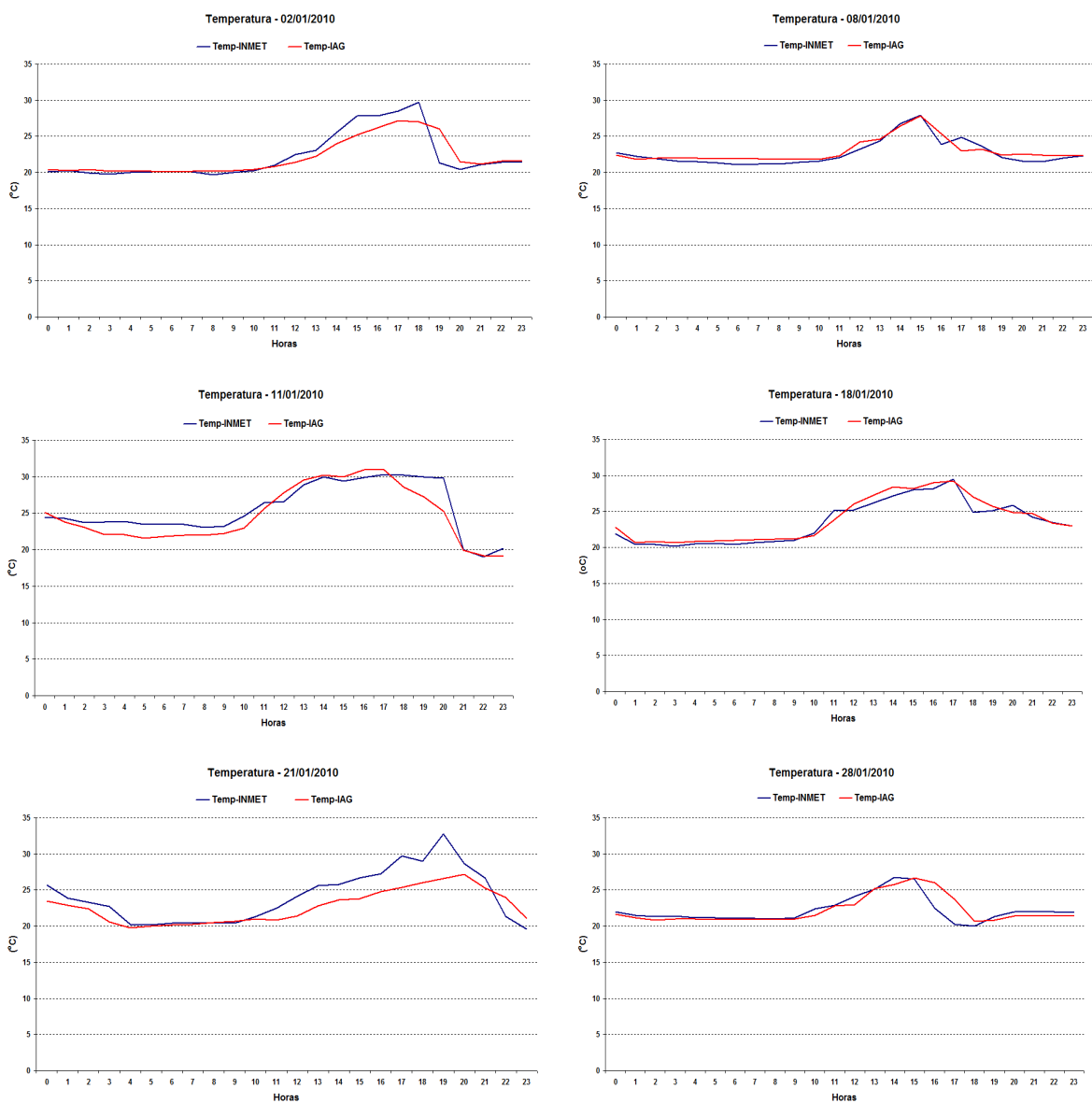


Figura 23. Variação horária (UTC) da temperatura do ar nas estações meteorológicas do IAG e INMET para 02, 08, 11, 18, 21 e 28 de janeiro de 2010.

Na Figura 24 pode-se observar a variação horária (UTC) da chuva nas estações meteorológicas do IAG e INMET para os dias 02, 08, 11, 18, 21 e 28 de janeiro de 2010. Percebe-se que há uma boa concordância dessa figura com a Figura 19, apresentada anteriormente, mostrando que não houve chuva entre os horários de 09 e 15 Z, exceto para o dia 02 de janeiro quando foi observada chuva fraca entre 09 e 13 Z na estação do IAG. A estação do IAG/USP apresentou maiores valores de precipitação horária do que a estação do INMET para todos os dias aqui apresentados, esse resultado indica que houve mais chuva na região sul da capital do que na região norte para os dias aqui analisados. Os dias 08, 11 e 28 de janeiro apresentaram chuvas no período da tarde, enquanto que os dias 18 e 21 apresentaram chuva principalmente no período da noite e madrugada.

O dia 02 de janeiro foi escolhido para uma análise mais detalhada com relação aos objetivos da tese de doutorado, ou seja, a influência do aerossol atmosférico na chuva observada. Nesse dia houve vários pontos de alagamentos na RMSP e conseqüentemente vários transtornos à população. Era de se esperar que as concentrações de partículas durante o dia estivessem relativamente baixas, uma vez que choveu nas estações do IAG e INMET durante uma boa parte do dia, mas foi observado que as concentrações de partículas podem ser bastante variadas e chegando a valores relativamente elevados para algumas estações da CETESB.

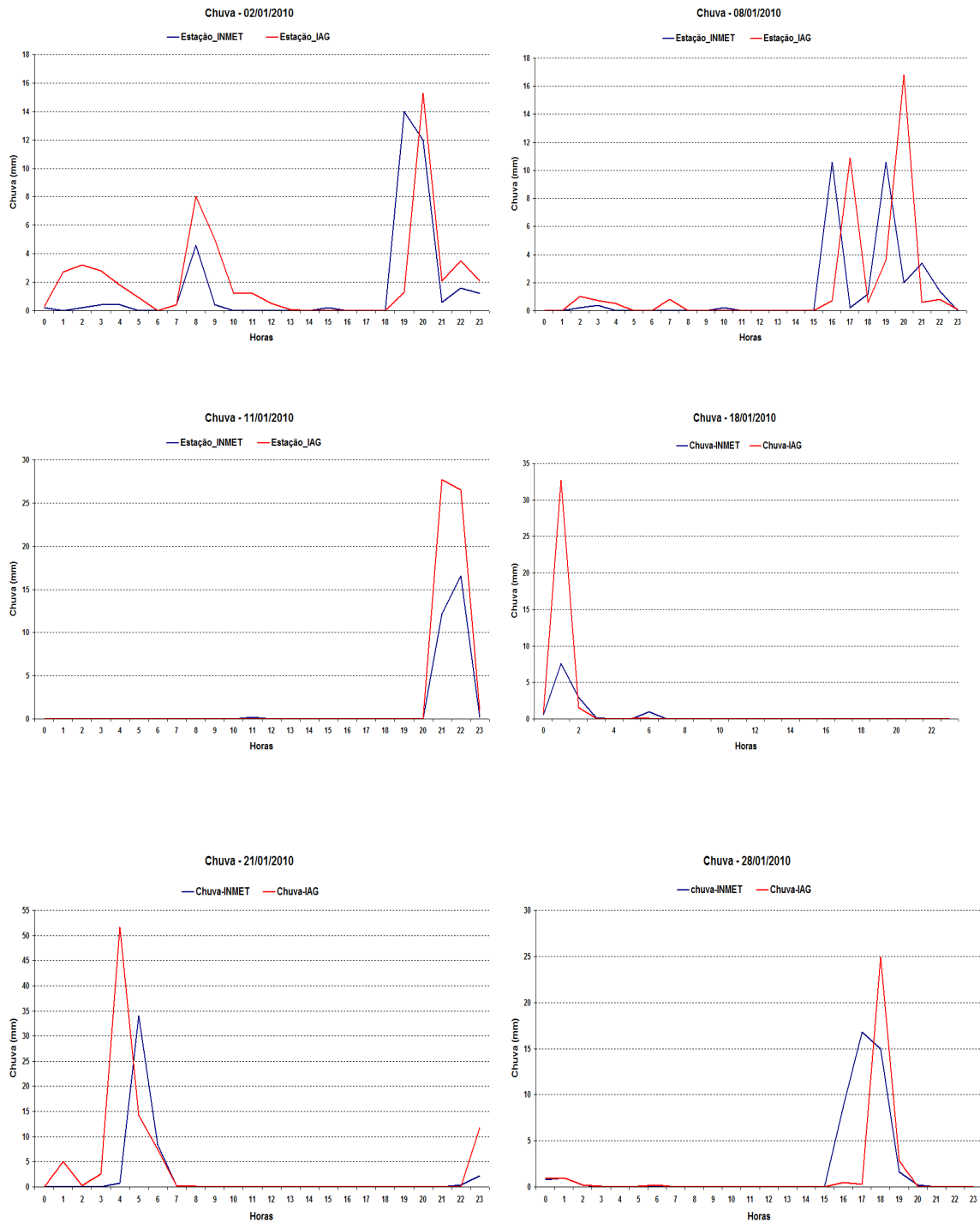


Figura 24. Variação horária (UTC) da chuva (mm) nas estações meteorológicas do IAG e INMET para 02, 08, 11, 18, 21 e 28 de janeiro de 2010.

Na Figura 25 podem-se observar as variações horárias (horário local) das concentrações de  $PM_{10}$  ( $\mu g/m^3$ ) para o dia 02 de janeiro de 2010 medidas em cinco estações de monitoramento da CETESB (Parelheiros, Santana, Diadema, Centro e Mooca). Como foi discutido anteriormente percebe-se que

há estações com valores elevados em alguns horários do dia, por exemplo, as estações de Parelheiros, Centro e Mooca apresentaram valores de concentrações de  $PM_{10}$  ultrapassando os  $70 \text{ ug/m}^3$  em algum horário do dia. O intervalo das 05 às 08 horas (hora local) apresentou baixas concentrações para todas as estações, o que é bem coerente com os dados de chuva para este intervalo quando foi registrado chuvas tanto na estação do IAG como na do INMET. Vale ressaltar que o horário local aqui considerado é igual ao horário UTC (ou Zulu) menos três horas.

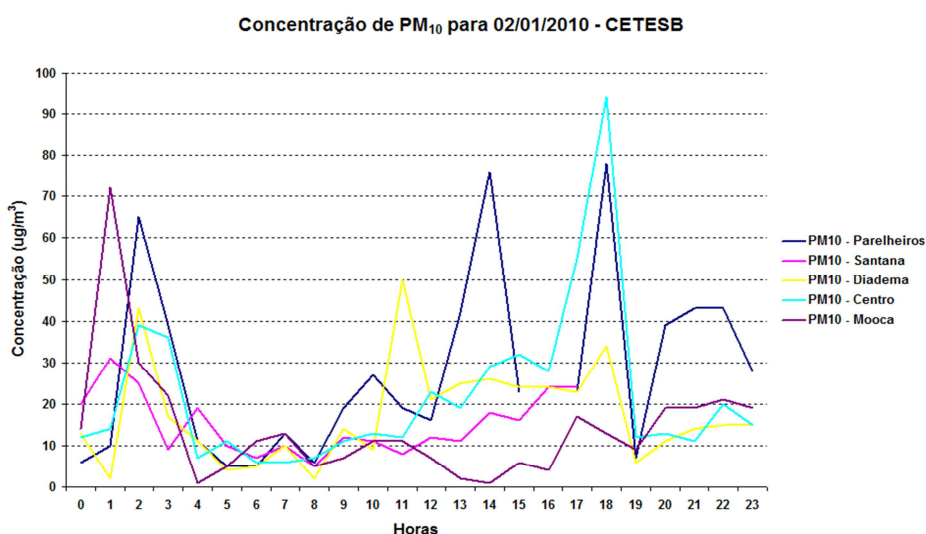


Figura 25. Variação horária da concentração de  $PM_{10}$  ( $\text{ug/m}^3$ ) para o dia 02 de janeiro de 2010 medidas por estações de monitoramento da CETESB.

Ainda na Figura 25, pode-se observar um pico na concentração de partículas na estação do centro que chega a  $94 \text{ ug/m}^3$  às 18 horas (hora local). Esse pico ocorreu antes do registro de chuva na estação do INMET (estação mais próxima do centro) às 19 horas, indicando que as emissões de partículas para a atmosfera devem ter sido intensas entre as 17 e 18 horas, e que o processo de remoção de partículas pela formação de nuvens e chuva foi bastante eficiente entre 18 e 19 horas, como mostrado na Figura 25.

Na Figura 26 observa-se a variação das médias horárias da concentração de  $PM_{10}$  ( $\text{ug/m}^3$ ) para o mês de janeiro de 2010 e para sete estações de monitoramento automático da CETESB (Santana, Osasco, Pinheiros, Mooca, Diadema, São Caetano e Parque D. Pedro II). Percebe-se que mesmo sendo o mês de janeiro o mais chuvoso já medido pela estação do

IAG, houve vários dias que apresentaram concentrações de partículas elevadas para algumas médias horárias. Observa-se que vários dias apresentaram concentrações acima dos 50  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  o que de acordo com o índice de qualidade do ar é caracterizado como “Regular”.

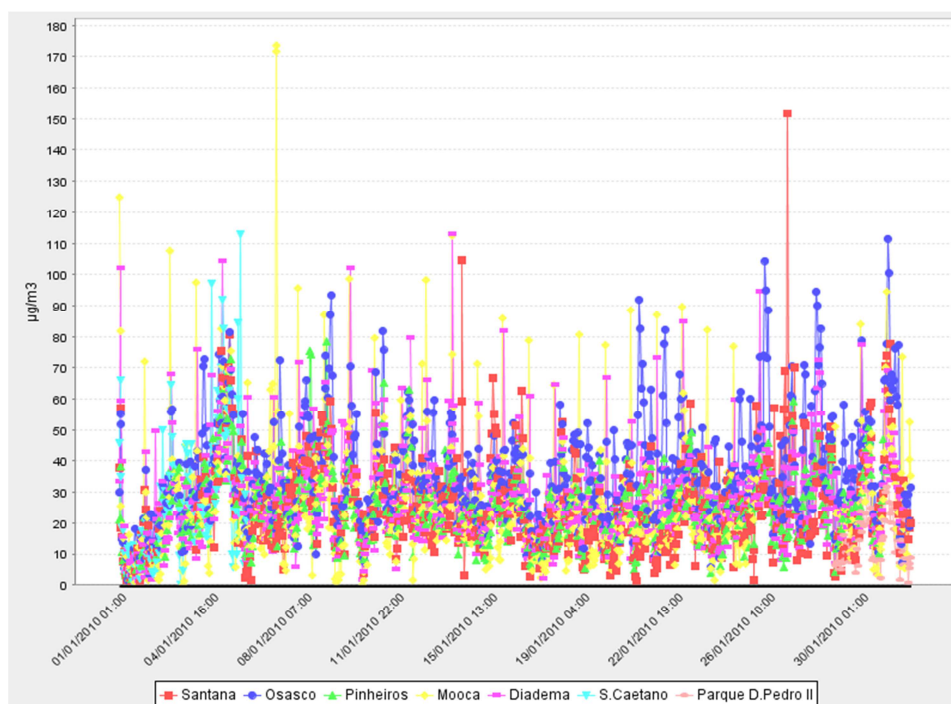


Figura 26. Médias horárias da concentração de  $\text{PM}_{10}$  ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) para o mês de janeiro de 2010 para sete estações de monitoramento automático da CETESB. Fonte: CETESB.

Com o objetivo de se investigar as possíveis relações entre as concentrações de aerossóis e a chuva observada na RMSP foram feitas várias simulações (testes de sensibilidades) com o modelo WRF/Chem e investigados os possíveis *feedbacks* existentes. Na sequência da tese são apresentados alguns resultados dessas simulações.

## 4.2 RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Abaixo é apresentado um estudo da Distribuição de Tamanho em Número (DTN) das partículas medidas pelo SMPS - *Scanning Mobility Particle Sizer*, equipamento capaz de medir a concentração em número de partículas a



partir de 3 nm de diâmetro até 1 µm. Neste estudo o intervalo de tamanho utilizado foi entre 0,009 µm e 0,414 µm. O equipamento está descrito em detalhes no trabalho de mestrado de Oliveira (2007) e aqui serão apenas apresentados alguns resultados do experimento realizado em 2005. São apresentadas as evoluções espectrais de partículas durante alguns dias estudados em agosto e setembro de 2005. Com base nas análises das concentrações e sabendo-se que a fonte veicular é a principal responsável pelas partículas formadas na RMSP, pode-se estimar os horários de maior tráfego veicular durante os dias medidos. Também é apresentado um estudo da correlação entre as concentrações de partículas em determinados diâmetros e as concentrações de CO e NOx. O objetivo foi estudar se as fontes veiculares (veículos a gasolina e diesel) podem ser relacionadas como as principais fontes de partículas finas na Região Metropolitana de São Paulo.

#### **4.2.1 Correlações entre fontes veiculares e Distribuições de Tamanho em Número de partículas na RMSP**

Considerando-se áreas urbanas, pode-se dizer que as partículas pertencentes à moda ultrafina (< 10 nm) e a moda de nucleação (< 100 nm) são formadas principalmente por queima de combustíveis fósseis em veículos automotores, sejam estes à gasolina ou a diesel. As partículas são geradas no processo de ignição, dentro do escapamento ou imediatamente após a emissão de seus precursores para a atmosfera. Partículas pertencentes à moda de nucleação têm um pico de concentração em número variando abaixo de 100 nm, sendo às vezes observados dois picos distintos.

Com base nos resultados da CETESB (2006) pode-se afirmar que veículos leves (que usam gasolina como combustível) apresentam o monóxido de carbono (CO) como traçador e veículos pesados (que usam diesel como combustível) apresentam o NOx (NO + NO<sub>2</sub>) como um bom traçador. Foi realizada uma análise de correlação linear entre os traçadores veiculares (CO e NOx) e as concentrações de partículas em diferentes faixas de tamanhos. Os dados aqui utilizados correspondem as concentrações de partículas medidas pelo SMPS para o mês de setembro de 2005 e as concentrações de CO (ppm)

e NOx ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) também para todo o mês de setembro de 2005 medidos na estação de monitoramento automático da CETESB em Pinheiros, na capital.

A Figura 27 apresenta os gráficos de dispersão entre o CO e concentrações em número de partículas (à esquerda) e NOx e concentrações de partículas (à direita), os diâmetros estão aumentando de cima para baixo na página. Nos gráficos “a” e “b” pode-se observar a relação de CO e NOx com a concentração total de partículas durante o mês de setembro de 2005. O coeficiente de correlação de Pearson (R) para o CO e NOx e o total de partículas foi de 0,74 e 0,65 respectivamente, valores esses que comprovam a alta relação entre as concentrações totais de partículas e a fonte veicular. Vale a pena ressaltar que as concentrações de CO e NOx foram medidas na estação de Pinheiros da CETESB, enquanto que as concentrações em número de partículas foram medidas no topo do prédio do IAG/USP, distante cerca de 3 km da estação da CETESB. Sabendo-se que as condições atmosféricas e possíveis reações químicas influenciam nas concentrações dos poluentes, pode-se supor que as correlações seriam ainda maiores caso as medidas fossem realizadas no mesmo ponto da capital.

Com relação aos valores encontrados de correlação para o CO ( $R=0,74$ ) e NOx ( $R=0,65$ ), percebe-se uma melhor relação do CO em comparação ao NOx com a concentração total de partículas, isso poderia levar a se pensar que as concentrações em número de partículas podem ter realmente como fonte majoritária os veículos leves – o que contraria outras referências e deve ser questionado, pois espera-se que as partículas estejam mais relacionadas com emissões de veículos a diesel. Outro fator é que o NOx é mais reativo, sendo consumido na formação do ozônio, enquanto o CO tem um tempo de residência maior na atmosfera. Medidas recentes na estação da CETESB localizada no IPEN têm mostrado elevadas concentrações de ozônio nesta região, o que estaria mais coerente com referências anteriores.

Os gráficos “c” e “d” apresentam a relação do CO e NOx com a concentração em número de partículas com diâmetros de 20,2 nm. Os coeficientes de correlação são  $R=0,23$  para o CO e  $R=0,13$  para o NOx. Essa baixa correlação indica que as fontes veiculares que contribuem para as concentrações de CO e NOx na estação da CETESB não devem contribuir fortemente com as concentrações em número de partículas no diâmetro de

20,2 nm, sendo possivelmente essa concentração melhor relacionada com fontes mais próximas do equipamento utilizado nas medidas, ou seja, veículos que trafegam dentro da própria Cidade Universitária.

Ainda na Figura 27, e nos gráficos seguintes (e,f,g,h,i,j,k,l,m) pode-se observar um aumento nos coeficientes de correlações (R) acompanhando um aumento nos diâmetros das partículas, culminado com um máximo de  $R=0,79$  para o CO e  $R=0,73$  para o NOx com relação as concentrações em número de partículas com diâmetro de 102 nm. Esta boa correlação indica que as fontes veiculares que contribuem com as concentrações de CO e NOx na estação da CETESB em Pinheiros devem estar também contribuindo com as concentrações de partículas com diâmetros de 102 nm medidas no prédio do IAG/USP.

Para os gráficos restantes (n,o,p,q,r,s,t) pode-se observar uma diminuição nos coeficientes de correlações com o aumento dos diâmetros, observando-se um mínimo de  $R=0,18$  para o CO e  $R=0,17$  para o NOx com relação as concentrações de partículas com diâmetro de 400 nm. Esta diminuição nas correlações indicam uma menor contribuição das fontes responsáveis pelas concentrações de CO e NOx nas partículas com diâmetros maiores, bem como as baixas concentrações em número de partículas nesta faixa de diâmetro podem ter também contribuído fortemente para a baixa correlação observada.

A Tabela 1 abaixo apresenta um resumo dos coeficientes de correlações (R) observados entre o CO e NOx, medidos na estação da CETESB em Pinheiros no mês de setembro de 2005, com as concentrações de partículas nos diferentes diâmetros medidos no mesmo período no prédio do IAG/USP. Metodologia semelhante foi discutida no trabalho de Kittelson (1999), onde é feita uma revisão sobre a medida de material particulado produzido pela exaustão veicular.

De uma forma geral, pode-se considerar que as correlações foram boas para uma faixa de diâmetros que variam entre 61,5 e 202 nm. Este resultado é muito importante, pois possibilita afirmar que as fontes veiculares contribuem majoritariamente para as concentrações em número de partículas observadas nessa faixa de diâmetros, e conseqüentemente também contribuem com os NCN's que são formados a partir dessa população de partículas e com mesma faixa diâmetro.

Tabela 1. Correlações entre CO e NOx com as concentrações em número de partículas em diferentes faixas de tamanho.

