



Ministério da  
Ciência e Tecnologia



INPE-16681-TDI/1626

**ESTUDO NUMÉRICO DA PRODUÇÃO DE CHUVAS  
INTENSAS NA REGIÃO DA SERRA DO MAR  
PAULISTA**

Caroline Estéphanie Ferraz Mourão

Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Meteorologia, orientada  
pela Dra. Chou Sin Chan, aprovada em 19 de fevereiro de 2010

Registro do documento original:

<<http://urlib.net/sid.inpe.br/mtc-m18@80/2010/04.15.22.03>>

INPE  
São José dos Campos  
2010

## **PUBLICADO POR:**

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE

Gabinete do Diretor (GB)

Serviço de Informação e Documentação (SID)

Caixa Postal 515 - CEP 12.245-970

São José dos Campos - SP - Brasil

Tel.:(012) 3945-6911/6923

Fax: (012) 3945-6919

E-mail: [pubtc@sid.inpe.br](mailto:pubtc@sid.inpe.br)

## **CONSELHO DE EDITORAÇÃO:**

### **Presidente:**

Dr. Gerald Jean Francis Banon - Coordenação Observação da Terra (OBT)

### **Membros:**

Dr<sup>a</sup> Maria do Carmo de Andrade Nono - Conselho de Pós-Graduação

Dr. Haroldo Fraga de Campos Velho - Centro de Tecnologias Especiais (CTE)

Dr<sup>a</sup> Inez Staciarini Batista - Coordenação Ciências Espaciais e Atmosféricas (CEA)

Marciana Leite Ribeiro - Serviço de Informação e Documentação (SID)

Dr. Ralf Gielow - Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPT)

Dr. Wilson Yamaguti - Coordenação Engenharia e Tecnologia Espacial (ETE)

## **BIBLIOTECA DIGITAL:**

Dr. Gerald Jean Francis Banon - Coordenação de Observação da Terra (OBT)

Marciana Leite Ribeiro - Serviço de Informação e Documentação (SID)

Jefferson Andrade Ancelmo - Serviço de Informação e Documentação (SID)

Simone A. Del-Ducca Barbedo - Serviço de Informação e Documentação (SID)

## **REVISÃO E NORMALIZAÇÃO DOCUMENTÁRIA:**

Marciana Leite Ribeiro - Serviço de Informação e Documentação (SID)

Marilúcia Santos Melo Cid - Serviço de Informação e Documentação (SID)

Yolanda Ribeiro da Silva Souza - Serviço de Informação e Documentação (SID)

## **EDITORAÇÃO ELETRÔNICA:**

Viveca Sant´Ana Lemos - Serviço de Informação e Documentação (SID)



Ministério da  
Ciência e Tecnologia



INPE-16681-TDI/1626

**ESTUDO NUMÉRICO DA PRODUÇÃO DE CHUVAS  
INTENSAS NA REGIÃO DA SERRA DO MAR  
PAULISTA**

Caroline Estéphanie Ferraz Mourão

Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Meteorologia, orientada  
pela Dra. Chou Sin Chan, aprovada em 19 de fevereiro de 2010

Registro do documento original:

<<http://urlib.net/sid.inpe.br/mtc-m18@80/2010/04.15.22.03>>

INPE  
São José dos Campos  
2010

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

---

Mourão, Caroline Estéphanie Ferraz.

M867es Estudo numérico da produção de chuvas intensas na região da Serra do Mar Paulista / Caroline Estéphanie Ferraz Mourão. – São José dos Campos : INPE, 2010.  
119 p. ; (INPE-16681-TDI/1626)

Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2010.  
Orientadora : Dra. Chou Sin Chan.

1. Modelagem atmosférica. 2. Tempestades severas. 3. Parametrização convectiva. 4. Modelo de superfície. 5. Previsão de tempo. I.Título.

CDU 551.509.313.4(815.6)

---

Copyright © 2010 do MCT/INPE. Nenhuma parte desta publicação pode ser reproduzida, armazenada em um sistema de recuperação, ou transmitida sob qualquer forma ou por qualquer meio, eletrônico, mecânico, fotográfico, reprográfico, de microfilmagem ou outros, sem a permissão escrita do INPE, com exceção de qualquer material fornecido especificamente com o propósito de ser entrado e executado num sistema computacional, para o uso exclusivo do leitor da obra.

Copyright © 2010 by MCT/INPE. No part of this publication may be reproduced, stored in a retrieval system, or transmitted in any form or by any means, electronic, mechanical, photocopying, recording, microfilming, or otherwise, without written permission from INPE, with the exception of any material supplied specifically for the purpose of being entered and executed on a computer system, for exclusive use of the reader of the work.

**Aprovado (a) pela Banca Examinadora  
em cumprimento ao requisito exigido para  
obtenção do Título de Mestre em  
Meteorologia**

**Dr. José Antônio Aravéquia**



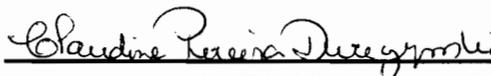
Presidente / INPE / São José dos Campos - SP

**Dra. Chou Sin Chan**



Orientador(a) / INPE / Cachoeira Paulista - SP

**Dra. Claudine Pereira Dereczynski**



Convidado(a) / UFRJ / Rio de Janeiro - RJ

**Aluno (a): Caroline Estéphanie Ferraz Mourão**

**São José dos Campos, 19 de fevereiro de 2010**



A minha mãe Vera Lúcia Ferraz Mourão, *in memoriam*, cuja memória sempre me deu forças para seguir adiante. E que certamente ficaria feliz com mais essa conquista.

Dedico



## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a Deus e aos familiares que me apoiaram nessa difícil jornada.

À Dra. Chou Sin Chan pela brilhante orientação, dedicação e incentivo.

Aos colegas do PROJETA, Dr. Jorge Gomes, Dra. Josiane Bustamante e ao Daniel Andrés pelas colaborações.

Aos professores do curso de Pós-graduação em Meteorologia pelos ensinamentos.

Aos colegas de Pós-graduação e funcionários do CPTEC/INPE pelo bom convívio.

Aos amigos que tiveram um papel muito importante no desenrolar do curso e principalmente na adaptação à nova cidade. A todos os amigos, em especial às meninas Caroline Vidal, Isabel Pilotto, Isabel Porto, Maria das Dores (Dorinha), Naiane Araujo e Renata Tedeschi agradeço os momentos que vivi intensamente e pelas lembranças que guardarei para sempre.

À CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) pela bolsa concedida.

Aos membros da banca examinadora pela predisposição em analisar este trabalho e pelos comentários e sugestões.



## RESUMO

O regime pluviométrico da região da Serra do Mar (localizada próximo ao litoral de São Paulo) é fortemente influenciado por sistemas convectivos que ocorrem com frequência nessa região causando diversos transtornos à população. A circulação local da Serra do Mar é influenciada pela localização próxima ao mar, tipo de vegetação e topografia. Neste trabalho, dois episódios de chuvas intensas que atingiram a Serra do Mar foram analisados através de simulações numéricas utilizando o modelo Eta, com o objetivo de investigar o papel da circulação local, do esquema de convecção e as interações entre convecção e fluxos de superfície, no desenvolvimento de chuvas intensas. A vegetação urbana foi incluída no mapa de tipo de vegetação utilizado pelo esquema de superfície Noah, pois se trata de uma região bastante urbanizada, que sofre o efeito da ilha de calor em dias quentes. Além disso, testes de sensibilidade foram aplicados ao parâmetro de disparo do esquema de parametrização de convecção *cumulus* Kain-Fritsch. O experimento com a inclusão da vegetação urbana alterou a temperatura do ar e do ponto de orvalho a 2 m, assim como a circulação local e, conseqüentemente, a precipitação em relação à simulação controle, principalmente nos locais onde o tipo urbano foi incluído mostrando que a formação de precipitação convectiva nesta região é fortemente influenciada pela configuração térmica e dinâmica que a ilha de calor urbano promove em dias quentes, com fraca atuação de sistemas sinóticos. Os resultados dos experimentos com alterações no parâmetro de disparo mostraram que ao diminuir a camada fonte de ar da corrente ascendente, os processos de superfície foram melhor representados e com isso os locais e quantidades de precipitação foram alterados melhorando em determinados instantes a simulação da precipitação convectiva. No entanto, ao aumentar a dependência desse parâmetro com o movimento vertical no ponto de grade o resultado da simulação da precipitação e da temperatura em 850 hPa não foi satisfatório. Baseado nos resultados encontrados foi realizado um último experimento com a inclusão da vegetação urbana e a redução da camada fonte no esquema de convecção KF. Os resultados deste último experimento mostraram uma representação um pouco melhor da temperatura em 850 hPa e da precipitação em relação à simulação controle. Os resultados deste trabalho mostram a importância da descrição acurada da cobertura da superfície combinado com um melhor ajuste dos parâmetros de disparo do esquema de parametrização *cumulus* para obter melhorias na simulação de chuvas convectivas.



# NUMERICAL STUDY OF THE PRODUCTION OF INTENSE RAINFALL IN THE SERRA DO MAR PAULISTA REGION

## ABSTRACT

Rainfall in the Serra do Mar region (located near the coast of São Paulo) is strongly influenced by convective systems that occur in this region. The local circulation of the Serra do Mar is affected by the proximity the sea, vegetation type and complex topography. Two episodes of heavy rains that occurred in the Serra do Mar region were studied in this work by means of numerical simulations using the Eta model. This study investigates the role of local circulation, the convection scheme and the interactions between convection and the surface fluxes in the development of heavy rainfall. The urban vegetation was included in the vegetation map used by Noah surface scheme, since it is a very urbanized region, and suffers the effect of heat island on hot days. In addition, sensitivity tests were applied to the trigger function of the Kain-Fritsch cumulus parameterization scheme. The experiment with the inclusion of urban vegetation modified the 2-m air and dew-point temperatures, as well as the local circulation, and consequently, the precipitation for the control run, especially in places where the urban vegetation type was included. This showed that the formation of convective precipitation in this region is strongly influenced by the thermodynamic effects that the urban heat island promotes on hot days, in weak large scale forcing conditions. The results of experiments with changes in the trigger function showed that with the modification to shallower updraft source layers (USL), the model was more sensitive to surface conditions and generally improved the locations and amounts of the simulated convective precipitation. However, by increasing the dependence of the trigger function to grid point vertical movement, results were not considered satisfactory. Based on these results, a last experiment was performed with the inclusion of urban vegetation and reduction of the updraft source layer depth in the KF convection scheme. Results of this experiment showed a small improvement of 850-hPa temperature and precipitation over the control run. These results showed the importance of more accurate description of land cover combined with adjusted parameters of the convection scheme to improve the simulation of heavy rainfall.



## SUMÁRIO

### **LISTA DE FIGURAS**

### **LISTA DE TABELAS**

### **LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS**

<b>1. INTRODUÇÃO</b>	<b>27</b>
1.1 Objetivos	29
<b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	<b>31</b>
2.1 Sistemas Convectivos	31
2.2 Aspectos observacionais	34
2.3 Aspectos numéricos	36
2.3.1 Processos de superfície	36
2.3.2 Parametrização de convecção	38
<b>3. METODOLOGIA</b>	<b>41</b>
3.1 Modelo Eta	41
3.1.1 Esquema de Parametrização Convectiva Kain-Fritsch	42
3.1.1.1. A função de disparo:	43
3.1.1.2. Formulação do fluxo de massa	45
3.1.1.3. Suposições do fechamento	47
3.1.2 Parametrização de superfície	47
3.1.2.1 Noah LSM	49
3.2 Dados e experimentos	52
3.2.1 Simulação controle	53
3.2.2 Mudanças no mapa de vegetação	54
3.2.3 Mudanças na parametrização convectiva	56
3.2.4 Mudanças no mapa de vegetação e na parametrização convectiva KF	57
3.2.5 Análise dos resultados	57
<b>4. RESULTADOS</b>	<b>59</b>

<b>4.1 Caso fevereiro de 2008</b>	<b>59</b>
4.1.1 Descrição Sinótica	62
4.1.2 Simulações numéricas	66
4.1.2.1 Simulação controle	67
4.1.2.2 Mudanças no mapa de vegetação	69
4.1.2.3 Mudanças na parametrização convectiva KF	77
4.1.2.3.1 Redução da USL de 50 para 30 hPa	77
4.1.2.3.2 Redução da USL de 50 para 10 hPa	80
4.1.2.3.3 Redução do w	81
4.1.2.4 Mudanças no mapa de vegetação e na parametrização convectiva KF	83
4.1.3 Avaliação estatística	84
<b>4.2 Caso março de 2009</b>	<b>91</b>
4.2.1 Descrição Sinótica	92
4.2.2 Simulações numéricas	95
4.2.2.1 Simulação controle	95
4.2.2.2 Mudanças no mapa de vegetação	96
4.2.2.3 Mudanças na parametrização convectiva KF	99
4.2.2.3.1 Redução da USL de 50 para 30 hPa	99
4.2.2.3.2 Redução da USL de 50 para 10 hPa	100
4.2.2.3.3 Redução do w	100
4.2.2.4 Mudanças no mapa de vegetação e na parametrização convectiva KF	101
4.2.3 Avaliação estatística	102
<b>5. CONCLUSÃO</b>	<b>109</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	<b>113</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 - Localização da Serra do Mar Paulista (quadro vermelho). ....	27
Figura 2.1 - Estágios de uma célula convectiva individual: Estágio de desenvolvimento (a), Estágio Maduro (b), Estágio de dissipação (c).....	32
Figura 3.1 – Diagrama termodinâmico esquemático mostrando a primeira USL escolhida em verde. ....	44
Figura 3.2 - Modelo solo superfície. ....	48
Figura 3.3 - Novo mapa de solos para a América do Sul incorporado no modelo Eta com os tipos de solo (1 a 18) conforme dados da tabela 3.1.....	51
Figura 3.4 - Região de domínio das simulações. ....	53
Figura 3.5 - Mapa de vegetação para a região de estudo mostrando os tipos de vegetação da tabela 3.2. ....	54
Figura 3.6 – Mapa de uso e cobertura da terra do Estado de São Paulo (tipo urbano representado pela cor rosa). ....	55
Figura 3.7 - Mapa de vegetação para a região de estudo mostrando os 12 tipos de vegetação da tabela 3.2 e o tipo urbano (em preto).....	55
Figura 4.1 - Precipitação observada à superfície (coluna da esquerda) e estimada pelo satélite TRMM (coluna da direita), acumulada em 24h das 12Z do dia anterior até as 12Z do dia 10 (a) e (b), 11 (c) e (d), 12 (e) e (f), 13 (g) e (h) e 14 (i) e (j) de fevereiro de 2008.....	61
Figura 4.2 - (a) Imagem do satélite GOES-10 no canal infravermelho e (b) carta de superfície para o dia 11 de fevereiro de 2008 às 18Z. ....	62
Figura 4.3 - Imagem do satélite GOES-12 realçada no canal infravermelho do dia (a) 10 às 20:45Z, (b) do dia 11 às 20:15Z e (c) do dia 12 às 20:15Z.....	63

Figura 4.4 - Pressão ao nível médio do mar (hPa) às 18z para os dias (a) 10, (b) 11 e (c) 12 de fevereiro de 2008. Dados de reanálise ERA Interim. ....	64
Figura 4.5 - Vento (m/s) em 500 hPa às 18z para os dias (a) 10, (b) 11 e (c) 12 de fevereiro de 2008. Dados de reanálise ERA Interim. ....	65
Figura 4.6 - Vento (m/s) em 200 hPa às 18z para os dias (a) 10, (b) 11 e (c) 12 de fevereiro de 2008. Dados de reanálise ERA Interim. ....	66
Figura 4.7 - Pressão ao nível médio do mar (hPa) da simulação controle às 18z para os dias (a) 10, (b) 11 e (c) 12 de fevereiro de 2008. ....	67
Figura 4.8 - Precipitação convectiva (mm) da simulação controle acumulada em 24h das 12Z do dia anterior até as 12Z do dia (a) 11, (b) 12 e (c) 13 de fevereiro de 2008. ....	69
Figura 4.9 - Precipitação convectiva (mm) do experimento com a vegetação urbana (coluna da esquerda) e diferença entre o experimento e a simulação controle (coluna da direita), acumulada em 24h das 12Z do dia anterior até as 12Z do dia (a e b) 11, (c e d) 12 e (e e f) 13 de fevereiro de 2008. ....	71
Figura 4.10 - Áreas escolhidas (quadro vermelho).....	72
Figura 4.11 - Evolução temporal na RMSD (figura 4.10) para 132 horas de simulação iniciada no dia 09 às 00Z das variáveis: (a) temperatura do ar a 2m (°C) (b) temperatura do ponto de orvalho a 2m (°C) e (c) precipitação convectiva (mm) e do (d) fluxo de calor sensível ( $W/m^2$ ) e (e) fluxo de calor latente ( $W/m^2$ ). A linha preta representa a rodada controle e a verde o experimento com a vegetação urbana (com valores representados no eixo esquerdo) e a rosa a diferença entre o experimento e a simulação controle (com valores representados no eixo direito).....	73
Figura 4.12 - Evolução temporal para 132 horas de simulação iniciada no dia 09 às 00Z da componente meridional do vento a 10m (m/s), (a) na RMSD e (b)	

no litoral (áreas indicadas na figura 4.10). A linha preta representa a simulação controle e a verde o experimento com a vegetação urbana..... 74

Figura 4.13 - Região onde foi feito um corte trasversal (linha vermelha). ..... 75

Figura 4.14 - Seção vertical do vento (vetor) e Omega (sombreado - Pa/s) da simulação controle (figuras da esquerda) e do experimento com a vegetação (figuras da direita), para os dias (a e b) 10, (c e d) 11 e (e e f) 12 às 18Z, na região representada na figura 4.13. .... 76

Figura 4.15 - Precipitação convectiva (mm) do experimento com a redução da USL de 50 para 30hPa (coluna da esquerda) e diferença entre o experimento e a simulação controle (coluna da direita), acumulada em 24h das 12Z do dia anterior até as 12Z do dia (a e b) 11, (c e d) 12 e (e e f) 13 de fevereiro de 2008. .... 78

Figura 4.16 - Evolução temporal para 132 horas de simulação iniciada no dia 09 às 00Z no litoral (figura 4.10) da (a) precipitação convectiva (mm/h), (b) temperatura a 2m (°C) e (c) CAPE (J/kg). A linha preta representa a simulação controle, a verde o experimento (com valores representados no eixo esquerdo) e a rosa a diferença entre o experimento e a simulação controle (com valores representados no eixo direito). .... 79

Figura 4.17 - Precipitação convectiva (mm) do experimento com a redução da USL de 50 para 10hPa (coluna da esquerda) e diferença entre o experimento e a simulação controle (coluna da direita), acumulada em 24h das 12Z do dia anterior até as 12Z do dia (a e b) 11, (c e d) 12 e (e e f) 13 de fevereiro de 2008. .... 81

Figura 4.18 - Precipitação convectiva (mm) do experimento com a redução do w de 0,2 para zero (coluna da esquerda) e diferença entre o experimento e a simulação controle (coluna da direita), acumulada em 24h das 12Z do dia

anterior até as 12Z do dia (a e b) 11, (c e d) 12 e (e e f) 13 de fevereiro de 2008. ....	82
Figura 4.19 - Precipitação convectiva (mm) do experimento com a redução da USL de 50 para 30hPa e inclusão da vegetação urbana (coluna da esquerda) e diferença entre o experimento e a simulação controle (coluna da direita), acumulada em 24h das 12Z do dia anterior até as 12Z do dia (a e b) 11, (c e d) 12 e (e e f) 13 de fevereiro de 2008. ....	84
Figura 4.20 - Evolução temporal para 132 horas de simulação iniciada no dia 09 às 00Z da raiz do erro quadrático médio da temperatura em 850 hPa (°C) para a simulação controle (preto) e (a) o experimento com a vegetação (verde), (b) o experimento com a redução da USL para 30 hPa (azul) e para 10 hPa (vermelho), (c) o experimento com o w (azul claro) e (d) o experimento com a USL de 30 hPa e com a vegetação (rosa). Os valores mostrados dentro do gráfico representam a REQM média para todo o período. ....	86
Figura 4.21 - ETS e BIAS da precipitação para a simulação controle (preto) e para o experimento com a inclusão da vegetação urbana (verde). ....	88
Figura 4.22 - ETS e BIAS da precipitação para a simulação controle (preto) e para o experimento com a redução da USL para 30 hPa (azul) e para 10 hPa (vermelho). ....	89
Figura 4.23 - ETS e BIAS da precipitação para a simulação controle (preto) e para o experimento com a alteração no w (azul claro). ....	90
Figura 4.24 - ETS e BIAS da precipitação para a simulação controle (preto) e para o experimento com a redução da USL para 30 hPa e com a inclusão da vegetação urbana (rosa). ....	91
Figura 4.25 - Precipitação (mm) (a) observada à superfície e (b) estimada pelo satélite TRMM, acumulada em 24h das 12Z do dia 17 até as 12Z do dia 18 de março de 2009. ....	92

Figura 4.26 - (a) Imagem do satélite GOES-10 no canal infravermelho e (b) carta de superfície para o dia 17 de março de 2009 às 18Z. ....	93
Figura 4.27 - Imagem do satélite GOES-10 realçada do dia 17 (a) às 18:00Z, (b) às 21:00Z e (c) às 22:30Z. ....	94
Figura 4.28 - Reanálise para o dia 17 de março de 2009 às 18Z da (a) Pressão ao nível médio do mar (hPa) (b) do vento (m/s) em 500hPa e em (c) 200hPa. Dados de reanálise ERA Interim. ....	95
Figura 4.29 - Precipitação convectiva (mm) da simulação controle acumulada em 24h das 12Z do dia 17 as 12Z do dia 18 de março de 2009. ....	96
Figura 4.30 - (a) Precipitação convectiva (mm) do experimento com a vegetação urbana e a (b) diferença entre o experimento e a simulação controle, acumulada em 24h das 12Z do dia 17 as 12Z do dia 18 de março de 2009. ....	96
Figura 4.31 - Evolução temporal na RMSp (figura 4.10) para 132 horas de simulação iniciada no dia 16 às 00Z das variáveis: (a) temperatura do ar a 2m (°C), (b) temperatura do ponto de orvalho a 2m (°C), (c) do fluxo de calor sensível ( $W/m^2$ ) e (d) do fluxo de calor latente ( $W/m^2$ ). A linha preta representa a rodada controle e a verde o experimento com a vegetação urbana. ....	97
Figura 4.32 - Evolução temporal para 132 horas de simulação iniciada no dia 16 às 00Z da componente meridional do vento a 10 m (m/s), (a) na RMSp e (b) no litoral (áreas indicadas na figura 4.10). A linha preta representa a simulação controle e a verde o experimento com a vegetação urbana. ....	98
Figura 4.33 - Seção vertical do vento (vetor) e Omega (sombreado - Pa/s) da (a) simulação controle e (b) do experimento com a vegetação, para o dia 17 às 18Z. ....	99
Figura 4.34 - (a) Precipitação convectiva (mm) do experimento com a redução da USL de 50 para 30 hPa e a (b) diferença entre o experimento e a simulação	

controle, acumulada em 24h das 12Z do dia 17 as 12Z do dia 18 de março de 2009. ....	100
Figura 4.35 - (a) Precipitação convectiva (mm) do experimento com a redução da USL de 50 para 10 hPa e a (b) diferença entre o experimento e a simulação controle, acumulada em 24h das 12Z do dia 17 as 12Z do dia 18 de março de 2009. ....	100
Figura 4.36 - (a) Precipitação convectiva (mm) do experimento com a redução do w de 0,2 para zero e a (b) diferença entre o experimento e a simulação controle, acumulada em 24h das 12Z do dia 17 as 12Z do dia 18 de março de 2009. ....	101
Figura 4.37 - (a) Precipitação convectiva (mm) do experimento com a redução do w de 0,2 para zero e a (b) diferença entre o experimento e a simulação controle, acumulada em 24h das 12Z do dia 17 as 12Z do dia 18 de março de 2009. ....	101
Figura 4.38 - Evolução temporal para 132 horas de simulação iniciada no dia 16 às 00Z da raiz do erro quadrático médio da temperatura em 850hPa (°C) para a simulação controle (preto) e (a) o experimento com a vegetação (verde), (b) o experimento com a redução da USL para 30hpa (azul) e para 10hPa (vermelho), (c) o experimento com o w (azul claro) e (d) o experimento com a USL de 30hPa e com a vegetação (rosa). Os valores mostrados dentro do gráfico representam a REQM média para todo o período. ....	103
Figura 4.39 - ETS e BIAS da precipitação para a simulação controle (preto) e para o experimento com a inclusão da vegetação urbana (verde). ....	104
Figura 4.40 - ETS e BIAS da precipitação para a simulação controle (preto) e para o experimento com a redução da USL para 30 hPa (azul) e para 10 hPa (vermelho). ....	105

Figura 4.41 - ETS e BIAS da precipitação para a simulação controle (preto) e para o experimento com a alteração no w (azul claro)..... 106

Figura 4.42 - ETS e BIAS da precipitação para a simulação controle (preto) e para o experimento com a redução da USL para 30hPa e com a inclusão da vegetação urbana (rosa). ..... 107



## LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 - Novos valores dos parâmetros do solo do modelo Eta .....	50
Tabela 3.2 - Tipos de cobertura de uso do solo. ....	52
Tabela 3.3 - Tabela com os parâmetros do tipo urbano da USGS.....	55



## LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

CAPE	-	<i>Convective Available Potential Energy</i>
CPTEC	-	Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos
ETS	-	<i>Equitable Threat Score</i>
GFDL	-	<i>Geophysical Fluid Dynamics Laboratory</i>
GOES	-	<i>Geostationary Operational Environmental Satellite</i>
IBGE	-	Instituto Brasileiro de Geografia Estatística
ICU	-	Ilha de Calor Urbano
INMET	-	Instituto Nacional de Meteorologia
INPE	-	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
KF	-	Kain-Fritsch
LCL	-	<i>Lifting Condensation Level</i>
NCAR	-	<i>National Center for Atmospheric Research</i>
NCEP	-	<i>National Centers for Environmental Prediction</i>
REQM	-	Raiz do Erro Quadrático Médio
RMSP	-	Região Metropolitana de São Paulo
USGS	-	<i>U. S. Geological Survey</i>
USL	-	<i>Updraft Source Layers</i>



## 1. INTRODUÇÃO

A região da Serra do Mar, que está localizada próximo ao litoral de São Paulo (figura 1.1), é de grande importância econômica para o Estado de São Paulo devido as suas ferrovias, rodovias, dutovias e instalações industriais e portuárias. No entanto, essa região é frequentemente atingida por sistemas convectivos, que causam deslizamentos nas suas encostas gerando diversos transtornos à população. Por isso, o bom entendimento da origem e desenvolvimento desses sistemas é necessário para aprimorar a previsão e assim alertar a população sobre a ocorrência de eventos de chuvas intensas.



Figura 1.1 - Localização da Serra do Mar Paulista (quadro vermelho).  
Fonte: [www.guiageografico.com](http://www.guiageografico.com)

A região da Serra do Mar abrange cidades de alta densidade demográfica, portanto é uma região bastante urbanizada e em dias de forte aquecimento produz o efeito da ilha de calor. Os eventos extremos de precipitação na Serra do Mar estão normalmente associados com a atuação da Zona de Convergência do Atlântico sul (ZCAS) e com a passagem de sistemas frontais (SELUCHI, 2006) ou com sistemas convectivos isolados (BUSTAMANTE e CHOU, 2006; TEIXEIRA e SATYAMURTY, 2006). Entretanto, o número de observações nessa região é ainda limitado, por isso estudos com simulações numéricas têm sido realizados (CHOU et al., 2006; GUIMARÃES et al., 2006; ROZANTE e CAVALCANTI, 2006), para entender melhor a circulação da

região e como os processos de superfície influenciam no regime de precipitação.