<b>Coefficiente de Correlação de Pearson (R)</b>		
<b>Diâmetros das Partículas (nm)</b>	<b>CO</b>	<b>NOx</b>
<b>20,2</b>	0,23	0,13
<b>40</b>	0,66	0,57
<b>61,5</b>	0,76	0,69
<b>82</b>	0,78	0,72
<b>102</b>	0,79	0,73
<b>151</b>	0,79	0,72
<b>202</b>	0,77	0,70
<b>300</b>	0,51	0,44
<b>400</b>	0,18	0,17
<b>Total de Partículas</b>	0,74	0,65

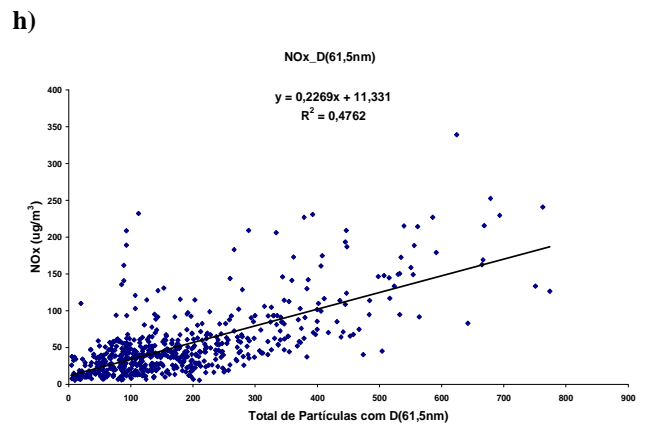
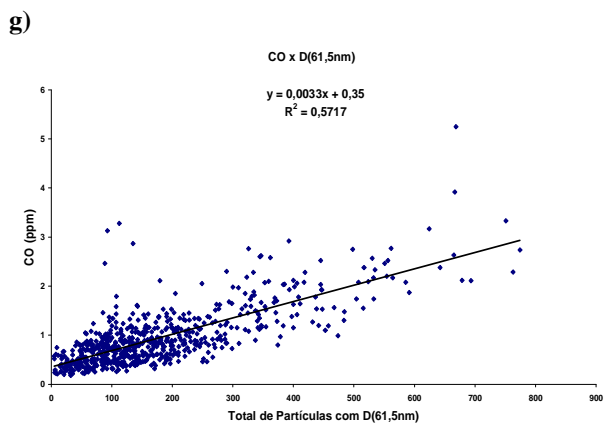
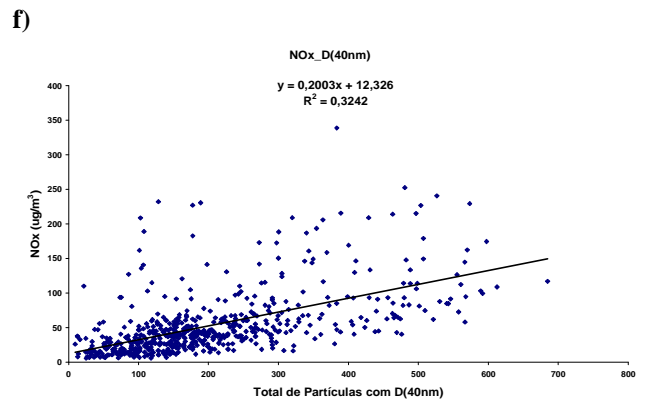
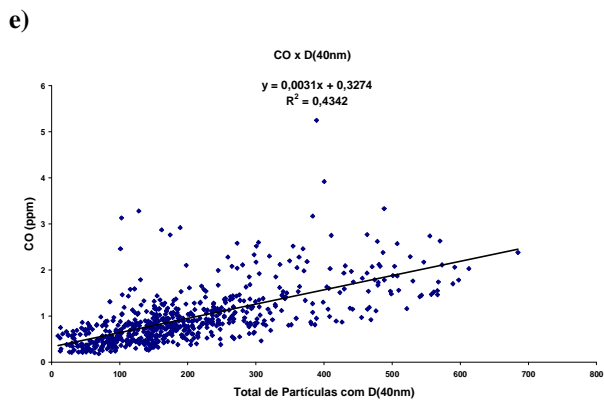
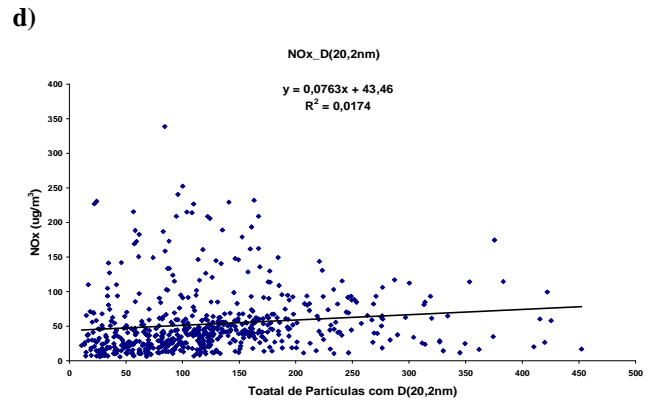
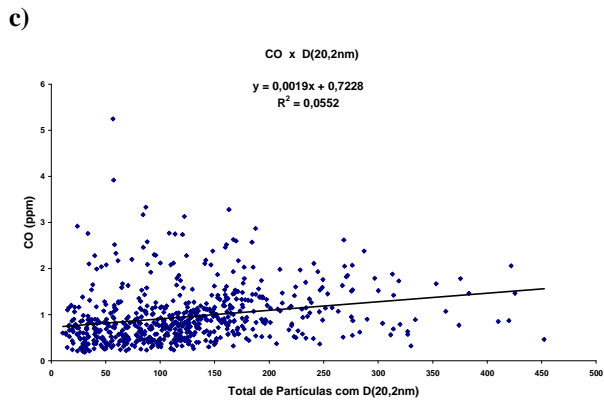
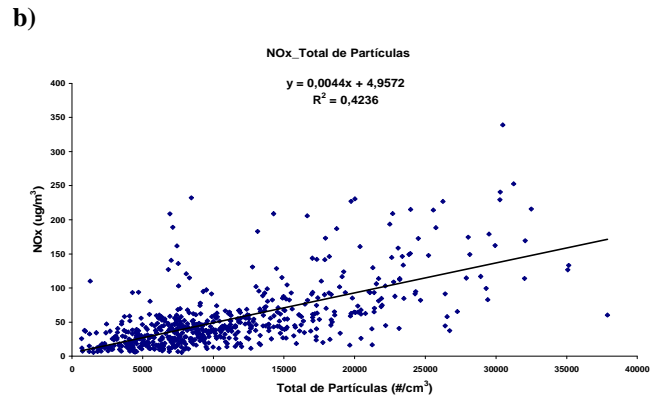
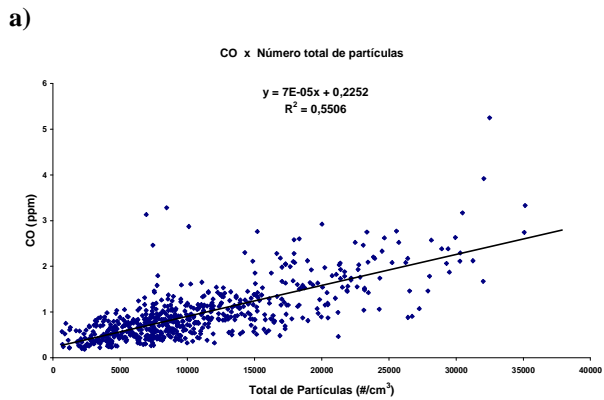


Figura 27. Gráficos de dispersão entre o CO e concentrações de partículas (à esquerda) e NOx (à direita), os diâmetros estão aumentando de cima para baixo na página.

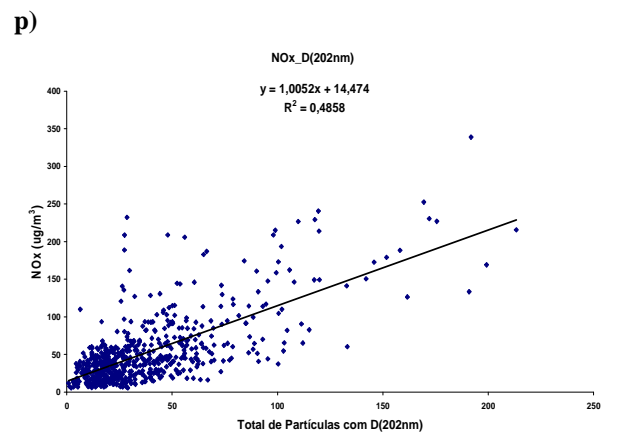
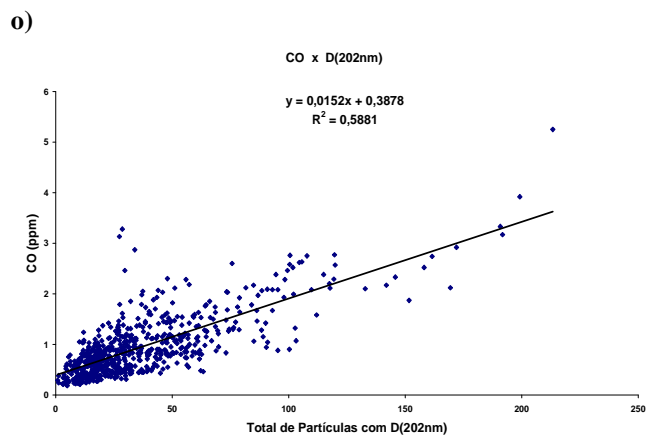
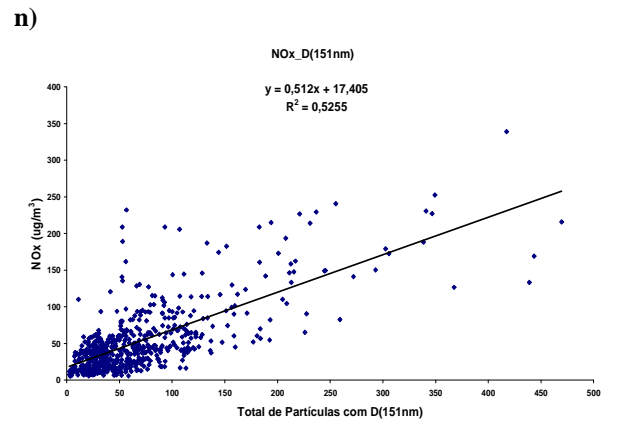
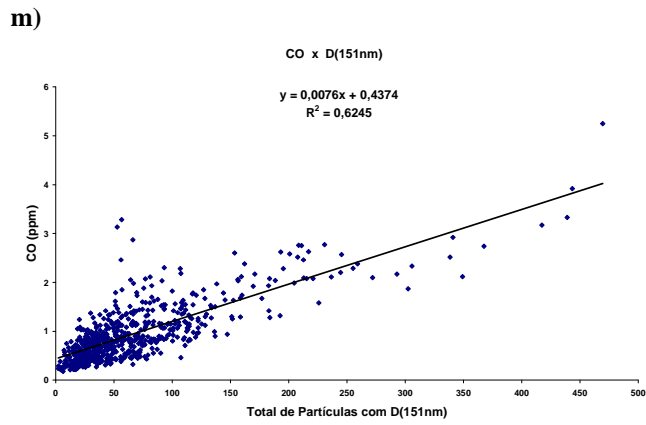
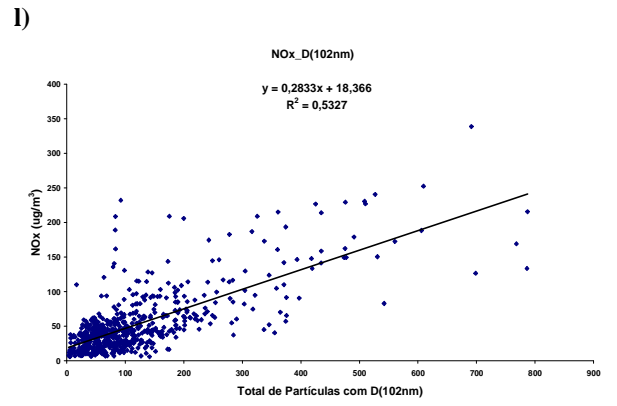
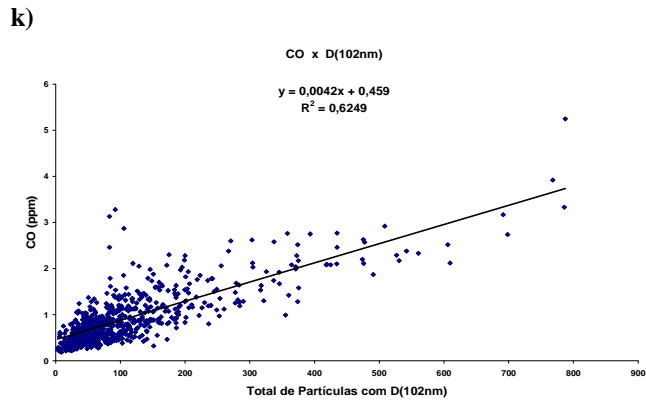
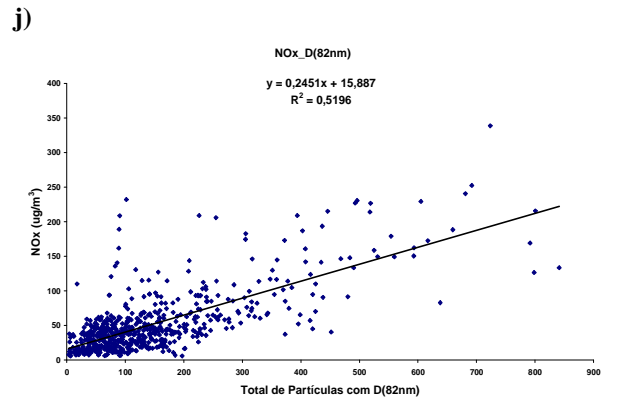
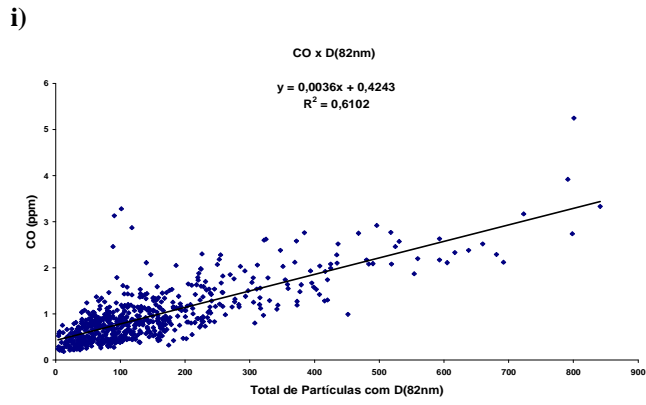


Figura 27. Continuação.

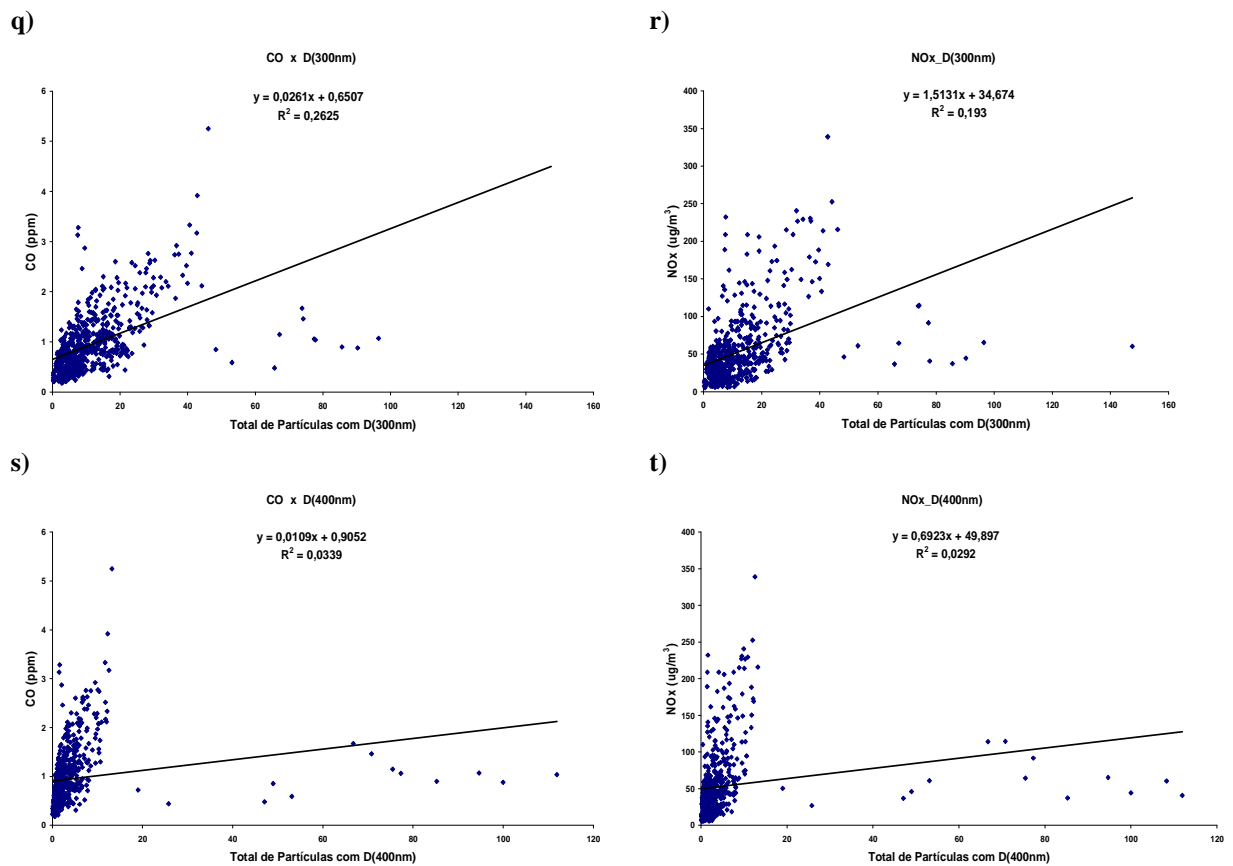


Figura 27. Continuação.

#### 4.2.2 Análises da variação diária da Distribuição de Tamanho em Número do aerossol na RMSP

Como foi visto no tópico anterior, é possível associar a Distribuição de Tamanho em Número de partículas com as fontes veiculares presentes na RMSP. Esta associação é mais bem representada quando as concentrações de partículas estão entre uma faixa de diâmetros que varia de 61,5 a 202 nm, onde existe uma forte correlação entre as concentrações de CO e NOx com o número de partículas medidas. Considerando-se que as condições meteorológicas são praticamente as mesmas entre os dois pontos de amostragem (distantes aproximadamente 3 km), pode-se esperar que as oscilações nas concentrações medidas nos dois pontos sejam também correlacionadas positivamente em relação à condição de tempo.

A Figura 28 mostra a evolução horária (a cada três horas) das concentrações em número de partículas medidas pelo SMPS em alguns dias

de agosto (26 a 31) e setembro (1,2,9 e 10) de 2005 no topo do prédio do IAG/USP. No gráfico “a” observam-se as evoluções de partículas para o dia 26 de agosto de 2005 (sexta-feira), percebe-se um aumento nas concentrações durante o período da manhã, atingindo um máximo de concentração que ultrapassa as 500 partículas/cm<sup>3</sup> em torno de 12 às 14h, e para diâmetros da ordem de 40 nm. Este aumento nas concentrações pode estar relacionado a um possível aumento no tráfego veicular no período da manhã e culminando no início da tarde com um conseqüente aumento nas concentrações de CO e NOx. Em “b”, pode-se observar a evolução nas concentrações de partículas para um dia de sábado (27/08/2005), não se observa elevadas concentrações no período da manhã e início da tarde, mas já no início da noite, entre 18 e 20h, pode-se observar um aumento nas concentrações de partículas associadas possivelmente a um maior tráfego veicular nestes horários e permanecendo elevadas as concentrações entre 21 e 23h, horário em que as condições atmosféricas contribuíram fortemente com as elevadas concentrações. Foi observado durante este período em agosto que entre os horários de 21 e 23h e no início da madrugada, entre 0 e 2h, que a velocidade do vento, medida na estação do próprio IAG/USP na Cidade Universitária, possuía um valor muito baixo ou até mesmo igual a zero em muitos momentos, favorecendo assim as elevadas concentrações de partículas observadas à noite.

Pode-se observar em “c” (28/08/2005, domingo) que as concentrações permanecem elevadas no intervalo de 0 a 2h seguindo as elevadas concentrações observadas anteriormente. Pode-se também observar em “c” um pequeno pico de concentrações no intervalo de 6 às 8h e uma posterior diminuição nas concentrações resultando com um mínimo entre 12 e 14h, horário provável de menor tráfego veicular neste domingo. Após as 15h pode-se observar um aumento nas concentrações de partículas com um pico bem definido entre 18 e 20h, horário provável de maior tráfego veicular. As elevadas concentrações observadas no intervalo de 21 às 23h podem ser devido às condições atmosféricas desfavoráveis à dispersão dos poluentes.

Seguindo a análise para os dias posteriores, pode-se observar na segunda-feira (dia 29/08/2005), gráfico “d”, que permanecem elevadas as concentrações na madrugada, entre 0 e 2h, e que existe um pico de

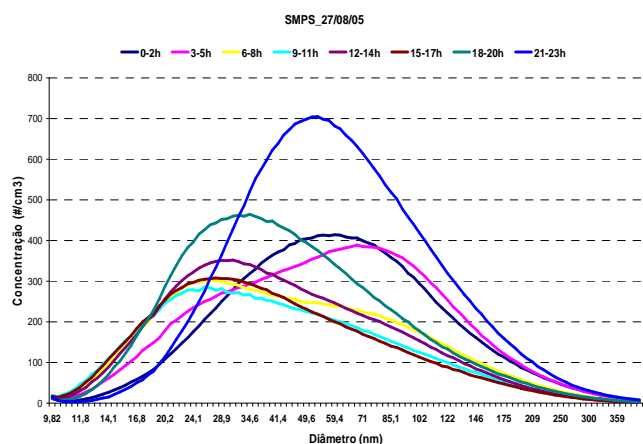
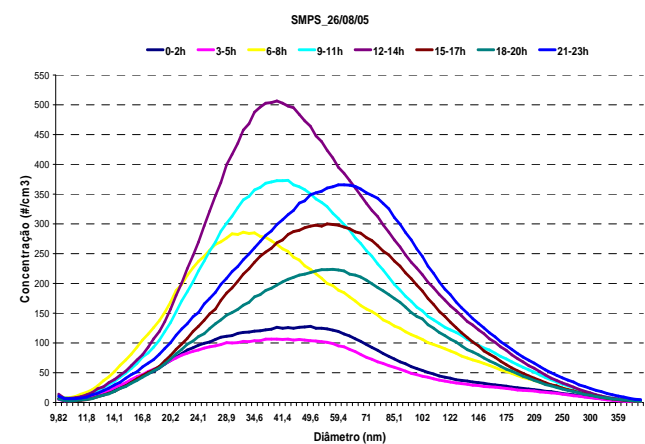


concentrações de partículas no intervalo de 6 as 8h, sendo atribuído a um provável pico no tráfego veicular neste mesmo intervalo. Também se observa para este dia um máximo nas concentrações de partículas ultrapassando as 650 partículas/cm<sup>3</sup> no intervalo entre 18 e 21h, horário provável de maior tráfego veicular, e para diâmetros em torno dos 80 nm.

Para o dia 30 de agosto de 2005 (terça-feira), gráfico “e”, podem-se observar claramente os picos de partículas no período da manhã (6 às 8h) e início da noite (18 às 20h), sendo representativo dos horários prováveis de maior tráfego veicular. As elevadas concentrações observadas no intervalo de 21 às 23h são principalmente relacionadas com as condições atmosféricas desfavoráveis a dispersão dos poluentes, como foi anteriormente discutida.

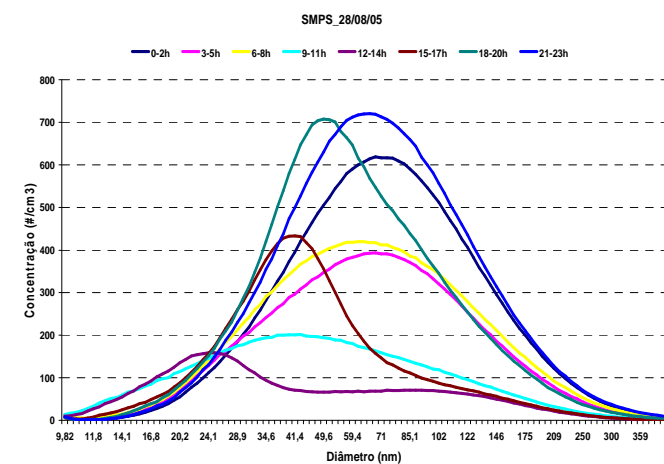
Analisando-se os demais dias (gráficos “f”, “g” e “h”), pode-se observar como características comuns os picos de concentrações de partículas no início da manhã (6 às 8h) e início da noite (18 às 20h), sendo também uma provável característica do intenso tráfego veicular observado nestes horários, e característico da atividade veicular. Também se observam em alguns dias um pico de concentrações no intervalo de 9 às 11h. Para o dia 09 de setembro de 2005 (sexta-feira), gráfico “i”, pode-se observar um aumento gradativo nas concentrações de partículas do início da tarde (12 às 14h), culminado com um máximo de concentrações no intervalo de 21 às 23h, pode-se supor que um maior tráfego veicular deve ter ocorrido na tarde e início da noite deste dia. Pode-se observar no dia 10 de setembro de 2005 (sábado), gráfico “j”, um aumento nas concentrações no intervalo de 6 às 8h com uma diminuição nos horários seguintes, observando-se um mínimo nas concentrações de partículas no intervalo de 15 às 17h, sendo provável que neste dia o tráfego veicular no período da tarde tenha sido muito pequeno, voltando a se intensificar no início da noite, como se observa com o aumento das concentrações de partículas no mesmo intervalo.

As análises aqui apresentadas mostram claramente uma forte relação entre os traçadores veiculares (CO e NO<sub>x</sub>) e as concentrações em número de partículas medidas com o SMPS, sendo possível se investigar os prováveis horários de tráfego veicular e também se perceber a forte influencia que as condições atmosféricas (principalmente ventos fracos) podem ter sobre as elevadas concentrações observadas em alguns dias à noite.

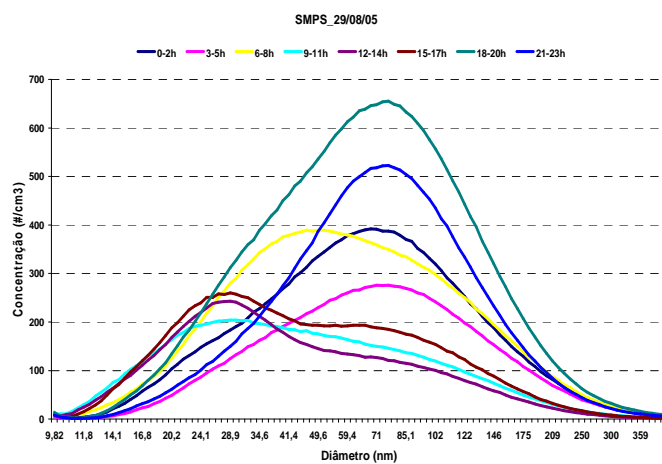


a)

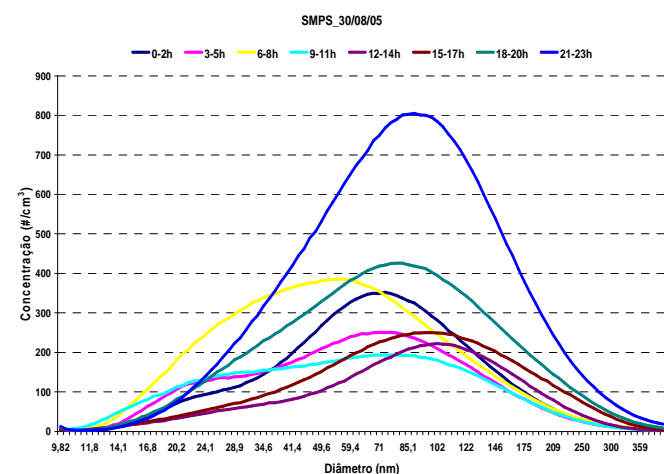
b)



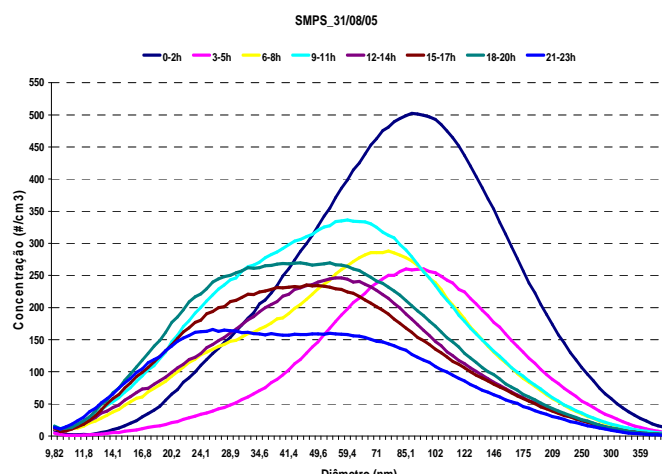
c)



d)

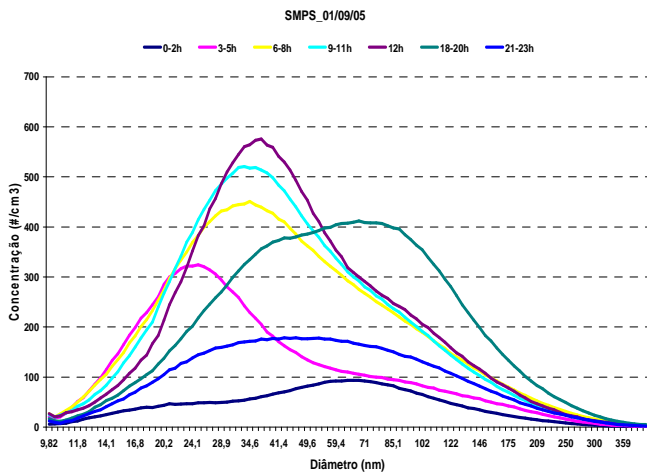


e)

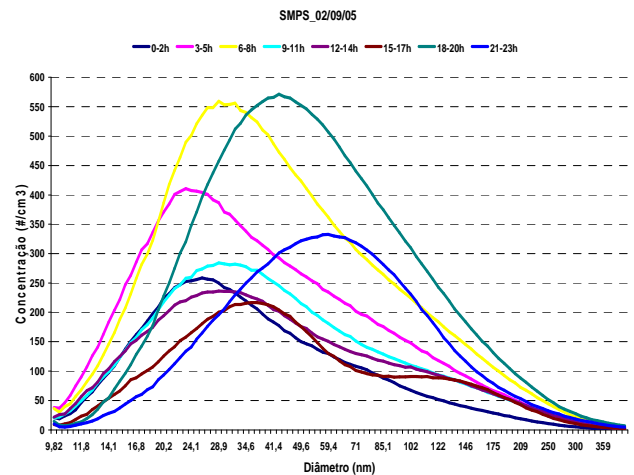


f)

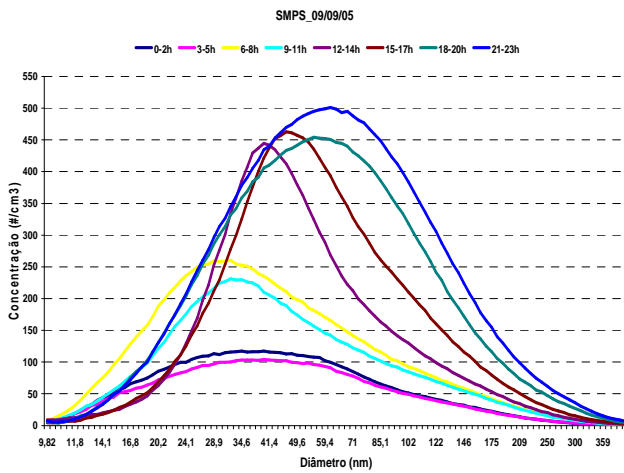
Figura 28. Evolução espectral horária da concentração em número de partículas na RMSP.



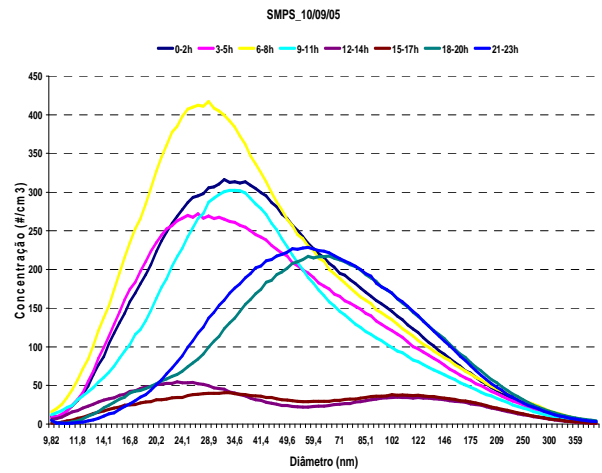
g)



h)



i)



j)

Figura 28. Continuação

De uma forma geral, foi possível afirmar que houve uma boa correlação entre o número de partículas e a fonte veicular, como era de se esperar, principalmente com a quantidade de partículas em torno de 61,5 a 202 nm de diâmetro. Baseado nos resultados da correlação do número de partículas e a fonte veicular e analisando o ciclo diário de concentração em número de partículas foi possível estimar os horários prováveis de maior tráfego veicular na RMSP. Essas informações podem ser de grande importância na determinação e validação de um ciclo diário de emissões de poluentes de origem veicular na RMSP.

O estudo apresentado anteriormente pode justificar o uso do inventário de emissões utilizado nas simulações com o modelo numérico WRF/Chem

(pelo menos em relação ao Material Particulado fino), uma vez que no inventário atual de emissões só se consideram as fontes móveis (veiculares) como fontes poluidoras. Sabe-se que devem ser incluídas as contribuições das fontes fixas e possíveis contribuições de queimadas para uma melhor representação das fontes emissoras de poluentes na RMSP, mas ainda assim pode-se utilizar um inventário baseado somente nas fontes veiculares com certa acurácia para a representação do material particulado fino emitido para a atmosfera da RMSP (principalmente de uma forma qualitativa), pois se sabe que estas fontes são as que contribuem majoritariamente para as concentrações de partículas na RMSP.

## **4.2 RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES NUMÉRICAS**

Abaixo são apresentados resultados da modelagem da atmosfera com o WRF/Chem. Foram feitas várias simulações tanto para a meteorologia (simulações sem a química) quanto com a química acoplada. Primeiramente são apresentados os resultados para as validações meteorológicas das simulações realizadas com o WRF/Chem, para os dias 01 e 02 de janeiro de 2010. Posteriormente são apresentados resultados para alguns testes de sensibilidade realizados, e comparações entre as diferentes escolhas de parametrizações e aninhamentos de grade. A discussão está focada na variação da chuva produzida pelo modelo com as diferentes escolhas de parametrizações (testes de sensibilidade). Na sequência são apresentados resultados para simulações com o módulo de química ligado e desligado, e análises comparativas de simulações com ambiente considerado limpo e poluído (com diferenças nas emissões consideradas para as simulações). São também apresentados resultados para as simulações com a inclusão de dados topográficos de alta resolução (SRTM), bem como resultados das simulações com quatro diferentes ambientes atmosféricos (muito limpo, limpo, poluído, e muito poluído).

#### 4.2.1 Validação das simulações meteorológicas com o WRF/Chem e dados observados

Sabendo-se que as variáveis meteorológicas determinam o transporte e dispersão dos poluentes é importante que o modelo consiga representar bem a evolução dessas variáveis. Na simulação aqui considerada para a validação dos resultados, o modelo foi executado desligando-se o módulo de química acoplada (desativada), e utilizando-se três grades aninhadas de 27, 9 e 3 km de espaçamento. A Tabela 2 apresenta as principais opções de configuração do modelo WRF/Chem com relação aos processos atmosféricos. Os resultados para a grade com 3 km de espaçamento são utilizados nas comparações abaixo com dados medidos. Ressalta-se que para a simulação na terceira grade (3 km) a parametrização de cúmulos estava ativada, e para as simulações somente com a meteorologia todos os processos químicos foram desligados.

Tabela 2. Opções de configurações utilizadas nas simulações com o WRF/Chem.

<b>Processo Atmosférico</b>	<b>Opção no WRF/Chem</b>
Radiação de onda longa	RRTM
Radiação de onda curta	Goddard
Camada de superfície	Monin-Obukhov
Camada limite planetária	YSU
Modelo de superfície	Noah LSM
Parametrização de cúmulos	Grell (G3)
Parametrização de microfísica	Lin (modificado)
Ativação do aerossol para a fase de nuvem	Ghan
Modelo de aerossol	MADE/SORGAM
Mecanismo químico (fase gasosa)	RADM2
Química da fase aquosa	Fahey e Pandis
Fotólise	Fast-J

Na Figura 29 pode-se observar a comparação entre os valores observados de temperatura, umidade relativa e velocidade do vento para as estações do INMET (esquerda) e IAG (direita) com os valores simulados pelo modelo WRF/Chem para 01 e 02 de janeiro de 2010. Observa-se que os valores simulados de temperatura do ar estão bem coerentes com os valores observados para as duas estações, e os horários que apresentaram maiores diferenças correspondem ao dia dois de janeiro na parte da tarde, nos mesmos horários de ocorrência de chuva observada mais intensa. Com relação à comparação com a umidade relativa os valores simulados também apresentaram boa concordância com as observações, sendo melhores simulados os valores para a estação do INMET. A umidade relativa simulada para a estação do IAG ficou abaixo daquela observada, sendo as maiores diferenças para o período da tarde do dia dois de janeiro, mas de uma forma geral o modelo consegue simular bem o ciclo observado.

Ainda na Figura 29 percebe-se que a velocidade do vento simulada possui valores acima da observada, e que mais uma vez o modelo consegue simular melhor os valores observados para a estação do INMET. Para a estação do IAG os valores simulados estão superestimados durante várias horas e as maiores diferenças nas velocidades do vento são encontradas no período da tarde e da noite para ambos os dias aqui analisados. Mesmo o modelo simulando valores da velocidade do vento mais elevados do que o observado, percebe-se que há uma boa concordância com relação ao ciclo diurno, ou seja, o modelo conseguiu simular relativamente bem às variações na velocidade do vento durante os dois dias. As comparações apresentadas aqui sugerem que as configurações utilizadas no modelo WRF/Chem (e listadas na Tabela 3) são adequadas na representação da evolução das variáveis meteorológicas (temperatura, umidade relativa e velocidade do vento) durante os dias 01 e 02/01/2010.

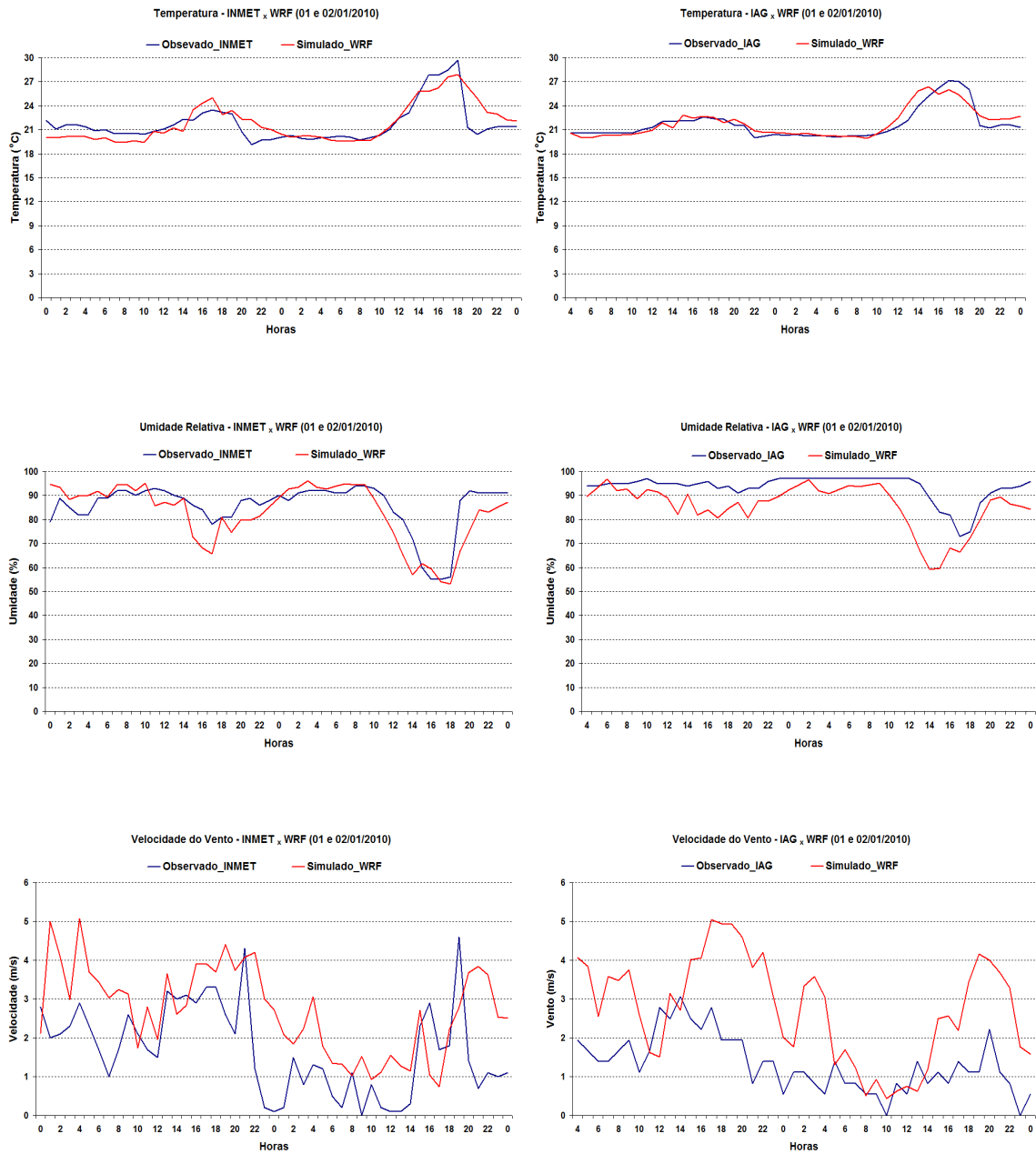


Figura 29. Comparação entre os valores observados de temperatura, umidade relativa e velocidade do vento para as estações do INMET (esquerda) e IAG (direita) e os valores simulados pelo modelo WRF/Chem para 01 e 02 de janeiro de 2010.

#### 4.2.1 Resultados dos testes de sensibilidade para as simulações com o WRF/Chem

Abaixo são apresentados os resultados de alguns testes de sensibilidade com o modelo WRF/Chem, cujo objetivo principal consistiu em perceber os impactos na precipitação simulada ao se variar uma determinada parametrização fixando as demais e assim avaliar as diferenças na chuva simulada. A discussão está focada na variação da precipitação produzida pelo modelo com a utilização de diferentes parametrizações, como: parametrização de área urbana (Martilli et al., 2002); efeito radiativo dos aerossóis – efeito direto (Fast et al., 2006; Chou et al., 1998) e o efeito indireto dos aerossóis (Ghan e Easter, 2006, Ghan et al., 1997, 2001). Os detalhes dessas parametrizações encontram-se nas referências citadas acima. Todas as opções de parametrizações aqui utilizadas estão implementadas e disponíveis para uso no modelo.

A versão do modelo aqui utilizada é a 3.1.1, e o modelo de aerossóis utilizado foi o MADE/SORGAM, que está acoplado com o esquema de microfísica de nuvens de Lin et al. (1983). As simulações foram realizadas seguindo-se uma metodologia já discutida anteriormente e que consiste em se obter condições iniciais e de fronteira mais realistas em relação às variáveis químicas. Para isso, foi realizado um *spin-up* de quatro dias anteriores ao dia de interesse e reduzindo-se o domínio (aumentando a resolução) gradativamente de 27, 9 e 3 km de espaçamento de grade. Serão apresentados os resultados da simulação com a resolução máxima que é para o domínio com 3 km de espaçamento de grade. Cada dia foi simulado separadamente e somente na primeira simulação com a grade de 27 km foi utilizado um perfil vertical idealizado para as espécies químicas, depois de terminada esta simulação foram utilizadas as saídas do último passo de tempo para fornecerem um perfil vertical, agora com as informações das emissões na grade, mais realistas para o segundo dia de simulação. Este procedimento foi feito com a grade de 27 km de resolução para os quatro dias iniciais, e posteriormente utilizaram-se as saídas deste dia para se inicializar a simulação com a grade de 9 km de resolução. Este procedimento foi feito até se chegar



no dia de interesse e na resolução de 3 km de espaçamento de grade (em x e y). O domínio simulado na grade de mais alta resolução possui 100 pontos tanto em x como em y, centrado em -23.55 de latitude e -46.63 de longitude, e 35 níveis na vertical.

Na Tabela 3 apresenta-se a descrição dos códigos utilizados para a identificação dos testes de sensibilidade realizados, tendo como finalidade facilitar a visualização das comparações entre os diferentes testes de sensibilidade.

Tabela 3. Tabela descritiva dos códigos utilizados para a identificação dos testes de sensibilidade realizados.

<b>Código</b>	<b>Descrição</b>
U1	Simulação com a parametrização urbana ativada
U0	Simulação com a parametrização urbana desativada
D1	Simulação com o efeito direto dos aerossóis ativado
D0	Simulação com o efeito direto dos aerossóis desativado
I1	Simulação com o efeito indireto dos aerossóis ativado
I0	Simulação com o efeito indireto dos aerossóis desativado
Exemplo: U1D0I1 significa que a simulação foi realizada com a parametrização urbana ligada, o efeito direto dos aerossóis desligado e o efeito indireto ligado.	

O foco da discussão apresentada a seguir é a variação na precipitação acumulada simulada pelo modelo para os diferentes testes de sensibilidade.

Na Figura 30 observa-se a comparação entre o total de chuva observado e o simulado pelo WRF/Chem (somente meteorologia) para as estações do IAG (à esquerda) e INMET (à direita) para o dia 02 de janeiro de 2010. As linhas azuis na figura representam os valores acumulados de chuva observados para ambas as estações, as linha vermelhas e verdes representam a chuva simulada para ambas as estações nas opções (U0) e (U1), referentes à parametrização urbana. Observa-se que o modelo executado somente com a meteorologia representa melhor a chuva na estação do IAG com a parametrização urbana desligada, quando essa parametrização é ligada (U1) percebe-se uma diminuição significativa na chuva simulada. , fato que não é observado para a estação do INMET, cujas simulações com a parametrização urbana ligada e desligada apresentaram praticamente a mesma quantidade de chuva simulada em 24 horas.

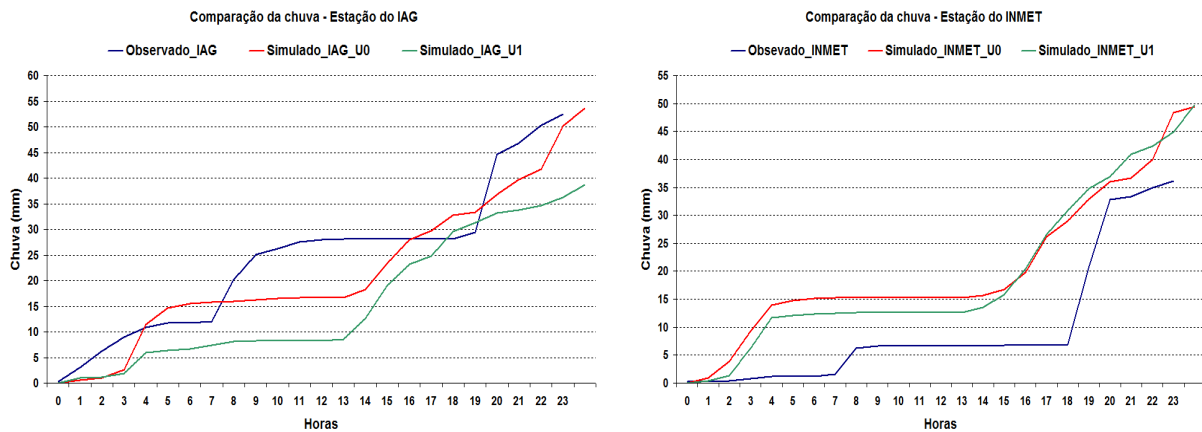
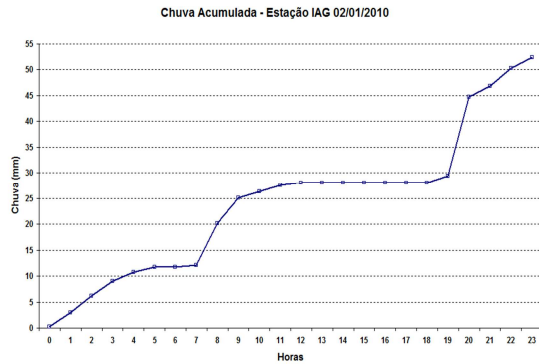


Figura 30. Comparação da chuva observada com a simulada pelo WRF/Chem (somente meteorologia) para as estações do IAG (à esquerda) e INMET (à direita) e para o dia 02 de janeiro de 2010.

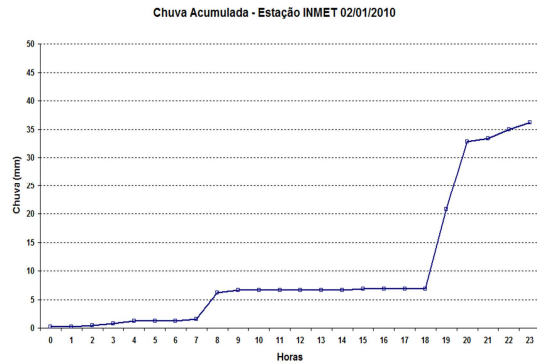
Simulações foram realizadas considerando também o módulo de química do WRF-Chem ligado. Na Figura 31 (a e b) podem-se observar as precipitações acumuladas durante todo o dia 02 de janeiro de 2010 medidas para as estações do IAG (à esquerda) e do INMET (à direita), na parte superior da figura. Logo abaixo, Figura 31c e 31d apresentam-se resultados das simulações com o WRF/Chem com a parametrização urbana “ligada” (U1), e abaixo dessas (Figuras 31e e 31f) observam-se resultados das simulações com a parametrização urbana “desligada” (U0), ambas com a química acoplada. Ainda na Figura 31, as linhas pretas representam as simulações em que o efeito radiativo dos aerossóis (efeito direto) estava “desligado” (D0) e linhas verdes, que o efeito radiativo dos aerossóis estava “ligado” (D1). O efeito indireto dos aerossóis estava ligado (I1) para ambos os testes anteriores. Percebe-se que de uma forma geral o modelo consegue simular bem a chuva acumulada das duas estações, sendo claro que quando a parametrização urbana está “ligada” a chuva simulada pelo modelo é menor para ambas as estações. Também fica claro o aumento na precipitação para ambos os casos quando o efeito radiativo dos aerossóis está “ligado”. O acumulado em 24 horas para a estação do IAG foi de 52 mm, enquanto que o modelo consegue simular (sem a parametrização urbana e com o efeito radiativo dos aerossóis – U0D1I1) um acumulado de aproximadamente 38 mm. Já para a estação do INMET o acumulado do dia 02 de janeiro foi de 36 mm e o modelo consegue

simular (na mesma configuração anterior – U0D111) um acumulado de 38 mm, sendo descontado os 6 mm do dia anterior (ver no gráfico).