As nuvens e os processos associados a sua formação tem grande influência no sistema climático (ARAKAWA, 2004). A liberação de calor por condensação e a redistribuição dos fluxos de calor sensível, latente e de momentum influenciam nos processos atmosféricos e hidrológicos, alterando o perfil de temperatura e umidade, o *momentum* e a instabilidade atmosférica. A refletividade, absorção e emissão de radiação pelas nuvens são importantes nos processos radiativos. Devido às transformações de energia associadas às nuvens, desde mudanças de fase de água em nuvens *cumulus* precipitantes, a fortes correntes ascendentes e descendentes, é de grande importância o conhecimento acerca da dinâmica e energética que a convecção *cumulus*, principalmente a convecção profunda e de grande intensidade, exerce em sistemas atmosféricos de grande escala (COTTON; ANTHES, 1989).

No entanto, para representar as nuvens e seus processos em modelos numéricos de meso ou grande escala, a resolução horizontal adequada seria da ordem de 100 a 1000 m, entretanto, cobrir uma grande área com essa resolução seria extremamente caro computacionalmente (COTTON; ANTHES, 1989). Dessa forma, a parametrização de *cumulus* consiste em uma alternativa para incluir os efeitos dos processos físicos de subgrade nas escalas resolvidas pelo modelo.

A parametrização *cumulus* vem sendo estudada e aprimorada por meio de diversos esquemas (OOYAMA, 1971; ARAKAWA e SCHUBERT, 1974; KUO, 1974; FRITSCH e CHAPPELL, 1980; BETTS, 1986; KAIN e FRITSCH, 1993).

Os processos de superfície do solo também têm grande influência na circulação de meso e grande escala. Por isso, diversos estudos buscando uma boa representação do uso do solo nos modelos numéricos têm sido realizados (LO et al., 2007; LIN et al., 2007; LIN et al., 2008).

Neste trabalho, serão utilizadas as simulações do modelo Eta, para estudar casos de chuvas convectivas, em que houve fraca atuação de sistemas de grande escala, sobre a região da Serra do Mar. A escolha de casos com fraca atuação sinótica é realizada para que o efeito local da formação dos sistemas convectivos possa ser identificado.

O presente trabalho procura responder a seguinte questão: A formação dos temporais pode ocorrer simplesmente por instabilidade termodinâmica e/ou por efeito da ilha de calor?

### **1.1 Objetivos**

O objetivo deste trabalho é investigar os processos físicos que contribuem para a formação de sistemas convectivos bem como a circulação atmosférica associada a eventos de chuvas intensas (temporais), sobre a região da Serra do Mar, através de simulações numéricas. A investigação dará ênfase aos processos de convecção *cumulus* e das interações solo-vegetação-atmosfera. O trabalho tem como objetivos específicos:

- Investigar as alterações na circulação de brisa com mudanças na cobertura da superfície incluindo o tipo de vegetação urbana. Dessa forma, será avaliado o papel da cobertura de superfície na formação das chuvas intensas.
- Estudar a contribuição da instabilidade convectiva local, através de modificações no esquema de Kain-Fritsch feitas no intuito de aumentar a flutuabilidade da parcela.

Com essas alterações, espera-se melhorar o desempenho do modelo, para que possa representar melhor a circulação de brisa marítima e o efeito da ilha de calor, assim como a precipitação na região de estudo.

No capítulo 2 é apresentada uma revisão bibliográfica sobre Sistemas Convectivos abordando os aspectos observacionais e numéricos dos

processos de superfície e de convecção. No capítulo 3 a metodologia utilizada no trabalho é apresentada, assim como, os dados utilizados e uma breve descrição da parametrização de superfície e convectiva utilizadas pelo modelo Eta neste trabalho, posteriormente os resultados são discutidos no capítulo 4 e as conclusões são expostas no capítulo 5.

## **2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

Neste capítulo são descritas algumas características gerais dos sistemas convectivos, como origem e desenvolvimento; alguns aspectos observacionais para ressaltar a influência da circulação de brisa marítima e da ilha de calor urbano e aspectos numéricos da importância da parametrização de superfície e de convecção em modelos atmosféricos e estudos relacionados a mudanças nestes esquemas.

### **2.1 Sistemas Convectivos**

Modelos conceituais têm sido propostos para os tipos mais comuns de tempestades observadas como, por exemplo, o modelo de células convectivas de vida curta (BYERS e BRAHAM, 1949), o modelo de tempestade em multicélulas (MARWITZ, 1972, NEWTON e FRANKHAUSER, 1975), e o modelo para tempestades em supercélulas (BROWNING, 1964; LEMON e DOSWELL, 1979).

Segundo Weisman e Klemp (1986), a tempestade em célula individual é o sistema convectivo mais básico. O seu estágio de desenvolvimento consiste em uma simples corrente de ar ascendente que rapidamente alcança a alta troposfera produzindo grande quantidade de água líquida e gelo. Quando as gotas de chuva ou as partículas de gelo tornam-se muito pesadas para serem suportadas pela corrente ascendente, elas começam a precipitar, criando uma corrente de ar descendente, dando início ao estágio de maturação. Conforme a corrente descendente torna-se predominante, a célula entra no estágio de dissipação. Esse ciclo pode durar até 1 hora. Rajadas de vento ou granizo podem ocorrer. A figura 2.1 ilustra esses estágios da célula individual.

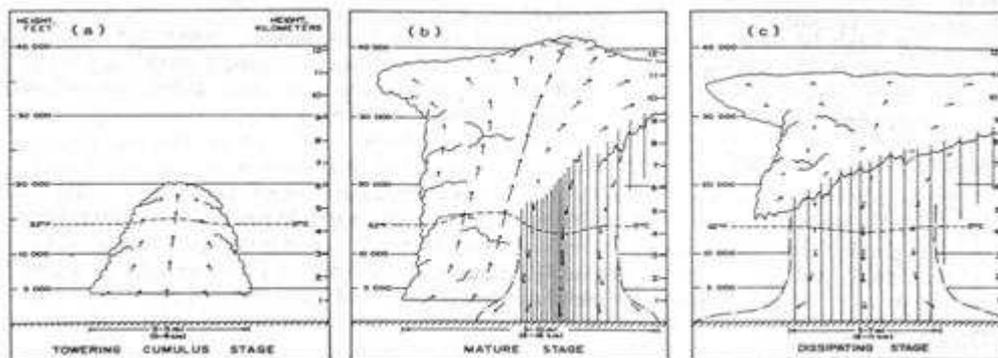


Figura 2.1 - Estágios de uma célula convectiva individual: Estágio de desenvolvimento (a), Estágio Maduro (b), Estágio de dissipação (c).  
 Fonte: Weisman e Klemp (1986).

A tempestade em multicélulas, de acordo com Weisman e Klemp (1986), consiste num aglomerado de células convectivas, que podem durar por um longo tempo atingindo várias áreas devido a sua habilidade de criar novas células. Se a velocidade da tempestade for lenta, chuvas extremas podem ocorrer num mesmo local, com a possibilidade de enchentes. Excepcionalmente, granizos e tornados de curta duração podem ocorrer. O tipo mais comum de tempestade em multicélulas são as chamadas linhas de instabilidade.

A supercélula consiste de uma corrente de ar ascendente simples, quase estacionária e com rotação, sua duração pode ser de várias horas. As supercélulas ocasionalmente desenvolvem-se a partir de sistemas de tempestades em multicélulas, sendo o tipo mais perigoso e destrutivo de tempestade, produzindo grande quantidade de granizo, ventos intensos e possivelmente tornados de vida longa, sobre uma ampla trajetória (WEISMAN e KLEMP, 1986).

De acordo com Cotton e Anthes (1989), o termo sistema convectivo de mesoescala (SCM) descreve um sistema convectivo profundo, que é considerado maior que uma tempestade individual e normalmente possui uma grande extensão vertical com uma bigorna estratiforme em altos níveis (Figura

2.2). O tempo de vida do SCM é de 6 a 12 h, sendo que em algumas ocasiões a bigorna pode sobreviver por vários dias.

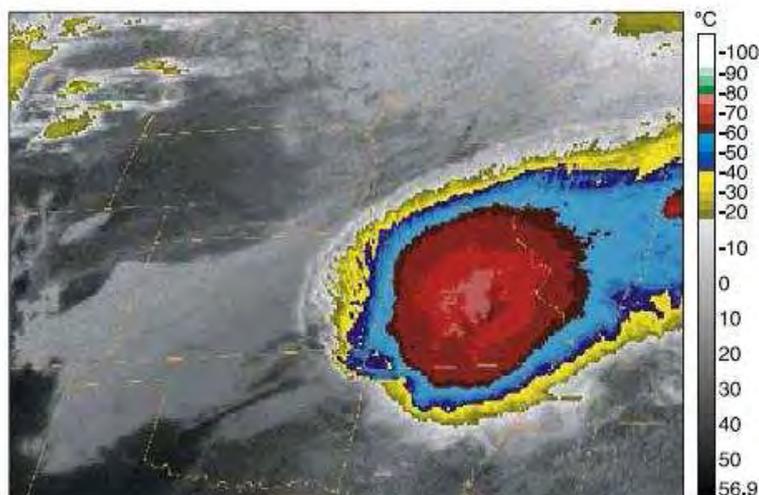


Figura 2.2 - Imagem de satélite infravermelho de um sistema convectivo de mesoescala sobre Missouri.  
Fonte: Houze (2004).

Segundo Houze (2004) os SCMs se formam quando nuvens aparecem em resposta à instabilidade convectiva e organizam uma corrente ascendente dentro de um sistema de nuvem individual com uma estrutura superior cirriforme muito grande e precipitação que cobre grandes áreas. Os SCMs são responsáveis por uma grande quantidade de precipitação nos trópicos e em regiões quentes nas latitudes médias. Uma definição descritiva de um SCM é um sistema de nuvens cumulunimbus que produz uma área de precipitação contínua de aproximadamente 100 km ou mais. Houze (1993) sugeriu uma definição similar e notavelmente adicionou que a dinâmica de um SCM é normalmente mais complexa do que a de nuvens cumulunimbus individuais ou linhas de cumulunimbus.

SCMs possuem uma variedade de estruturas de nuvens e precipitação (HOUZE et al., 1990). Os SCMs contêm uma grande região de precipitação estratiforme e circulações de mesoescala induzidas pelo grande conglomerado de nuvens convectivas e estratiformes e pela precipitação (HOUZE, 1993).

As tempestades severas desempenham um papel muito importante no regime pluviométrico nas regiões Norte, Centro-Oeste e Sudeste do Brasil (VIANELLO e ALVES, 1991).

## **2.2 Aspectos observacionais**

A circulação local da região da Serra do Mar é influenciada principalmente pela localização (próxima ao mar), tipo de vegetação e topografia. Essa região é freqüentemente atingida por sistemas convectivos, que se formam devido ao efeito combinado dos sistemas sinóticos com a circulação local dos ventos vale-montanha e brisa marítima/terrestre (TEIXEIRA e SATYAMURTY, 2006).

Cavalcanti et al. (2006) realizaram o estudo do evento extremo de precipitação no litoral norte do Estado de São Paulo, onde foram registrados deslizamentos nas cidades e nas estradas, além de alagamentos. A chuva intensa foi associada tanto aos sistemas de escala sinótica quanto à circulação da brisa marítima e circulação devido à presença da Serra do Mar.

Xavier (2002) estudou o caso de tempestade multicelular que atingiu a região metropolitana do Rio de Janeiro no dia 15 de novembro de 2001 através, principalmente, de imagens de radar e de análises de modelos regionais. A única característica peculiar significativa encontrada foi a presença de um “bolsão” de temperaturas máximas na região do sistema convectivo, o que indicou que a flutuabilidade devido ao gradiente de temperatura intenso pode ter funcionado como uma “forçante” importante para o disparo da tempestade.

Cidades muito urbanizadas, com prédios e superfícies pavimentadas, armazenam mais energia solar, que superfícies com coberturas naturais. Adicionalmente, o homem e as atividades industriais produzem calor extra ao ambiente, causando altas temperaturas próximas à superfície. Este fenômeno é chamado de efeito da ilha de calor urbano (ICU).

Nos últimos 30 anos, um número de estudos observacionais e climatológicos identificou que a ilha de calor urbano pode ter grande influência na escala local e mesoescala, assim como no microclima. Inicialmente, estudos climatológicos indicavam que o efeito da ICU poderia aumentar a nebulosidade e precipitação em uma cidade (KHEMANI e MURTY, 1973; CHANGNON et al., 1976; BRAHAM, 1979). Observações mostraram que, em situações com forçante sinótica calma e fraca, uma circulação de ilha de calor pode ser gerada entre a cidade e a região ao redor (VUKOVICH, 1971; BORNSTEIN, 1968; SAWAI, 1978).

Pinto Jr. et al. (2008) realizaram uma breve revisão de sistemas de detecção e localização de descargas elétricas atmosféricas em centros urbanos, com maior detalhamento para São Paulo, Campinas e São José dos Campos. Neste estudo observou-se uma estreita correlação espacial entre a distribuição dos raios, a área urbana e a configuração da ilha de calor (figura 2.3) indicando a formação de sistemas convectivos profundos e intensos na área urbana.

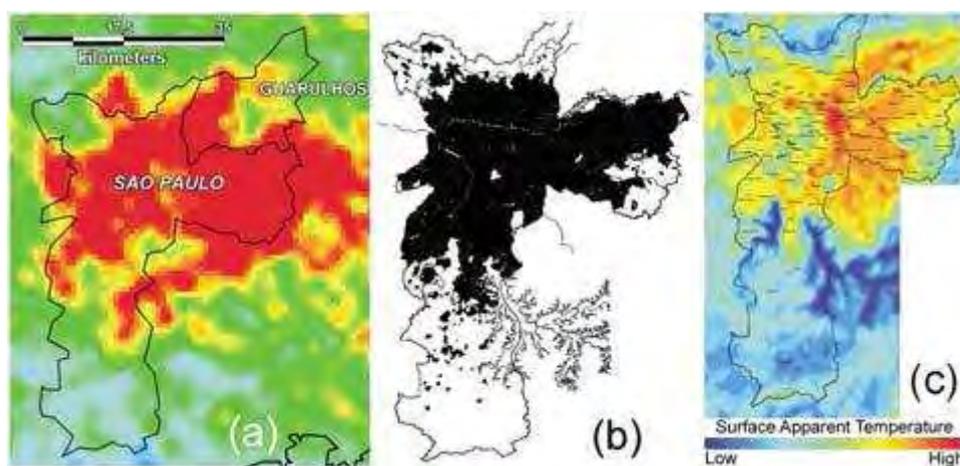


Figura 2.3 - a) densidade de raios na cidade de São Paulo (indicada em vermelho) a partir de dados da Rede Brasileira de Detecção de Descargas atmosféricas (BrasilDat), b) área urbana do município e São Paulo, indicada em preto, c) temperatura aparente da superfície obtida a partir da imagem da banda termal do satélite LandSat-7, caracterizando a ilha de calor urbana.

Fonte: Naccarato et al. (2003).

Farias et al. (2008) observaram durante o período de 1999 a 2004 na cidade de São Paulo uma diminuição na incidência de raios nos fins de semana, que coincide com a diminuição de poluição neste mesmo período.

## **2.3 Aspectos numéricos**

Um grande número de experimentos numéricos de alta resolução tem sido realizado para entender melhor os impactos da urbanização e sua associação com as ilhas de calor urbano, com diferentes abordagens para tratar a superfície da terra e os processos urbanos, assim como trabalhos envolvendo testes com esquemas de parametrização convectiva.

### **2.3.1 Processos de superfície**

Lo et al. (2007) analisaram uma região na parte sul da China, que é uma das regiões de desenvolvimento econômico e industrial mais rápido do mundo. A rápida urbanização causou diversos impactos ambientais, como mudanças no clima e deterioração da qualidade do ar. Neste estudo, foi utilizado o modelo de mesoescala MM5, para analisar o impacto da rápida urbanização na circulação de escala local e regional. O primeiro experimento (SLAB) usou o mapa de uso do solo padrão do MM5 (U.S. Geological Survey - USGS), com um simples tratamento da superfície da terra MM5-slab. O segundo experimento (SLAB-LANDU) usou uma atualização do uso do solo de 2003 com o MM5-slab. O terceiro experimento (URBAN-LSM) usou a atualização do solo com o Noah LSM, que tem atualizações no tratamento do uso do solo urbano. Os autores concluíram que o URBAN-LSM apresentou resultados melhores, em relação aos outros experimentos representando bem a circulação de brisa marítima e a circulação de ilha de calor, tanto espacialmente quanto verticalmente, com boa representação do vento e apresentando um gradiente de temperatura maior entre a área urbana e as regiões ao redor. Seus resultados indicaram que uma boa simulação da ilha de calor não precisa apenas de uma atualização na distribuição do uso do solo urbano, mas também de parametrizações com um maior detalhamento dos processos físicos.

Lin et al. (2007), realizaram um estudo numérico do impacto da urbanização na precipitação sobre Taiwan. Para estudar e avaliar os impactos do efeito da ilha

de calor em temporais sobre Taiwan foi utilizado o modelo de mesoescala MM5. Baseado no mapa de uso do solo fornecido pela USGS, foram considerados três diferentes tamanhos urbanos no estudo da simulação para avaliar o impacto da urbanização na precipitação. Para o caso urbano (com o tamanho urbano de  $15 \times 15 \text{ km}^2$ ) o fluxo de calor sensível é quase  $500 \text{ W m}^{-2}$  em torno de meio dia. Isto é, um valor 3 vezes maior que no caso não urbano. A temperatura do ar na superfície no caso urbano aumenta quase  $3 \text{ }^\circ\text{C}$  e a umidade diminui quase 10 % a mais que no caso não urbano. Aparentemente, a topografia em Taiwan e o efeito de levantamento do ar pela montanha têm um papel importante no processo de formação da precipitação. O estudo numérico sugere que o efeito da ilha de calor sobre a planície ocidental pode perturbar os processos térmicos e dinâmicos e ainda afetar a localização das tempestades e a precipitação sobre a planície ocidental de Taiwan.

Lin et al. (2008) analisaram o efeito da ilha de calor urbano e seus impactos no desenvolvimento da camada limite e na circulação terra-mar sobre o norte de Taiwan. A fim de avaliar os impactos da urbanização e o efeito da ilha de calor urbano sobre Taiwan, especialmente Taipei (localizado no norte de Taiwan) foi utilizado o modelo de mesoescala WRF acoplado com o modelo de superfície Noah e o modelo de dossel urbano (*Urban Canopy Model - UCM*). O uso do modelo WRF-Noah-UCM melhorou significativamente os resultados, representando bem o efeito de ilha de calor urbano, o desenvolvimento da camada limite e a brisa marítima. O modelo prevê bem o desenvolvimento da camada limite durante o dia e o efeito da ilha de calor urbano no norte de Taiwan. Testes de sensibilidade indicam que o calor antropogênico tem um papel importante para o desenvolvimento da camada limite e intensifica a ilha de calor urbano na área de Tapei, especialmente durante a noite e ao amanhecer. Quando o calor antropogênico é aumentado para  $100 \text{ W m}^{-2}$  no modelo, a temperatura média da superfície aumenta quase  $0,3 \text{ }^\circ\text{C}$  em Tapei. Além disso, foi encontrado que o efeito da ICU tem igualmente um impacto significativo na circulação mar terra. Podendo realçar a brisa do mar durante o

dia e enfraquecer a brisa terrestre durante a noite e ainda tem um impacto significativo na difusão da poluição do ar no norte de Taiwan.

### **2.3.2 Parametrização de convecção**

A versão do modelo Eta usando o esquema de parametrização *cumulus* Kain-Fritsch (KF) tende a superestimar a precipitação sobre a América do Sul (ROZANTE e CAVALCANTI, 2008). Por isso, estudos vêm sendo desenvolvidos propondo testes para que o esquema possa representar melhor a precipitação.

Anderson et al. (2007) alteraram o perfil vertical do detranhamento do fluxo de massa ascendente da parametrização convectiva KF utilizando o modelo de Mesoescala MM5. As modificações realizadas e sua sensibilidade à resolução horizontal foram testadas através de simulações experimentais de inundações no período de Junho-Julho 1993, no centro dos Estados Unidos. O efeito esperado desta modificação era alterar o perfil vertical da massa da nuvem (incluindo água e gelo) fornecida ao modelo para a simulação explícita pelas equações dinâmicas de grade resolvida e pelos processos microfísicos parametrizados. As modificações impactaram o ciclo diurno da precipitação reduzindo a precipitação da parametrização convectiva. O esquema modificado reduziu a alta taxa de precipitação durante a tarde em simulações de baixa e alta resolução. A combinação de alta resolução com o esquema modificado resultou na propagação mais freqüente e mais realística de aglomerados e eventos de precipitação noturna de mesoscala, concordando melhor com as observações da taxa de precipitação noturna.

Bastos (2007) inseriu o fluxo de momentum no esquema de parametrização KF de forma análoga ao fluxo de calor já existente no esquema e realizou um experimento com a corrente ascendente da nuvem (FM1) e outro incluindo as correntes ascendentes e descendentes (FM2), utilizando dois domínios para um caso de atividade convectiva. Foi feita uma simulação para 48h utilizando o

modelo Eta. Em geral, o esquema com as modificações acelera os ventos em altitude e próximo à superfície e reduz a intensidade dos ventos máximos. Nas regiões de atividade convectiva, nos experimentos FM1 e FM2 houve um aumento da convergência de umidade em 850 hPa e divergência de massa em 300 hPa, associado à intensificação da vortacidade ciclônica em 850 hPa e surgimento de vortacidade anticiclônica em 300 hPa, o que favorece a formação de sistemas convectivos. Os valores dos índices de instabilidades termodinâmicos e dinâmicos também mostraram uma melhora com as modificações no esquema.

Gomes (2009) incluiu um parâmetro no esquema de parametrização convectiva KF que controla o quanto de água condensada gerada pelo esquema implícito é convertida em precipitação convectiva e o quanto é deixada no ponto de grade do modelo. Com isso, há uma redução da atividade do esquema implícito e uma maior disponibilidade de água em estado líquido e vapor que é deixada no ponto de grade para o esquema explícito. Esse parâmetro controla também o quanto de água condensada deixada no ponto de grade é mantida como água/gelo e quanto é evaporada. O modelo Eta foi utilizado com a inclusão do parâmetro no esquema KF, para estudar um caso de ZCAS com diferentes resoluções. Os resultados indicaram que com o aumento da resolução horizontal do modelo de 20 para 10 km, o esquema implícito tornou-se menos ativo, enquanto o esquema explícito indicou uma maior atividade e produziu mais precipitação. Com o aumento de resolução de 10 para 5 km o esquema implícito produziu um pouco mais de precipitação em relação à resolução de 10 km, porém verificou-se que a precipitação explícita também aumentou em quantidade e área de cobertura. A avaliação objetiva mostrou uma redução da superestimativa de precipitação verificada nos experimentos controle, principalmente para os limiares de chuva mais intensa.



### 3. METODOLOGIA

Neste capítulo é feita uma descrição da versão do modelo Eta, que será utilizado para estudar alguns casos de chuva convectiva, na região da Serra do Mar e uma descrição mais detalhada da parametrização convectiva Kain-Fritsch e da parametrização de superfície Noah, que serão utilizadas nos experimentos. Apresenta-se também uma descrição dos experimentos que serão realizados para estudar a influência da circulação local na formação e desenvolvimento de nuvens profundas.

#### 3.1 Modelo Eta

O modelo de mesoescala Eta (MESINGER et al., 1988; BLACK, 1994) é um modelo em ponto de grade de equações primitivas, que vem sendo utilizado desde 1996 no Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC), para previsões de curto e médio prazo. Operacionalmente o modelo utiliza no CPTEC as análises do *National Centers for Environmental Prediction* (NCEP) como condição inicial e as previsões do modelo global CPTEC/COLA, atualizadas a cada 6 horas, como condição de contorno.

A grade horizontal utilizada é a grade E de Arakawa. A topografia é representada em forma de degraus discretos e a coordenada vertical é a coordenada  $\eta$  (MESINGER, 1984), definida como:

$$\eta = \left( \frac{p - p_T}{p_{sfc} - p_T} \right) \eta_{sfc}$$

onde,  $\eta_{sfc} = \frac{p_{ref}(z_{sfc}) - p_T}{p_{ref}(0) - p_T}$ ,  $p$  é a pressão atmosférica e os índices  $sfc$  e  $T$

referem-se a superfície e ao topo da atmosfera, respectivamente. O índice  $ref$  se refere a pressão em uma atmosfera de referência e  $Z_{sfc}$  é a altitude da superfície.

O esquema de integração é por particionamento explícito ('split-explicit'). As variáveis prognósticas são: temperatura do ar, umidade específica, componente zonal e meridional do vento, pressão à superfície, energia cinética turbulenta, umidade e temperatura do solo e hidrometeoros das nuvens.

Os processos físicos são tratados no modelo através de esquemas de parametrizações. Os processos turbulentos na atmosfera livre são resolvidos pelo esquema de Mellor-Yamada nível 2.5 (MELLOR e YAMADA, 1982) e na camada superficial através das funções de estabilidade de Paulson (PAULSON, 1970). O esquema de parametrização dos fluxos radiativos foram desenvolvidos pelo *Geophysical Fluid Dynamics Laboratory* (GFDL), onde a radiação de onda curta se baseia no esquema de Lacis e Hansen (1974) e a radiação de onda longa se baseia no esquema de Fels e Schwarzkopf (1975). As taxas de aquecimento ou resfriamento devido aos processos radiativos são calculados a cada hora de integração. As distribuições de dióxido de carbono, ozônio, e do albedo iniciais são retiradas da climatologia. O modelo é integrado no modo não-hidrostático, que é mais adequado para experimentos com resolução espacial maior que 10 km.

As trocas de energia entre solo-vegetação-atmosfera seguem o esquema de parametrização Noah (CHEN et al., 1997). Parte da chuva e das nuvens estratiformes são representadas pelo esquema de microfísica de nuvens de Ferrier et al. (2002) que trata de diferentes tipos de hidrometeoros. A produção de chuva convectiva se baseia no esquema de parametrização cumulos Kain-Fritsch (KAIN e FRITSCH, 1993; KAIN, 2004). Os esquemas de parametrização de superfície Noah e de convecção KF serão descritos com mais detalhes a seguir.

### **3.1.1 Esquema de Parametrização Convectiva Kain-Fritsch**

O esquema de parametrização convectiva KF é do tipo fluxo de massa que foi derivado do esquema de parametrização convectiva de Fritsch-Chappell

(FRITSCH e CHAPPELL, 1980). O esquema KF é unidimensional com entranhamento e detranhamento, o que permite uma interação maior entre a nuvem e o ambiente. Esse esquema utiliza o método da parcela lagrangiano, isto é acompanhando o movimento da parcela, incluindo as dinâmicas do momentum vertical (DONNER, 1993), para estimar se a instabilidade existe e as propriedades de nuvens convectivas.

O esquema KF pode ser dividido em três partes: 1) a função de disparo convectiva, 2) a formulação do fluxo de massa e 3) as suposições do fechamento.