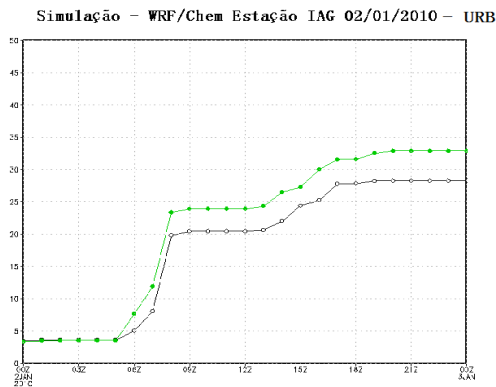
(a)



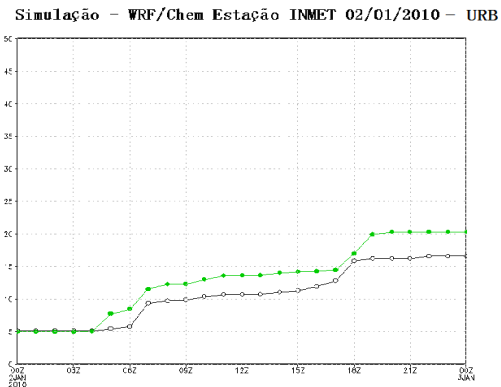
(b)



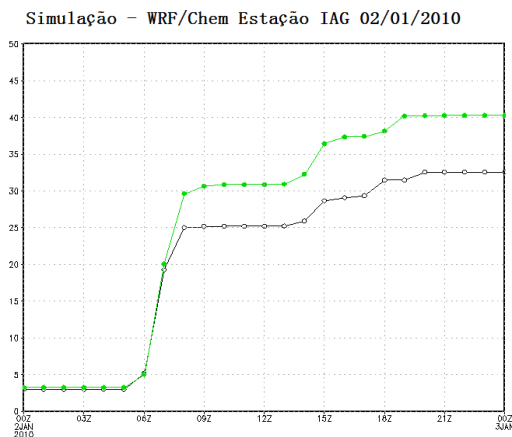
(c)



(d)



(e)



(f)

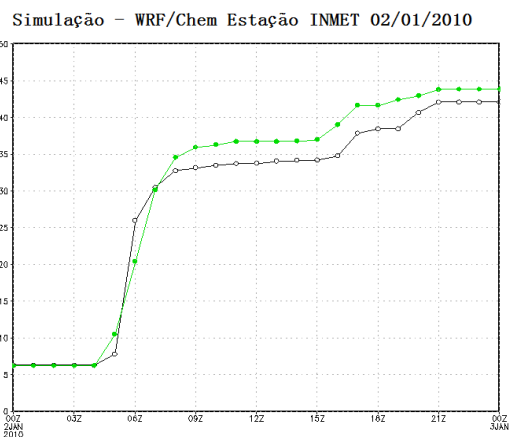


Figura 31. Chuva acumulada observada: (a) Estação do IAG; (b) Estação do INMET; simulações com o WRF/Chem para 02 de janeiro de 2010 nas estações do IAG (c) e INMET (d) considerando a parametrização urbana ligada. Na parte (e) e (f) da Figura apresentam-se os resultados para as simulações com a parametrização urbana desligada, para o IAG e o INMET, respectivamente.

Na Figura 32, apresenta-se uma avaliação espacial dessas diferenças na Região Metropolitana de São Paulo. Podem-se observar as diferenças na precipitação entre as simulações com e sem a parametrização urbana, isto é, a chuva simulada com U1 menos a chuva simulada com U0, e com o efeito radiativo dos aerossóis “desligado” (parte a da figura) e as diferenças na precipitação das simulações com e sem a parametrização urbana e com o efeito radiativo dos aerossóis “ligado” (parte b da figura) ambas para o dia 02 de janeiro de 2010. Todas as simulações anteriores estavam com o efeito indireto dos aerossóis ligado (I1). Observa-se mais uma vez que quando a parametrização urbana está “ligada” o modelo simula menos chuva do que com ela “desligada”, pelo menos em uma média para a RMSP. Analisando-se as figuras com relação às diferenças espaciais, observa-se que as maiores diferenças na chuva simulada ocorrem sobre a cidade de São Paulo, principalmente na parte norte da cidade.

A explicação física para essas diferenças na precipitação com relação a U1 e U0 não é inicialmente óbvia, visto que quando se aplica uma parametrização urbana mais sofisticada os fluxos de calor sensível e latente são diferentes nos dois casos e essas diferenças ocasionam uma mudança nas circulações locais (intensificando ou desintensificando as circulações) e conseqüentemente na convecção sobre a RMSP.

Com relação às diferenças entre D1 e D0, é observado um aumento na chuva quando o efeito radiativo dos aerossóis é ligado, ressaltando-se que esse aumento na chuva aproxima mais o valor simulado do observado, sendo, portanto mais realista (pelo menos para as duas estações aqui consideradas). Isto sugere que a utilização do modelo WRF/Chem com a química acoplada e com o efeito radiativo dos aerossóis ligado seja mais representativa para a simulação da chuva observada na RMSP, pelo menos para o período aqui simulado.

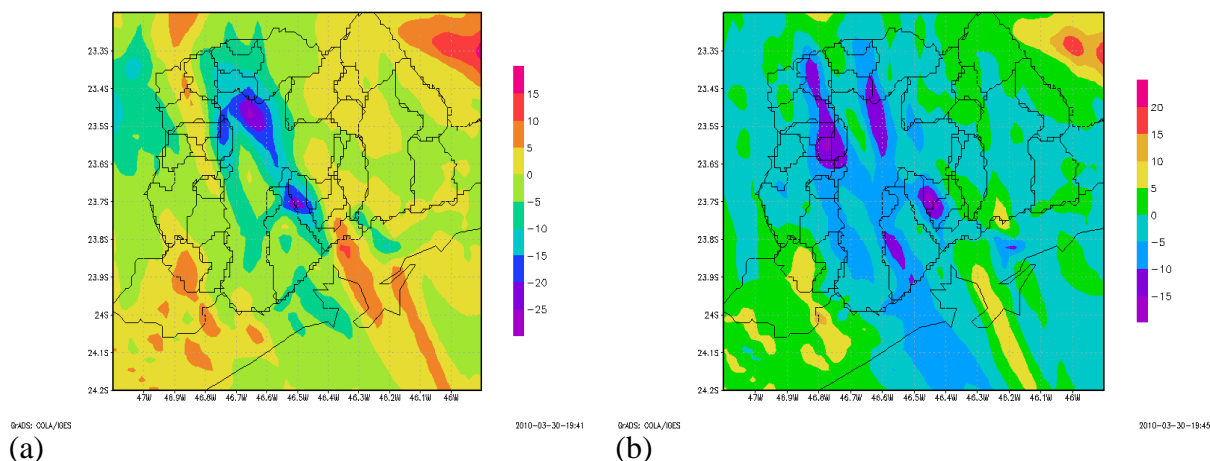


Figura 32. Diferença na precipitação das simulações com e sem a parametrização urbana e com o efeito radiativo dos aerossóis “desligado” (a) e diferença na precipitação das simulações com e sem a parametrização urbana e com o efeito radiativo dos aerossóis “ligado” (b).

Na Figura 33 observam-se as diferenças na precipitação das simulações sem e com o efeito radiativo dos aerossóis e a parametrização urbana “ligada” (à esquerda) e diferenças na precipitação das simulações com e sem o efeito radiativo dos aerossóis e a parametrização urbana “desligada” (à direita). Percebe-se que quando a parametrização urbana está “ligada” a escala de cores possui valores menores do que quando “desligada”, isso se deve ao mesmo fato anterior, ou seja, as simulações sem a parametrização urbana ligada simulam mais chuva sobre a RMSP, e também observa-se um deslocamento nos máximos de chuvas quando o efeito radiativo dos aerossóis é ligado ou desligado.

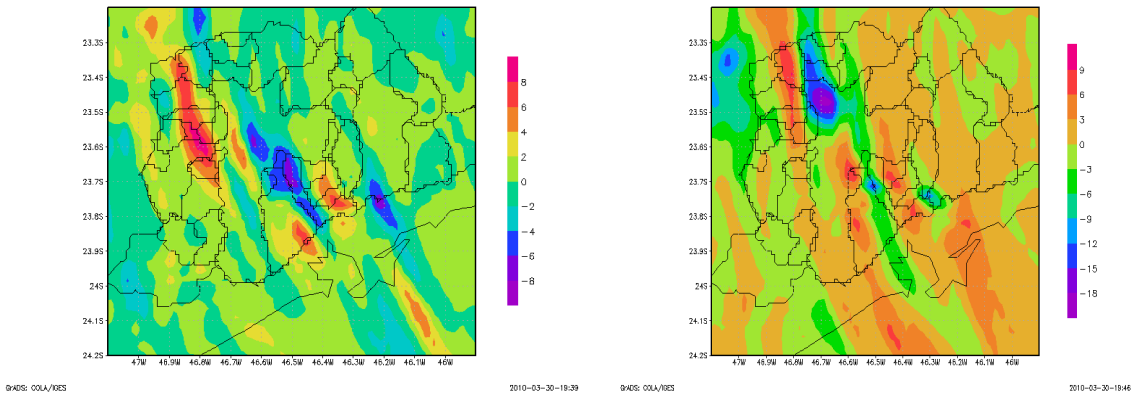


Figura 33. Diferença na precipitação das simulações sem e com o efeito radiativo dos aerossóis e a parametrização urbana “ligada” (à esquerda) e diferença na precipitação das simulações com e sem o efeito radiativo dos aerossóis e a parametrização urbana “desligada” (à direita).

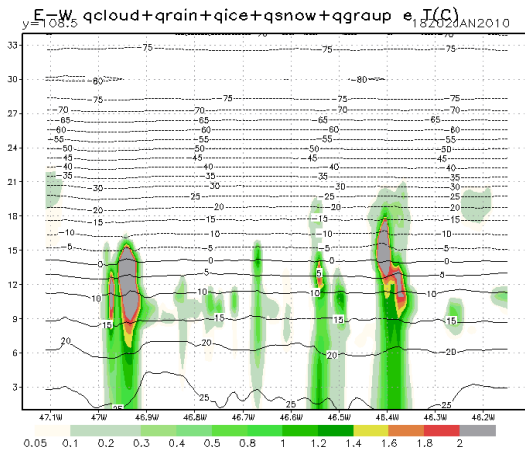
#### 4.2.2 Resultados das comparações entre as simulações e as imagens de RADAR

Com o objetivo de melhorar a representatividade da modelagem da parametrização de microfísica de nuvens foi realizada uma série de simulações com resolução final de 1 km (de espaçamento de grade).

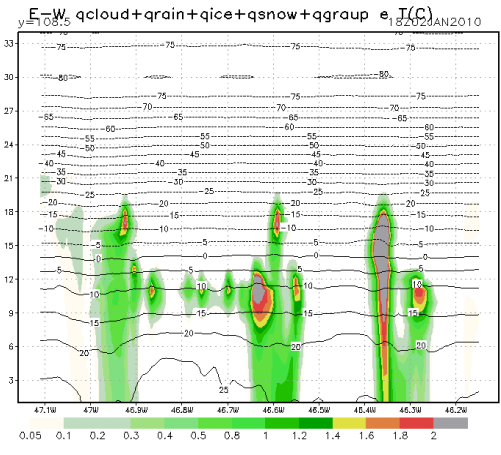
A Figura 34 apresenta uma sequência de saídas das simulações com o modelo WRF/Chem para uma grade com 1 km de espaçamento de grade e 100 x 100 x 35 pontos. As simulações apresentadas abaixo tratam apenas da parte meteorológica, pois fazem parte das validações realizadas com o modelo para a representação da formação de nuvens e chuva no período simulado.

A parametrização de microfísica utilizada foi a de Lin et al. (1983) modificada e não se utilizou a parametrização de cúmulos. São apresentadas figuras do corte vertical da atmosfera na direção Leste-Oeste e sobre a RMSP (Lat -23.55) mostrando a comparação entre as variáveis produzidas pela parametrização de microfísica de nuvens: soma de água de nuvem com chuva, gelo de nuvem, neve, e *graupel* em g/kg, para simulações com opção de *1-way* (Figuras 34 a, c, e, g, h e k) e *2-way nesting* (Figuras 34 b, d, f, i, j) para os horários 18Z, 18:30Z, 19Z, 19:30Z, 20Z e 20:30Z do dia 02 de janeiro de 2010. De forma geral pode-se observar que ambas as simulações conseguem reproduzir de forma adequada as células convectivas que se desenvolveram sobre a RMSP na tarde do dia 02 de janeiro de 2010.

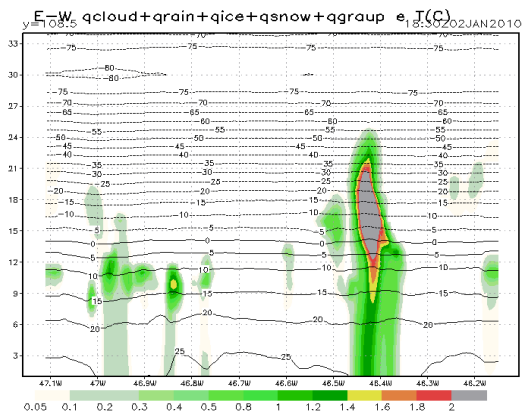
No horário das 18 e 18:30Z, observa-se que a simulação com a opção *2-way nesting* produz células convectivas mais intensas do que a simulação com a opção *1-way*, e observa-se uma situação contrária para o horário das 19:00Z, onde a simulação com a opção *1-way* produz células convectivas mais intensas e de grande desenvolvimento vertical. Pode-se observar a evolução das células convectivas a partir das 18:00Z até as 20:30Z, quando fica clara a ocorrência dos estágios de desenvolvimento dos sistemas desde a sua fase de início, formação do sistema com pouca chuva, maturidade do sistema produzindo bastante chuva que chega na superfície, e as 20:30Z os sistemas já entrando na fase de dissipação com observação da formação de bigornas.



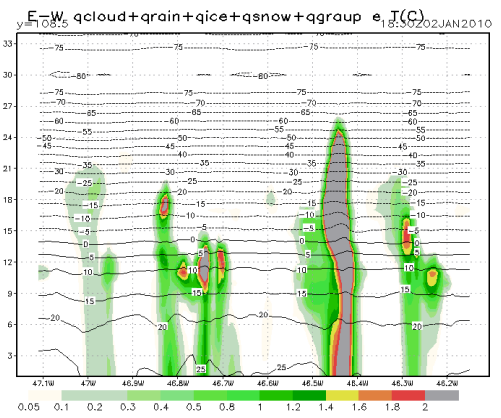
(a)



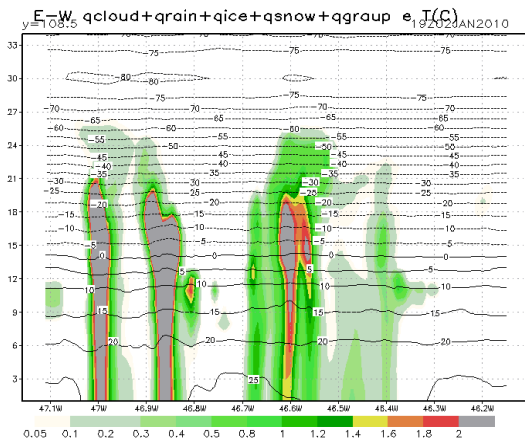
(b)



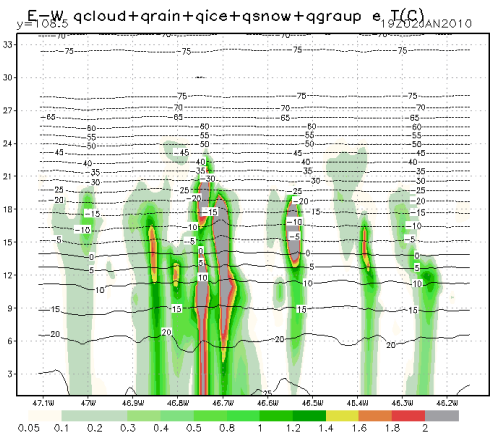
(c)



(d)



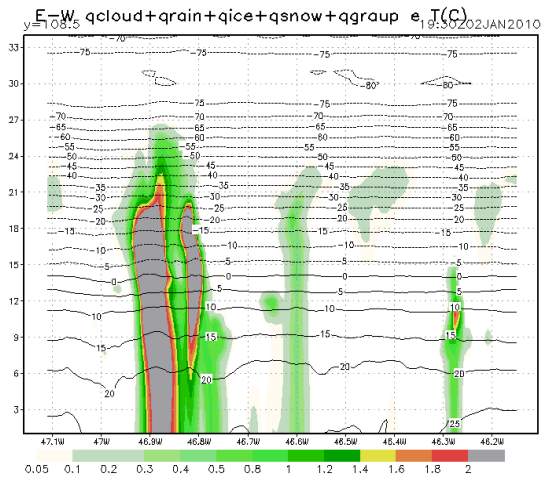
(e)



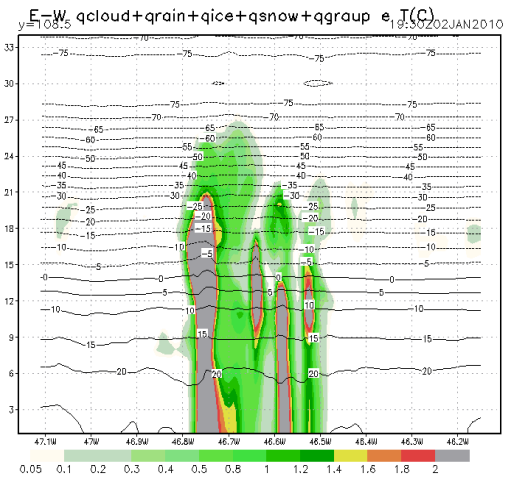
(f)

Figura 34. Corte vertical da atmosfera na direção Leste-Oeste e sobre a RMSF mostrando a comparação da chuva produzida pela parametrização de microfísica de nuvens (g/kg) para simulações com opção de 1-way (à esquerda) e 2-way nesting (à direita) para alguns horários do dia 02 de janeiro de 2010 (18Z, 18:30Z, 19Z, 19:30Z, 20Z, 20:30Z).

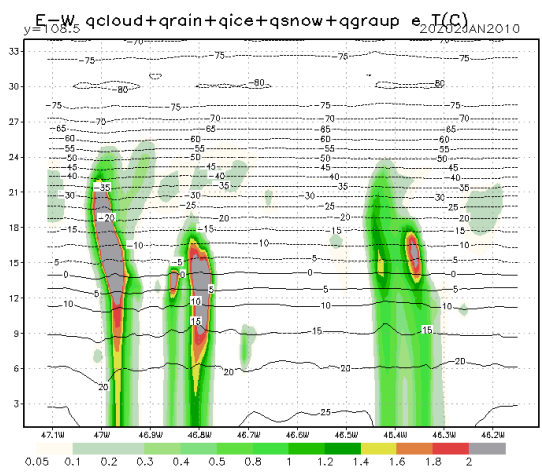




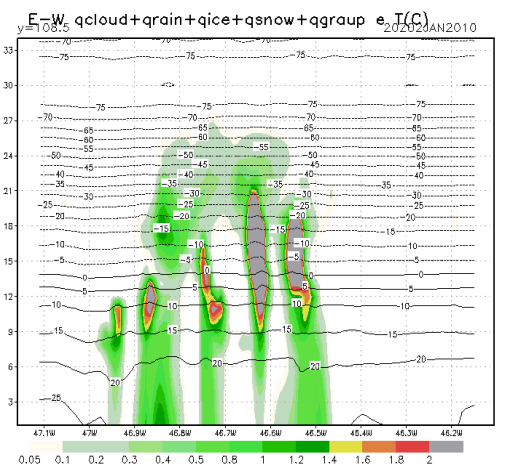
(g)



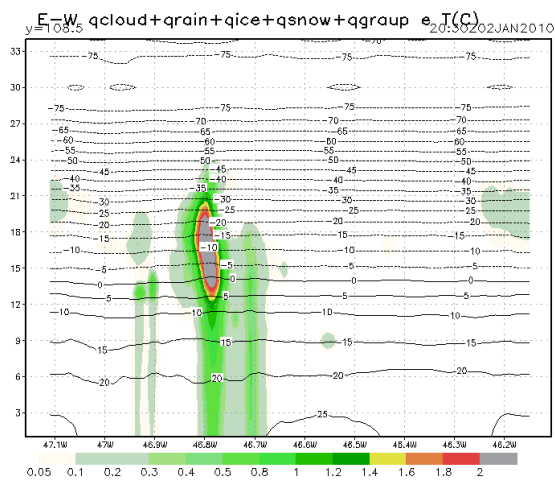
(h)



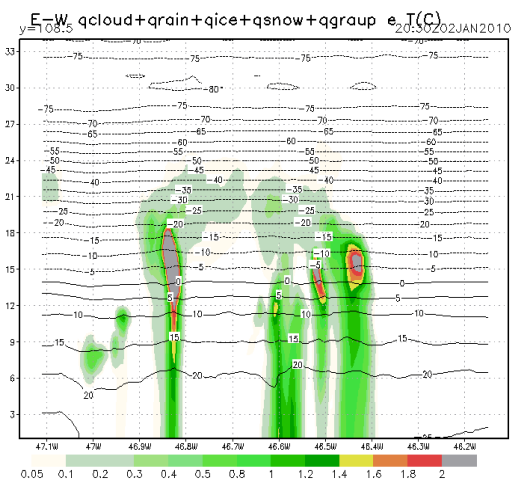
(i)



(j)



(k)



(l)

Figura 34. Continuação.

Esses estágios de desenvolvimento dos sistemas também puderam ser comprovados com dados do radar MXPOL para o mesmo período. Na Figura

35 pode-se observar o produto Max CAPPI medido pelo radar MXPOL do grupo LabHidro do IAG/USP para o dia 02 de janeiro de 2010 das 18 às 19:30Z (e de 30 em 30 min).

O radar MXPOL encontrava-se na cidade de Barueri nas coordenadas Lat = -23.499, Lon = -46.904 e Alt = 953 m acima do nível do mar, e estava apontado para a RMSP cobrindo toda a área da região. As imagens podem ser utilizadas para uma análise qualitativa dos sistemas precipitantes que atingiram a RMSP em 02 de janeiro de 2010. Pode-se observar que o radar consegue captar a evolução das células convectivas durante à tarde do dia 02, a partir das 18:00Z quando observa-se refletividades acima dos 45 dBz, o que significa regiões de convecção com forte intensidade e grande desenvolvimento vertical. Comparativamente aos resultados para as simulações apresentadas acima, observa-se claramente na imagem do RADAR que no horário das 18:30Z havia um forte sistema convectivo sobre a zona leste da capital, sendo que, o modelo simula um sistema com as mesmas características e na longitude -46,4. Também se pode observar que a partir das 19:30Z o sistema se apresenta mais espalhado tanto no PPI como no Max CAPPI, o que indica uma possível mudança para a fase de maturidade do sistema e posterior dissipação.

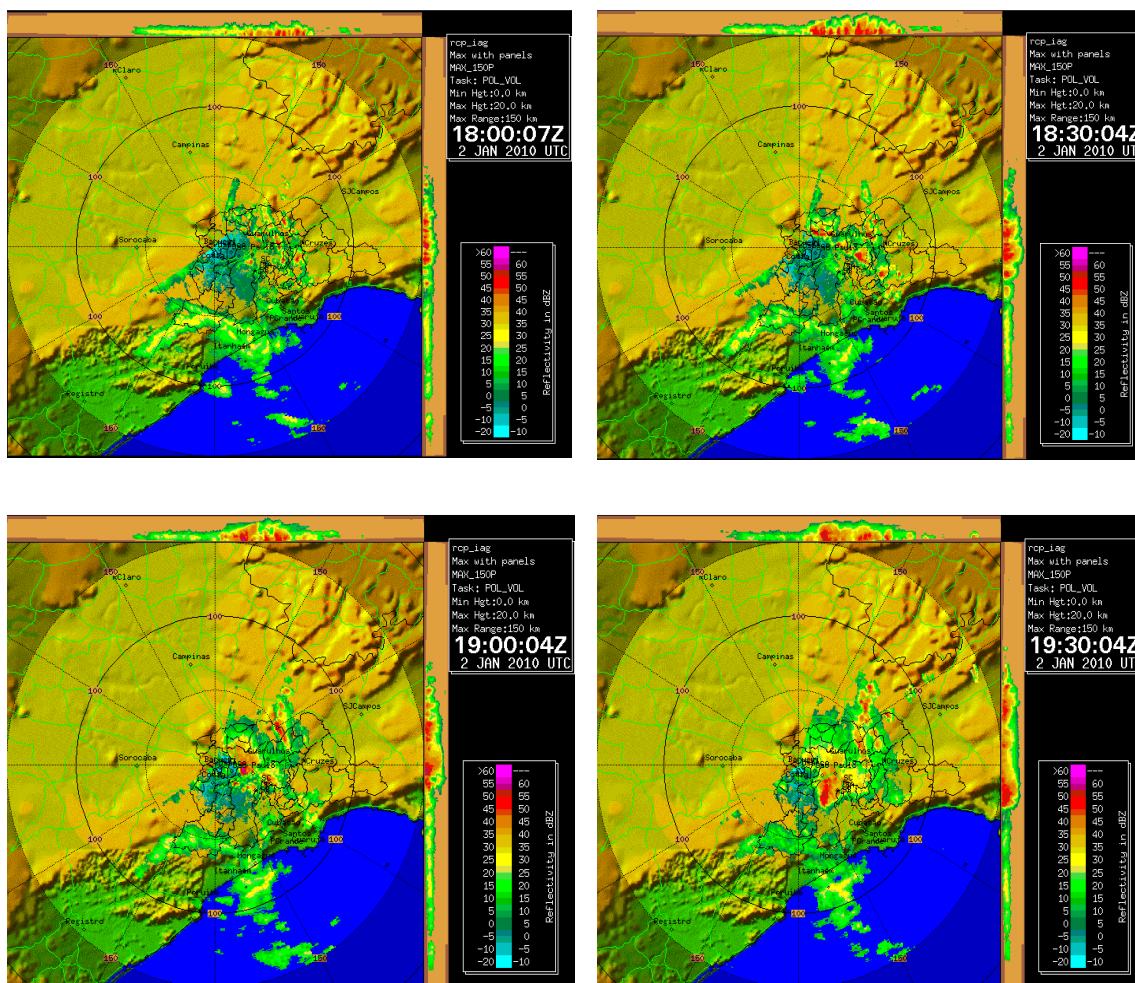


Figura 35. Max CAPPi medido pelo radar MXPOL do IAG/USP para o dia 02 de janeiro de 2010 das 18 e das 19:30Z.

#### 4.3.4 Comparações entre resultados de simulações com módulo de química e sem química acoplado

Dando continuidade às discussões dos resultados a Figura 36 apresenta uma sequência de saídas das simulações com o modelo WRF/Chem para duas grades com 1 km de espaçamento de grade e 100 x 100 x 35 pontos. As simulações apresentadas abaixo tratam os resultados sem química (Figura 36 a, c, e, g, i, k, m, o) e com a química acoplada (Figura 36 b, d, f, h, j, l, n, p). Como nas simulações anteriores a parametrização de microfísica utilizada foi a de Lin et al. (1983) modificada e não se utilizou a parametrização de cúmulos. São apresentadas figuras do corte vertical da atmosfera na direção Norte-Sul e

sobre a RMSP (centrado na longitude -46.63) mostrando a comparação do acumulado de todos os hidrometeoros produzidos pela parametrização de microfísica de nuvens ( $q_{cloud}$  – soma da água de nuvem,  $q_{rain}$  – água de chuva,  $q_{ice}$  – gelo de nuvem,  $q_{snow}$  – neve e  $q_{graup}$  – *graupel* em g/kg) para simulações com e sem química com *downscaling* seguindo 1-way *nesting* (como descrito na metodologia) para alguns horários (17Z, 17:30Z, 18Z, 18:30Z, 19Z, 19:30Z, 20Z e 20:30Z) do dia 02 de janeiro de 2010.

Observa-se que ambas as simulações conseguem reproduzir de forma adequada as células convectivas que se desenvolveram sobre a RMSP na tarde do dia 02 de janeiro de 2010, sendo que em alguns momentos ficam claras as diferenças nos resultados simulados para as duas condições. No horário das 17Z, observa-se que as simulações apresentam comportamentos parecidos na representação da chuva sobre a RMSP, com chuva produzida nos mesmos locais (próximo a latitude -23.8), mas com duas células convectivas bem destacadas para a simulação com química (à direita). No horário das 17:30Z observa-se que as duas simulações produzem chuva na latitude entre -23.8 e -23.9, sendo interessante observar que as nuvens com pequeno desenvolvimento vertical que se formaram na simulação sem química (a esquerda) e na latitude de -23.2 não aparecem na simulação com química para este mesmo horário (situação também observada no horário anterior para a latitude de -23.3).

Durante todos os outros horários são observadas várias células convectivas que produzem chuva nas mesmas localidades do domínio, sendo perceptível que em alguns momentos as células convectivas produzidas pela simulação com química possuem um maior desenvolvimento vertical do que as células produzidas sem química acoplada, e em outros momentos são percebidas situações contrárias. Essas diferenças nas células convectivas simuladas nas duas situações são principalmente um resultado das diferenças na atuação do esquema de microfísica de nuvens. Na simulação com química os NCN's são ativados a partir do módulo de aerossóis enquanto que estes são parametrizados na simulação sem química. Deve-se também destacar, que há mudanças físicas causadas pela presença dos aerossóis na simulação com química em especial relacionadas com os efeitos radiativos diretos e indiretos.



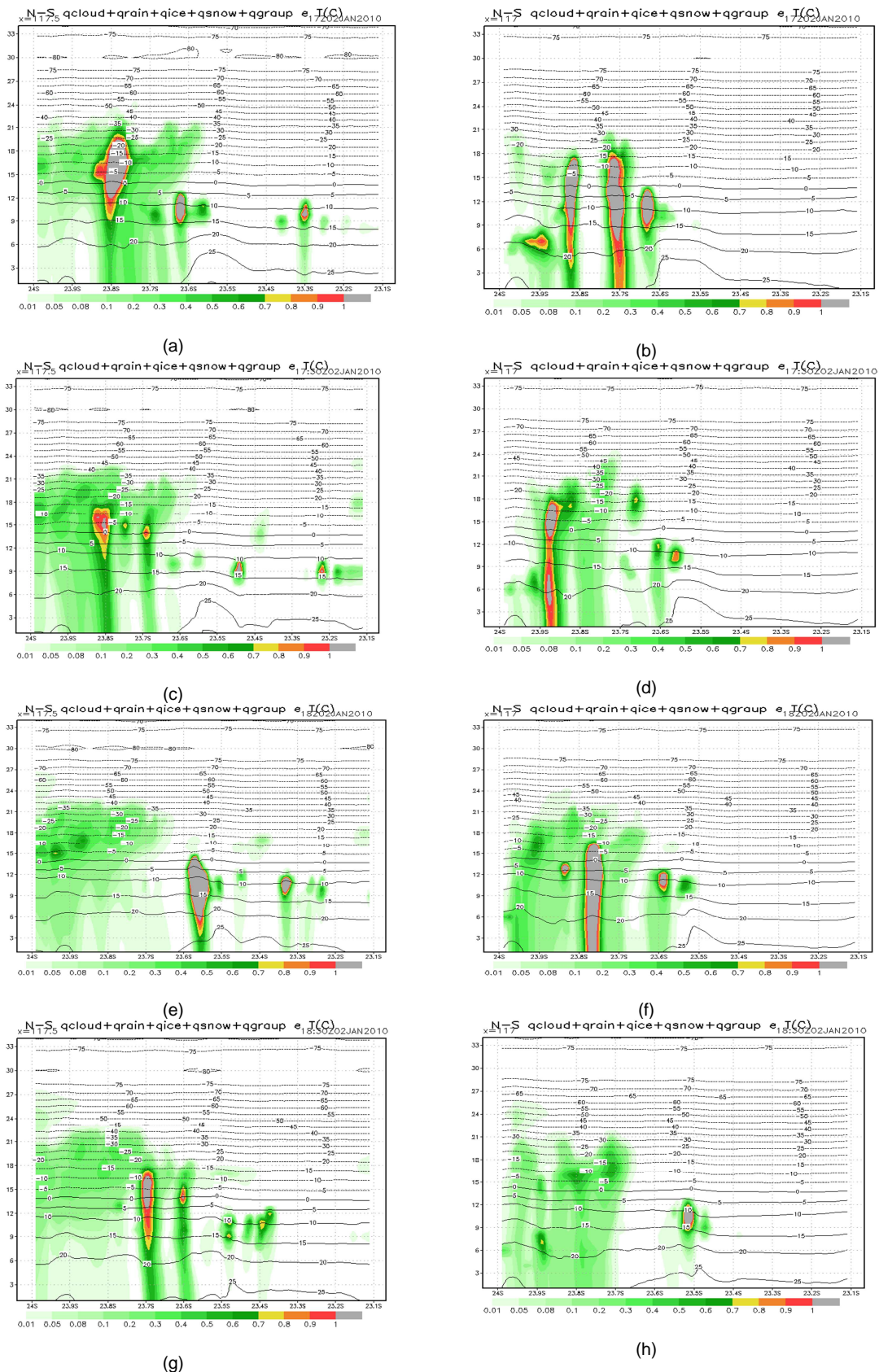


Figura 36. Corte vertical da atmosfera na direção Norte-Sul e sobre a RMSF mostrando a comparação da chuva produzida considerando a parametrização de microfísica de nuvens (g/kg) para simulações sem química acoplada (à esquerda) e com química (à direita) para os horários 17Z, 17:30Z, 18Z, 18:30Z, 19:30Z, 20Z, 20:30Z.

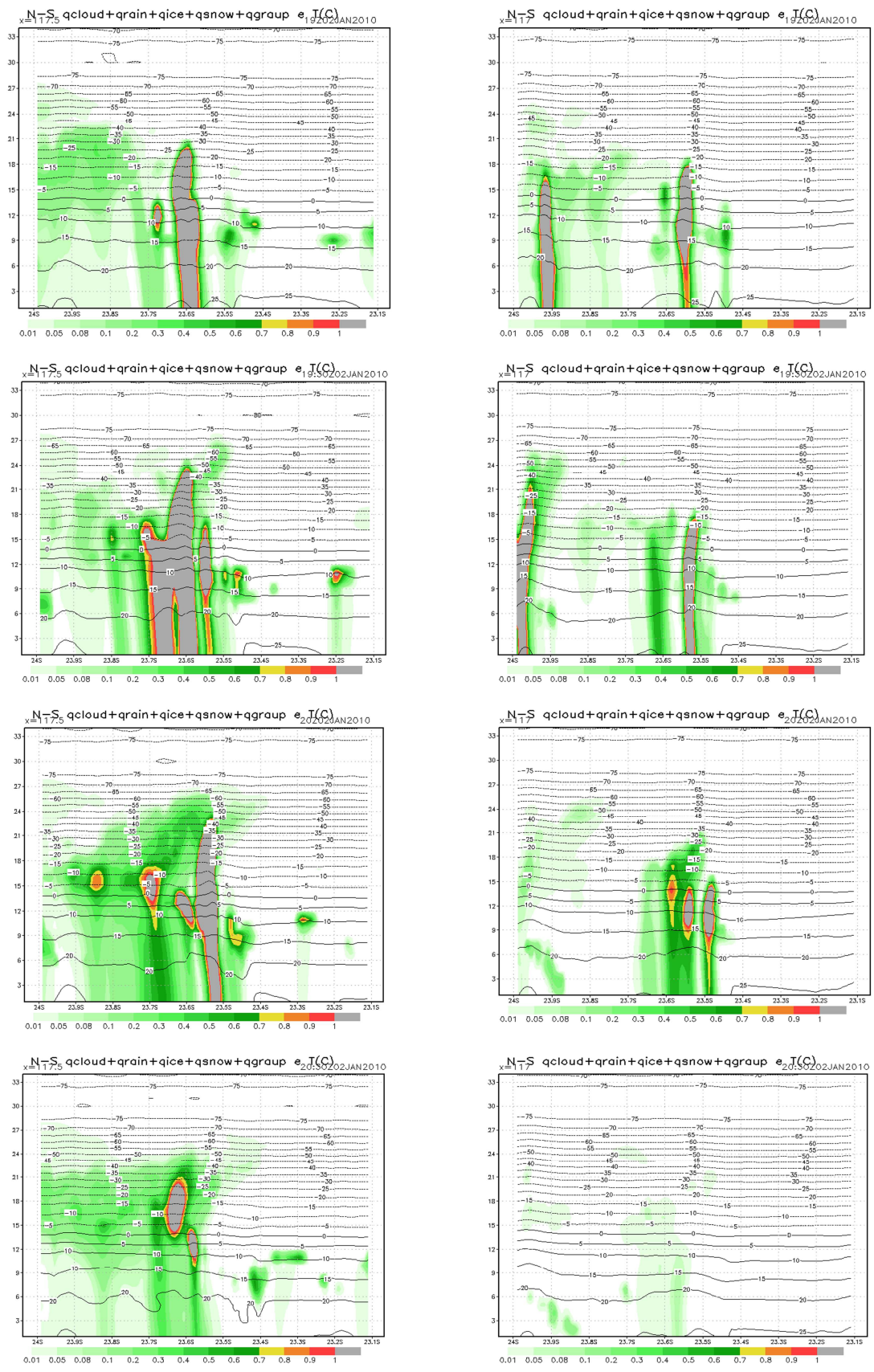


Figura 36. Continuação.

#### 4.3.5 Comparações entre resultados de simulações com ambiente limpo e poluído

Dentro dos objetivos da tese está a análise e discussão sobre a influência das elevadas concentrações de partículas sobre o total de chuva acumulada na superfície. Utilizando o modelo numérico WRF/Chem foi possível realizar alguns testes de sensibilidade para a chuva calculada pelo modelo em função de variações nas concentrações de partículas. Utilizou-se o inventário de emissões atualmente em uso pelo grupo LAPAt e uma versão “poluída” do mesmo, esta modificação para a situação poluída foi aplicada apenas ao material particulado e consistiu de uma multiplicação por 10 nas emissões primárias de material particulado.

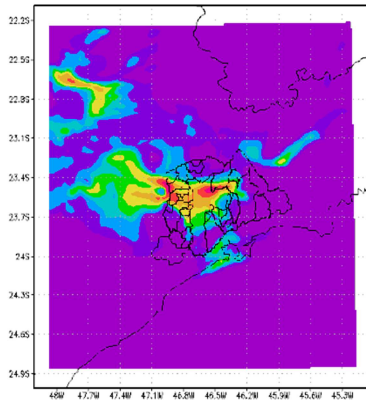
Abaixo são apresentados resultados para simulações com uma grade de 3 km de espaçamento de grade com 100 x 100 x 35 pontos para o dia 02 de janeiro de 2010. O modelo de aerossóis utilizado foi o MADE/SORGAM (Ackermann et al., 1998), que está acoplado com o esquema de microfísica de nuvens de Lin et al. (1983), sendo que esta escolha de processamento com os aerossóis acoplados com a microfísica foi utilizada em todas as simulações com química aqui apresentadas. As parametrizações físicas utilizadas são as mesmas anteriormente descritas na Tabela 3. Ressalta-se que para a simulação com a grade de 3 km de espaçamento a parametrização de cúmulos (Grell G3) estava ligada e, ainda, para as simulações com a química utilizou-se a opção de acoplamento do módulo de aerossóis com o esquema de microfísica de nuvens (opção de química 11 no *namelist.input* do WRFV3.1.1). Para as simulações aqui apresentadas os efeitos radiativos dos aerossóis (efeito direto e indireto) estavam ligados.

Na Figura 37 apresentam-se os resultados das comparações entre simulações com ambiente limpo (à esquerda da figura) e poluído (à direita) para o  $PM_{2.5}$  (parte superior) e chuva total acumulada (parte inferior) respectivamente e para os dias 01 e 02 de janeiro de 2010. Percebe-se claramente que as concentrações de  $PM_{2.5}$  para a simulação de ambiente limpo chegam a um máximo de  $16 \mu g/m^3$  sobre a RMSP, enquanto que as concentrações para o ambiente poluído chegam a um máximo de  $80 \mu g/m^3$ . É

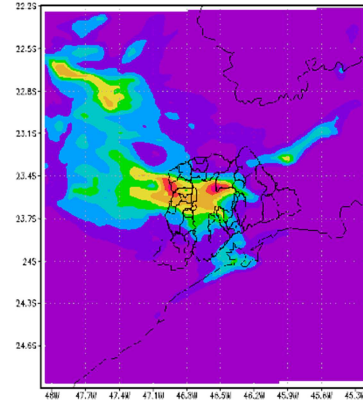
interessante observar que apesar das emissões primárias de material particulado estarem multiplicadas por 10, as concentrações finais máximas estão cerca de cinco vezes maiores no ambiente poluído. Uma possível explicação para esse resultado é que boa parte das partículas simuladas pelo modelo são geradas por processos secundários, cujas emissões gasosas são as mesmas para as duas situações.

Na Figura 37 podem-se observar as diferenças nas quantidades de chuva total acumulada (produzida pela parametrização de cúmulos e microfísica) durante o período de simulação, dia 01 e 02/01/2010, para os ambientes limpo e poluído. Observa-se que há uma grande quantidade de chuva produzida pelo modelo na região da serra do mar, região esta com uma topografia bastante irregular e com índices pluviométricos bastante elevados, e chegando a valores totais acumulados de 140 mm de chuva para a simulação com ambiente limpo e 130 mm para a simulação com o ambiente poluído. Observa-se ainda que sobre a RMSP houve uma diferença na chuva total acumulada, sendo que na simulação com o ambiente limpo os máximos de chuva acumulada (entre 40 e 50 mm) estão mais distribuídos (espalhados) sobre a RMSP e os máximos de chuva acumulada (também entre 40 e 50 mm) para o ambiente poluído estão mais concentrados (em uma região contínua) sobre a RMSP.

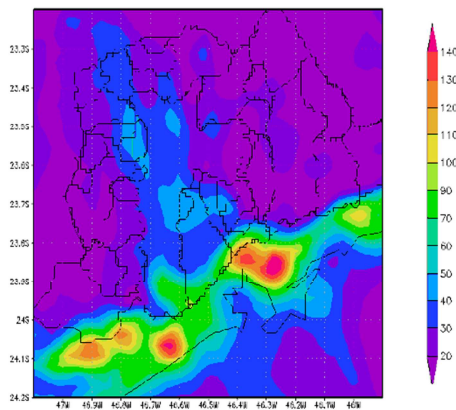




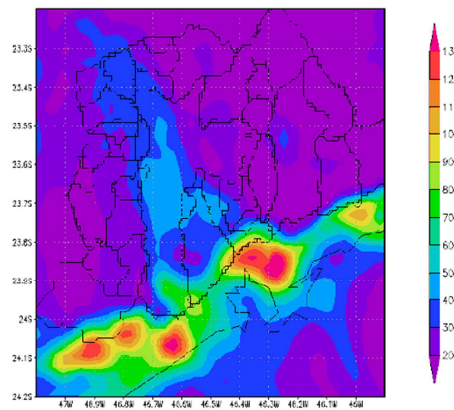
(a)  $PM_{2.5}$  (em  $\mu g/m^3$ ) para ambiente limpo



(b)  $PM_{2.5}$  (em  $\mu g/m^3$ ) para ambiente poluído



(c) Chuva total acumulada (mm)



(d) Chuva total acumulada (mm)

Para o ambiente limpo

Para o ambiente poluído

Figura 37. Resultados das comparações entre simulações com ambiente limpo (esquerda) e poluído (direita),  $PM_{2.5}$  (a e b) e chuva total acumulada (c e d) respectivamente e para os dias 01 e 02 de janeiro de 2010.

A Figura 38 apresenta a chuva resolvida pelo esquema de microfísica de nuvens (em mm) para as simulações com ambiente limpo (parte a) e poluído (parte b) e simulação sem química (parte c) acumulada às 23Z de 02 de janeiro de 2010. Observa-se que os máximos de precipitação acumulados para a parametrização de microfísica estão entre 20 e 30 mm para as simulações com a química acoplada e sobre a RMSF, já para a simulação sem química os máximos acumulados estão entre 30 e 35 mm sobre a RMSF. Percebe-se um padrão relativamente semelhante para a precipitação acumulada sobre a RMSF e produzida pelas simulações com química, sendo que quando o

ambiente é limpo existem regiões de maiores valores acumulados (região oeste e sul) se comparados com a simulação mais poluída. Também se pode observar que sobre a Serra do Mar existe uma região onde a chuva acumulada é maior na simulação com o ambiente limpo e chegando a variar entre 30 e 35 mm. Essas diferenças na chuva total acumulada estão diretamente ligadas às diferenças de concentrações de partículas em cada situação (limpo e poluído). As parametrizações físicas e químicas são exatamente as mesmas nas duas simulações, diferenciando-se apenas as concentrações de partículas nas mesmas. As diferentes concentrações de partículas levam a uma diferença nas concentrações de NCN e conseqüentemente na chuva total calculada pela parametrização.

Outro fator importante é a mudança na interação com a radiação provocada pelas altas concentrações de partículas, quanto maiores às concentrações de partículas na coluna atmosférica maior será sua interação com a radiação incidente, podendo causar uma diferença de temperatura na superfície e essa diferença de temperatura ser responsável pelo deslocamento de uma determinada célula de convecção e até mesmo influenciar a intensidade do desenvolvimento da célula. Ainda analisando a Figura 38, pode-se observar que a simulação sem química possui um padrão de máximos de chuva acumulados bem diferente das simulações com a química, produzindo um grande acúmulo de chuva na região mais ao norte da RMSP e chegando aos 35 mm de chuva acumulada para o dia 02/01/2010.

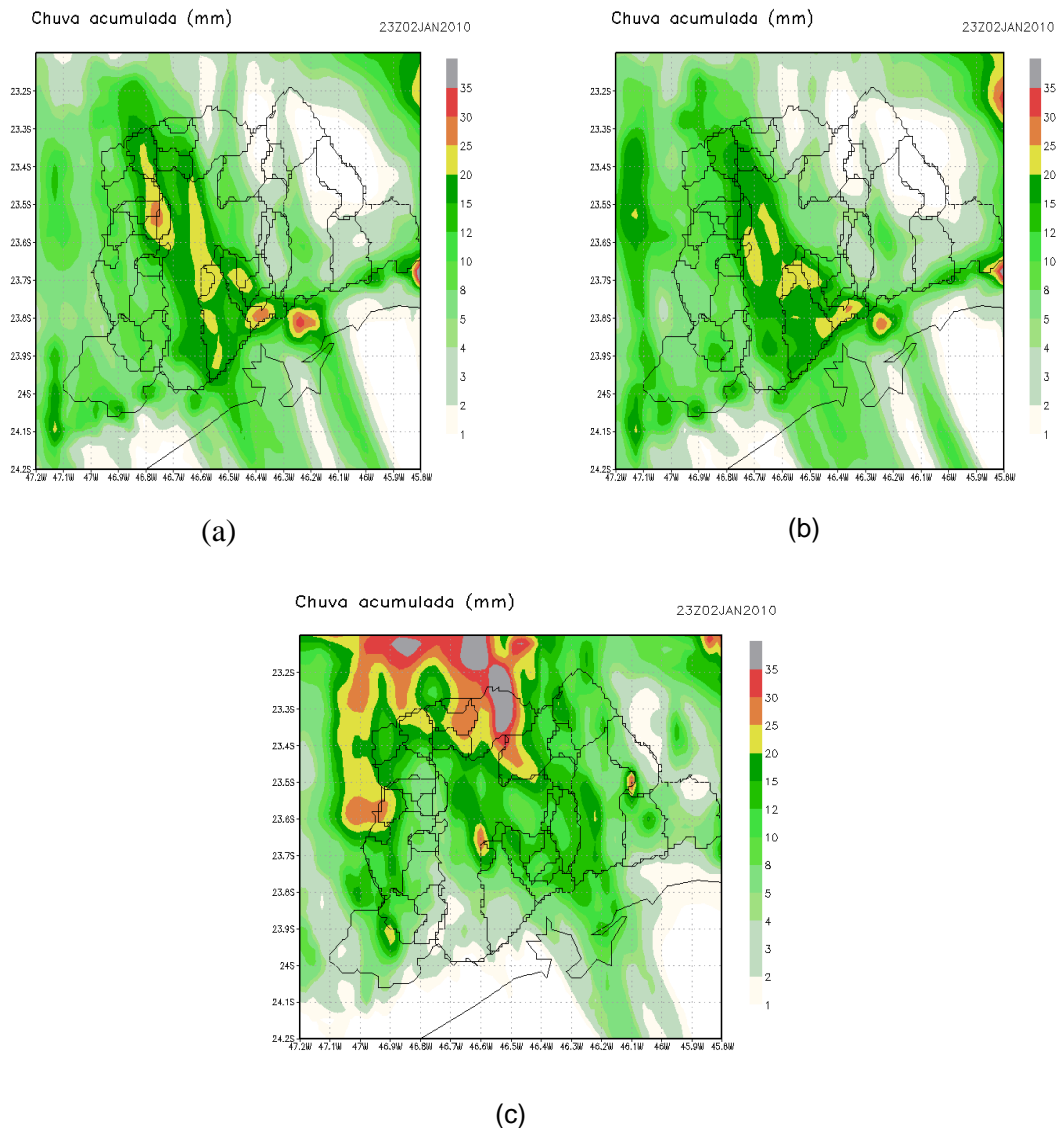
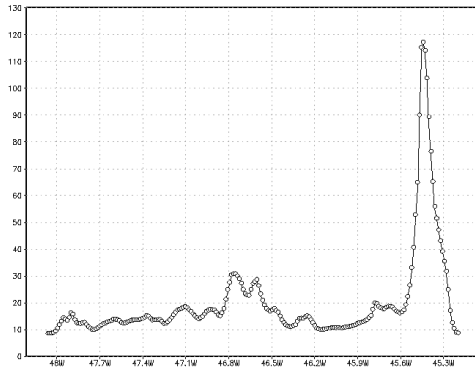


Figura 38. Chuva resolvida pelo esquema de microfísica de nuvens (em mm) para as simulações com ambiente limpo (figura a) e poluído (figura b) e simulação sem química (figura c) acumulada as 23Z de 02 de janeiro de 2010.