### 3.1.1.1. A função de disparo:

A primeira etapa do esquema é identificar camadas fonte de corrente ascendente (*updraft source layers* – USLs). Verticalmente as camadas adjacentes do modelo são somadas a partir da superfície até que a profundidade encontrada seja de pelo menos 50 hPa. Esta combinação de camadas adjacentes do modelo compõe a primeira camada fonte potencial (figura 3.1). As características médias termodinâmicas desta camada encontrada são calculadas, junto com a temperatura e altura desta parcela em seu nível de condensação por levantamento (*lifting condensation level* - LCL). A temperatura da parcela  $T_{LCL}$  é comparada com a temperatura ambiente  $T_{ENV}$  no LCL da parcela, para verificar se há possibilidade de formação convectiva. A parcela estará tipicamente mais fria do que seu ambiente, isto é, negativamente flutuante. No entanto, observações sugerem que o desenvolvimento convectivo tende a ser favorecido pelo movimento vertical do ambiente (FRITSCH e CHAPPELL 1980), portanto uma perturbação da temperatura proporcional à magnitude do movimento vertical na grade resolvida é atribuída à parcela. A fórmula específica para esta perturbação  $\delta T_{vw}$  é

$$\delta T_{vw} = k [w_g - c(z)]^{1/3} \quad (3.1)$$

Onde,  $k$  é um unitário com dimensões  $K s^{1/3} cm^{-1/3}$ , o  $w_0$  é uma aproximação média da velocidade vertical no LCL na grade resolvida ( $cm s^{-1}$ ), e  $c(z)$  é a velocidade vertical do ponto inicial dada por

$$c(z) = \begin{cases} w_0 (Z_{LCL} / 2000), & Z_{LCL} \leq 2000 \\ w_0, & Z_{LCL} > 2000, \end{cases} \quad (3.2)$$

onde,  $w_0 = 2 cm s^{-1}$  e  $Z_{LCL}$  é a altura do LCL acima do solo (m).

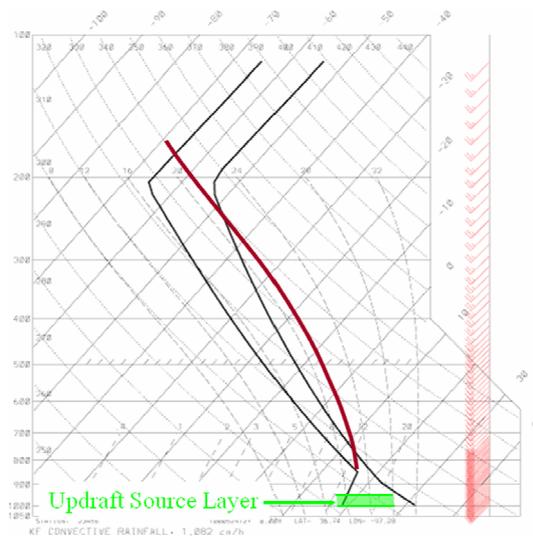


Figura 3.1 – Diagrama termodinâmico esquemático mostrando a primeira USL escolhida em verde.

Fonte: Kain e Baldwin (2006).

O uso deste termo de perturbação permite de forma eficaz eliminar a maioria das parcelas como candidatas para a convecção profunda, o que é importante para a eficiência computacional. O processo da eliminação envolve adicionar à temperatura da parcela no LCL a perturbação da temperatura computada, que é tipicamente 1-2 K, nos ambientes com movimento ascendente de fraco a moderado. Se a temperatura resultante ainda for menor do que o valor do ambiente (isto é,  $T_{LCL} + \delta T_w < T_{ENV}$ ), esta parcela então é eliminada da consideração e a base do USL é movida para um nível acima, e o teste é repetido para um novo USL potencial. Se, entretanto, a parcela perturbada está mais quente do que seu ambiente, ela passa a ser uma candidata para a convecção profunda. Nesta fase, a parcela é liberada em seu LCL com sua

temperatura original (não perturbada) e um conteúdo de umidade e uma velocidade vertical é derivada da temperatura da perturbação. Especificamente sua velocidade vertical inicial  $w_{p0}$  é baseada na equação da flutuabilidade da parcela dada por:

$$w_{p0} = 1 + 1.1 \left[ (Z_{LCL} - Z_{USL}) \delta T_{VV} / T_{ENV} \right]^{1/2}, \quad (3.3)$$

onde  $Z_{USL}$  é a altura na base do USL.

Acima do LCL, a velocidade vertical da parcela é estimada a cada nível do modelo usando o método Lagrangiano da parcela, incluindo os efeitos do entranhamento, detranhamento, e a água líquida (FRANK e COHEN, 1987; BECHTOLD et al., 2001). Se a velocidade vertical permanece positiva sobre uma profundidade que exceda uma profundidade mínima específica da nuvem (tipicamente 3-4 km), a convecção profunda é ativada usando este USL. Caso contrário, a base do USL potencial é movida para uma camada acima do modelo e o procedimento é repetido. Este processo continua até que a primeira camada apropriada da fonte seja encontrada ou até que a busca ultrapasse 300 hPa na atmosfera, onde a busca é concluída.

As nuvens convectivas rasas são ativadas quando o esquema determina que a flutuabilidade da corrente ascendente possa formar a nuvem, mas não pode impor a profundidade mínima para uma convecção profunda.

### 3.1.1.2. Formulação do fluxo de massa

As correntes ascendentes convectivas no esquema de KF são representadas usando um modelo de nuvem de estado estacionário entranhando-detranhando, onde a temperatura potencial equivalente ( $\theta_e$ ) e o vapor d'água ( $q_v$ ) são entranhados e detranhados. Neste modelo, as taxas de entranhamento e detranhamento são inversamente proporcionais, com altas taxas de entranhamento (detranhamento) que são favorecidas por elevada (baixa) flutuabilidade da parcela e ambientes úmidos (secos). Como visto na função de

disparo, a formulação da corrente ascendente pode determinar se a profundidade mínima específica da nuvem para a convecção profunda é alcançada.

As correntes descendentes convectivas são abastecidas pela evaporação de condensado que é gerado dentro da corrente ascendente. Uma fração deste condensado total torna-se disponível por evaporação dentro da corrente descendente, baseado em fórmulas empíricas para a eficiência da precipitação como uma função do cisalhamento vertical do vento e da altura da base da nuvem (ZHANG e FRITSCH 1986). Esta fração dita os valores relativos entre os fluxos de massa descendente e ascendente uma vez que outros parâmetros críticos de correntes descendentes são especificados. Estes outros parâmetros incluem os níveis de início e fim das correntes descendentes, seu perfil de umidade relativa, e as características e quantidades de ar entranhado.

A corrente descendente é especificada para iniciar no nível de mínima temperatura potencial equivalente de saturação  $\theta_{es}$  na camada de nuvem com uma mistura da corrente ascendente e do ar ambiente. Essa corrente é movida para baixo em um sentido Lagrangiano, com uma taxa de entranhamento especificada (somente entranhamento do ar ambiente) e uma umidade relativa fixa de 100% acima da base da nuvem e 90% abaixo da base da nuvem. A corrente descendente é terminada quando o ar da nuvem se torna mais quente do que seu ambiente ou quando se alcança a superfície. A parcela é forçada a detranhar no ambiente imediatamente acima do nível de terminação, tal que a profundidade mínima da camada de detranhamento é de 60 hPa.

Os fluxos de massa do ambiente são produzidos para compensar os transportes para cima e para baixo nas correntes ascendentes e descendentes, de modo que o fluxo de massa convectivo líquido em todos os níveis numa coluna seja zero.

### **3.1.1.3. Suposições do fechamento**

Em termos fundamentais, o esquema de KF rearranja massa em uma coluna usando as correntes ascendentes, descendentes e os fluxos de massa do ambiente até que pelo menos 90% da energia potencial convectiva disponível (CAPE) sejam removidos. A CAPE inicial é calculada da maneira tradicional, usando o levantamento da parcela não diluída, com as características da parcela que são aquelas da USL. A CAPE é removida pelos efeitos combinados de baixar o  $\theta_e$  na USL e de aquecer o ambiente no topo. A escala de tempo convectiva, ou o período de relaxação, são baseados na escala de tempo advectiva na camada da nuvem, com um limite superior de 1 h e um limite inferior de 0.5 h.

O método pelo qual o esquema de KF satisfaz as suposições do fechamento são descritos em Bechtold et al. (2001).

O esquema fornece as tendências convectivas da temperatura, da razão de mistura do vapor de água, e da razão de mistura da água ou gelo de nuvem.

Uma descrição completa da parametrização convectiva Kain-Fritsch é encontrada em Kain e Fritsch (1993).

### **3.1.2 Parametrização de superfície**

A cobertura vegetal e a umidade do solo têm grande influência sobre o comportamento da atmosfera nos baixos níveis e as condições físicas da superfície. Os fluxos de calor e energia à superfície são fontes para instabilidade convectiva, portanto, o bom entendimento e uma boa estimativa desses fluxos se fazem necessários para simulação de chuvas intensas.

Os modelos solo-superfície (*Land Surface Models* – LSMs) foram formulados para calcular a transferência de energia, de massa e de momento entre a atmosfera e o sistema solo-vegetação da superfície terrestre e para servirem de condição de contorno para os modelos atmosféricos, que são usados para

previsão numérica de tempo ou simulação do clima, uma vez que os modelos requerem a determinação dos fluxos de momento, radiação, vapor de água e calor sensível, abaixo da camada limite da atmosfera (figura 3.2).

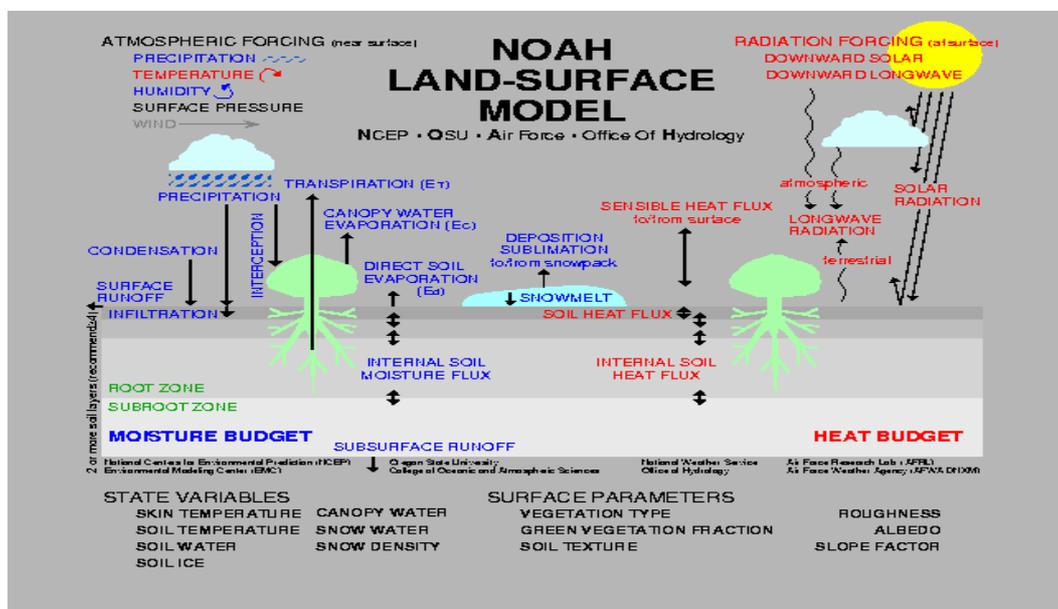


Figura 3.2 - Modelo solo superfície.

Fonte: <ftp://ftp.emc.ncep.noaa.gov/mmb/gcp/ldas/noahlsm>.

Os LSMs estão estruturados da seguinte forma:

- Dados de entrada:** a temperatura e umidade do ar a 2m, pressão à superfície, velocidade do vento, taxa de precipitação e radiação incidente (ondas curtas e longas) são usadas como condições iniciais.
- Parâmetros morfológicos:** fração de área coberta pelo dossel e pela vegetação rasteira; altura máxima da região foliar e altura mínima do dossel; profundidade e densidade das raízes e densidade de armazenamento de água em cada camada do solo são alguns dos parâmetros morfológicos considerados.
- Parâmetros físicos e fisiológicos:** as propriedades físicas da vegetação e do solo, e as propriedades morfológicas e fisiológicas da vegetação governam a interceptação da radiação e a transferência de umidade através do sistema solo-plantas. Alguns desses parâmetros são: índices de área

foliar; coeficientes de resistência estomatal; temperaturas mínima, máxima e ótima para o funcionamento estomatal; resistências impostas pelo sistema vascular da planta; resistência das raízes por unidade de comprimento; condutividade hidráulica de solo saturado; porosidade; capacidade térmica do dossel e da vegetação rasteira; coeficiente de transferência de calor/vapor da vegetação e do solo, entre outros.

### **3.1.2.1 Noah LSM**

O aumento da cooperação multidisciplinar e do conhecimento em meteorologia, hidrologia e física da planta e do solo tem aprimorado a base física da parametrização dos processos solo-superfície.

O esquema utilizado neste projeto é o Noah (NCEP-OSU-Air Force-Office of Hydrology), que considera o solo dividido em 4 camadas de profundidade 10, 30, 60 cm e 1m. Os parâmetros fornecidos são: tipo de vegetação; topografia; tipo de solo; porosidade de cada camada do solo; albedo e fração de vegetação verde. Os dados de entrada são radiação incidente, velocidade do vento, precipitação, umidade relativa do ar e temperatura do ar a 2m.

O solo utilizado pelo Eta é dividido em 9 classes, segundo Zabler (1986) de acordo com as propriedades de cada tipo de solo. Essas propriedades são definidas por diversos parâmetros (tabela 3.1) que consideram a quantidade de quartzo no solo (QTZ), o valor volumétrico do ponto de murcha permanente (WLTMSC), a difusividade do solo saturado (SATDW), a condutividade hidráulica do solo saturado (SATDK), o potencial de saturação do solo (SATPSI), o limiar a partir do qual a umidade do solo começa a controlar a evapotranspiração (REFSMC), o valor da saturação da umidade do solo (MAXSMC), a relação entre a difusividade e condutividade (F11), o limiar para solo seco quando acaba de evaporar (DRYSMC) e do parâmetro B do tipo de solo (BB).

Tabela 3.1 - Novos valores dos parâmetros do solo do modelo Eta

Tipo de solo	MAXSMC	SATPSI	SATDK	BB	QTZ	REFSMC	WLTSMC	DRYSMC	SATDW	F11
1	0.16	0.27	4.28E-07	2.03	0.60	0.03	0.08	0.08	1.48E-06	-0.21
2	0.19	0.10	8.22E-07	2.78	0.25	0.04	0.16	0.16	1.21E-06	-1.00
3	0.19	0.25	1.69E-06	3.03	0.25	0.07	0.32	0.32	6.68E-06	-0.77
4	0.29	0.11	1.40E-05	2.25	0.60	0.05	0.11	0.11	1.16E-05	-0.17
5	0.29	0.09	9.45E-06	2.62	0.45	0.06	0.19	0.19	7.60E-06	-0.47
6	0.30	0.05	9.18E-06	3.02	0.25	0.06	0.27	0.27	4.90E-06	-0.88
7	0.37	0.09	7.70E-05	1.97	0.82	0.04	0.07	0.07	3.85E-05	0.13
8	0.38	0.04	3.43E-05	2.53	0.25	0.05	0.18	0.18	9.35E-06	-0.45
9	0.36	0.02	5.02E-05	2.98	0.25	0.05	0.27	0.27	7.32E-06	-1.05
10	0.32	0.43	1.71E-05	2.13	0.60	0.09	0.12	0.12	4.85E-05	0.58
11	0.32	0.4	5.28E-06	2.44	0.35	0.10	0.20	0.20	1.61E-05	0.40
12	0.30	0.22	3.46E-06	2.90	0.25	0.10	0.26	0.26	7.22E-06	-0.17
13	0.37	0.6	2.05E-05	2.01	0.60	0.12	0.11	0.11	6.77E-05	0.91
14	0.37	0.5	6.96E-06	2.42	0.10	0.13	0.20	0.20	2.30E-05	0.65
15	0.40	0.13	4.95E-05	2.97	0.10	0.11	0.28	0.28	4.95E-05	-0.05
16	0.31	0.93	3.64E-06	2.81	0.10	0.16	0.20	0.20	3.06E-05	0.54
17	0.42	1.29	1.06E-05	1.84	0.25	0.18	0.12	0.12	6.05E-05	1.41
18	0.39	0.84	6.55E-06	2.30	0.10	0.16	0.19	0.19	3.28E-05	0.98

O mapa de solo utilizado neste trabalho será o desenvolvido por Tomasella e Moira (2008) com base nas informações sobre perfis de solo da base de dados de solo CPTEC/INPE, que contém informações da Argentina, Brasil, Paraguai e Uruguai. Foram selecionados 3 parâmetros hidrológicos, que caracterizam os solos e 3 intervalos para cada variável e a combinação deles resultou em 27 tipos de solo. No entanto, algumas combinações foram descartadas, por não existir solo representativo para tal combinação e outras agrupadas em classes próximas por estar em pequena quantidade. Portanto, o novo mapa consiste de 18 tipos de solos e as médias dos valores dos parâmetros requisitados pelo modelo (tabela 3.1) foram calculadas com base no perfil do solo da base de dados.

O novo mapa é distribuído em uma grade de 0,25° x 0,25° (figura 3.3) e para completar as regiões onde não foi possível obter informações foi utilizado o mapa de solo STATSGO/FAO, desenvolvido pelo *National Center for Atmospheric Research* (NCAR).

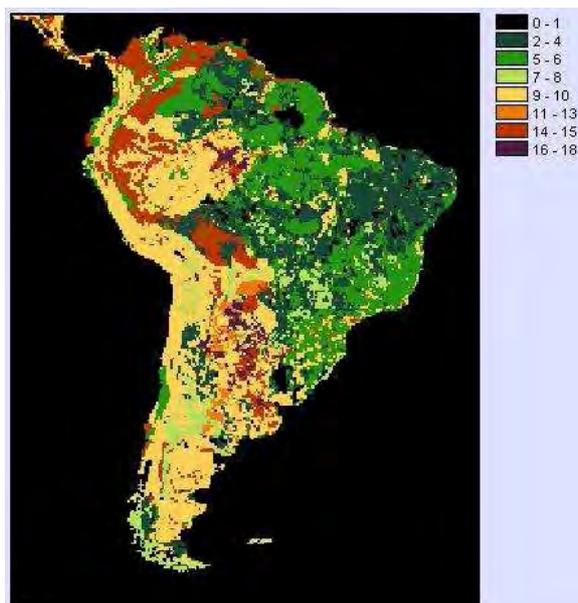


Figura 3.3 - Novo mapa de solos para a América do Sul incorporado no modelo Eta com os tipos de solo (1 a 18) conforme dados da tabela 3.1.  
Fonte: Tomasella e Moira (2008).

O mapa de vegetação utilizado será o do projeto PROVEG (Atualização da Representação da vegetação nos Modelos Numéricos do CPTEC). O mapa origina de dados do projeto RADAMBRASIL e do Instituto Brasileiro de Geografia Estatística (IBGE) (Projeto RADAMBRASIL, 1978; IBGE, 1992), com os seguintes tipos de cobertura:

Tabela 3.2 - Tipos de cobertura de uso do solo.  
 Fonte: adaptado de Dorman e Sellers,1989.

0	Oceano
1	árvores latifoliadas perenes (floresta tropicais)
2	árvores latifoliadas decíduas
3	árvores latifoliadas/aciculadas (floresta mista)
4	árvores aciculadas (perenes)
5	árvores aciculadas (decíduas)
6	árvores latifoliadas com cobertura arbustiva/herbácea (savana)
7	gramíneas e herbáceas (perene)
8	arbustos latifoliados com cobertura herbácea perene
9	arbustos latifoliados com solo exposto
10	árvores anãs e arbustos com cobertura herbácea (tundra)
11	solo exposto
12	cultivos

Os parâmetros dependentes dos tipos de vegetação são: albedo, comprimento de rugosidade, percentagem de cobertura da vegetação, número de camadas do solo alcançadas por raízes de cima para baixo, resistência estomatal, parâmetro da resistência do dossel associada com a radiação, coeficiente usado no déficit da pressão de vapor e limiar da profundidade de neve por cima da qual a cobertura é 100 %.

### 3.2 Dados e experimentos

No presente trabalho serão analisados 2 casos de precipitação intensa na cidade de São Paulo, que causaram diversos transtornos à população, com deslizamentos e inundações. Os casos a serem estudados ocorreram em fevereiro de 2008 e março de 2009. Os sistemas convectivos e o ambiente onde se formaram serão analisados posteriormente através de imagens de satélites, dados observados e reanálises do ERA Interim, com resolução espacial de 1,5°.

A precipitação será analisada através da análise de precipitação gerada pelo CPTEC/INPE, na grade de 40km baseada em dados observados à superfície de algumas estações meteorológicas e através da precipitação estimada pelos sensores do satélite TRMM.

Os casos serão simulados utilizando o modelo Eta durante 132 horas de integração. O domínio será o mesmo do projeto Serra do Mar (figura 3.4). A grade é centrada em 45.5° W e 23.0° S com resolução horizontal de 5 km e 50 níveis na vertical.

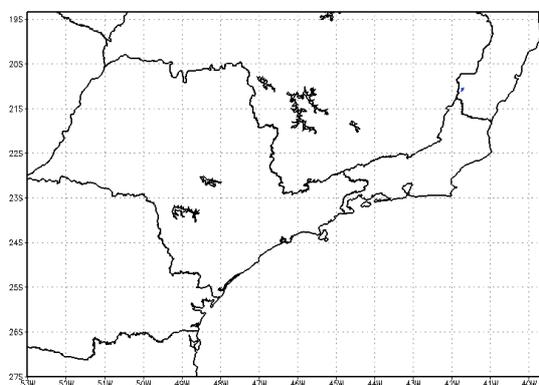


Figura 3.4 - Região de domínio das simulações.  
Fonte: <http://serradomar.cptec.inpe.br>

### 3.2.1 Simulação controle

Na simulação controle foi utilizado o esquema de convecção KF, com a inclusão do fluxo de momentum (BASTOS, 2007) e com o ajuste no parâmetro de partição da água condensada produzida pela parametrização convectiva em precipitação, evaporação e água líquida deixada no ponto de grade realizado por Gomes (2009). A microfísica utilizada foi a de Ferrier (2002).

O mapa de solo foi o de Tomasella e Moira (2008) com dados observados de umidade do solo inicial; e o mapa de vegetação do PROVEG, ainda sem a identificação das áreas urbanas (figura 3.5).

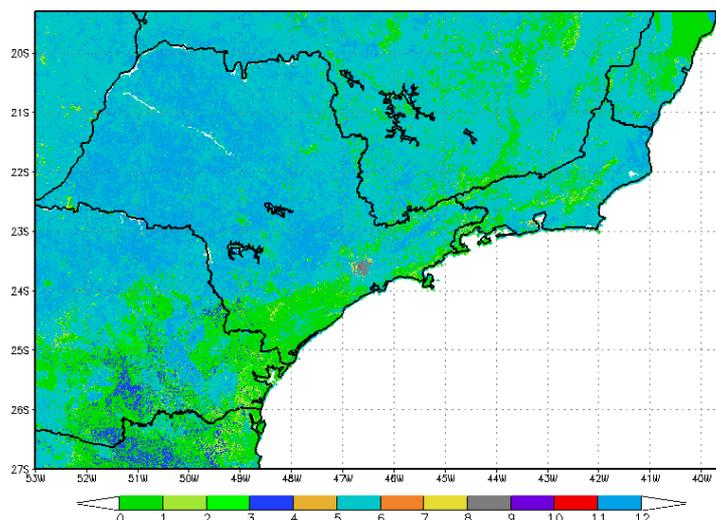


Figura 3.5 - Mapa de vegetação para a região de estudo mostrando os tipos de vegetação da tabela 3.2.

Os dados do ERA INTERIM (SIMMONS Et al., 2006) foram usados como condição inicial e de contorno, portanto as integrações consistem em simulações.

Essa simulação controle será comparada com simulações experimentais cujas configurações são descritas nas seções seguintes.

### 3.2.2 Mudanças no mapa de vegetação

Neste experimento foi utilizado o mapa de vegetação do PROVEG com a inclusão da vegetação urbana (criando um 13º tipo na tabela 3.2) no domínio da simulação, para analisar o efeito na circulação local e regional. A localização do tipo urbano foi realizada utilizando o mapa produzido por Vieira et al. (2010) (figura 3.6) o que resultou em um mapa com 13 tipos de vegetação, sendo o 13º o tipo urbano (figura 3.7) e os parâmetros associados a esse tipo de vegetação foram retirados da *U.S. Geological Survey* (USGS) (tabela 3.3).

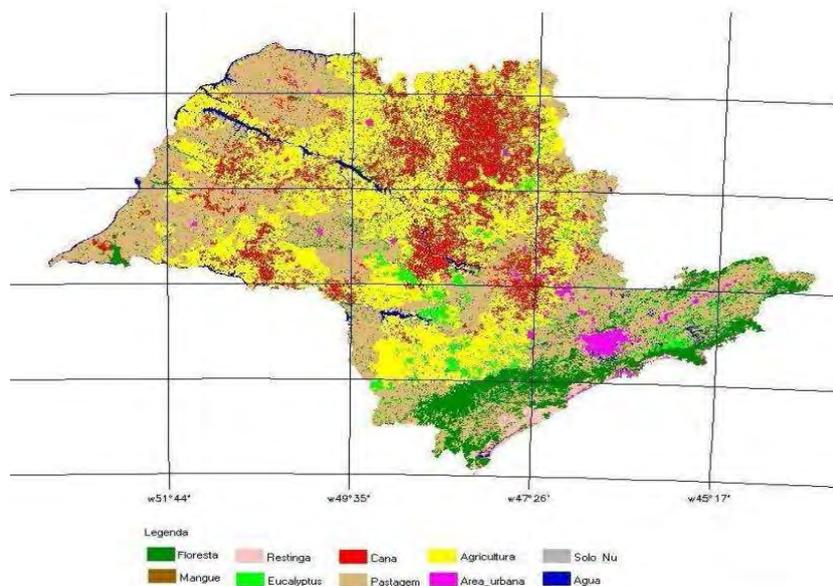


Figura 3.6 – Mapa de uso e cobertura da terra do Estado de São Paulo (tipo urbano representado pela cor rosa).  
Fonte: Vieira et al. (2010).

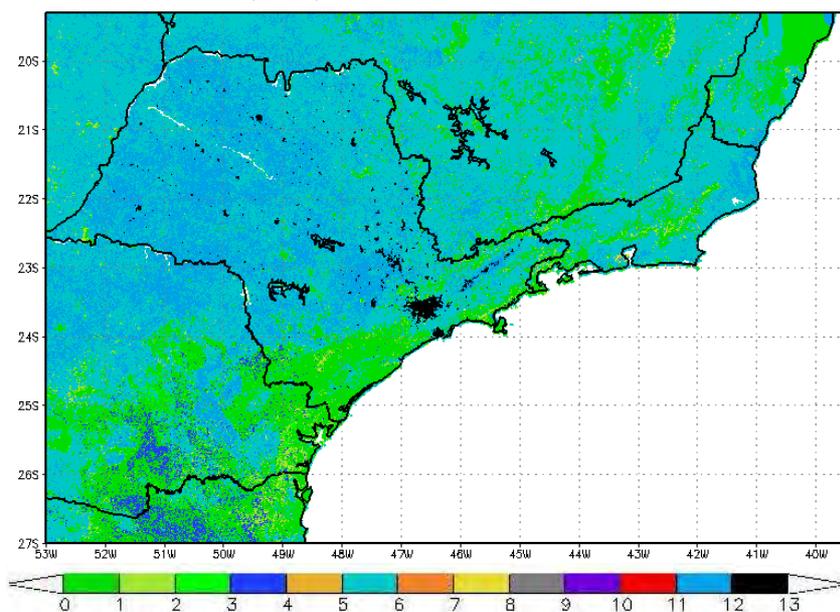


Figura 3.7 - Mapa de vegetação para a região de estudo mostrando os 12 tipos de vegetação da tabela 3.2 e o tipo urbano (em preto).

Tabela 3.3 - Tabela com os parâmetros do tipo urbano da USGS.