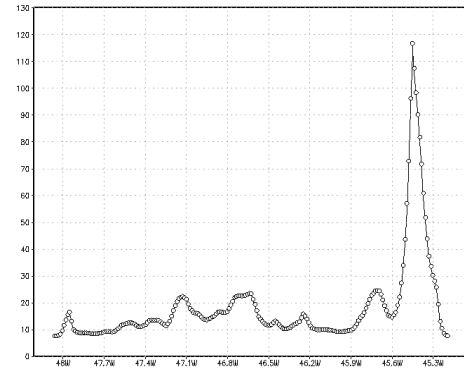
Na Figura 39 observa-se a chuva total calculada pelo modelo considerando a microfísica de nuvens e acumulada durante todo o período de simulação (01 e 02 de janeiro de 2010) apresentada para simulações com química (limpo e poluído) e sem química passando pelo centro da grade e nas direções Leste-Oeste e Norte-Sul. Na direção Leste-Oeste e passando sobre o centro da RMSP (Lat -23.55) percebe-se claramente nas figuras os elevados valores de chuva acumulada na região da Serra do Mar ultrapassando os 110 mm (acumulado nos dois dias simulados). Para a área da RMSP (entre 47.1 e 46.2W) observa-se claramente uma maior acumulação de chuva na simulação com o ambiente limpo (ultrapassando os 30 mm) se comparado com o

ambiente poluído (chegando aos 24 mm), também sendo possível se observar diferença na chuva acumulada em toda a extensão Leste-Oeste.

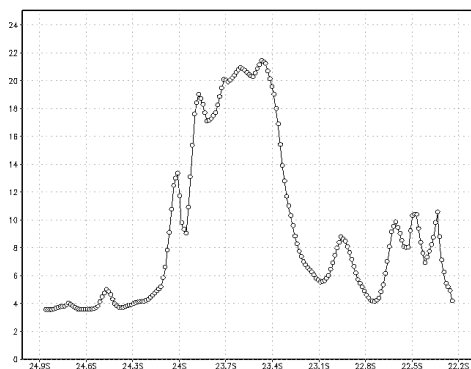
Analisando a chuva acumulada na direção Norte-Sul e sobre o centro da RMSP (Lon -46.64), observa-se claramente que a maior quantidade de chuva acumulada nesta direção está concentrada sobre a RMSP, principalmente com para as simulações com a química acoplada. Este resultado indica que o modelo foi capaz de simular o efeito que a área urbana, com suas emissões mais elevadas, produz sobre a formação de precipitação, o que foi também observado através do radar MXPOL para o mesmo período. Observa-se ainda que para as simulações com a química acoplada a quantidade de chuva acumulada máxima (pico máximo) para o ambiente limpo é um pouco menor do que para o ambiente poluído, mas quando analisa-se a extensão da chuva percebe-se que na simulação com o ambiente limpo esta cobre uma extensão maior da área da RMSP com chuvas acumuladas no período, gerando uma maior quantidade de chuva sobre a área da RMSP. Para a simulação sem a química, e para a direção Leste-Oeste o total de chuva calculado com a microfísica e acumulado durante o período está mais próximo da simulação com química em ambiente limpo. Já para a direção Norte-Sul a chuva acumulada na região mais ao norte é bem superior do que a calculada pelas simulações com química, e chegando aos 44 mm na latitude próxima de -23.1.



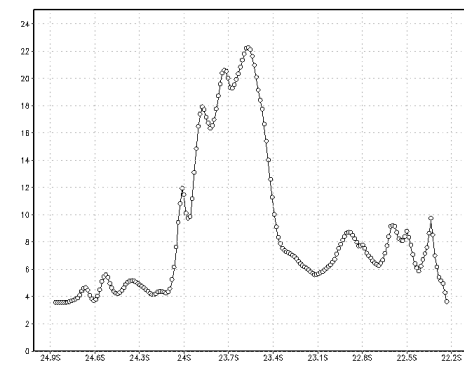
(a) Chuva microfísica (mm) W-E  
Ambiente limpo



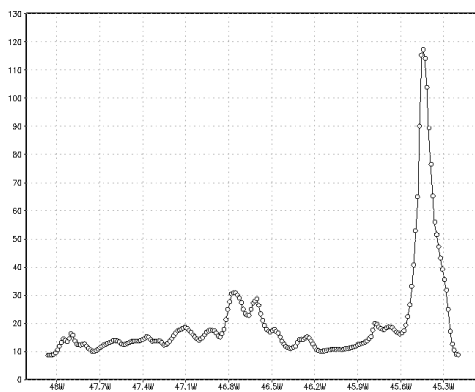
(b) Chuva microfísica (mm) W-E  
Ambiente poluído



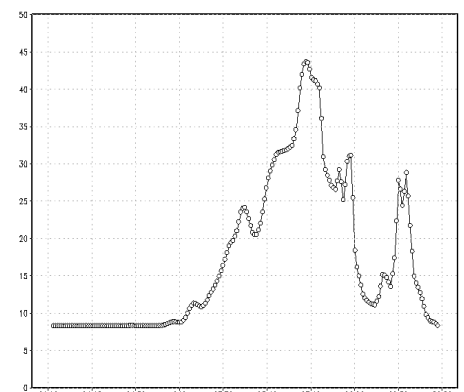
(c) Chuva microfísica (mm) N-S  
Ambiente limpo



(d) Chuva microfísica (mm) N-S  
Ambiente poluído



(e) Chuva microfísica (mm) W-E  
Sem química



(f) Chuva microfísica (mm) N-S  
Sem química

Figura 39. Chuva total calculada pela microfísica de nuvens e acumulada durante todo o período de simulação (01 e 02 de janeiro de 2010) apresentada para simulações com química (limpo e poluído) e sem química para o centro da grade e nas direções Leste-Oeste e Norte-Sul.

Na Figura 40 apresenta-se uma comparação entre a chuva observada na estação do IAG no bairro da Água Funda (à esquerda) e na estação do INMET em Santana (à direita) com a chuva simulada pelo modelo WRF/chem

para as condições de ambiente limpo e poluído no dia 02 de janeiro de 2010. Pode-se observar que para a estação do IAG a comparação da chuva simulada pelo modelo com a observação está relativamente coerente temporalmente e menos coerente em magnitude: a chuva observada acumulada durante todo o dia 02 de janeiro na estação do IAG atingiu os 52 mm, e o modelo subestimou a chuva no ponto da estação, calculando um valor acumulado de 37 mm. Uma observação interessante para este ponto é que a chuva acumulada para as duas simulações com a química acoplada (com ambiente limpo e poluído) foi praticamente a mesma, situação bem diferente para a estação do INMET em Santana.

A chuva acumulada medida durante o dia 02 de janeiro na estação do INMET em Santana foi de 36 mm. A simulação da chuva acumulada com a química em ambiente limpo foi bem representativa do ponto de vista de magnitude, simulando os mesmos 36 mm de chuva para o ponto, já para a análise da fase, ou seja, para a representação horária da chuva o modelo antecipa a formação da precipitação em duas horas e mantém taxas de chuva menores nos horários seguintes. Uma observação clara é a diminuição na quantidade de chuva simulada pelo modelo na situação de ambiente poluído, retornando um total acumulado de 22 mm para o ponto da estação do INMET em Santana.

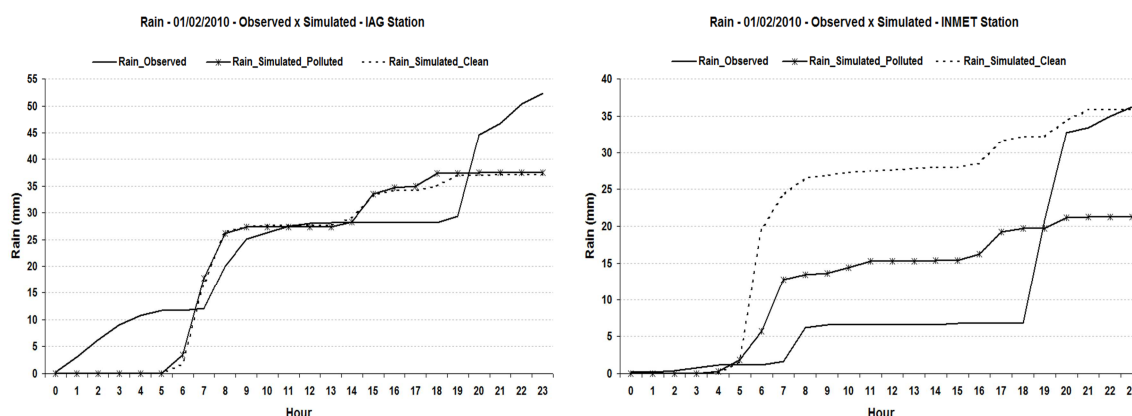


Figura 40. Comparação da chuva observada na estação do IAG no bairro da Água Funda (à esquerda) e na estação do INMET em Santana (à direita) com a chuva simulada pelo modelo WRF/chem para as condições de ambiente limpo e poluído no dia 02 de janeiro de 2010.

#### **4.3.6 Comparações entre resultados de simulações com o modelo WRF/Chem com o uso de dados topográficos de alta resolução**

Com o objetivo de tentar melhorar a representação da formação de nuvens devido aos efeitos topográficos nas simulações com o WRF/Chem sobre a RMSP, foram inseridos no modelo os dados topográficos do *Shuttle Radar Topography Mission* – SRTM (Farr et al., 2007), com uma resolução espacial de 3" de arco, ou ~90 m (a topografia anteriormente utilizada era oriunda do USGS e possuía resolução de 30" de arco, ou ~900 m). A idéia principal foi investigar o impacto na formação de nuvens sobre a RMSP o modelo teria com a mudança no arquivo de topografia utilizado, e quais as possíveis alterações nas outras variáveis atmosféricas.

Na Figura 41 pode-se observar o relevo gerado com dados do SRTM para área da RMSP e regiões vizinhas (a RMSP encontra-se na área central das figuras).



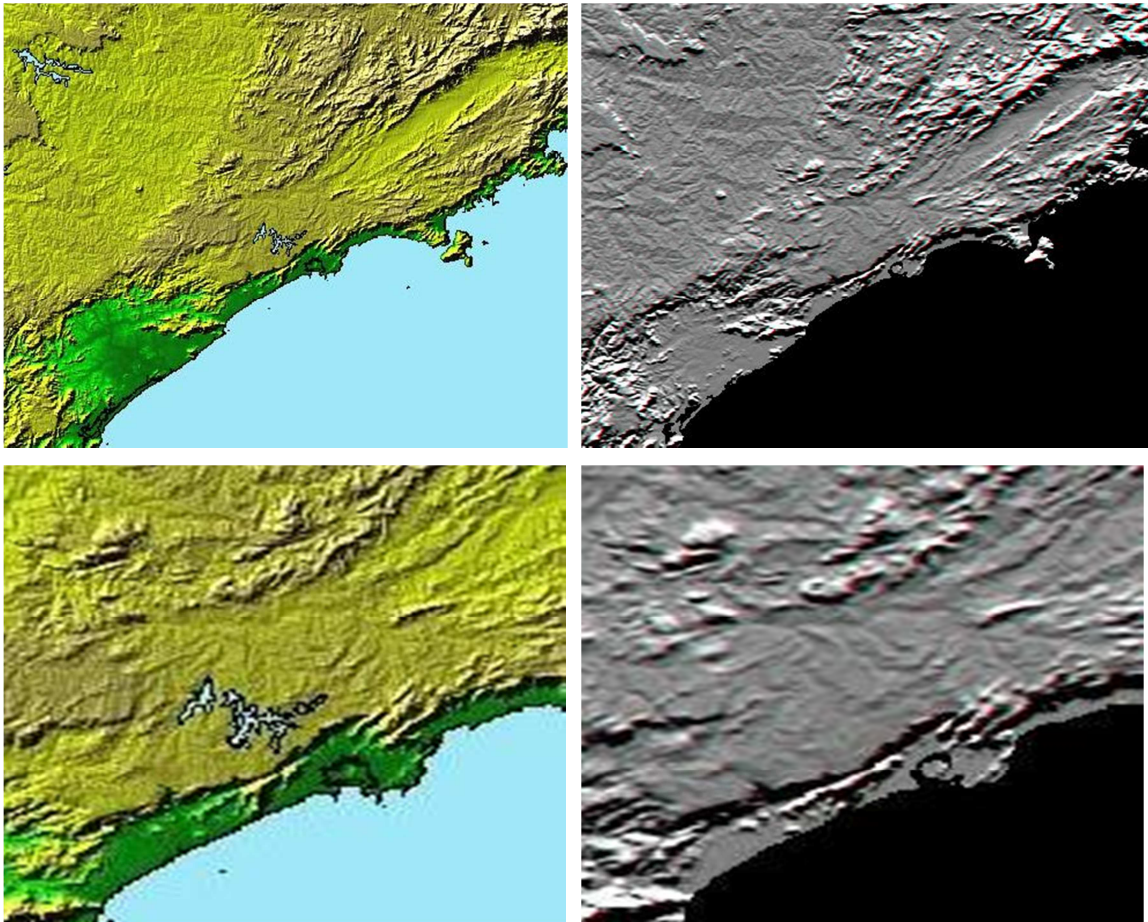


Figura 41. Imagens de topografia geradas com dados do SRTM para área da RMSP e regiões vizinhas (a RMSP encontra-se na área central das figuras).

Na Figura 42 pode-se observar uma comparação da topografia (elevação em metros) utilizada no modelo WRF/Chem com dados do USGS (esquerda) e com dados do SRTM (direita) representando a área da RMSP no centro das imagens. Esses arquivos de topografia são gerados pelo programa `geogrid.exe`, que faz parte do pré-processamento dos arquivos (WPS) que gera as condições iniciais e de fronteiras para a inicialização do modelo. Percebe-se pelas imagens que existe um detalhamento muito maior do relevo sobre a RMSP com os dados do SRTM, sendo possível perceber os cursos dos principais rios que cruzam a região.



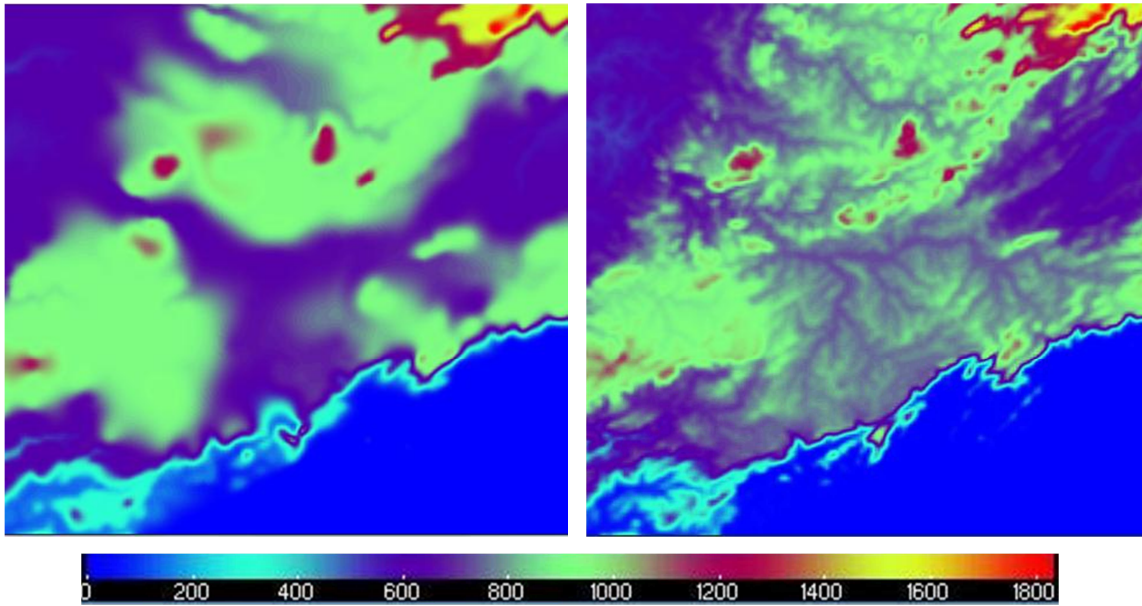


Figura 42. Topografia (elevação em metros) utilizada no modelo WRF/Chem com dados do USGS (à esquerda) e com dados do SRTM (à direita) representando a área da RMSP no centro das figuras.

A Figura 43 apresenta comparações entre os valores de temperatura e umidade relativa medidos nas estações do IAG (Água Funda) e INMET (Santana) e simulados com o WRF para o intervalo das 16 às 24Z de 02/01/10 para três diferentes configurações. Nas legendas das figuras o “WRF\_t14” refere-se a simulação sem química acoplada, o “WRF\_t19” refere-se a simulação com química utilizando dados topográficos do USGS, e “WRF\_t21” a simulação com química e utilizando topografia do SRTM. Observa-se que para a estação do IAG os resultados simulados para temperatura e umidade com a topografia do SRTM estão bem próximos dos valores observados, já para a estação do INMET verifica-se que os resultados para a simulação com o SRTM estão mais distantes das observações, relativamente às outras simulações.

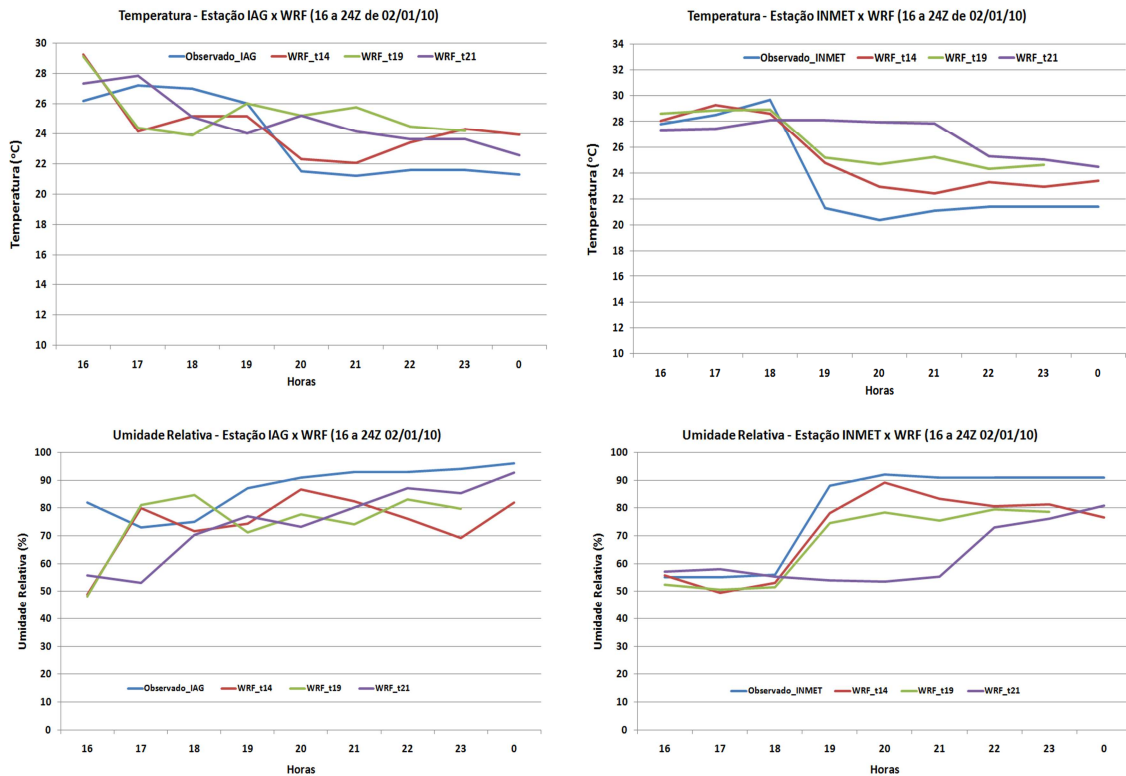


Figura 43. Comparações entre os valores de temperatura e umidade relativa medidos nas estações do IAG (Água Funda) e INMET (Santana) e simulados com o WRF para o intervalo das 16 às 24Z de 02/01/10.

Na Figura 44 é apresentada a diferença (em metros) da topografia utilizada nas simulações com dados do SRTM e com dados do USGS (SRTM-USGS), e diferença (em °C) da temperatura média de 24 horas no primeiro nível do modelo simulada considerando as duas topografias (SRTM-USGS). Pode-se observar que existem variações nos dois arquivos de topografia que chegam a aproximadamente 300 a 400 metros, sendo que para a região central da capital paulista observam-se valores entre 100 e 150 metros mais elevados para os dados com o SRTM. Com relação às diferenças na temperatura, observa-se que quanto mais elevada à topografia, mais baixa é a média da temperatura simulada, sendo observadas temperaturas mais frias na região central da capital com dados do SRTM.

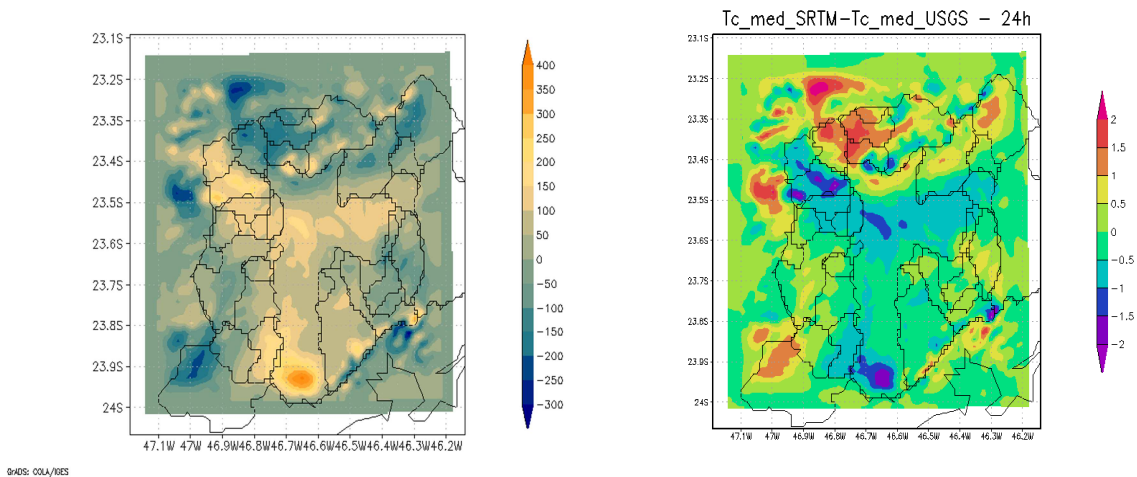


Figura 44. Diferença (em metros) da topografia utilizada nas simulações com dados do SRTM menos topografia com dados do USGS (esquerda), e diferença (em °C) da temperatura média de 24h (direita) entre as duas simulações (SRTM-USGS).

Na Figura 45 podem-se observar as diferenças na umidade relativa (em %, à esquerda) e diferenças na chuva total acumulada (em mm, à direita) para simulações com dados do SRTM e USGS (SRTM-USGS). Percebe-se que as diferenças na umidade relativa são muito pequenas, ficando um pouco mais úmida a região central da capital quando se considera os dados topográficos do SRTM comparativamente à simulação utilizando dados do USGS. Já para a chuva acumulada, observam-se maiores diferenças nos valores acumulados em regiões onde há maiores diferenças na topografia.

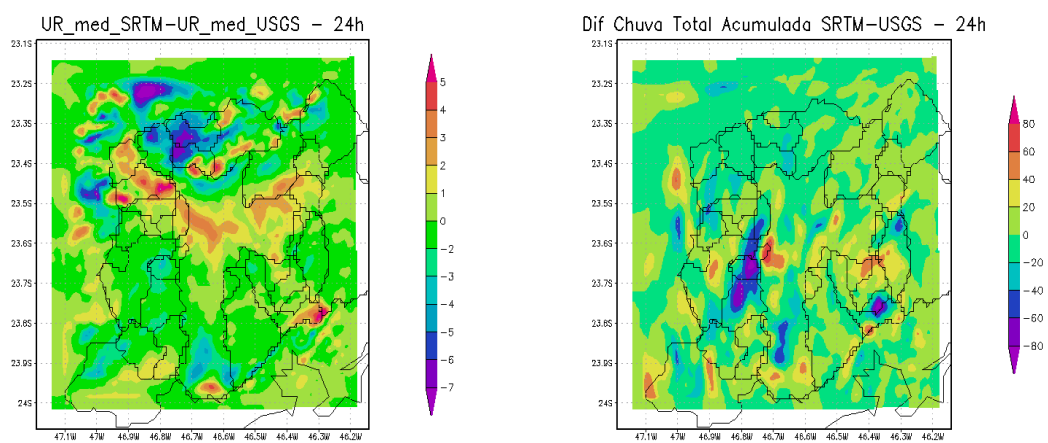


Figura 45. Diferenças na umidade relativa (em %, à esquerda) e chuva total acumulada (em mm, à direita) para simulações com dados do SRTM e USGS (SRTM-USGS).

Como síntese a Figura 46 apresenta a comparação entre resultados para simulações com as mesmas parametrizações físicas e químicas (Tabela 3), mesma topografia (SRTM), mesma dimensão de grade e mesmas condições iniciais e de fronteiras para diferentes horários. A única diferença entre as duas simulações é que nos resultados da direita tem-se o efeito de um ambiente poluído. Foi considerada uma emissão de material particulado dez vezes maiores que na simulação com o inventário padrão. As discussões estão focadas na formação de nuvens (variações espaciais e temporais) e seu desenvolvimento vertical (intensidade).

Observa-se que às 17Z há uma célula convectiva na Lon -46.3 em ambas as simulações e que há um maior desenvolvimento vertical na simulação com o ambiente poluído, sendo que este resultado está de acordo com vários trabalhos na literatura especializada onde para ambientes mais poluídos se observa que a chuva se desenvolve a partir de níveis mais altos na atmosfera (Rosenfeld e Woodley, 2000; Khain et al., 2004 ). O mesmo comportamento pode ser observado no horário 18Z e próximo da Lon -46.9 onde ambas as simulações apresentam a célula convectiva cujo desenvolvimento vertical da célula no ambiente poluído foi maior que no ambiente limpo chegando à temperaturas de topo da ordem de  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  contra  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$  no ambiente limpo. Para o mesmo horário, 18Z, e para a Lon -46.4, aparentemente observa-se um comportamento contrário, onde na simulação com o ambiente limpo há uma célula convectiva com desenvolvimento maior, com temperatura de topo chegando a  $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$  contra  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  no ambiente poluído.

Essa mudança na resposta ao desenvolvimento vertical pode também estar relacionada com a topografia da região onde se forma a célula convectiva, pois a longitude -46.4 está situada na zona leste da capital, onde a topografia é mais elevada do que na longitude -46.9. Também se observa que as nuvens mais intensas nas duas simulações tendem a se formar nas mesmas longitudes e nuvens menos intensas (com pequeno desenvolvimento vertical) tendem a se formar mais distribuídas ao longo do domínio, sendo estas variações espaciais entre as nuvens pouco desenvolvidas uma característica interessante nas simulações.

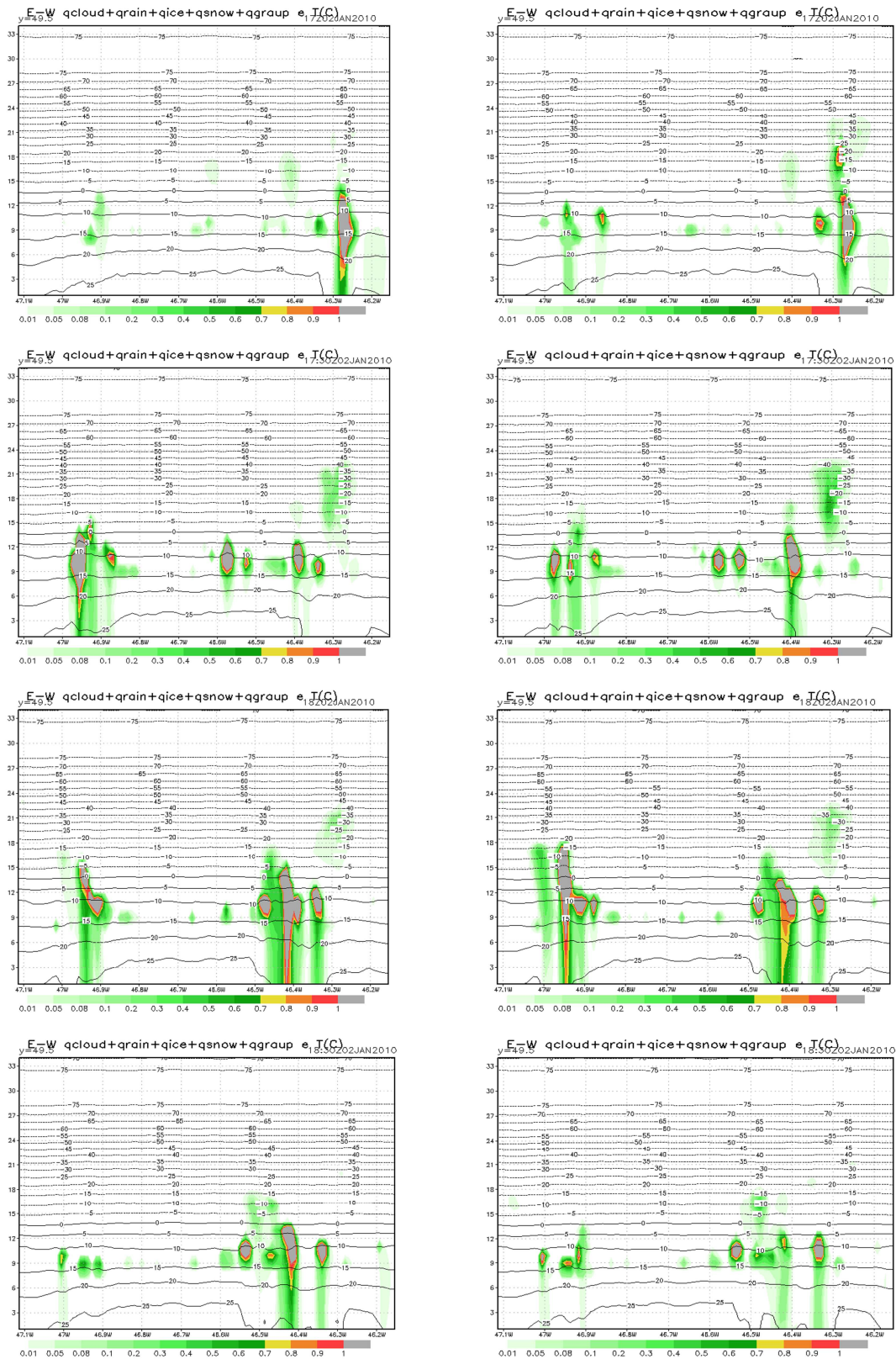


Figura 46. Corte vertical da atmosfera na direção Leste-Oeste e sobre a RMSP mostrando a comparação da chuva produzida pela parametrização de microfísica de nuvens (g/kg) para simulações com química acoplada e utilizando topografia do SRTM para ambiente limpo (à esquerda) e poluído (à direita) para diferentes horários (17Z, 17:30Z, 18Z, 18:30Z, 19Z, 19:30Z, 20Z e 20:30Z).



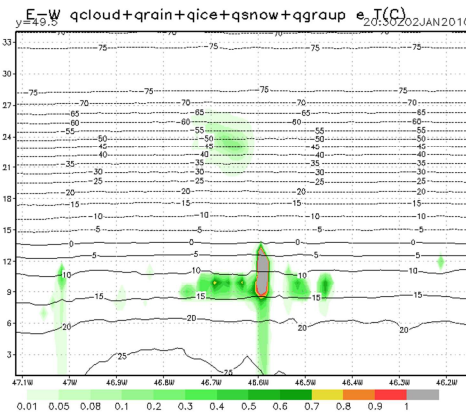
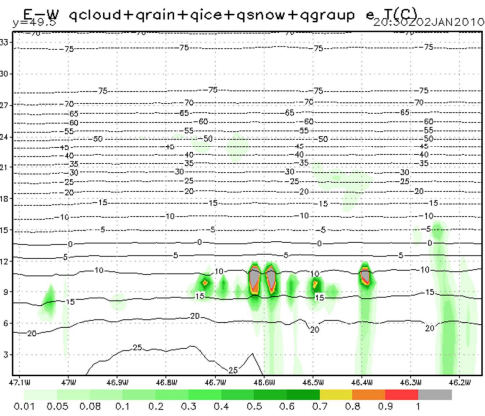
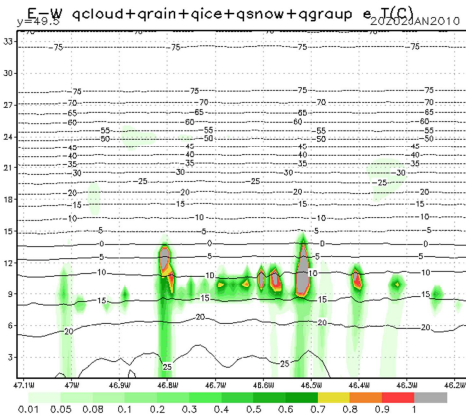
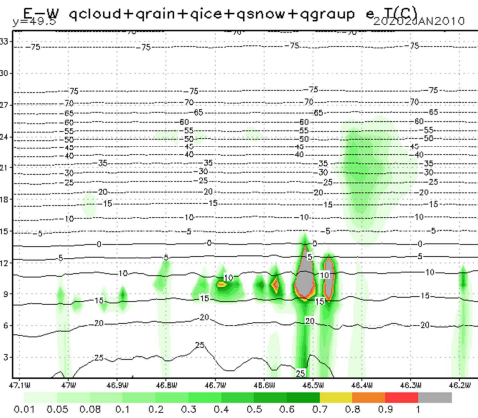
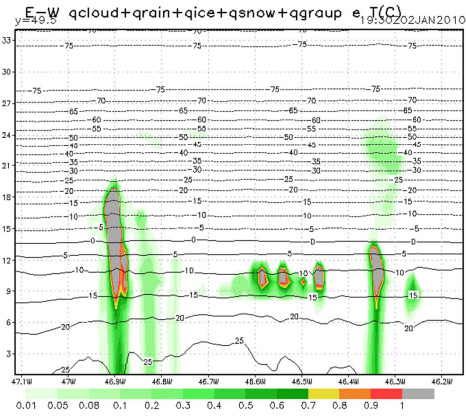
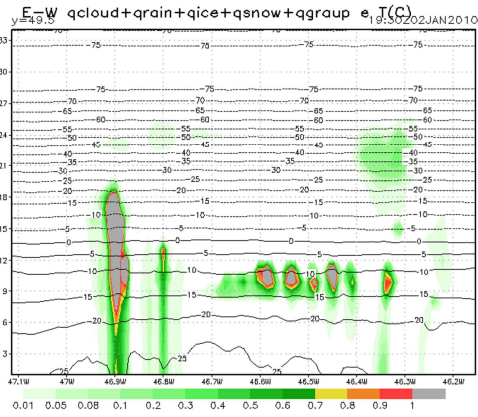
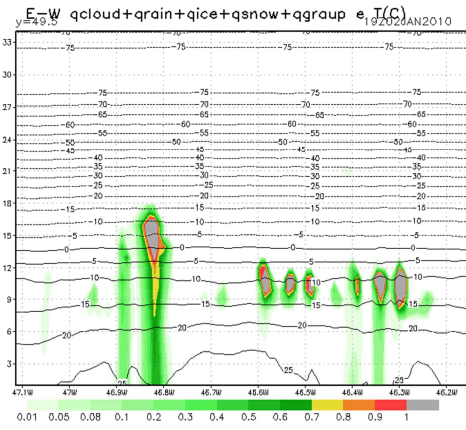
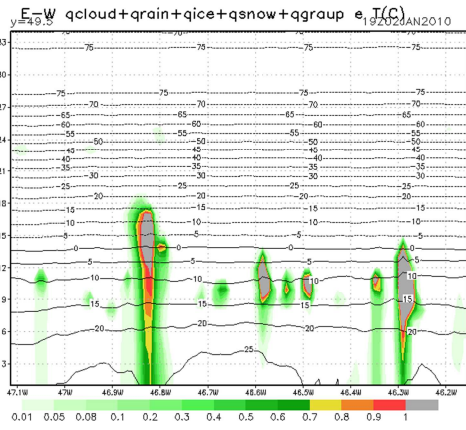


Figura 46. Continuação.

Com a análise dos resultados das comparações entre simulações com dados topográficos do USGS e SRTM, concluiu-se que os arquivos de topografia oriundos do SRTM poderiam ser utilizados para simulações mais específicas, dentro dos objetivos da tese de se investigar as influências das variadas concentrações de partículas na quantidade e distribuição de chuva produzida na RMSP. Na próxima seção são apresentados os resultados dos testes de sensibilidade às variações nas concentrações de partículas.

#### **4.3.7 Resultados dos testes de sensibilidade para as simulações com diferentes concentrações de partículas**

Para se atender aos objetivos da tese foram realizadas simulações com quatro condições diferentes de emissões de  $PM_{2.5}$ : 0,1PM (dez vezes menos emissões – ambiente muito limpo), 1PM (inventário sem alteração – ambiente limpo), 10PM (dez vezes mais emissões de PM – ambiente poluído) e 20PM (vinte vezes mais emissões – ambiente muito poluído). O objetivo destas quatro diferentes simulações foi detalhar melhor qual seria a real influência das concentrações de partículas na chuva total acumulada em 48h de simulação e as possíveis mudanças na distribuição espacial da precipitação.

Na Figura 47, pode-se observar as concentrações de  $PM_{2.5}$  ( $\mu g/m^3$ ) as 19Z do dia 02/01/2010 para as quatro diferentes taxas de emissões: 0,1PM (a), 1PM (b), 10PM (c), e 20PM (d). Fica clara a grande diferença nas concentrações de partículas simuladas com as diferentes taxas de emissões. Para a taxa de emissão 0,1PM pode-se observar concentrações máximas em torno de 10 a 15  $\mu g/m^3$  sobre a RMSP, e para as emissões com 20PM praticamente toda a área da RMSP apresenta concentrações da ordem de 40  $\mu g/m^3$  ou superiores.

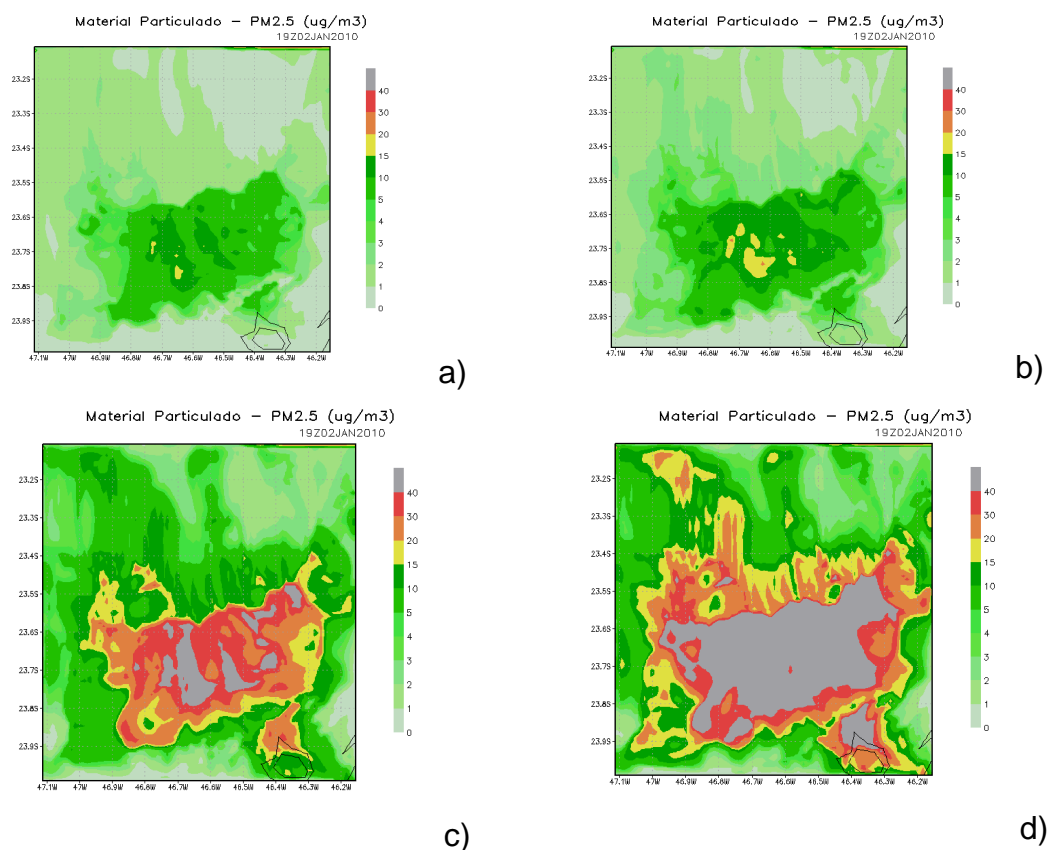


Figura 47. Concentrações de PM<sub>2.5</sub> (µg/m<sup>3</sup>) às 19Z do dia 02/01/2010 para quatro diferentes taxas de emissões: 0,1PM (a), 1PM (b), 10PM (c), e 20PM (d).

Analisando-se as variações nas concentrações em massa de partículas simuladas ao longo do dia 02/01/2010 e comparando as diferentes taxas de emissões para o ponto da estação do INMET (Figura 48), pode-se perceber que a partir das 09Z houve uma grande redução nas concentrações de partículas e permanecendo relativamente baixas até as 20Z do mesmo dia. Essas reduções nas concentrações podem ser explicadas principalmente pelas chuvas que ocorreram durante o dia.



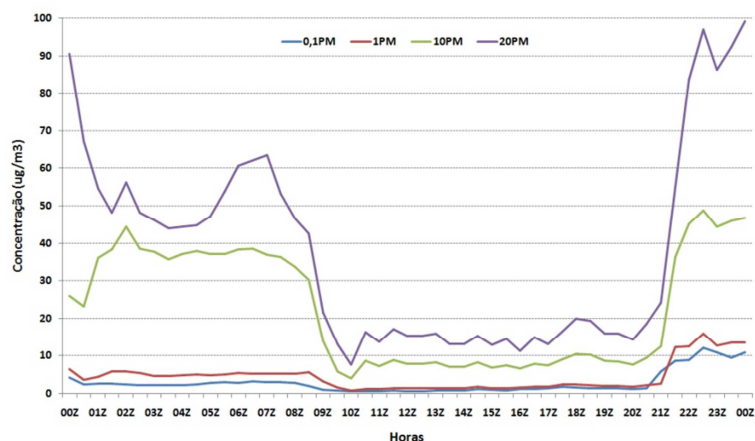


Figura 48. Variação na concentração de PM<sub>2,5</sub> (µg/m<sup>3</sup>) para as quatro diferentes taxas de emissões e durante o dia 02/01/2010 para o ponto correspondente à estação do INMET.

A Figura 49 apresenta os resultados para a chuva total acumulada nas simulações dos dias 01 e 02 de janeiro de 2010 para uma grade com 100 x 100 x 35 pontos e com 1 km de espaçamento de grade (com topografia do SRTM), e para as quatro diferentes condições de emissões de partículas citadas anteriormente (da esquerda para direita e de cima para baixo: simulações com alterações nas emissões de 0,1PM, 1PM, 10PM, e 20PM). Como a escala de cores das imagens é a mesma fica claro perceber uma alteração na quantidade de chuva total simulada pelas quatro condições, principalmente no centro da RMSP. Observa-se que quanto mais poluído o ambiente menos chuva é acumulada no centro da RMSP, sendo observadas áreas em torno da zona leste, da capital, que apresentam comportamento similar.

Observa-se também, que em uma área específica na zona leste da RMSP é acumulada uma quantidade de chuva muito similar em todas as simulações, bem como na região da serra do mar, o que pode ser um indicativo da influência da topografia na formação da chuva e predominância desse processo quando comparado com a concentração de partículas na formação da chuva naquela área.

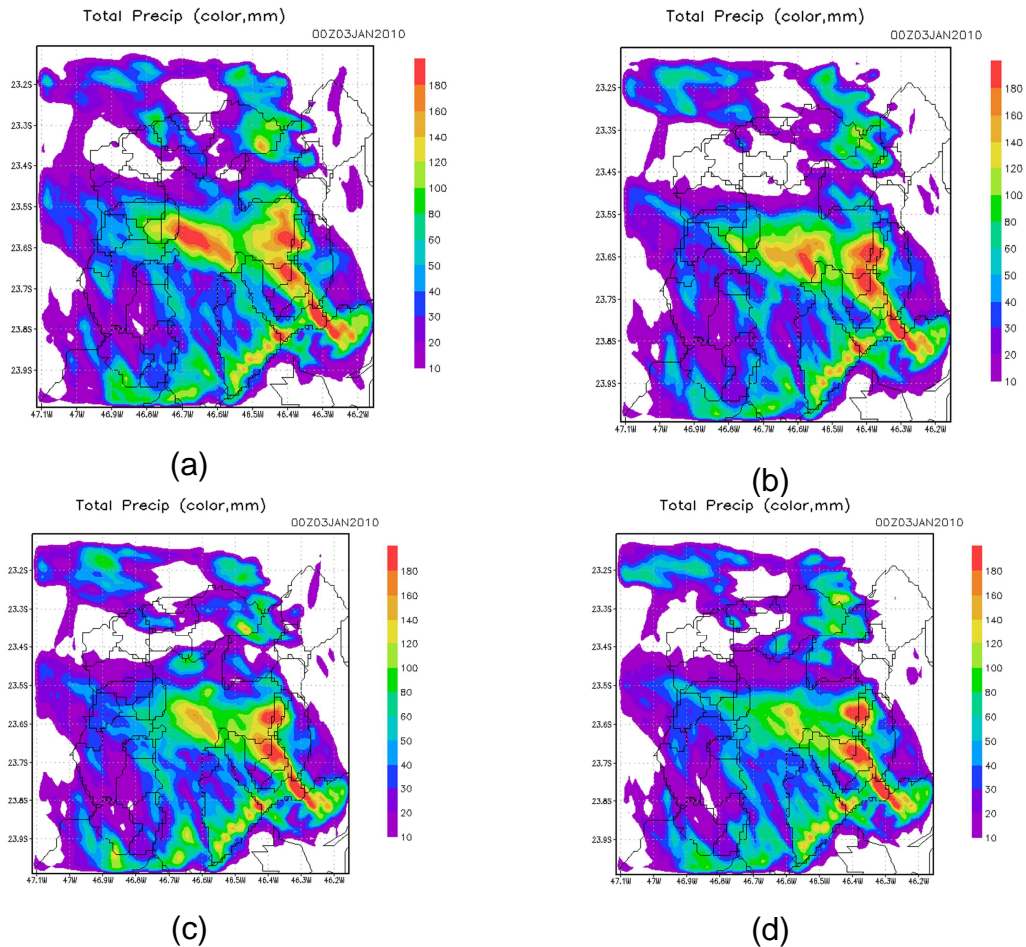


Figura 49. Da esquerda para direita e de cima para baixo: Simulações da precipitação com alterações nas emissões de 0,1PM (a), 1PM (b), 10PM (c), e 20PM (d), (chuva acumulada nos dias 01 e 02/01/2010).

Com o objetivo de investigar as possíveis alterações nas características microfísicas das nuvens formadas sob os diferentes cenários de emissões, foram escolhidos dois pontos distintos da RMSF onde houve diferentes respostas microfísicas às concentrações de partículas. Na Figura 50 pode-se observar o perfil vertical das variáveis microfísicas ( $q_{cloud}$  – água de nuvem,  $q_{ice}$  – gelo de nuvem,  $q_{graup}$  – *graupel*,  $q_{snow}$  – neve, e  $q_{rain}$  – água de chuva) para as quatro diferentes taxas de emissões de partículas às 19Z, e para o ponto: Lat -23.59; Lon -46.77.