Tipo de vegetação	NROOT	RSMTBL	RGLTBL	HSTBL	SNUP	Z <sub>0</sub>	LAI
Urbana	1	200	100	42	0.020	1	4

NROOT – número de camadas do solo ocupadas por raízes;

RSMTBL – resistência estomatal;

RGLTBL – parâmetro usado no termo da radiação solar da função de resistência do dossel;

HSTBL - parâmetro usado no termo da radiação solar da função de resistência da pressão de vapor;

SNUP – profundidade da neve;

$Z_0$  – rugosidade;

LAI – índice de área foliar.

### **3.2.3 Mudanças na parametrização convectiva**

O mesmo esquema de superfície e mapa de vegetação da simulação controle foram utilizados nestes experimentos, onde são realizados testes de sensibilidade com parâmetros de disparo do esquema de parametrização de convecção KF, tais como:

- Redução da profundidade da camada fonte de corrente ascendente (USL) que é de 50 para 30 e 10 hPa. Com isso espera-se que as características da superfície sejam melhor representadas.
- Redução da velocidade vertical do valor inicial ( $c(z)$ ) para zero fazendo

com que a perturbação da temperatura ( $\delta T_{VV}$ ) seja um pouco maior e

dependa somente da velocidade vertical ( $w_g$ )

Essas modificações visam aumentar a flutuabilidade da parcela com o objetivo de verificar se o esquema é capaz de produzir mais convecção no local do evento e mais próximo do horário.

### 3.2.4 Mudanças no mapa de vegetação e na parametrização convectiva KF

Este experimento utiliza os testes do experimento 1 e 2, ou seja, com a inclusão da vegetação urbana e com o esquema de convecção modificado, para avaliar se a formação e desenvolvimento dos sistemas convectivos são bem representados pelo modelo, para a região de estudo.

### 3.2.5 Análise dos resultados

A análise dos experimentos é feita através dos campos de precipitação, vento a 10m e temperatura do ar e do ponto de orvalho a 2m. As simulações são comparadas com os dados do Era Interim e dados de precipitação observados.

Para avaliar a destreza do modelo nos casos estudados foram utilizados os índices estatísticos: raiz do erro quadrático médio (REQM) (3.4) da temperatura em 850hPa utilizando o dado do ERA Interim como base e para avaliar a precipitação em relação a estimada pelo satélite TRMM foi utilizado o ETS normalizado (*Equitable Threat Score*) (3.5).

Considerando um número de observações N:

$$REQM = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_1^N (S_i - A_i)^2} \quad (3.4)$$

S: indica o valor simulado da variável;

A: indica o valor observado da variável.

O ETS foi definido como (3.5):

$$ETS = \frac{H - CH}{F + O - H - CH} \quad (3.5)$$

onde:

$$CH = \frac{FO}{N}$$

F: número de pontos com simulação de precipitação acima do limiar;

H: número de pontos com simulação correta acima do limiar;

O: número de pontos onde foi observada precipitação acima do limiar;

N: número de pontos de grade no domínio de verificação.

O ETS varia de 0 a 1 indicando uma previsão perfeita quando é igual a 1. No intuito de minimizar a deficiência que o ETS tem devido a dependência com o BIAS, Mesinger (2008) sugeriu a utilização do ETS normalizado, que será utilizado neste trabalho.

## 4. RESULTADOS

O estudo de dois casos de precipitação convectiva intensa está dividido em: análise do caso a partir de dados observados e uma breve descrição sinótica, análise de campos simulados pelo modelo com comparação entre as simulações experimentais e a simulação controle e avaliações estatísticas utilizando dados observados. O primeiro caso será estudado mais detalhadamente a seguir, enquanto o segundo será utilizado para verificar a coerência dos resultados encontrados no primeiro caso.

### 4.1 Caso fevereiro de 2008

A descrição a seguir das áreas atingidas por chuvas intensas permitirão posteriormente verificar a localização destas chuvas nas simulações numéricas.

Nos dias 10, 11 e 12 de fevereiro, ocorreram temporais no leste e nordeste de SP e no sul do RJ que causaram prejuízos econômicos e transtornos para população. As medidas de precipitação à superfície e a precipitação estimada pelo satélite TRMM mostram que entre os dias 9 e 10 de fevereiro já havia um núcleo de precipitação mais intensa sobre a região sul do RJ (figura 4.1b) e parte nordeste de SP (figuras 4.1a e b).

No dia 10, uma chuva intensa atingiu São José dos Campos – SP (localização indicada na figura 4.1d) por volta das 18Z e outra chuva atingiu a capital Fluminense, no Rio de Janeiro entre 18 e 21Z, como pode ser visto nos dados observados à superfície (figura 4.1c) e mais detalhadamente na precipitação estimada pelo TRMM (figura 4.1d). Segundo o jornal O Globo, no Estado de São Paulo, 45 árvores caíram em São José dos Campos, 6 bairros ficaram sem energia e o congestionamento chegou a 3 quilômetros na Rodovia dos Tamoios devido ao alagamento na ponte que passa sobre o rio Jambeiro. No

Rio de Janeiro, 8 bairros do município e 5 cidades da baixada Fluminense ficaram sem luz e em Nova Iguaçu (baixada Fluminense) ocorreu queda de granizo.

No dia 11, uma forte chuva atingiu o ABC Paulista, o Litoral de São Paulo e ocorreu de forma isolada no Vale do Paraíba entre 18 e 21Z, como mostra a precipitação estimada pelo satélite (figura 4.1f). Neste dia os dados observados à superfície (figura 4.1e) não mostram a chuva no litoral de SP, provavelmente devido à ausência de observações neste local, no entanto, os dados observados assim como o estimado mostram uma forte precipitação no RJ, que ocorreu entre 21Z do dia 11 e 03Z do dia 12.

No dia 12, houve chuva forte em Resende e temporais com queda de granizo em Mogi das Cruzes e Cachoeira Paulista entre 21Z do dia 12 e 03Z do dia 13 (figuras 4.1g e h). Segundo a estação de Campos do Jordão-SP do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), o acumulado de precipitação foi de 58 mm, entre a noite do dia 12 e a madrugada do dia 13. No dia 13, em torno de 21Z um núcleo precipitação intensa atingiu o vale do Paraíba (figura 4.1j).

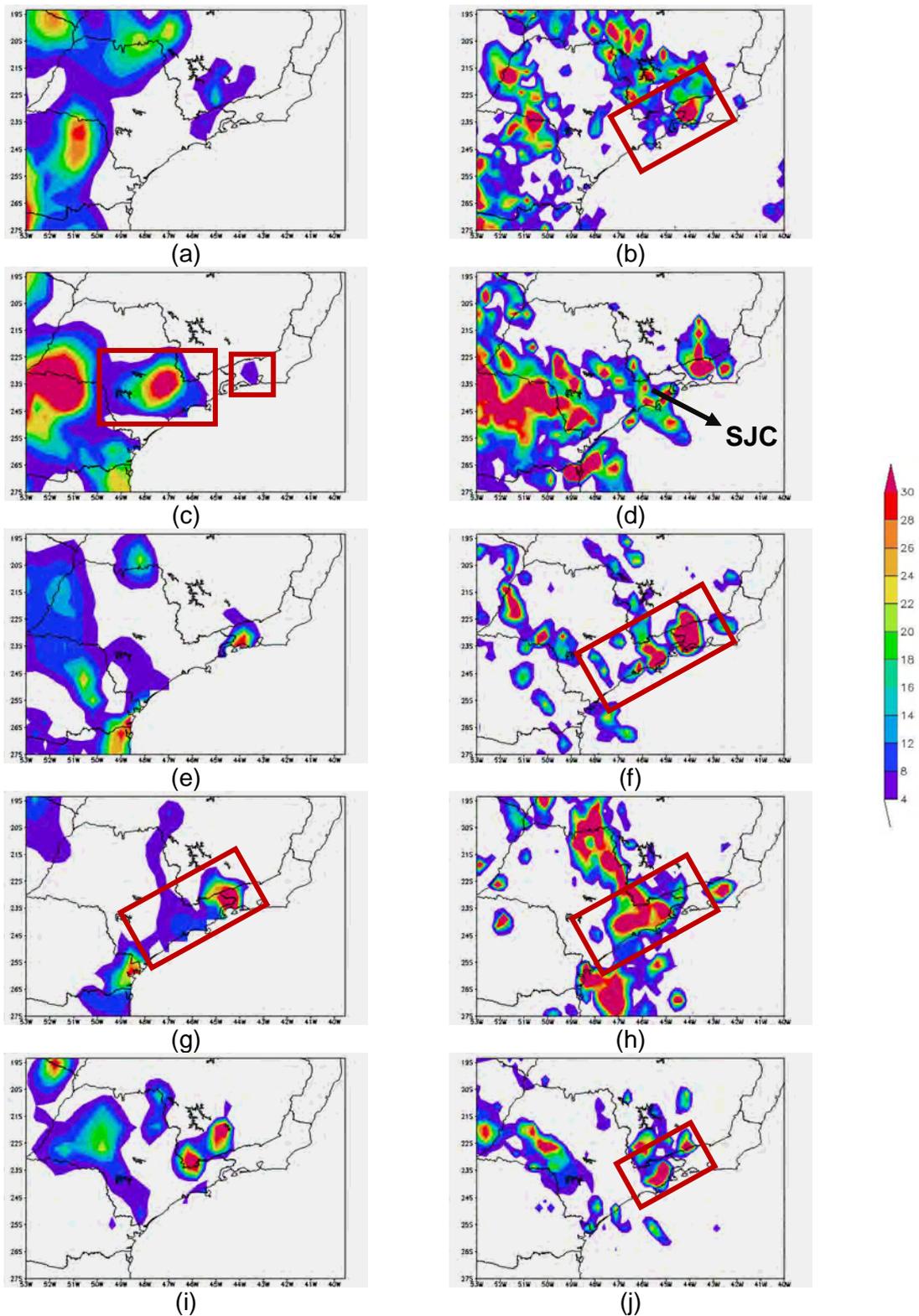


Figura 4.1 - Precipitação observada à superfície (coluna da esquerda) e estimada pelo satélite TRMM (coluna da direita), acumulada em 24h das 12Z do dia anterior até as 12Z

do dia 10 (a) e (b), 11 (c) e (d), 12 (e) e (f), 13 (g) e (h) e 14 (i) e (j) de fevereiro de 2008.

#### 4.1.1 Descrição Sinótica

Para analisar os temporais ocorridos neste período, uma breve descrição sinótica é apresentada a seguir através de campos e imagens de satélite das 18Z que é, aproximadamente, o horário de início da precipitação convectiva.

Durante o período em estudo, havia um sistema frontal atuando no oceano e sobre o litoral da região sul do Brasil como mostra a extensa banda de nebulosidade (de tonalidade cinza), na imagem de satélite (figura 4.2a), que está associada ao sistema representado na carta de superfície do mesmo horário (figura 4.2b). Essa situação sinótica mostra que os eventos extremos ocorridos nesse período nos Estados de SP e RJ não foram provocados pelo sistema frontal, portanto sua formação ocorreu predominantemente devido a fatores dinâmicos e termodinâmicos locais (forçantes locais).

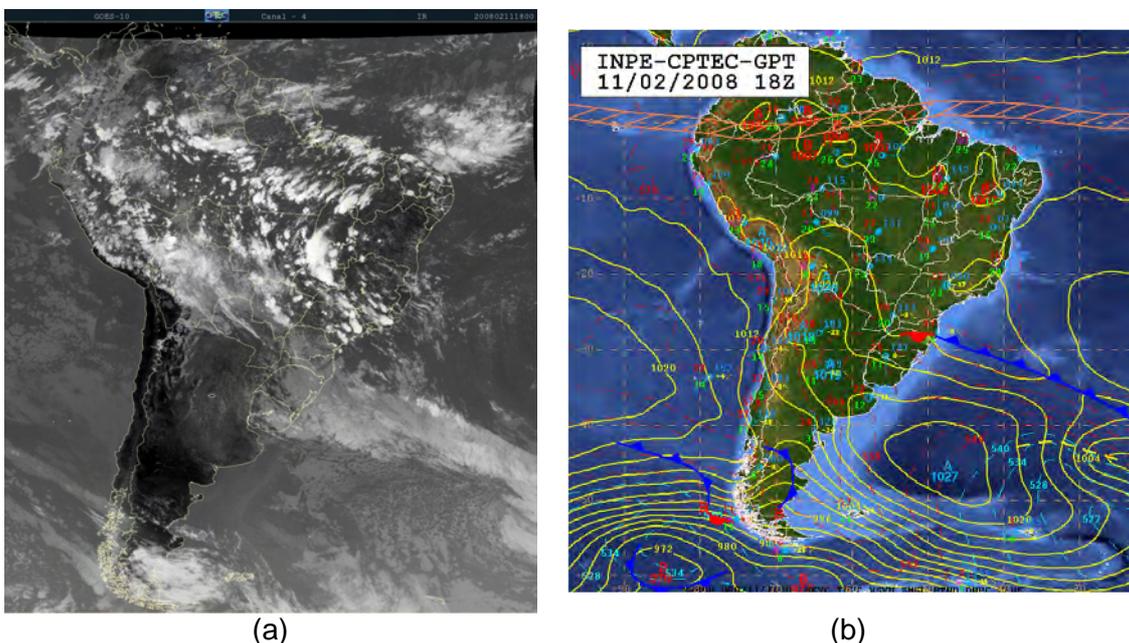


Figura 4.2 - (a) Imagem do satélite GOES-10 no canal infravermelho e (b) carta de superfície para o dia 11 de fevereiro de 2008 às 18Z.

Nas imagens de satélite dos dias 10, 11 e 12 (Figuras 4.3a, b e c) é possível observar, nos horários de maior convecção a intensidade das células que se formaram. Os tons em vermelho indicam topos de nuvem muito frios,

comprovando o grande desenvolvimento vertical e salientando o formato arredondado que também indica uma nuvem do tipo cúmulos congestus. Já os tons em verde indicam nuvens entre médias e altas, com topo mais baixo, mas que também podem estar associadas à chuva, geralmente com menor intensidade.

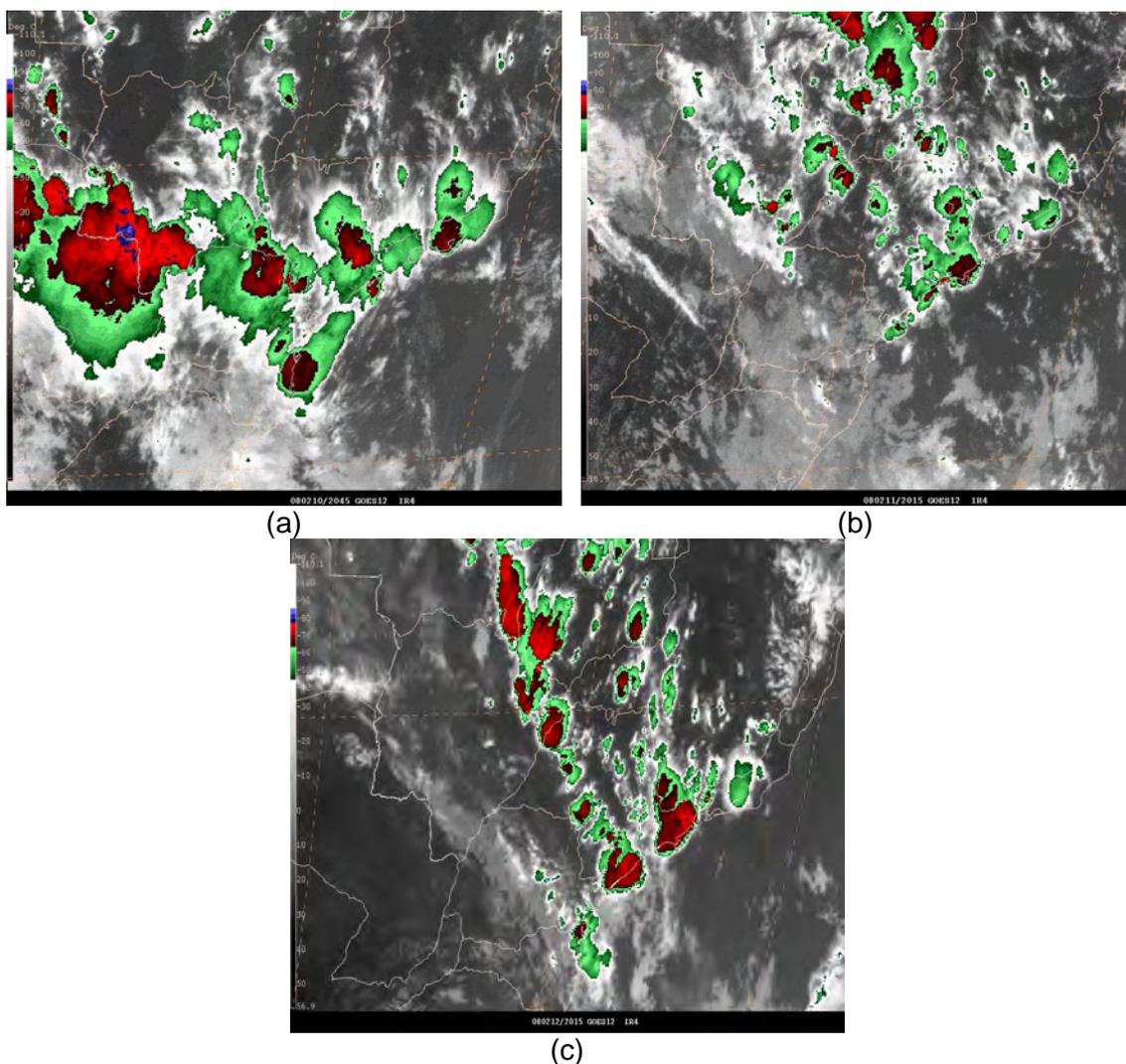


Figura 4.3 - Imagem do satélite GOES-12 realçada no canal infravermelho do dia (a) 10 às 20:45Z, (b) do dia 11 às 20:15Z e (c) do dia 12 às 20:15Z.

Em superfície, a reanálise da pressão ao nível médio do mar, mostra no dia 10 um cavado no litoral do RJ e SP (figura 4.4a) associado a um centro de baixa pressão no oceano, próximo ao litoral de Santa Catarina. Este centro se desintensifica nos dias seguintes e o passa a se posicionar no litoral de São

Paulo no dia 11 (figura 4.4b). Nos dias 11 e 12 nota-se um cavamento das pressões a leste da Região Sul do país (figuras 4.4b e c).

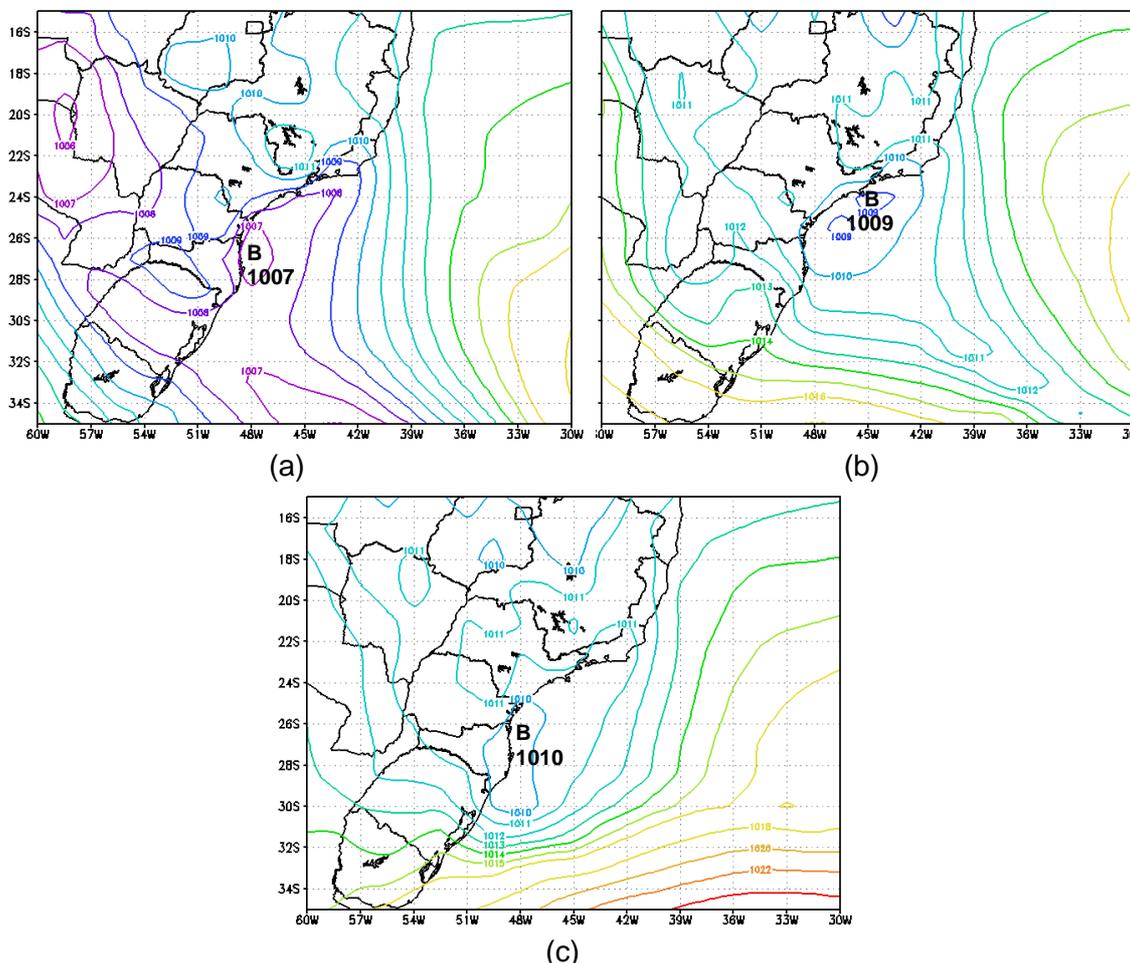


Figura 4.4 - Pressão ao nível médio do mar (hPa) às 18z para os dias (a) 10, (b) 11 e (c) 12 de fevereiro de 2008. Dados de reanálise ERA Interim.

O vento em 500 hPa mostra um escoamento de noroeste sobre SP devido ao posicionamento do anticiclone com centro entre RJ e ES no dia 10 (figura 4.5a), que se desintensifica nos dias 11 e 12 e se desloca para oeste formando uma zona de transição entre o escoamento anticiclônico sobre MG e o escoamento ciclônico sobre a região Sul (figuras 4.5b e c).

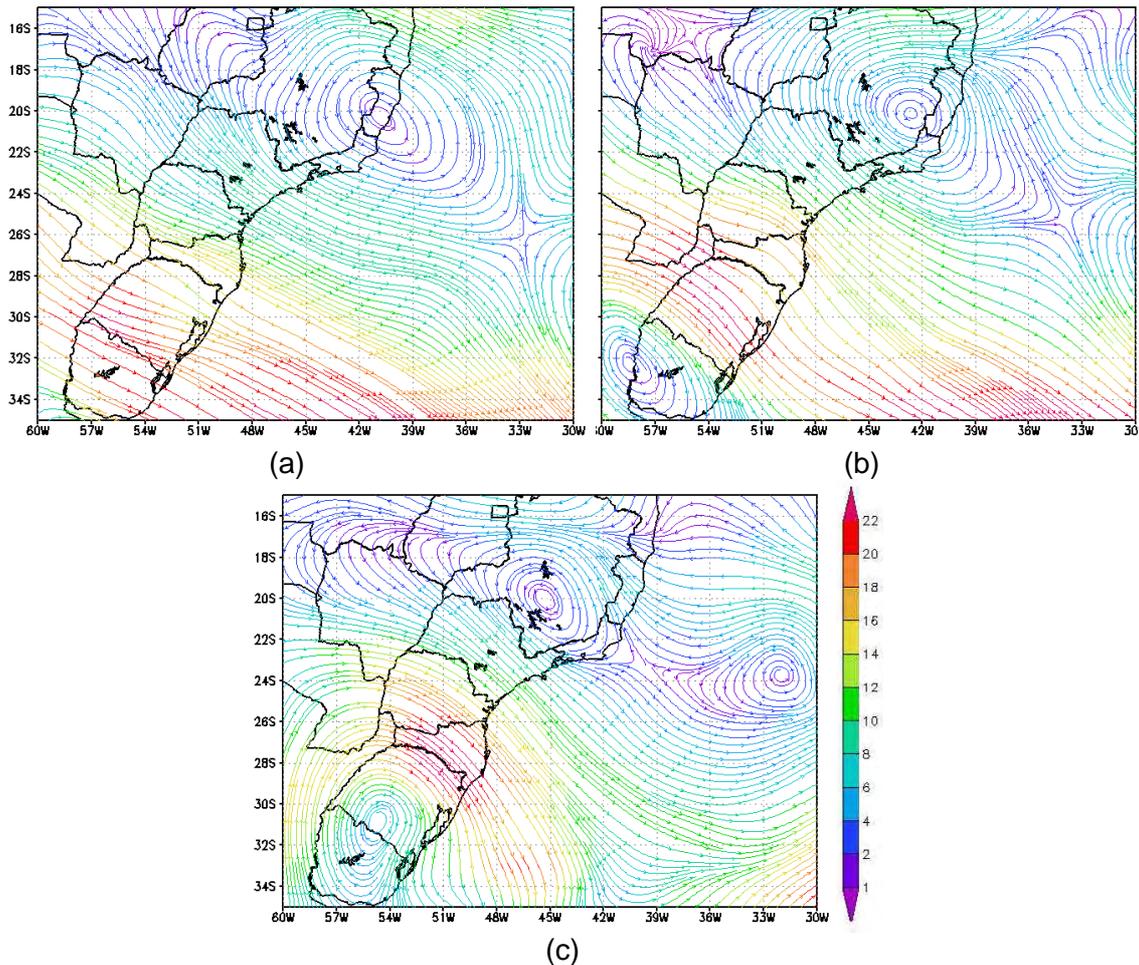


Figura 4.5 - Vento (m/s) em 500 hPa às 18z para os dias (a) 10, (b) 11 e (c) 12 de fevereiro de 2008. Dados de reanálise ERA Interim.

A circulação anticiclônica encontrada em 500 hPa é mantida em 200 hPa (figura 4.6). No dia 11 a circulação anticiclônica sobre São Paulo (figura 4.6b) está associada ao centro de baixa pressão de 1009 hPa no litoral de SP neste mesmo horário (figura 4.4b). Uma forte difluência é encontrada no dia 12, a leste de SP (figura 4.6c). A difluência em altos níveis intensifica a convergência de massa em níveis baixos, o que favorece a formação da convecção profunda.