As cores das linhas na Figura 50 estão assim representadas: Preto simulação com 0,1PM; Verde 1PM; Amarelo 10PM; e vermelho– 20PM. Pode-se observar que os resultados para água de nuvem ( $q_{cloud}$ ) estão bem coerentes com a teoria discutida anteriormente, onde as altas concentrações de partículas higroscópicas favorecem uma maior concentração de gotículas e

consequentemente uma maior quantidade de água condensada, e sendo confirmado na simulação através da linha vermelha. Para a análise da quantidade de gelo de nuvem ( $q_{ice}$ ), observa-se uma maior quantidade de gelo originada pelas simulações com 1PM e 0,1PM (linha verde e preta), isso pode ser um indicativo do desenvolvimento vertical da nuvem sob os diferentes cenários de emissões. Não houve formação de graupel ( $q_{graup}$ ) para este horário, e a quantidade de neve simulada está de acordo com a quantidade de gelo de nuvem vista anteriormente. Quando se analisa a quantidade de água de chuva simulada ( $q_{rain}$ ), observa-se uma maior quantidade simulada para o cenário 0,1PM, o que concorda com a quantidade de gelo simulada, e indica uma forte atividade convectiva.

Na Figura 51, pode-se observar as mesmas variáveis apresentadas anteriormente, agora para às 19Z, apenas estando invertidas as cores das linhas com relação à figura anterior, ou seja: vermelho 0,1PM; amarelo 1PM; verde 10PM; e preto 20PM. O ponto correspondente ao máximo na Figura 51 se encontra numa posição de topografia mais elevada se comparado ao ponto da figura anterior, isso pode ser um fator determinante nas intensidades de movimentos verticais simulados pelo modelo e consequentemente nas variáveis microfísicas calculadas pelo mesmo.

As quantidades de água de nuvem simuladas para os diferentes cenários são bem próximas, mas se observarmos as quantidades de gelo de nuvem ( $q_{ice}$ ), neve ( $q_{snow}$ ) e *graupel*, fica claro que as simulações com maiores taxas de emissões de partículas também devem ter maiores desenvolvimentos verticais e com fase de gelo ativa. As quantidades de água de chuva ( $q_{rain}$ ), também são maiores para as simulações com 10PM e 20PM. Esses resultados estão de acordo com alguns estudos realizados em outras regiões e evidenciam que o efeito da topografia nos movimentos verticais pode contribuir juntamente com as variadas concentrações de partículas determinando as características microfísicas das nuvens que se formam sobre a RMSP.

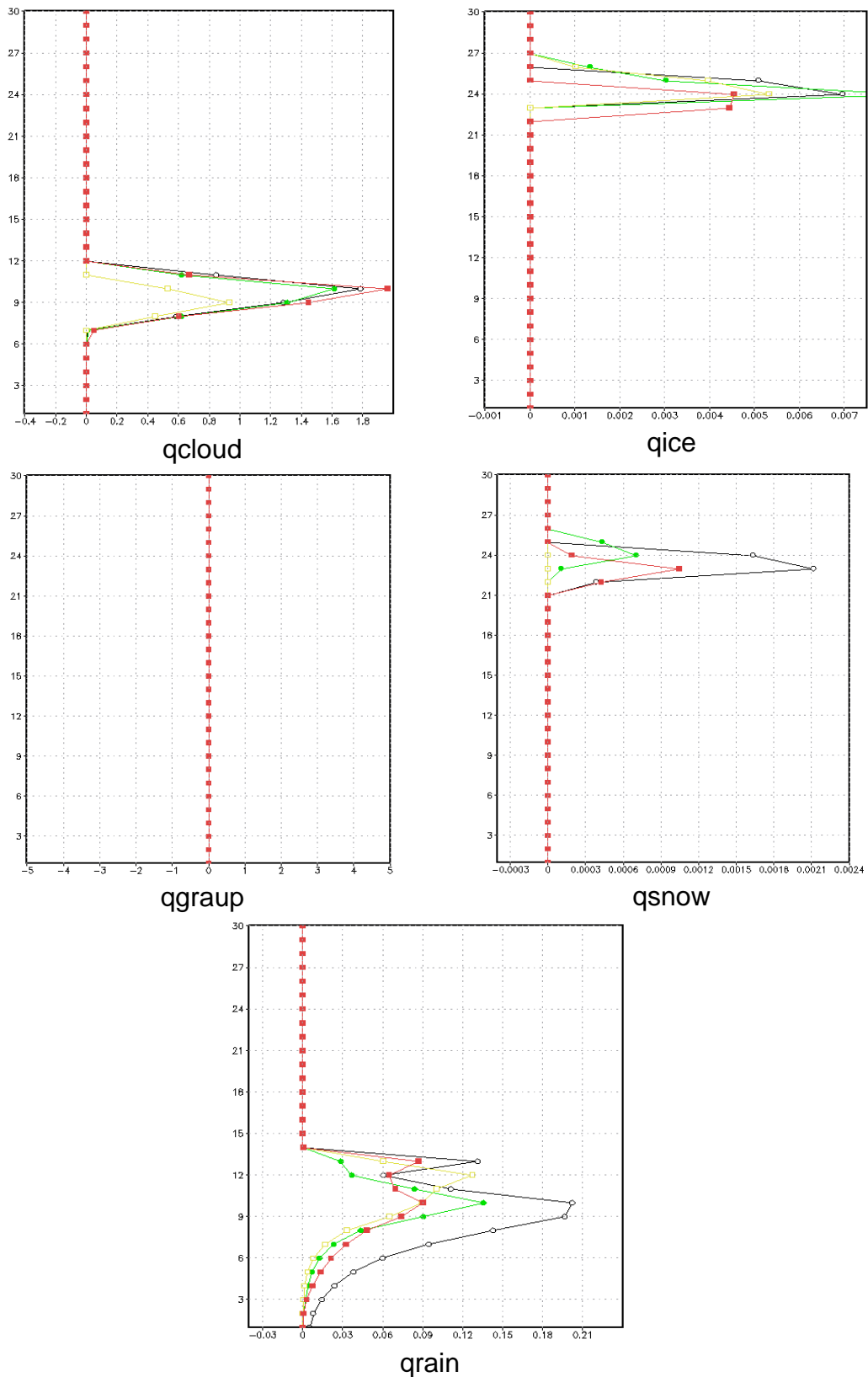


Figura 50. Perfil vertical das variáveis microfísicas para as quatro diferentes taxas de emissões de partículas as 19Z, e para o ponto: Lat -23.59; Lon -46.77.

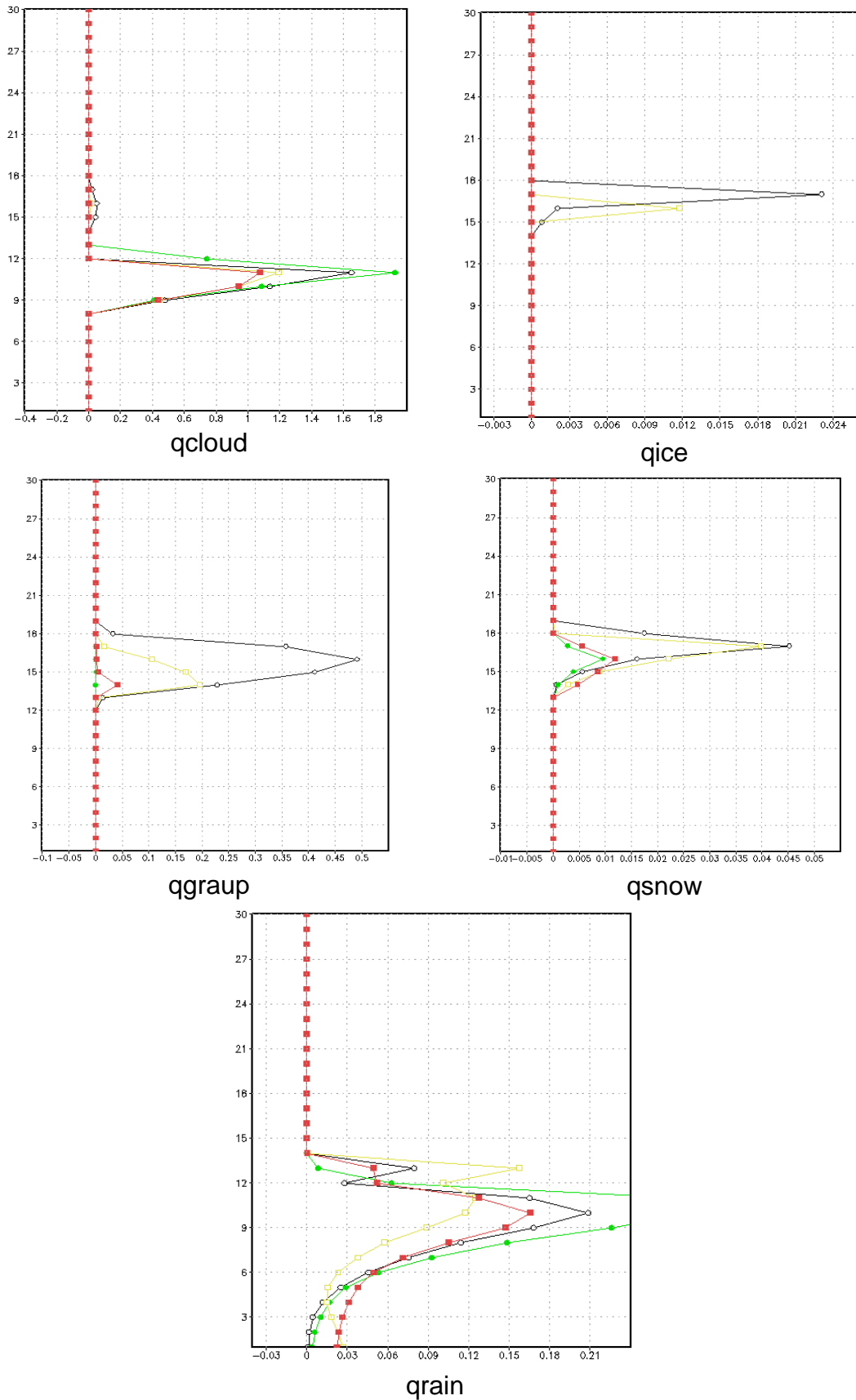


Figura 51. Perfil vertical das variáveis microfísicas para as quatro diferentes taxas de emissões de partículas as 17:30Z, e para o ponto: Lat -23.60; Lon -46.40.

## 5. DISCUSSÕES E CONCLUSÕES

O presente trabalho teve como foco o estudo do impacto dos aerossóis atmosféricos na formação de nuvens e precipitação sobre a RMSP. Foi apresentada uma análise das condições meteorológicas que predominaram no mês de janeiro de 2010 (período analisado na tese). Foi discutida a possível contribuição das elevadas temperaturas da superfície do mar (TSM), observada no Atlântico Sul e principalmente na costa do Sudeste, no aumento de chuvas neste período.

Foram apresentados os resultados para as investigações das relações entre emissões veiculares e concentrações em número de partículas na RMSP. Foi possível afirmar que houve uma boa correlação entre o número de partículas e a fonte veicular, como era de se esperar, principalmente com a quantidade de partículas em torno de 61,5 a 202 nm de diâmetro. Baseado nos resultados da correlação do número de partículas e a fonte veicular e analisando o ciclo diário de concentração em número de partículas foi possível estimar os horários prováveis de maior tráfego veicular na RMSP. Essas informações são de grande importância na determinação e validação de um ciclo diário de emissões de poluentes de origem veicular na RMSP. O estudo também justifica o uso do inventário de emissões utilizado nas simulações com o modelo numérico WRF/Chem.

Uma das etapas do trabalho foi à validação dos resultados das simulações com o WRF/Chem. Os resultados das comparações apresentadas na tese indicam que as configurações utilizadas no modelo WRF/Chem (e listadas na Tabela 3) são adequadas na representação da evolução das variáveis meteorológicas (temperatura, umidade relativa e velocidade do vento) durante os dias 01 e 02/01/2010. Também observou-se uma boa comparação entre as células convectivas simuladas pelo modelo e identificadas nas imagens de radar, principalmente em torno das 18:30Z, onde havia um forte sistema convectivo sobre a zona leste da capital, sendo que, provavelmente o modelo simula este mesmo sistema, na longitude -46.4.

Foram realizadas simulações com emissões de partículas para ambiente limpo e poluído, sendo observada uma maior sensibilidade as variações de partículas na chuva simulada para a estação do INMET no bairro de Santana.

Na estação do IAG na Água Funda a chuva produzida nas duas situações de concentrações de partículas foi praticamente à mesma.

Com o objetivo de investigar uma possível melhora na representação da formação de nuvens devido aos efeitos topográficos nas simulações com o WRF/Chem sobre a RMSP, foram realizadas simulações com dados topográficos do *Shuttle Radar Topography Mission* – SRTM. Foi observado que as variáveis temperatura, umidade relativa (no primeiro nível do modelo), e precipitação são fortemente influenciadas por efeitos da topografia e que as maiores diferenças nestas variáveis são ressaltadas em locais da superfície onde as diferenças entre as topografias (SRTM-USGS) são maiores.

Por fim, foram realizadas simulações em acordo com os objetivos propostos, onde se escolheu quatro condições diferentes de emissões de PM<sub>2,5</sub>: 0,1PM (dez vezes menos emissões – ambiente muito limpo), 1PM (inventário sem alteração – ambiente limpo), 10PM (dez vezes mais emissões de PM – ambiente poluído) e 20PM (vinte vezes mais emissões – ambiente muito poluído). O objetivo destas quatro diferentes simulações foi detalhar melhor qual seria a real influência das variações nas concentrações de partículas na chuva total acumulada em 48h de simulação e perceber claramente as possíveis mudanças na distribuição espacial da precipitação. Ficou evidente a diminuição na chuva total acumulada na área central da RMSP na medida em que se aumentavam as concentrações de partículas, foi observado que para os dias 01 e 02/01/2010 as altas concentrações de partículas contribuíram para a redução na quantidade total de chuva acumulada na RMSP. Também foram feitas análises nas variáveis microfísicas das nuvens formadas sob os diferentes cenários de emissões, foram escolhidos dois pontos distintos da RMSP onde houve diferentes respostas microfísicas às concentrações de partículas. Foi sugerido que a junção dos efeitos microfísicos dos aerossóis com as características topográficas da região podem ter causado as principais diferenças nas variáveis microfísicas analisadas.

## 6. REFERÊNCIAS

Ackermann, I.J., H. Hass, M. Memmesheimer, A. Ebel, F. S. Binkowski, and U. Shankar, 1998: Modal aerosol dynamics model for Europe: Development and first applications. *Atmps. Environ.*, 32, 2981-2999.

ARAKAWA, A.; LAMB, V. R. Computational design of the basic dynamical processes of the UCLA general circulation model.: Academic Press, 1977.

Asmi,A., B. Schell, I. Ackermann, M. Kulmala\* and H. Hass.2002: Ultrafine Aerosol Dynamics Module for Modal Aerosol Dynamic Model for Europe P.M. Midgley, M. Reuther (Eds.). *Proceedings from the EUROTRAC-2 Symposium 2002*. Margraf Verlag, Weikersheim 2002.

*Aitken, J.* 1880: On Dust, Fog and Clouds. – *Nature* **23**: 34-35.

*Aitken, J.* 1881: On Dust, Fogs and Clouds. – *Transactions of the Royal Society of Edinburgh* **30**: 337-368.

Binkowski, F. S. and Shankar, U. (1995): The regional particulate mater model 1. model description and preliminary results. *Journal of Geophysical Research* 100, 26191-26209.

Bringi, V. N., and V. Chandrasekar, 2001: *Polarimetric Doppler Weather Radar: Principles and Applications*. Cambridge University Press, 636 pp.

Boletim Climatológico Anual da Estação Meteorológica do IAG-USP / Seção Técnica do Serviço Meteorológico – Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da USP – v. 12, 2008 – São Paulo : IAG-USP, 2008.

*Coulier, P.J.* 1875: Note sur une nouvelle propriété de l'air. – *Journal de Pharmacie et de Chimie* **22**: 165- 73.

CETESB, 2008. *Relatório de qualidade do ar no Estado de São Paulo 2007*. São Paulo.

CETESB, 2006. *Relatório de qualidade do ar no Estado de São Paulo 2005*. São Paulo.

Chen, S.-H., and W.-Y. Sun, 2002: A one-dimensional time dependent cloud model. *J. Meteor. Soc. Japan*, 80, 99–118.

Chou, M. D., Suarez, M. J., Ho, C. H., Yan, M. M. H., and Lee, K. T.: Parameterizations for Cloud Overlapping and Shortwave Single-Scattering Properties for Use in General Circulation and Cloud Ensemble Models, *J. Clim.*, 11, 202–214, 1998.



Easter, R. C., Ghan, S. J., Zhang, Y., Saylor, R. D., Chapman, E. G., Laulainen, N. S., Abdul-Razzak, H., Leung, L. R., Bian, X., and Zaveri, R. A.: MIRAGE: Model Description and Evaluation of Aerosols and Trace Gases, *J. Geophys. Res.-Atmos.*, 109, D20210, doi:10.1029/2004JD004571, 2004.

E. G. Chapman, W. I. Gustafson Jr., R. C. Easter, J. C. Barnard, S. J. Ghan, M. S. Pekour, and J. D. Fast, 2009: Coupling aerosol-cloud-radiative processes in the WRF-Chem model: Investigating the radiative impact of elevated point sources. *Atmos. Chem. Phys.*, 9, 945–964, 2009

Fast, J. D., Gustafson, Jr., W. I., Easter, R. C., Zaveri, R. A., Barnard, J. C., Chapman, E. G., Grell, G. A., and Peckham, S. E.: Evolution of Ozone, Particulates and Aerosol Direct Radiative Forcing in the Vicinity of Houston Using a Fully Coupled Meteorology-Chemistry-Aerosol Model, *J. Geophys. Res.*, 111, D21305, doi:10.1029/2005JD006721, 2006.

FREITAS, E. D. Circulações locais em São Paulo e sua influência sobre a dispersão de poluentes. São Paulo, 2003. *Tese de Doutorado do Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da Universidade de São Paulo.*

Ghan, S. J. and Easter, R. C.: Impact of Cloud-Borne Aerosol Representation on Aerosol Direct and Indirect Effects, *Atmos. Chem. Phys.* 6, 4163–4174, 2006.

Ghan, S. J., Easter, R. C., Hudson, J., and Breon, F.-M.: Evaluation of Aerosol Indirect Radiative Forcing in MIRAGE, *J. Geophys. Res.-Atmos.*, 106, 5317–5334, 2001.

Ghan, S. J., Leung, L. R., Easter, R. C. and Abdul-Razzak, H.: Prediction of Droplet Number in a General Circulation Model, *J. Geophys. Res.*, 102, 21 777–21 794, 1997.

Jacobson, Mark Z. 1997: DEVELOPMENT AND APPLICATION OF A NEW AIR POLLUTION MODELING SYSTEM-II. AEROSOL MODULE STRUCTURE AND DESIGN. *Atmospheric Environment* Vol. 31, No. 2, pp. 131-144, 1997.

Jacobson M. Z. and Turco R. P. (1995) Simulating condensational growth, evaporation, and coagulation of aerosols using a combined moving and stationary size grid. *Aerosol Sci. Technol.* 22, 73-92.

Jorge Alberto Martins, Caroline R. Mazzoli da Rocha, Marcio Gledson Lopes Oliveira, Rita Y. Ynoue, Maria de Fátima Andrade, Edmilson Dias de Freitas, Leila Droprinchinski Martins, 2010, Desenvolvimento de inventários de emissão de alta resolução: Intensidade de luzes noturnas e distribuição espacial de veículos. XVI CBMET, Brasil.

Jorge A. Martins, Leila D. Martins, Edmilson D. Freitas, Caroline R. Mazzoli da Rocha, Ricardo Hallak, Maria de Fátima Andrade, 2008. APLICAÇÃO DE IMAGENS DE SATÉLITE NO DESENVOLVIMENTO DE INVENTÁRIOS DE EMISSÃO DE ALTA RESOLUÇÃO. XV CBMET, Brasil.

KESSLER, E. On the distribution and continuity of water substance in atmospheric circulation. American Meteorology Society, v. 32, p. 84, 1969.

Kittelson, David B. (1999): "Ultrafine Particulate Matter in the Exhaust from Diesel and Gasoline-powered Mobile Sources", University of Minnesota, Center for Diesel Research, AAAR Tutorial, 11 October, 1999.

Khain, A., A. Pokrovsky, M. Pinsky, A. Seifert, and V. Phillips (2004), Simulation of effects of atmospheric aerosols on deep turbulent convective clouds using a spectral microphysics mixed-phase cumulus cloud model. Part II: Sensitivity study, *Journal of the Atmospheric Sciences*, 61 (24), 2963–2982.

Khain, A., D. Rosenfeld, and A. Pokrovsky (2005), Aerosol impact on the dynamics and microphysics of deep convective clouds, *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 131 (611, Part A), 2639–2663, doi:10.1256/qj.04.62.

Khain, A., (2009), Notes on state-of-the-art investigations of aerosol effects on precipitation: a critical review. *ENVIRONMENTAL RESEARCH LETTERS*. doi:10.1088/1748-9326/4/1/015004

Lin, Y.L., et al. (1983): Bulk parameterization of the snow field in a cloud model, *J. Clim. Appl. Meteorol.*, 22, 1065– 1092.

LOMBARDO, M. A. Ilha de calor nas metrópoles: o exemplo de São Paulo. São Paulo: Hucitec, 1985. 244p.

Li, G., Y. Wang, and R. Zhang (2008), Implementation of a two-moment bulk microphysics scheme to the WRF model to investigate aerosol-cloud interaction, *J. Geophys. Res.*, 113, D15211, doi:10.1029/2007JD009361.

Lin, Y.L., et al. (1983): Bulk parameterization of the snow field in a cloud model, *J. Clim. Appl. Meteorol.*, 22, 1065– 1092.

Martins, J.A., Leila D. Martins, Edmilson D. Freitas, Caroline R. Mazzoli da Rocha, Ricardo Hallak, Maria de Fátima Andrade. 2008. "Aplicação de Imagens de Satélite no Desenvolvimento de Inventários de Emissão de Alta Resolução." Congresso Brasileiro de Meteorologia – CBMET, 2008.

Martilli, A.; Clappier, A.; Rotach, M.W. (2002): An Urban Surface Exchange Parameterisation for Mesoscale Models; *Boundary Layer Meteorology*, 104, pp. 261-304.

MARTINS, J.A.: Efeito dos núcleos de condensação na formação de nuvens e o desenvolvimento da precipitação na região amazônica durante a estação seca. Tese de Doutorado - Universidade de São Paulo, 2006.

Pereira Filho, A. J., O. Massambani, P. E. Martins and F. Cazenave, 2007: An operational mobile XPOL for hydrometeorological applications in Brazil. 33rd Conference on Radar Meteorology, Cairns, Austrália. P10.14.

Rutledge, S. A., and P. V. Hobbs, 1984: The mesoscale and microscale structure and organization of clouds and precipitation in midlatitude cyclones. XII: A diagnostic modeling study of precipitation development in narrow cloud-frontal rainbands. *J. Atmos. Sci.*, 20, 2949–2972.

Tao, W.-K., J. Simpson, and M. Mc Cumber 1989: An ice-water saturation adjustment, *Mon. Wea. Rev.*, 117, 231–235.

Tarifa, J. R., e Armani, G. G., 2000. ATLAS AMBIENTAL DO MUNICÍPIO DE SÃO PAULO. Secretaria do Verde e do Meio Ambiente – SVMA/PMSP, 2000.

THOMPSON, G.; RASMUSSEN, R. M.; MANNING, K. Explicit forecasts of winter precipitation using an improved bulk microphysics scheme. part i: Description and sensitivity analysis. *Mon. Wea. Rev.*, v. 132, p. 519\_542, 2004.

WRF (Skamarock et al., 2005): Skamarock, W. C., J. B. Klemp, J. Dudhia, D. O. Gill, D. M. Barker, W. Wang and J. G. Powers, 2005: A Description of the Advanced Research WRF Version 2.

Wesely, M. L.: Parameterization of Surface Resistance to Gaseous Dry Deposition in Regional Numerical Models, *Atmos. Environ.*, 23, 1293–1304, 1989.

Zaveri, R. A., R. C. Easter, J. D. Fast, and L. K. Peters (2007), Model for Simulating Aerosol Interactions and Chemistry (MOSAIC), *Journal of Geophysical Research - Atmospheres*, submitted.

Zaveri, R. A., R. C. Easter, and L. K. Peters (2005), A computationally efficient Multicomponent Equilibrium Solver for Aerosols (MESA), *Journal of Geophysical Research - Atmospheres*, 110, Art. No. D24203, doi:10.1029/2004JD005618.

Zaveri, R. A., R. C. Easter, and A. S. Wexler (2005), A new method for multicomponent activity coefficients of electrolytes in aqueous atmospheric aerosols, *Journal of Geophysical Research - Atmospheres*, 110, Art. No. D02201, doi:10.1029/2004JD004681.

Zrnica, D.S., Ryzhkov, A.V., 1996. *Advantages of rain measurements using specific differential phase*. *J. Atmos. Ocean. Technol.* 13, 465–476.