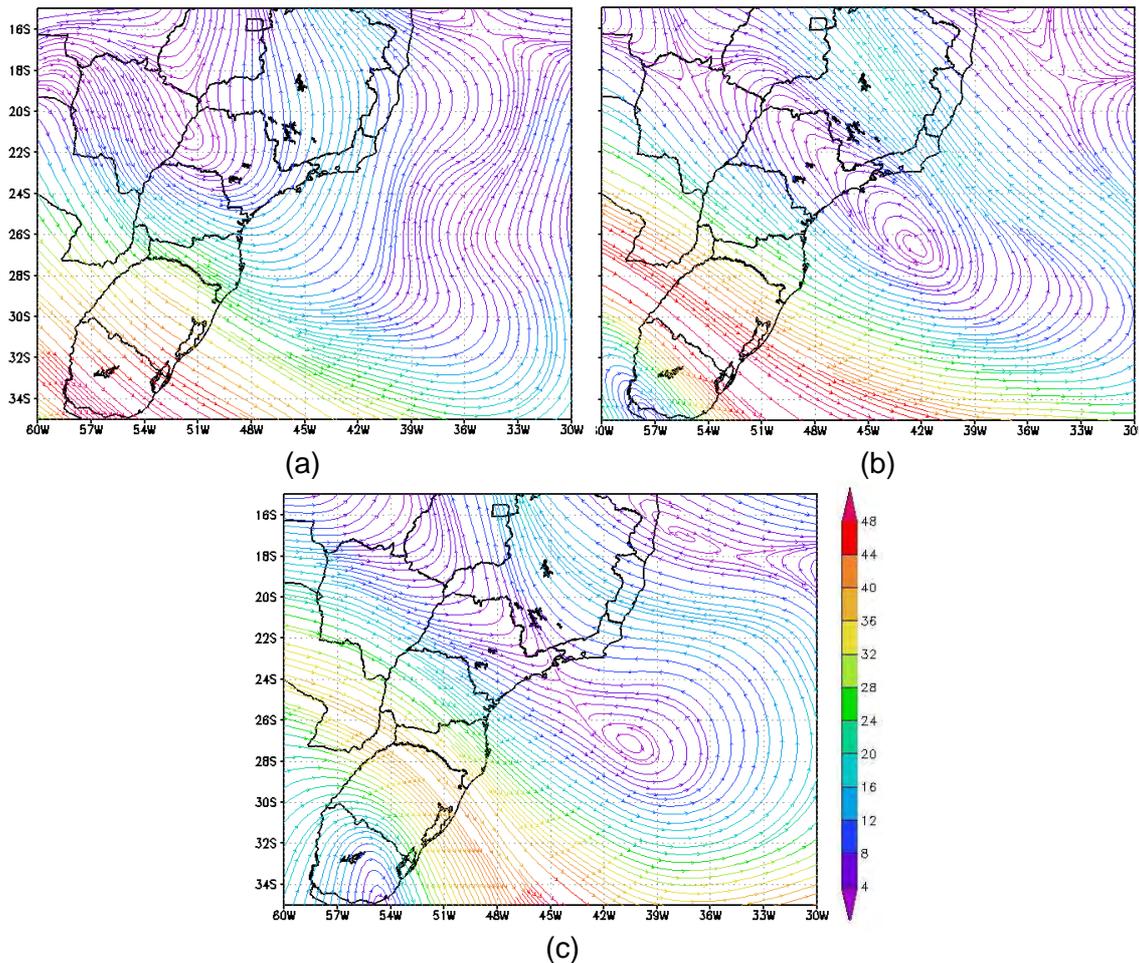


Figura 4.6 - Vento (m/s) em 200 hPa às 18z para os dias (a) 10, (b) 11 e (c) 12 de fevereiro de 2008. Dados de reanálise ERA Interim.

#### 4.1.2 Simulações numéricas

Neste trabalho foram realizadas simulações utilizando o modelo Eta para verificar a contribuição de alguns processos envolvidos na formação de sistemas convectivos na região da Serra do Mar Paulista. Portanto, foram produzidos: uma simulação controle, como referência para comparação, experimentos com mudanças no mapa de vegetação, experimentos com mudanças na parametrização convectiva KF e por fim um experimento com as mudanças simultâneas no mapa de vegetação e no esquema KF. Os impactos dessas simulações sobre a precipitação e algumas variáveis atmosféricas serão analisados e comparados com a simulação controle.

#### 4.1.2.1 Simulação controle

O campo de pressão ao nível médio do mar simulado pelo modelo mostra no dia 10 um cavado no litoral de SP e RJ associado a uma baixa pressão de 1006 hPa localizada no litoral do PR e SC (figura 4.7a). Esse cavado se desintensificou e no dia 11 formou um centro de baixa pressão de 1008 hPa no RJ (figura 4.7b), que persistiu no dia 12, quando outro núcleo de baixas pressões em torno de 1009hPa se formou próximo ao litoral de SP (figura 4.7c). Este campo está coerente com os dados do ERA INTERIM, porém mais detalhado devido à alta resolução da topografia, costa e tamanho da grade da simulação.

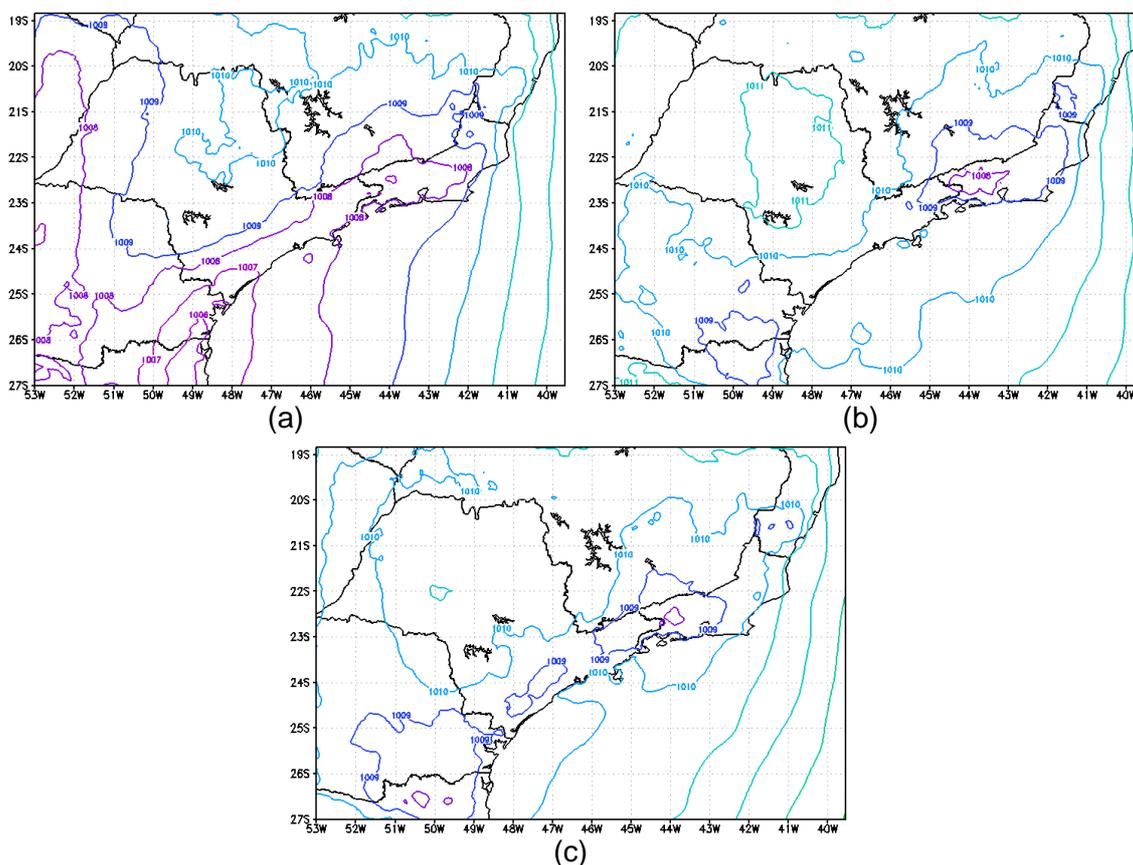


Figura 4.7 - Pressão ao nível médio do mar (hPa) da simulação controle às 18z para os dias (a) 10, (b) 11 e (c) 12 de fevereiro de 2008.

Neste trabalho, somente a precipitação produzida pela parametrização convectiva será analisada, pois o foco deste trabalho está em estudar os sistemas puramente convectivos como este caso. Além disso, ao analisar a

precipitação total simulada pelo modelo na simulação controle encontrou-se que praticamente toda precipitação foi produzida pela parametrização convectiva.

A precipitação convectiva simulada, acumulada em 24h do dia 10 às 12Z até o dia 11 (figura 4.8a), quando comparada com os dados observados e estimados (figura 4.1c e d), mostra que o modelo conseguiu reproduzir bem o núcleo mais intenso na fronteira de SP e PR e outro menor próximo a Capital Paulista (destacado pelo quadro vermelho), no entanto, a precipitação que ocorreu na capital Fluminense não foi bem simulada.

O modelo simulou um núcleo mais intenso no litoral do PR e SC entre os dias 11 e 12 (figuras 4.8b e c), o que está de acordo com os dados observados do CPTEC (figura 4.1e). Com relação aos temporais ocorridos no litoral de SP, Vale do Paraíba e RJ (figura 4.1f), embora o modelo tenha indicado precipitação para esta região, os valores estão bem abaixo do observado.

A precipitação convectiva acumulada entre os dias 12 e 13 (figura 4.8c) manteve a chuva no litoral do PR e SC e identificou alguns núcleos na Capital Paulista, Vale do Paraíba e Sul do RJ (Resende), no entanto, esses núcleos menores ainda apresentam valores bem abaixo do observado (figuras 4.1g e h).

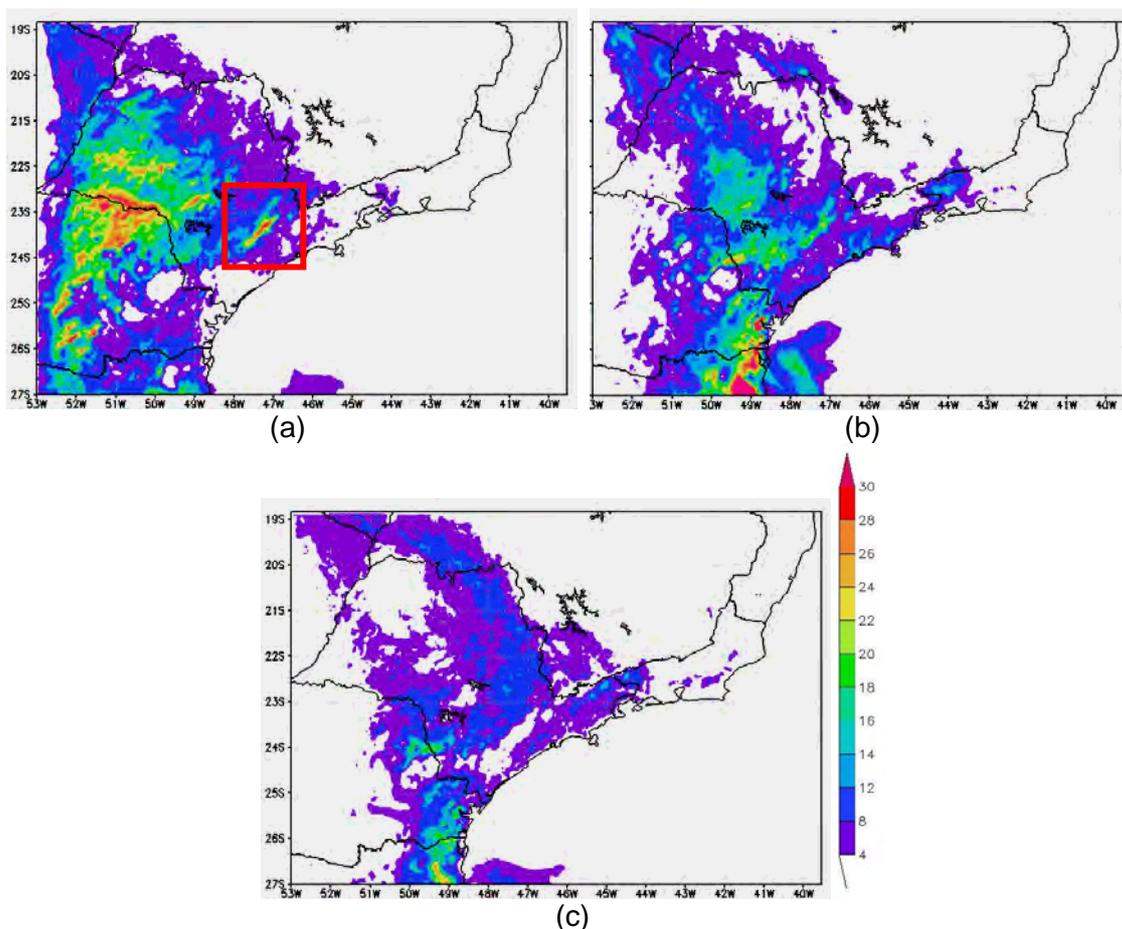


Figura 4.8 - Precipitação convectiva (mm) da simulação controle acumulada em 24h das 12Z do dia anterior até as 12Z do dia (a) 11, (b) 12 e (c) 13 de fevereiro de 2008.

#### 4.1.2.2 Mudanças no mapa de vegetação

A inclusão da vegetação urbana no mapa de vegetação e dos parâmetros relativos a esse tipo de vegetação é feita no intuito de aumentar o gradiente de temperatura entre locais muito urbanizados como SP, por exemplo, que sofre o efeito da ilha de calor urbano e as regiões ao redor. Com isso espera-se que a circulação local seja melhor representada fazendo com que os ventos se intensifiquem e que haja uma maior formação de precipitação convectiva no local.

A figura 4.9 mostra a precipitação convectiva acumulada em 24h dos dias 11, 12 e 13 para este experimento com o novo mapa, na coluna da esquerda e a

diferença da precipitação convectiva entre este experimento e a simulação controle. As áreas em amarelo indicam aumento da chuva com o novo mapa.

A precipitação convectiva deste experimento acumulada entre os dias 10 e 11 manteve um núcleo mais intenso entre SP e PR e outro próximo a Capital (figura 4.9a), no entanto, esses núcleos diminuíram de intensidade em relação à simulação controle (quadro vermelho da figura 4.9b), mas entre eles houve um aumento da precipitação, assim como no litoral e na parte Norte-Nordeste do Estado de SP (figura 4.9b). Entre os dias 11 e 12 a precipitação aumentou no litoral de SP e Vale do Paraíba e diminuiu no interior de SP (figuras 4.9c e d), o que está de acordo com os dados observados, que mostram forte precipitação no litoral de SP e Vale do Paraíba e ausência de precipitação no interior do Estado (figura 4.1f).

O acumulado de precipitação entre os dias 12 e 13 deste experimento registrou um aumento da precipitação na Capital de SP (figuras 4.9e e f), onde de acordo com o observado ocorreu uma forte precipitação (figura 4.1h).

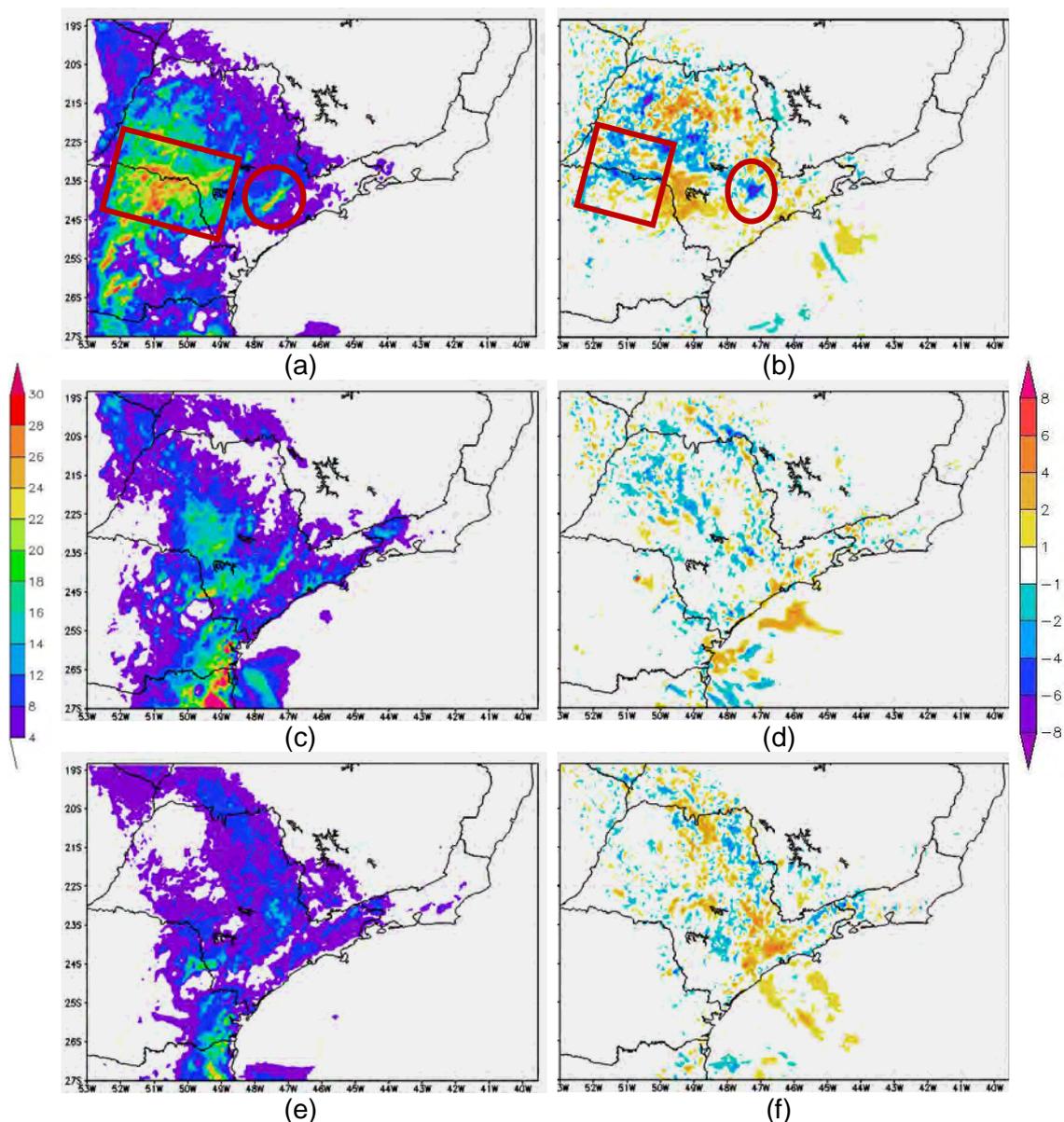


Figura 4.9 - Precipitação convectiva (mm) do experimento com a vegetação urbana (coluna da esquerda) e diferença entre o experimento e a simulação controle (coluna da direita), acumulada em 24h das 12Z do dia anterior até as 12Z do dia (a e b) 11, (c e d) 12 e (e e f) 13 de fevereiro de 2008.

Duas pequenas áreas foram escolhidas: uma localizada na Capital Paulista (latitude: 23,6°S - 23,5°S e longitude: 46,6°W - 46,5°W) (figura 4.10 - RMSP), onde o tipo de vegetação urbana predomina (figura 3.7) e outra localizada no litoral (latitude: 24,0°S - 23,9°S e longitude: 46,6°W - 46,5°W) (figura 4.10 - litoral) para acompanhar a evolução temporal da temperatura do ar a 2m, temperatura do ponto de orvalho a 2m, componente meridional do vento a 10m,

precipitação convectiva e fluxos de calor sensível e latente e comparar com a simulação controle.

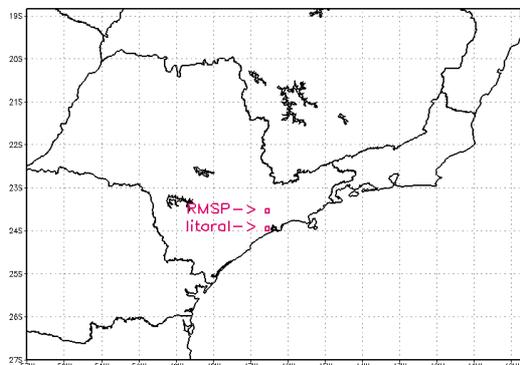


Figura 4.10 - Áreas escolhidas (quadro vermelho).

A média da temperatura a 2m na RMSP é maior (em torno de 1° a 2°C) no experimento com a inclusão da vegetação do que na simulação controle durante todo o tempo de integração (figura 4.11a). A temperatura do ponto de orvalho a 2m diminui, ou seja, a umidade do ar próximo a superfície é menor no experimento com a vegetação urbana (figura 4.11b) e a precipitação convectiva é maior em alguns momentos (figura 4.11c).

O fluxo de calor sensível é maior no experimento com a vegetação urbana do que na simulação controle (figura 4.11d) o que reflete no aumento da temperatura encontrado, enquanto o fluxo de calor latente é menor (figura 4.11e). O sinal negativo dos fluxos significa que eles estão saindo da superfície.

Os resultados encontrados são esperados quando a vegetação urbana é incluída, pois entre os parâmetros associados a esse tipo de superfície está a resistência estomatal, que é um parâmetro fisiológico no qual a planta pode facilitar ou dificultar a difusão de vapor, e no caso urbano essa resistência é grande, ou seja, no tipo de vegetação urbana há menos evaporação, portanto é esperado que o fluxo de calor latente seja menor, assim como a umidade próximo a superfície. E se há menor evaporação, a superfície se resfria menos causando o aumento da temperatura e do fluxo de calor sensível.

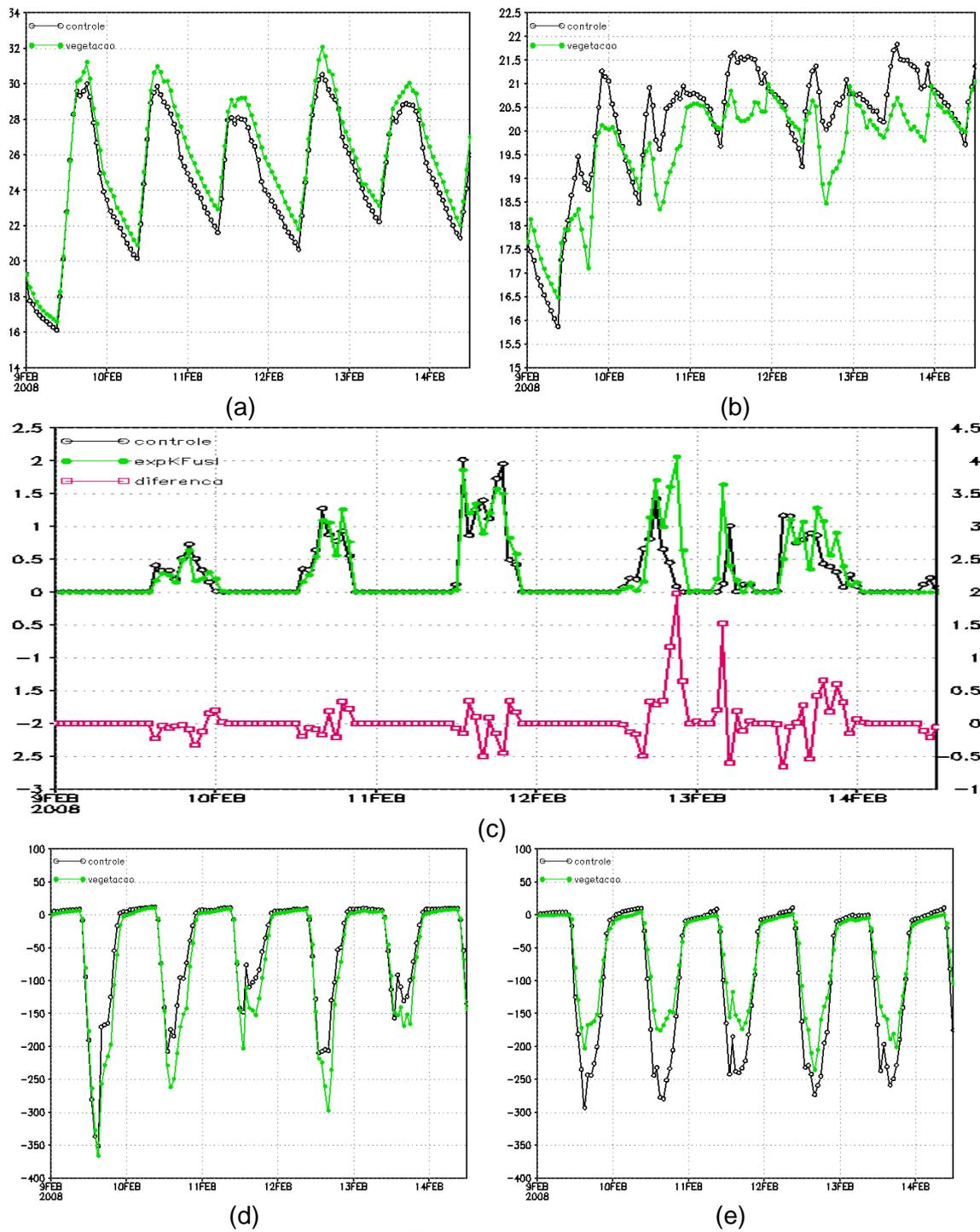


Figura 4.11 - Evolução temporal na RMSD (figura 4.10) para 132 horas de simulação iniciada no dia 09 às 00Z das variáveis: (a) temperatura do ar a 2m ( $^{\circ}\text{C}$ ) (b) temperatura do ponto de orvalho a 2m ( $^{\circ}\text{C}$ ) e (c) precipitação convectiva (mm) e do (d) fluxo de calor sensível ( $\text{W}/\text{m}^2$ ) e (e) fluxo de calor latente ( $\text{W}/\text{m}^2$ ). A linha preta representa a rodada controle e a verde o experimento com a vegetação urbana (com valores representados no eixo esquerdo) e a rosa a diferença entre o experimento e a simulação controle (com valores representados no eixo direito).

A componente meridional do vento a 10m na RMSP (figura 4.12a) é menos intensa que no litoral (figura 4.12b), como era esperado porque a rugosidade da superfície urbana (que predomina na RMSP) é maior do que a rugosidade relativa ao tipo de vegetação predominante no litoral, o que faz com que o vento seja enfraquecido ao chegar à RMSP. A diferença entre a simulação controle e o experimento com a vegetação urbana é maior no litoral (figura 4.12b), onde se nota o enfraquecimento da componente de norte devido à intensificação da brisa marítima (vento de Sul), que por sua vez ocorre devido ao aumento do gradiente de temperatura entre o oceano e a RMSP devido ao aumento da temperatura na área urbana (RMSP) (figura 4.11a). A intensificação da brisa marítima nessa região favorece a formação de convecção profunda uma vez que o vento de Sul sobe ao encontrar a serra e/ou converge com o vento de norte proveniente da circulação de grande escala.

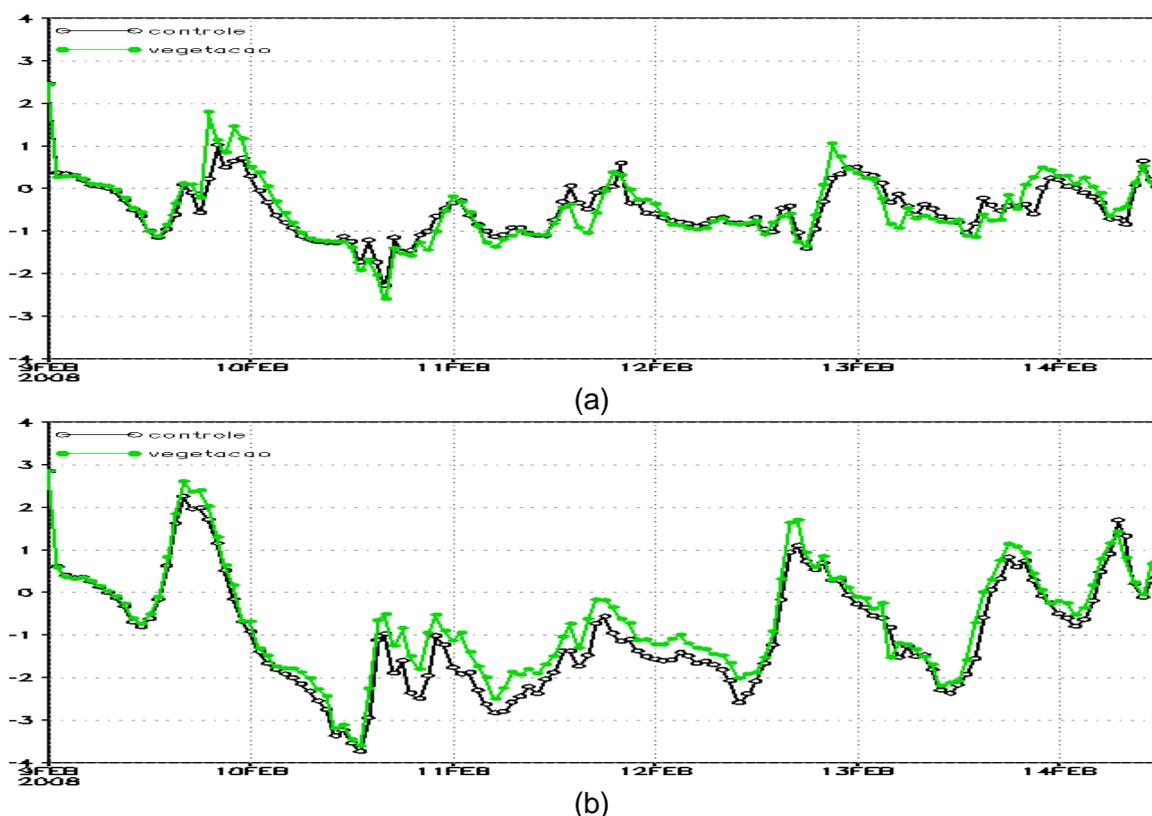


Figura 4.12 - Evolução temporal para 132 horas de simulação iniciada no dia 09 às 00Z da componente meridional do vento a 10m (m/s), (a) na RMSP e (b) no litoral (áreas indicadas na figura 4.10). A linha preta representa a simulação controle e a verde o experimento com a vegetação urbana.

Um corte transversal na longitude  $46,5^{\circ}\text{W}$  entre as latitudes  $24,5^{\circ}\text{S}$  e  $22,8^{\circ}\text{S}$  (indicado na figura 4.13) foi gerado para mostrar as mudanças na circulação local do experimento com a inclusão da vegetação urbana em relação à simulação controle.

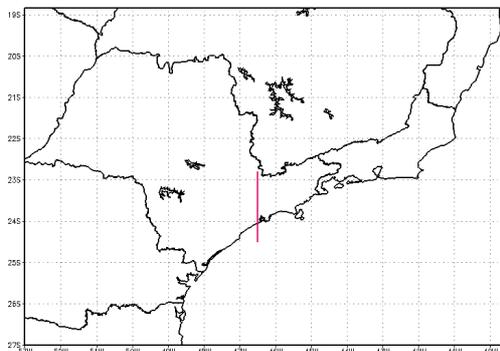


Figura 4.13 - Região onde foi feito um corte trasversal (linha vermelha).

Na simulação controle para o dia 10 (figura 4.14a) observa-se valores positivos de omega nas latitudes entre  $24^{\circ}\text{S}$  e  $23,8^{\circ}\text{S}$  (próximo ao litoral), enquanto no experimento com a vegetação (figura 4.14b) esse valor passa a ser negativo e a circulação passa a ser de baixo para cima nesta região. No dia 11 (figura 4.14c e d) as regiões com valores de omega negativo são maiores no experimento com a vegetação do que na simulação controle. No dia 12 os núcleos negativos de omega se intensificam no experimento com a vegetação e se deslocam mais para latitudes mais baixas (em direção a área com vegetação urbana) devido a intensificação do vento de Sul próximo a superfície (figura 4.12a e b).

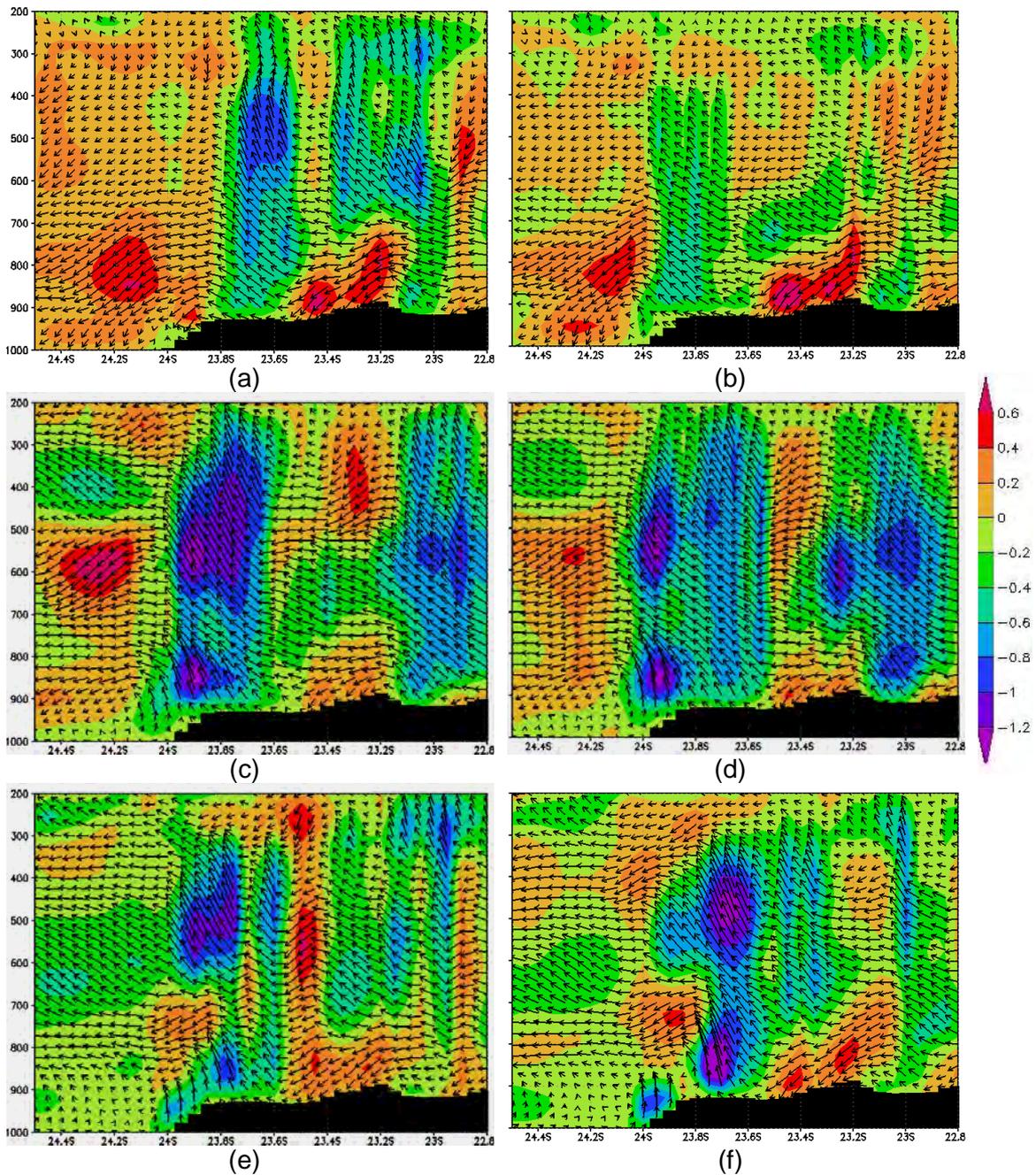


Figura 4.14 - Seção vertical do vento (vetor) e Omega (sombreado - Pa/s) da simulação controle (figuras da esquerda) e do experimento com a vegetação (figuras da direita), para os dias (a e b) 10, (c e d) 11 e (e e f) 12 às 18Z, na região representada na figura 4.13.

Os resultados encontrados neste experimento como o aumento da temperatura à superfície e do fluxo de calor sensível, o decréscimo da temperatura do ponto de orvalho e do fluxo de calor latente, a desintensificação do vento de norte e intensificação da brisa marítima mostram o impacto da inclusão da vegetação

urbana e dos parâmetros associados a esse tipo de superfície e estão de acordo com trabalhos como os de Lo et al. (2007), Lin et al. (2007) e Lin et al. (2008).

#### **4.1.2.3 Mudanças na parametrização convectiva KF**

Nos experimentos a seguir o mapa de vegetação utilizado é o mesmo da simulação controle e as alterações propostas são realizadas nos parâmetros de disparo do esquema KF.

##### **4.1.2.3.1 Redução da USL de 50 para 30 hPa**

Neste experimento a USL é reduzida de 50 para 30 hPa de forma que a parcela de ar em ascensão possua características mais próximas da superfície, como temperatura e umidade. Se não houver uma camada de inversão à superfície esta parcela de ar possivelmente estará mais quente e úmida fazendo com que haja mais disparo de convecção profunda.

A figura 4.15b mostra a diferença entre a precipitação convectiva do experimento e a simulação controle acumulada do dia 10 ao dia 11, onde é possível notar a predominância de valores positivos em regiões onde foi observada precipitação (figura 4.1c e d) como no PR e em alguns pontos entre PR e SP, assim como, na divisa entre SP e MG e próximo ao vale do Paraíba. O acumulado do dia 11 a 12 (figura 4.15c e d) mostra um aumento da precipitação no litoral de SC, PR e SP, que está de acordo com o observado (figura 4.1e e f) e um decréscimo no interior do Estado próximo à divisa com o PR. Entre os dias 12 e 13 (figura 4.15e e f) houve um aumento da precipitação no litoral de SC, na Capital e no oceano, enquanto ocorreu um decréscimo no vale do Paraíba, onde foi observado precipitação intensa (figura 4.1g e h).

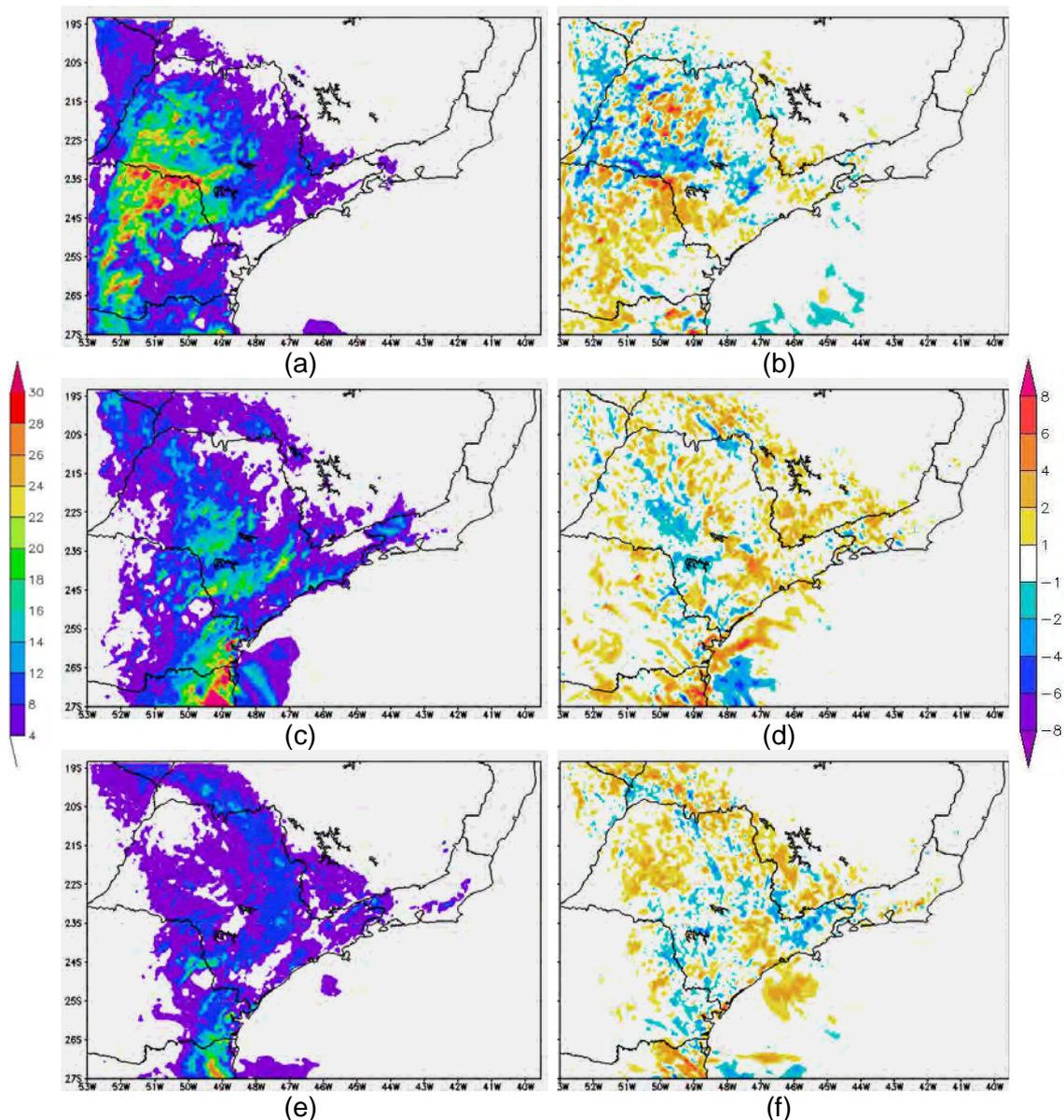


Figura 4.15 - Precipitação convectiva (mm) do experimento com a redução da USL de 50 para 30hPa (coluna da esquerda) e diferença entre o experimento e a simulação controle (coluna da direita), acumulada em 24h das 12Z do dia anterior até as 12Z do dia (a e b) 11, (c e d) 12 e (e e f) 13 de fevereiro de 2008.

A evolução temporal da precipitação convectiva no litoral (figura 4.16a) mostra que a redução da USL para 30 hPa aumentou em até 1,2mm/dia a precipitação nesta área. A temperatura a 2m (figura 4.16b) varia em resposta às variações da precipitação, ou seja, nos horários em que a temperatura a 2m está mais alta a precipitação aumenta e logo em seguida a temperatura diminui devido ao resfriamento que ocorre quando a convecção é ativada e a chuva é produzida. A energia potencial disponível para convecção (CAPE) em geral é maior neste

experimento (figura 4.16c) e aparentemente ela diminui momentos antes da precipitação aumentar.



Figura 4.16 - Evolução temporal para 132 horas de simulação iniciada no dia 09 às 00Z no litoral (figura 4.10) da (a) precipitação convectiva (mm/h), (b) temperatura a 2m (°C) e (c) CAPE (J/kg). A linha preta representa a simulação controle, a verde o experimento (com valores representados no eixo esquerdo) e a rosa a diferença entre o experimento e a simulação controle (com valores representados no eixo direito).

#### 4.1.2.3.2 Redução da USL de 50 para 10 hPa

A redução da USL de 50 para 10 hPa neste experimento foi realizada para verificar a sensibilidade dessa alteração em relação a redução da USL para 30hPa.

A figura 4.17b, d e f mostra que a distribuição espacial da diferença entre o experimento e o controle é semelhante ao teste anterior (com a redução da USL para 30 hPa), no entanto as diferenças são maiores quantitativamente. O aumento da precipitação no PR entre os dias 10 e 11 (figura 4.17b) e no litoral de SP entre os dias 11 e 12 (figura 4.17d) é satisfatório, mas neste experimento houve um aumento excessivo em alguns locais onde não ocorreu chuva, como no PR entre os dias 11, 12 e 13 (figura 4.17d e f) e um decréscimo muito elevado no vale do Paraíba entre os dias 12 e 13.

A avaliação deste experimento mostrou mudanças semelhantes ao anterior, mas com um impacto quantitativo maior, ou seja, a mudança da USL para 10hPa amplificou o resultado encontrado na redução para 30hPa, isto é, aumentou o disparo da precipitação convectiva, no entanto esse resultado foi excessivo e considerado não satisfatório para determinadas regiões onde não foi observada precipitação.

Estes testes direcionaram para a dependência das propriedades termodinâmicas do ar de origem da convecção, na seção seguinte será testada a dependência da função de disparo com a parte dinâmica incluindo maior ou menor efeito do movimento vertical na parcela.

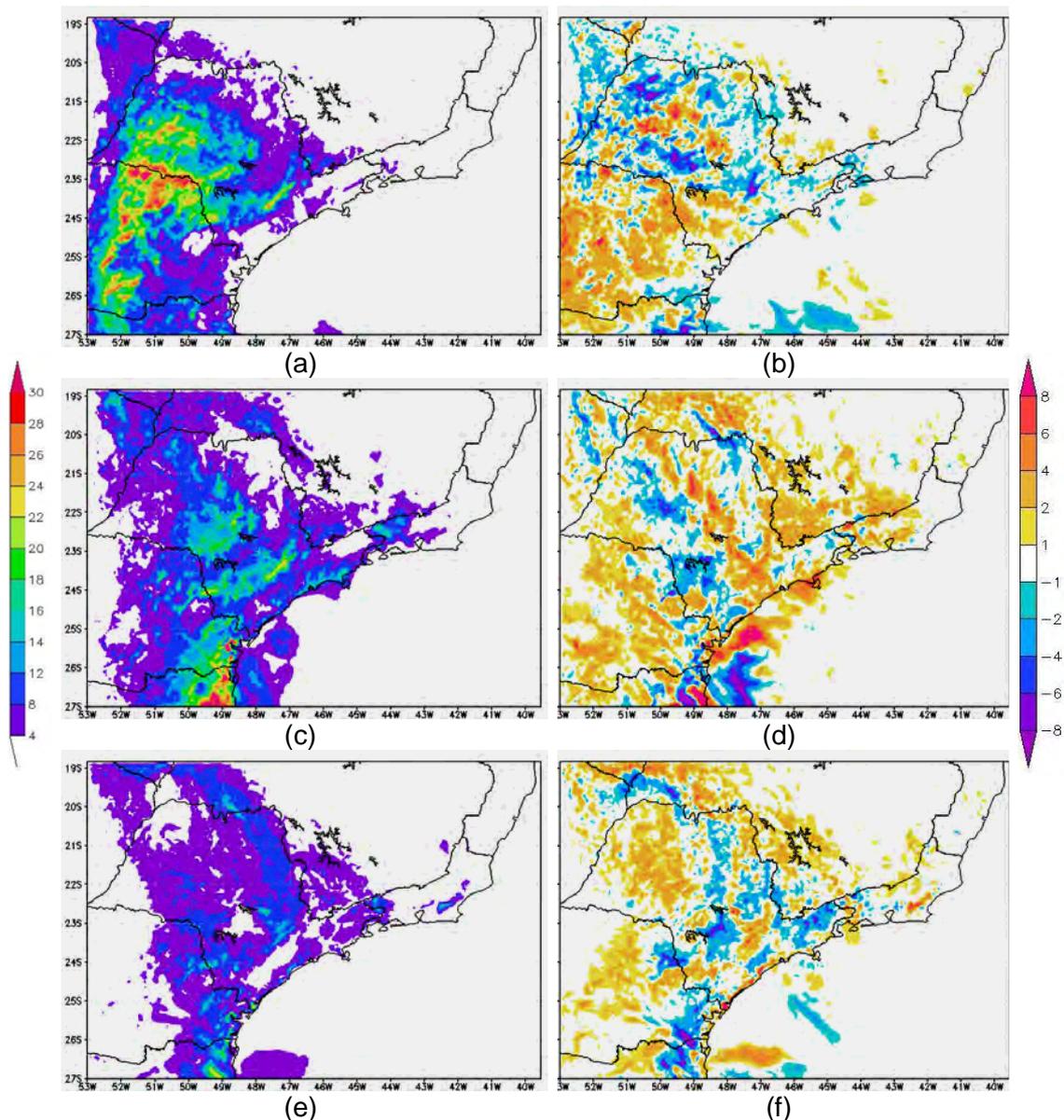


Figura 4.17 - Precipitação convectiva (mm) do experimento com a redução da USL de 50 para 10hPa (coluna da esquerda) e diferença entre o experimento e a simulação controle (coluna da direita), acumulada em 24h das 12Z do dia anterior até as 12Z do dia (a e b) 11, (c e d) 12 e (e e f) 13 de fevereiro de 2008.

#### 4.1.2.3.3 Redução do $w$

A figura 4.18b mostra um aumento da precipitação convectiva deste experimento na região norte de SP, onde não foi observada chuva para este período (figura 4.1c e d) e um decréscimo elevado na região sul e entre SP e PR. Este experimento provocou um aumento da chuva no litoral de SC e PR nos três períodos (figura 4.18b, d e f) (observada nas figuras 4.1c, e e g). Entre

os dias 11 e 12 e 12 e 13 (figura 4.18d e f) o aumento da precipitação no vale do Paraíba e próximo ao litoral Sul de SP está coerente com o observado (figura 4.1f e h), mas a redução na região sul do RJ e no litoral norte de SP (figura 4.18d) não é considerada satisfatória.

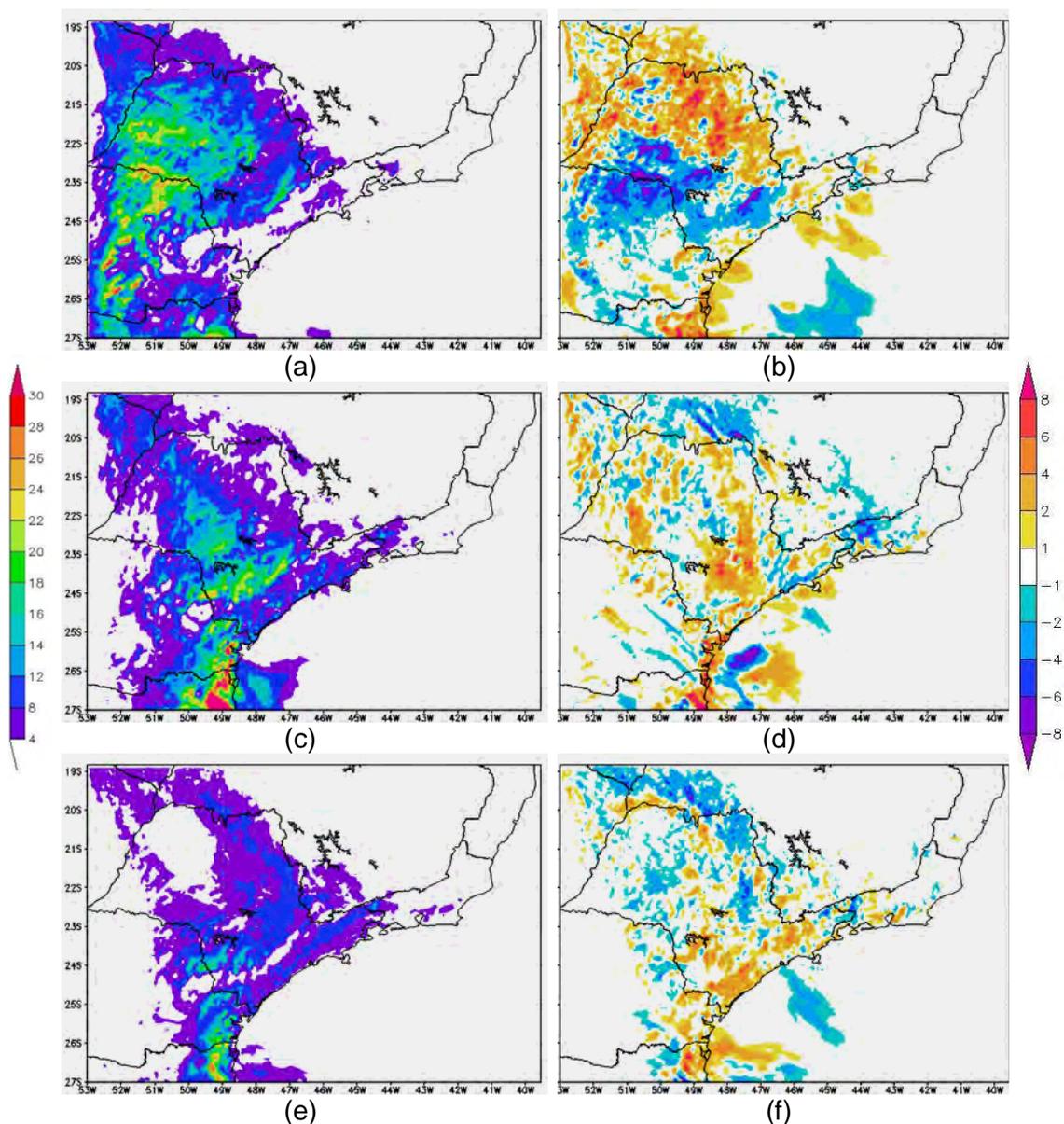


Figura 4.18 - Precipitação convectiva (mm) do experimento com a redução do  $w$  de 0,2 para zero (coluna da esquerda) e diferença entre o experimento e a simulação controle (coluna da direita), acumulada em 24h das 12Z do dia anterior até as 12Z do dia (a e b) 11, (c e d) 12 e (e e f) 13 de fevereiro de 2008.

As alterações nos parâmetros de disparo realizadas em geral fizeram com que houvesse mais precipitação convectiva ativada em regiões onde já havia

precipitação e em alguns locais onde não havia. Sendo que para este caso em estudo as alterações na USL foram mais satisfatórias.

#### **4.1.2.4 Mudanças no mapa de vegetação e na parametrização convectiva KF**

Baseado nos resultados dos experimentos anteriores algumas combinações foram realizadas a fim de representar melhor os processos dinâmicos e termodinâmicos responsáveis pela formação dos temporais ocorridos neste período. Portanto, este experimento foi realizado utilizando o mapa de vegetação com a inclusão da vegetação urbana, que obteve bons resultados nas regiões mais urbanizadas como São Paulo (Capital) indicando que a temperatura do ar próximo à superfície assim como a precipitação convectiva aumentaram devido aos diferentes parâmetros utilizados para este tipo de superfície. Além da mudança do tipo de superfície foi realizada a redução da USL de 50 para 30 hPa para facilitar a ativação do esquema em regiões termodinamicamente instáveis.

Os resultados encontrados neste experimento coincidem com os encontrados no experimento com a inclusão da vegetação urbana e com a redução da USL para 30 hPa. A mudança das propriedades da cobertura de superfície sobre a região metropolitana de São Paulo permite maior aquecimento da superfície durante o dia, e a combinação com a redução da camada de origem do ar convectivo permite ascensão de ar mais instáveis. Portanto houve um aumento satisfatório da precipitação convectiva durante o período analisado no litoral e na Capital Paulista e redução da chuva no interior do Estado (figuras 4.19b, d e f).

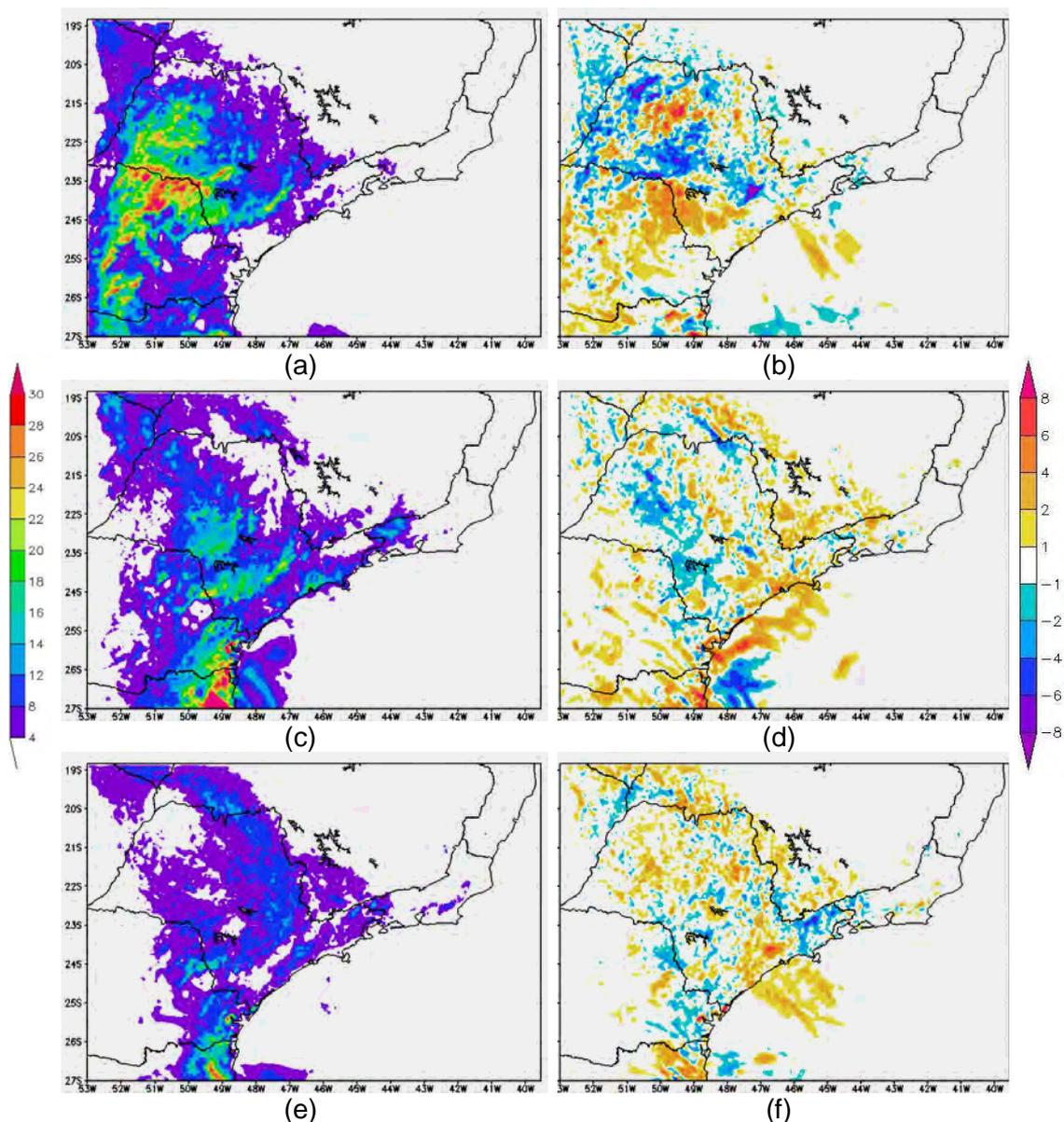


Figura 4.19 - Precipitação convectiva (mm) do experimento com a redução da USL de 50 para 30hPa e inclusão da vegetação urbana (coluna da esquerda) e diferença entre o experimento e a simulação controle (coluna da direita), acumulada em 24h das 12Z do dia anterior até as 12Z do dia (a e b) 11, (c e d) 12 e (e e f) 13 de fevereiro de 2008.

#### 4.1.3 Avaliação estatística

Nesta seção é apresentada uma avaliação estatística de todos os experimentos realizados em relação à simulação controle. As variáveis analisadas são temperatura em 850 hPa, porque neste nível os sinais da superfície ainda são perceptíveis e devido a má qualidade dos dados muito próximo à superfície do ERA Interim e precipitação.

Para a temperatura em 850 hPa foi calculada a raiz do erro quadrático médio (REQM) com base nos dados do ERA Interim e para a precipitação foi utilizado o *Equitable Threat Score* (ETS) e o Bias considerando a precipitação estimada pelo satélite TRMM como base.

O experimento com a inclusão da vegetação urbana produziu uma REQM para a temperatura em 850 hPa praticamente igual a simulação controle durante quase todo o período de integração o que se confirma com a REQM média de todo o período (figura 4.20a).

A REQM média para os experimentos com a redução da USL é menor que o erro da simulação controle (figura 4.20b), sendo que o experimento com a USL de 10 hPa possui uma REQM média menor que o outro experimento, mas ao analisar a evolução temporal nota-se que em alguns momentos a REQM dos experimentos com a redução da USL é maior que o erro da simulação controle (quadro vermelho), sendo o do experimento com a USL de 10 hPa maior que o da USL de 30 hPa portanto, a temperatura em 850 hPa do experimento com a USL de 30 hPa foi considerada melhor.

A comparação da evolução temporal da REQM da temperatura em 850 hPa entre a simulação controle e o experimento com a redução do  $w$  (figura 4.20c) mostra que este experimento não gerou resultados satisfatórios, pois resultou em uma REQM maior que a da simulação controle em praticamente todo o período de integração, assim como a REQM média.

A simulação utilizando a mudança da USL para 30 hPa e a inclusão da vegetação urbana produziu uma REQM da temperatura em 850 hPa menor que a simulação controle durante praticamente todo o período de integração, assim como a REQM média que além de ser menor que a REQM média da simulação controle é menor que o erro dos demais experimentos, o que confirma as análises dos resultados anteriores (figura 4.20d).

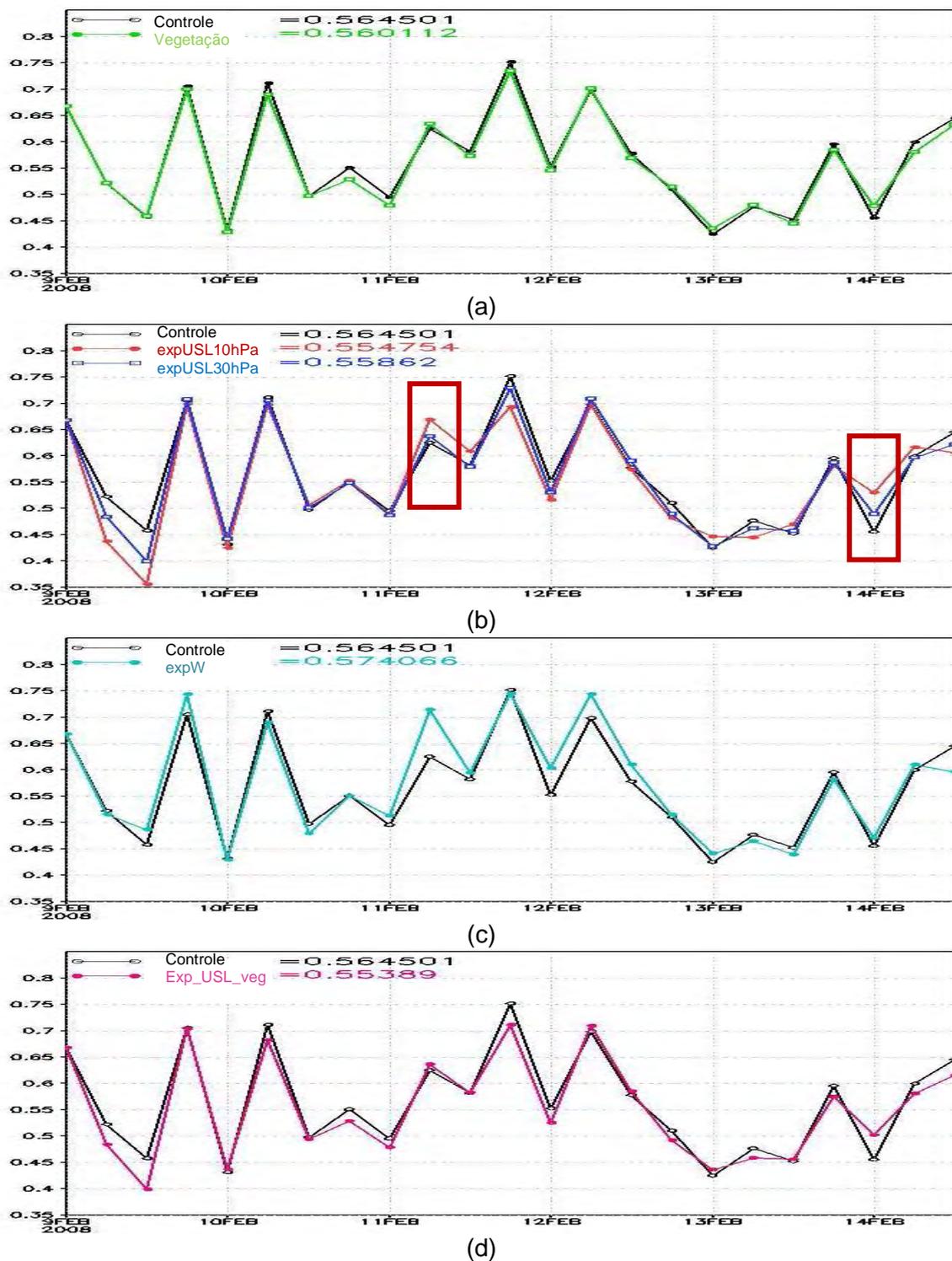


Figura 4.20 - Evolução temporal para 132 horas de simulação iniciada no dia 09 às 00Z da raiz do erro quadrático médio da temperatura em 850 hPa ( $^{\circ}\text{C}$ ) para a simulação controle (preto) e (a) o experimento com a vegetação (verde), (b) o experimento com a redução da USL para 30 hPa (azul) e para 10 hPa (vermelho), (c) o experimento com o w (azul claro) e (d) o experimento com a USL de 30 hPa e com a vegetação (rosa). Os valores mostrados dentro do gráfico representam a REQM média para todo o período.

O ETS da precipitação em todas as simulações foi maior para limiares de chuva menores, ou seja, o modelo não obteve bons resultados para chuvas intensas em nenhuma das simulações (figuras 4.21, 4.22, 4.23 e 4.24).

O experimento com a vegetação urbana obteve um ETS igual ou ligeiramente maior que o ETS da simulação controle até o limiar de 12,7 mm e um BIAS aproximadamente igual ao da simulação controle (figura 4.21), para todo domínio de simulação.

Neste caso de fevereiro de 2008 a precipitação convectiva simulada no experimento da vegetação foi melhor que a simulação controle, nos locais onde o tipo urbano foi incluído o que significa que a inclusão da vegetação urbana contribui para a formação de sistemas convectivos na região de estudo fazendo com que o ambiente atmosférico favorável a formação desses sistemas fosse melhor representado, como pode ser visto na análise de variáveis como temperatura do ar e do ponto de orvalho.

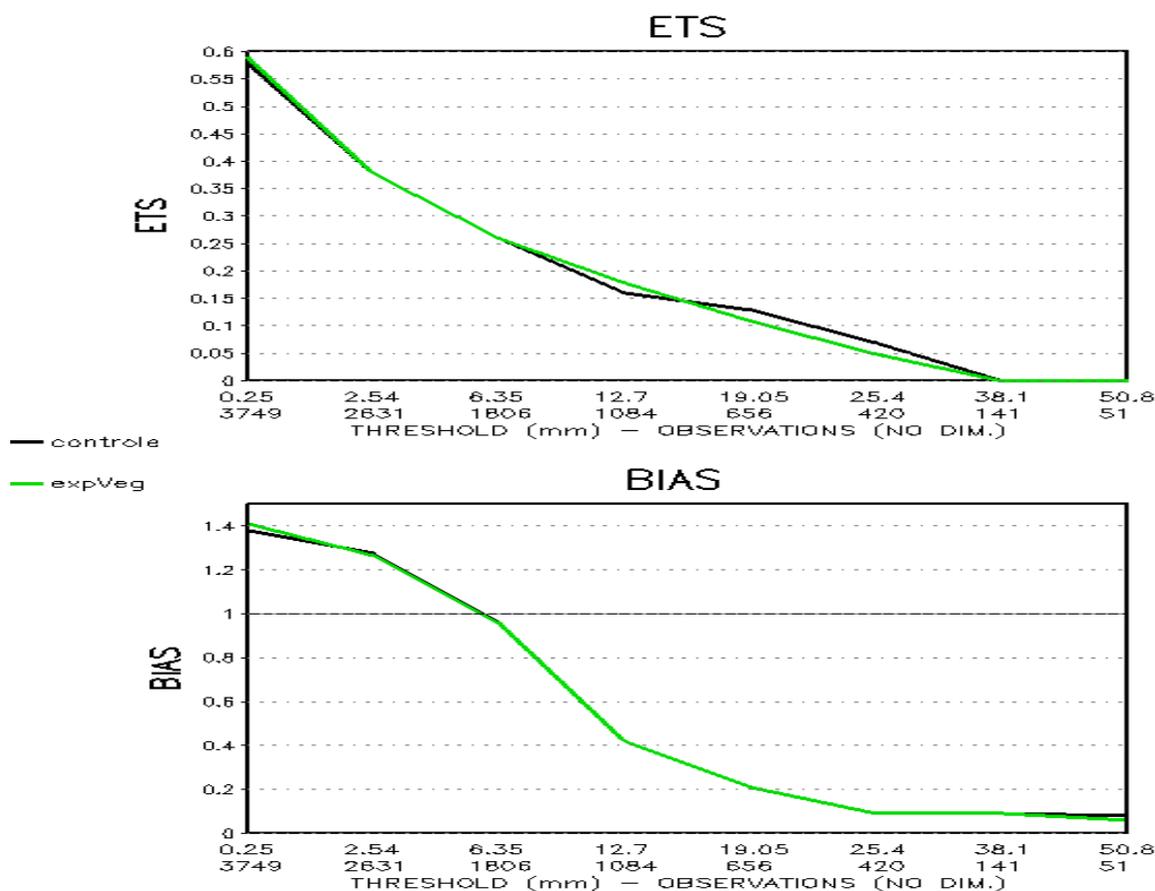


Figura 4.21 - ETS e BIAS da precipitação para a simulação controle (preto) e para o experimento com a inclusão da vegetação urbana (verde).

Os experimentos com a redução da USL ativaram mais o esquema convectivo como pode ser visto através do BIAS para limiares pequenos, como era esperado sendo que o BIAS do experimento com a redução da USL para 10 hPa foi maior que o experimento com a redução para 30 hPa, por esta razão embora o ETS do experimento com a USL de 10 hPa seja maior, para a precipitação o experimento com a USL de 30 hPa foi considerado melhor por apresentar o ETS um pouco maior que o controle e um BIAS mais próximo de 1 que o experimento com USL de 10 hPa (figura 4.22).

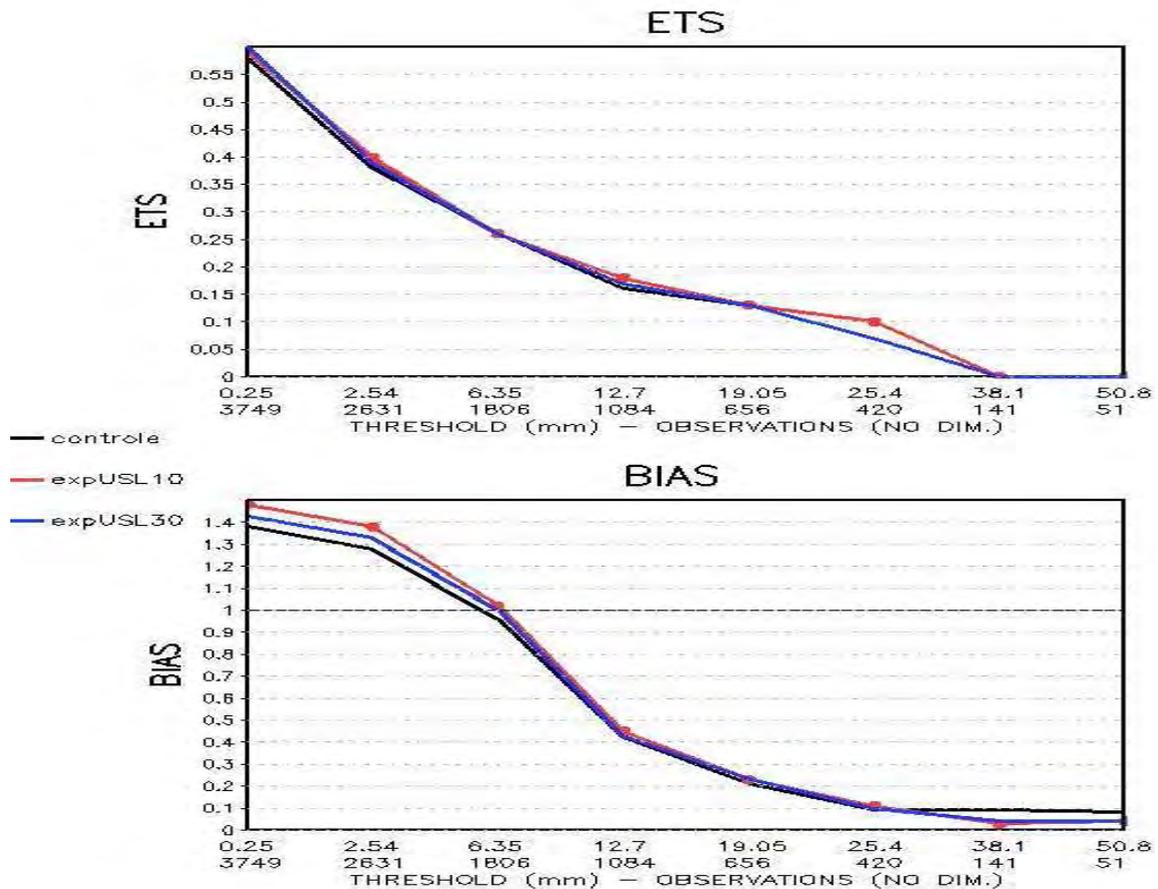


Figura 4.22 - ETS e BIAS da precipitação para a simulação controle (preto) e para o experimento com a redução da USL para 30 hPa (azul) e para 10 hPa (vermelho).

A simulação com a alteração do  $w$  para zero gerou um BIAS semelhante ao da simulação controle e o ETS deste experimento foi inferior ao da simulação controle, principalmente nos limiares mais intensos de chuva (figura 4.23), portanto baseado nas avaliações deste experimento conclui-se que para o caso estudado a redução do parâmetro  $w$  na função de disparo do esquema de convecção não foi satisfatória.

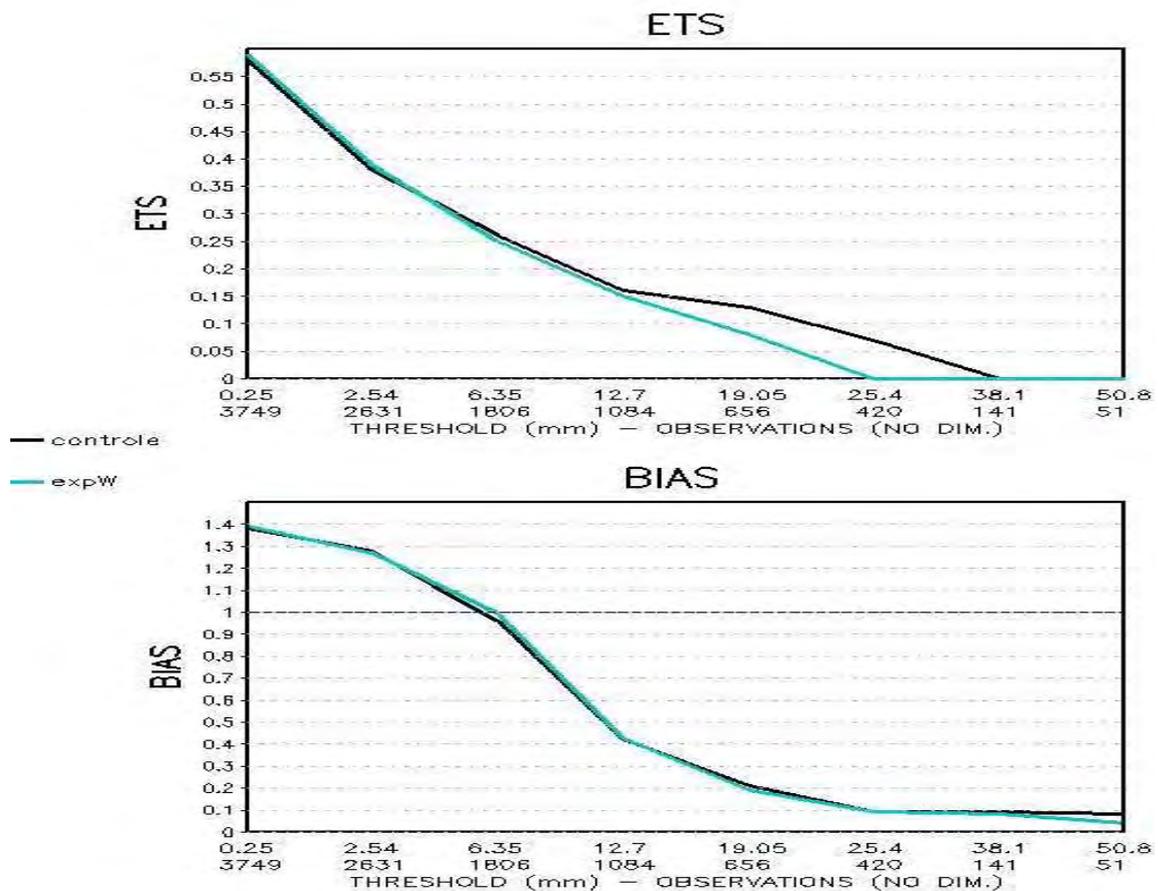


Figura 4.23 - ETS e BIAS da precipitação para a simulação controle (preto) e para o experimento com a alteração no w (azul claro).

Ao incluir a vegetação urbana juntamente com o esquema KF com a USL reduzida para 30 hPa nota-se que a precipitação convectiva simulada por este experimento melhorou em relação à simulação controle para limiares de chuva pequenos. O ETS corrigido mostra que apesar de o BIAS ser maior, a simulação da precipitação deste experimento obteve um desempenho igual ou ligeiramente superior a simulação controle (figura 4.24), o que concorda com os resultados deste experimento encontrados anteriormente, que além da superfície estar melhor representada através da inclusão do tipo urbano, o esquema convectivo captura melhor as características próximo à superfície.

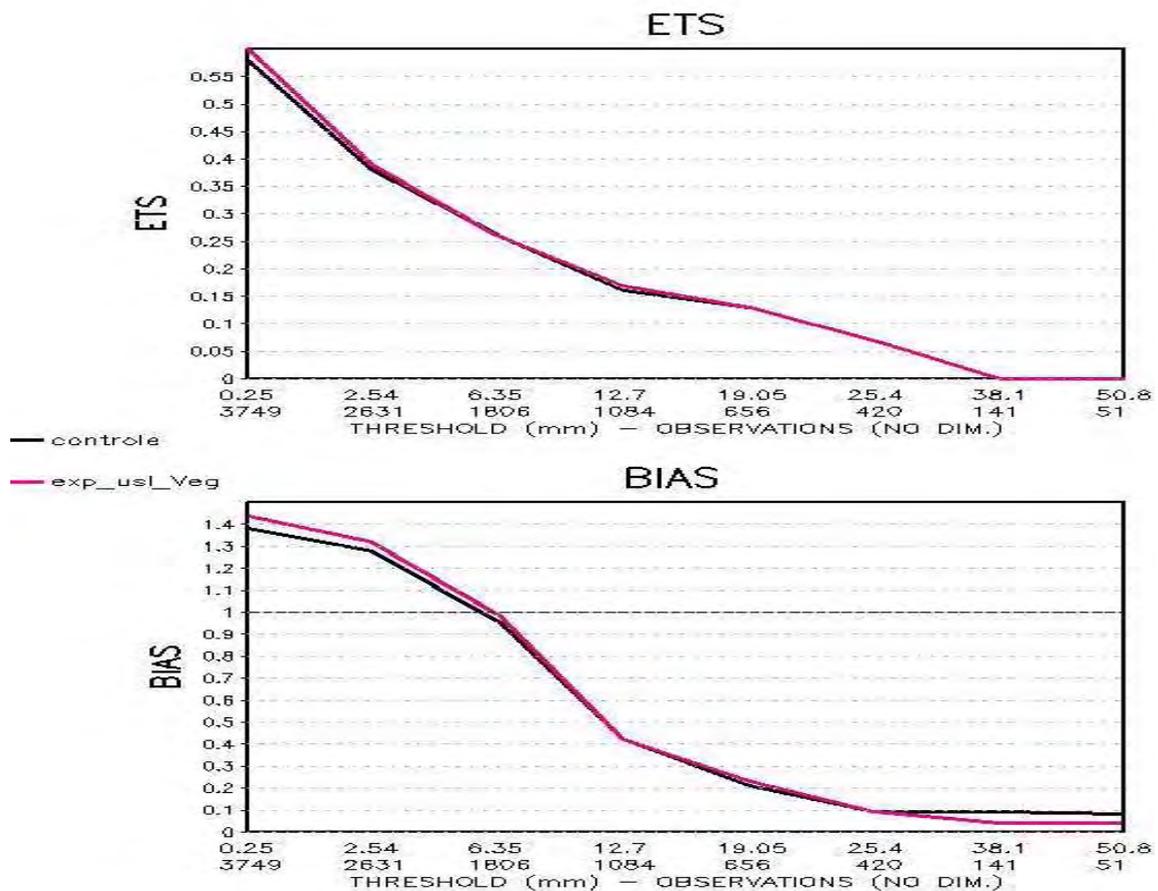


Figura 4.24 - ETS e BIAS da precipitação para a simulação controle (preto) e para o experimento com a redução da USL para 30 hPa e com a inclusão da vegetação urbana (rosa).

Na próxima seção será analisado outro caso de precipitação intensa para verificar se os resultados encontrados são semelhantes aos encontrados no caso de fevereiro de 2008.

#### 4.2 Caso março de 2009

No dia 17 de março de 2009 chuvas intensas acompanhadas de descargas elétricas e rajadas de ventos atuaram em parte do estado de São Paulo, inclusive sobre a capital paulista (figuras 4.25a e b), causando alagamentos, interrupção no fornecimento de energia elétrica e congestionamentos no trânsito. Houve muito transtorno e prejuízo na Região Metropolitana de São Paulo (RMSP). Na estação Mirante do Santana pertencente ao INMET e

localizada na região norte da Capital Paulista foi registrado 68,4mm de chuva acumulado neste dia.

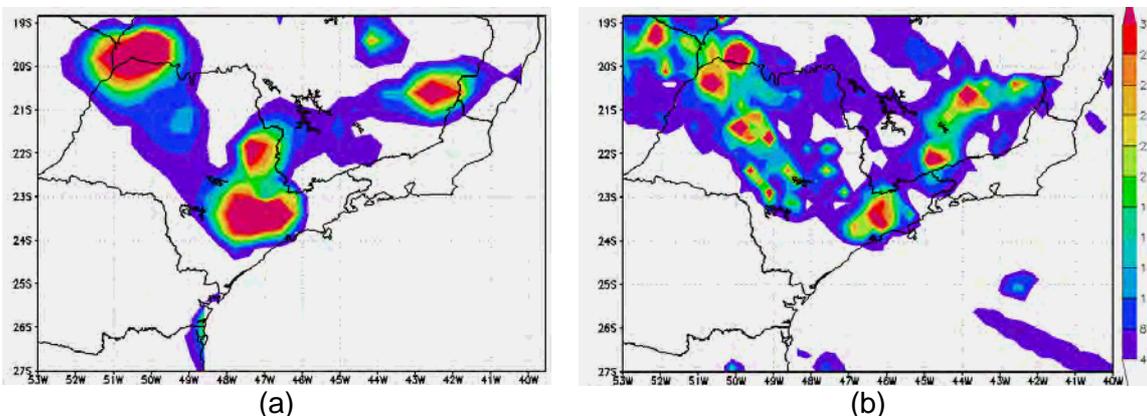


Figura 4.25 - Precipitação (mm) (a) observada à superfície e (b) estimada pelo satélite TRMM, acumulada em 24h das 12Z do dia 17 até as 12Z do dia 18 de março de 2009.

#### 4.2.1 Descrição Sinótica

Uma breve descrição sinótica é apresentada somente para o dia 17 às 18Z, momento em que foi observada precipitação intensa.

No dia 17 as 18Z pode-se observar na imagem de satélite (figura 4.26a) um aglomerado de nuvem com tons de cinza mais claro próximo ao litoral do Estado de São Paulo, que não estava associado a um sistema sinótico predominante, como mostra a carta de superfície do mesmo horário (figura 4.26b). Neste dia havia um sistema frontal atuando no oceano próximo à Santa Catarina, um centro de alta pressão de 1022 hPa sobre o oceano e outro centro de 1017 hPa no sul de Minas Gerais.

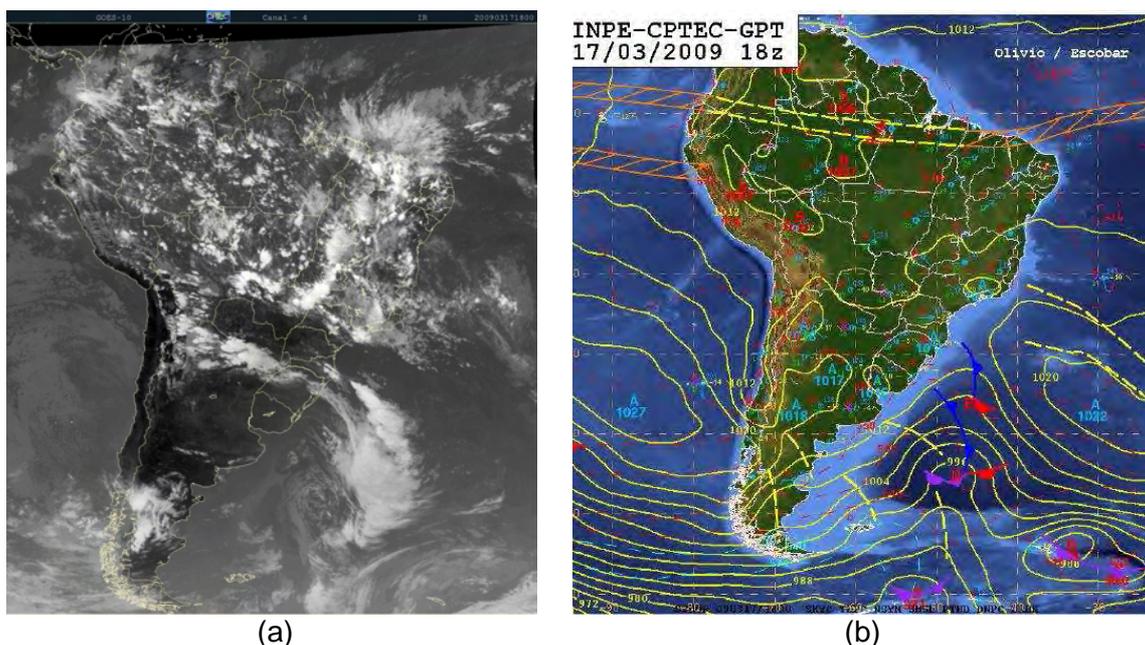


Figura 4.26 - (a) Imagem do satélite GOES-10 no canal infravermelho e (b) carta de superfície para o dia 17 de março de 2009 às 18Z.

Nas imagens realçadas nota-se que às 18Z do dia 17 (figura 4.27a) havia convecção significativa entre a Capital de SP e o Vale do Paraíba, que persistiu nos horários seguintes (figura 4.27b e c) e se estendeu pelo interior do Estado e oceano. As 18Z e 21Z (figuras 4.27a e b) observa-se um núcleo convectivo bastante intenso (rosa) entre SP e MG, que gerou precipitação intensa como pode ser visto na precipitação observada (figura 4.25a e b).

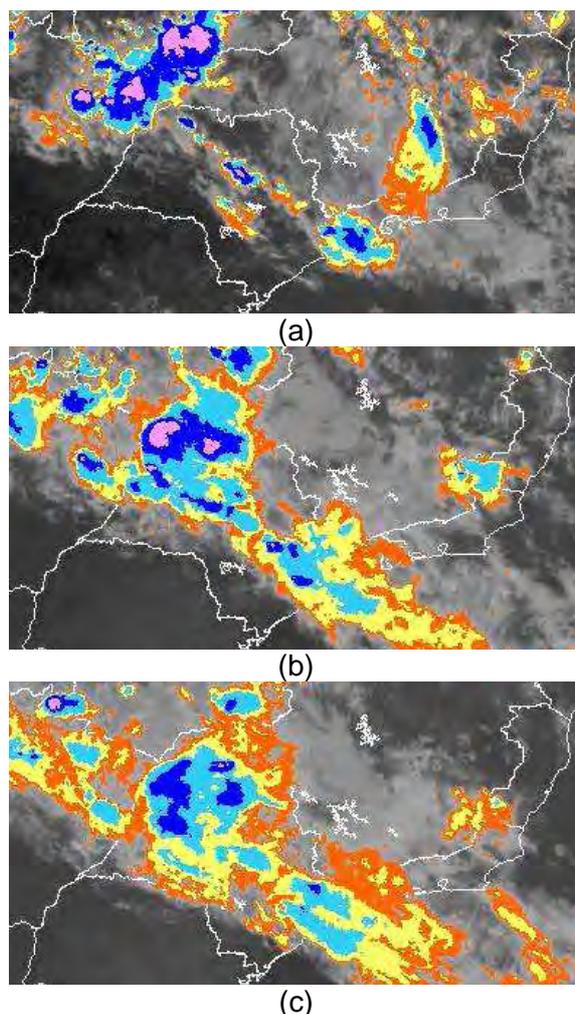


Figura 4.27 - Imagem do satélite GOES-10 realçada do dia 17 (a) às 18:00Z, (b) às 21:00Z e (c) às 22:30Z.

A reanálise do ERA Interim mostra que neste dia havia o predomínio de um centro de alta pressão sobre o oceano e outro centro de 1015 hPa ao Sul de MG (figura 4.28a). O Estado de São Paulo está localizado na transição entre o centro de altas pressões e de baixas pressões ao Sul. Em 500 hPa nota-se uma ampla circulação anticiclônica atuando entre RJ, ES e MG, com o centro localizado a leste do ES (figura 4.28b). Em 200 hPa observa-se ventos de Noroeste sobre SP bastante intensos, correspondendo a região de entrada do jato de altos níveis ao sul da circulação anticiclônica posicionada ao norte de MG. Um cavado de onda curta passa mais ao Sul do País (figura 4.28c) e contribui para a intensificação dos ventos sobre o litoral da região Sul e Sudeste.

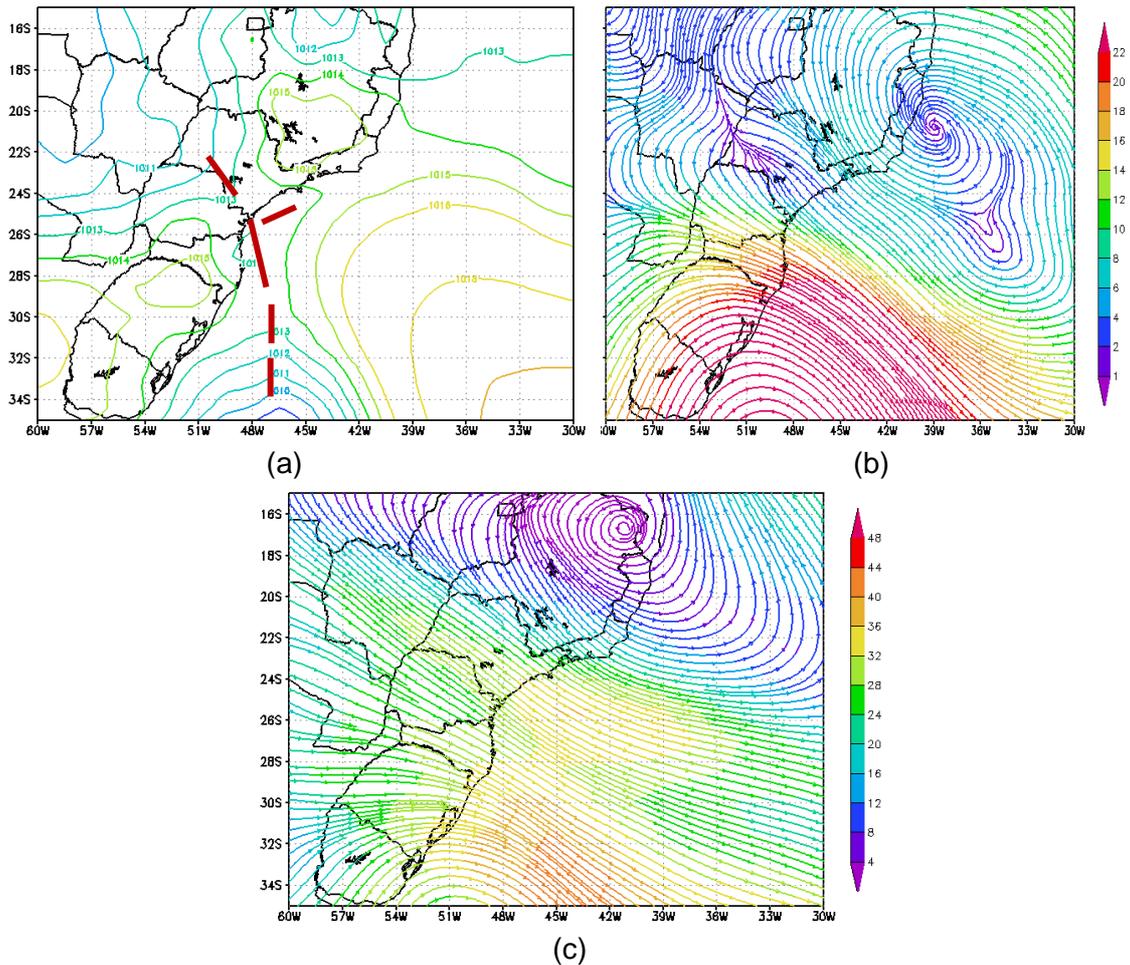


Figura 4.28 - Reanálise para o dia 17 de março de 2009 às 18Z da (a) Pressão ao nível médio do mar (hPa) (b) do vento (m/s) em 500hPa e em (c) 200hPa. Dados de reanálise ERA Interim.

Ao analisar os campos de superfície para o dia 17, nota-se que não há um padrão de circulação sinótica bem definida para a formação de precipitação intensa nessa região localizada na zona de transição entre os centros de altas e baixas pressões, deste modo a formação de chuvas intensas nesse dia ocorreu devido a fatores dinâmicos e termodinâmicos locais.

## 4.2.2 Simulações numéricas

### 4.2.2.1 Simulação controle

A precipitação convectiva da simulação controle posicionou um núcleo de chuva mais intenso entre SP e MG a Noroeste de SP e outros núcleos menos

intensos como o localizado no Vale do Paraíba (figura 4.29), onde ocorreu a precipitação intensa em foco nesta análise (figura 4.25a e b). Embora essa simulação tenha capturado os núcleos de chuva mais intensos, esses valores estão muito abaixo do observado.

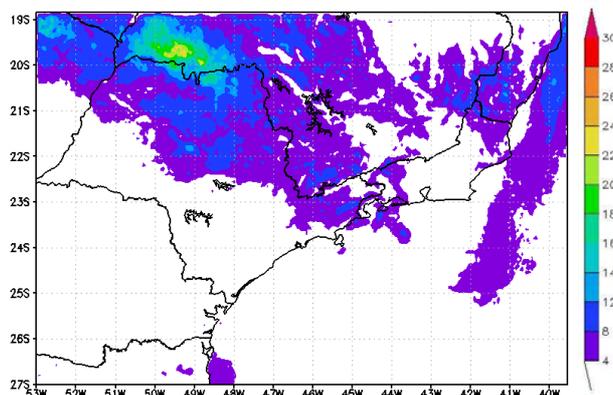


Figura 4.29 - Precipitação convectiva (mm) da simulação controle acumulada em 24h das 12Z do dia 17 as 12Z do dia 18 de março de 2009.

#### 4.2.2.2 Mudanças no mapa de vegetação

Este experimento com a inclusão da vegetação urbana gerou mais precipitação convectiva no interior do Estado de SP e no Vale do Paraíba (figura 4.30a e b) regiões onde foi observada precipitação intensa neste dia (figura 4.25a e b). O aumento da precipitação no Vale do Paraíba coincide com a localização do tipo urbano no novo mapa de vegetação (figura 3.7). Portanto, as mudanças foram favoráveis a melhoria da simulação da chuva, apesar de não ter atingido os valores quantitativos da observação.

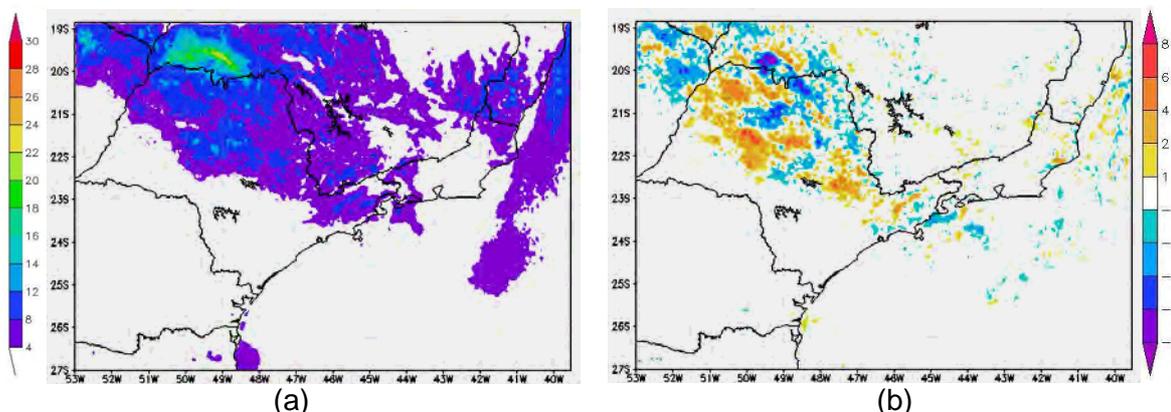


Figura 4.30 - (a) Precipitação convectiva (mm) do experimento com a vegetação urbana e a (b) diferença entre o experimento e a simulação controle, acumulada em 24h das 12Z do dia 17 as 12Z do dia 18 de março de 2009.

A evolução temporal de algumas variáveis será analisada na RMSP (figura 4.10), que foi escolhida na análise do caso anterior por ser uma região onde o tipo de vegetação urbana foi incluído. A figura 4.30b mostra que a precipitação convectiva não aumentou na RMSP, mas é esperado que o efeito da inclusão do tipo urbano na temperatura do ar e do ponto de orvalho a 2m e fluxo de calor latente e sensível seja o mesmo encontrado no caso anterior.

A temperatura a 2m nesta área aumenta com a inclusão da vegetação urbana (figura 4.31a), assim como ocorre o aumento do fluxo de calor sensível (figura 4.31c), enquanto a temperatura do ponto de orvalho (figura 4.31b) e o fluxo de calor latente (figura 4.31d) reduzem, indicando que há menos evaporação a superfície, como ocorreu no mesmo experimento com o caso de fevereiro de 2008.

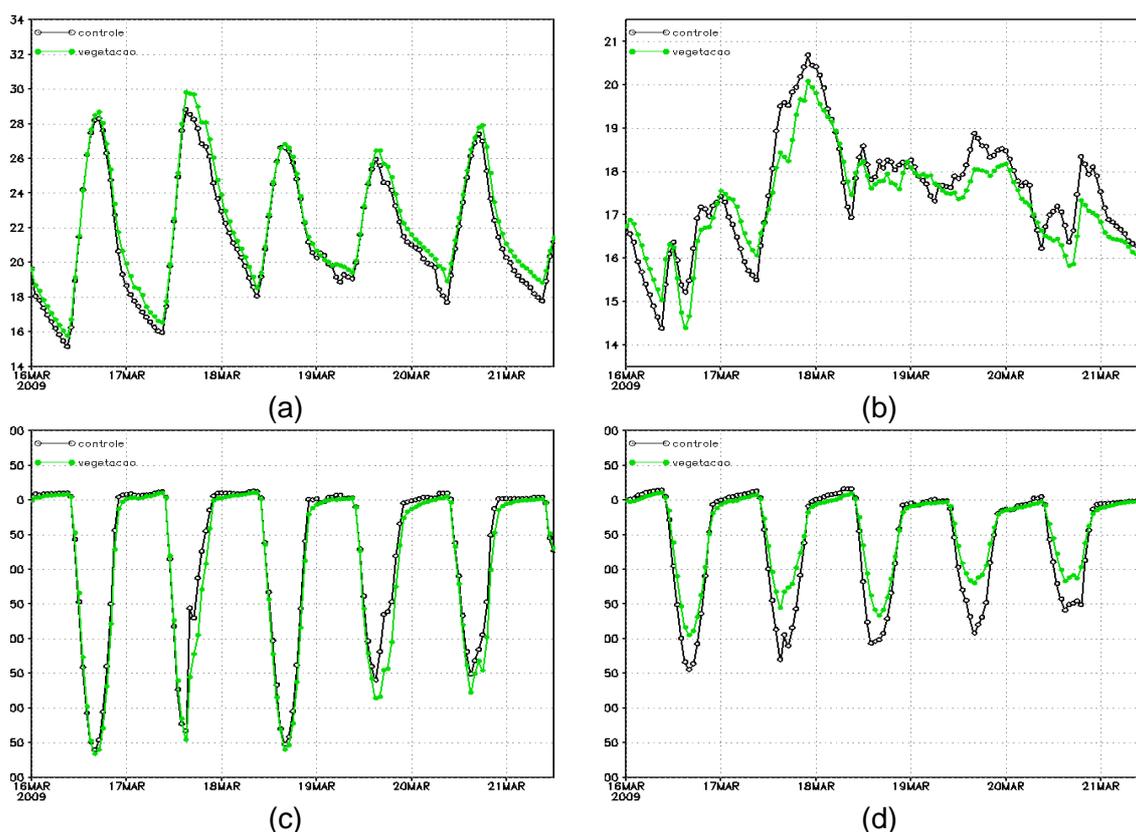
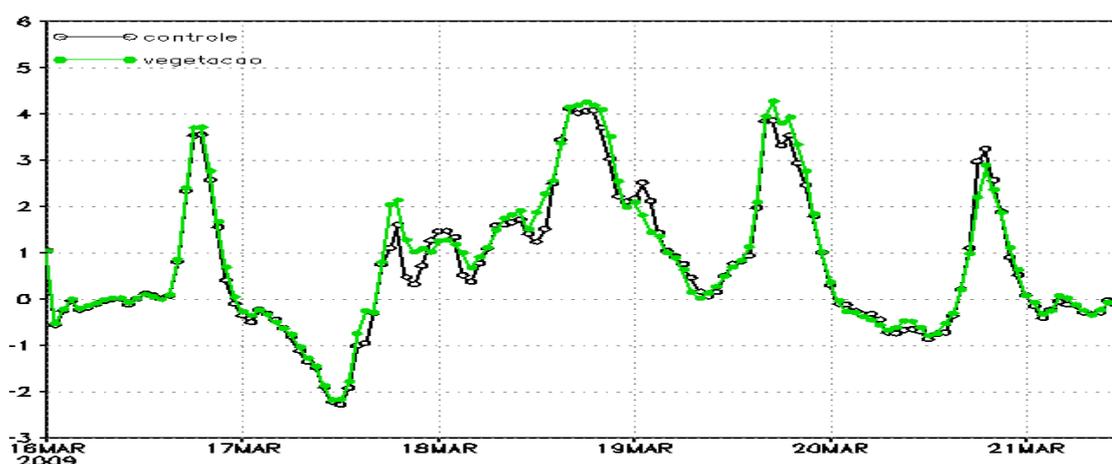
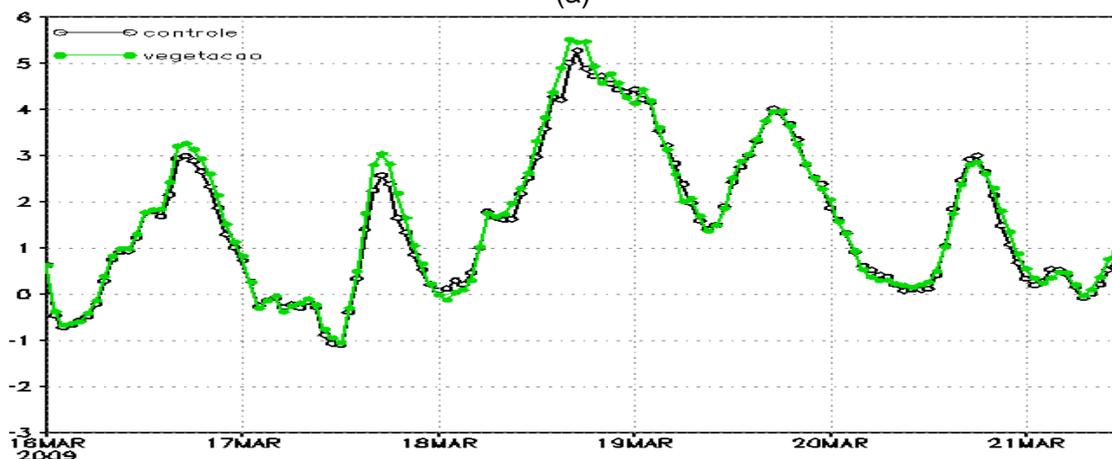


Figura 4.31 - Evolução temporal na RMSP (figura 4.10) para 132 horas de simulação iniciada no dia 16 às 00Z das variáveis: (a) temperatura do ar a 2m (°C), (b) temperatura do ponto de orvalho a 2m (°C), (c) do fluxo de calor sensível ( $W/m^2$ ) e (d) do fluxo de calor latente ( $W/m^2$ ). A linha preta representa a rodada controle e a verde o experimento com a vegetação urbana.

O vento meridional a 10m na RMSP e litoral em geral é de Sul. Na figura 4.32b é possível observar melhor a intensificação do vento de Sul (brisa marítima) durante o dia e desintensificação ou inversão durante a noite (brisa terrestre). Tanto na RMSP como no litoral nota-se uma intensificação da componente de sul do vento, que está associado à intensificação da brisa marítima. Esta intensificação do vento de sul está ligada ao aumento do contraste de temperatura entre a terra e o mar, como a temperatura da superfície do mar não sofreu alteração durante esta integração, o contraste de temperatura foi decorrência do aumento da temperatura do ar a superfície na RMSP (figura 4.31a) devido à inclusão da vegetação urbana.



(a)



(b)

Figura 4.32 - Evolução temporal para 132 horas de simulação iniciada no dia 16 às 00Z da componente meridional do vento a 10 m (m/s), (a) na RMSP e (b) no litoral (áreas indicadas na figura 4.10). A linha preta representa a simulação controle e a verde o experimento com a vegetação urbana.

O corte vertical do vento mostra que o movimento vertical para cima se intensificou no experimento com a inclusão da vegetação urbana (figura 4.33b), o que favorece a formação de convecção profunda.

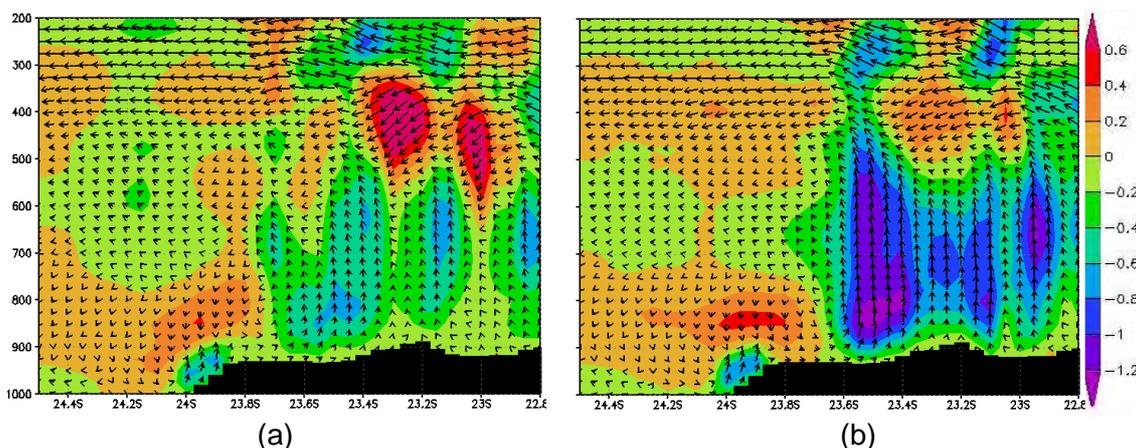


Figura 4.33 - Seção vertical do vento (vetor) e Omega (sombreado - Pa/s) da (a) simulação controle e (b) do experimento com a vegetação, para o dia 17 às 18Z.

O aumento da precipitação na Região Metropolitana de São Paulo e em algumas regiões do Vale do Paraíba, no experimento com a inclusão do tipo urbano nos dois casos estudados, mostra que a ilha de calor urbano tem contribuição importante nos casos de chuvas intensas sobre essa região, principalmente quando há fraca atuação de escala sinótica.

#### 4.2.2.3 Mudanças na parametrização convectiva KF

##### 4.2.2.3.1 Redução da USL de 50 para 30 hPa

A redução da USL para 30 hPa teve pouco impacto na precipitação convectiva sobre a RMSP, mas indicou um pequeno aumento no Vale do Paraíba (figura 4.34b). Na região Noroeste do Estado de SP houve um aumento satisfatório da precipitação (figura 4.34a), no entanto a redução na divisa entre SP e MG reduziu o núcleo encontrado na rodada controle (figura 4.29).

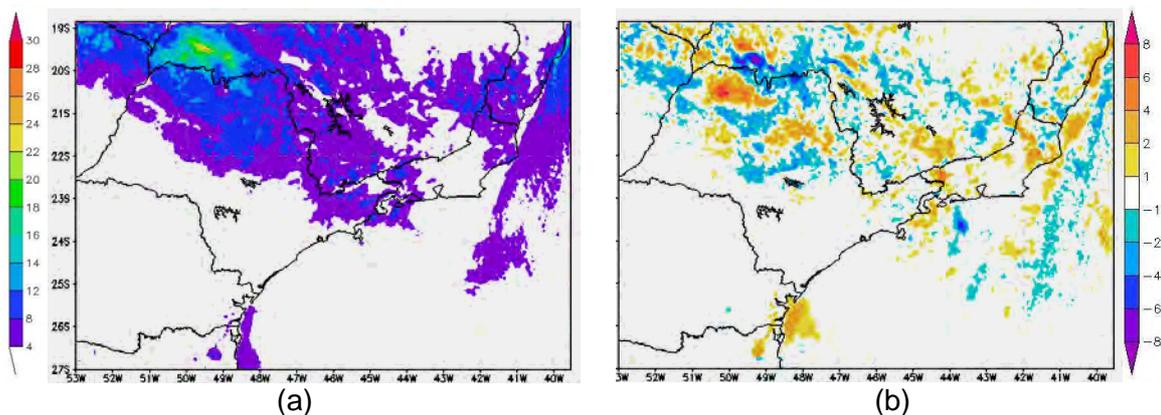


Figura 4.34 - (a) Precipitação convectiva (mm) do experimento com a redução da USL de 50 para 30 hPa e a (b) diferença entre o experimento e a simulação controle, acumulada em 24h das 12Z do dia 17 as 12Z do dia 18 de março de 2009.

#### 4.2.2.3.2 Redução da USL de 50 para 10 hPa

Assim como no caso de fevereiro de 2008 as mudanças na precipitação convectiva encontradas neste experimento tiveram um padrão semelhante ao experimento anterior, mas com um impacto maior. Este experimento também teve pouco impacto na precipitação sobre a RMSP (figura 4.35b) e o aumento/redução encontrado em outras regiões não gerou bons resultados (figura 4.35a).

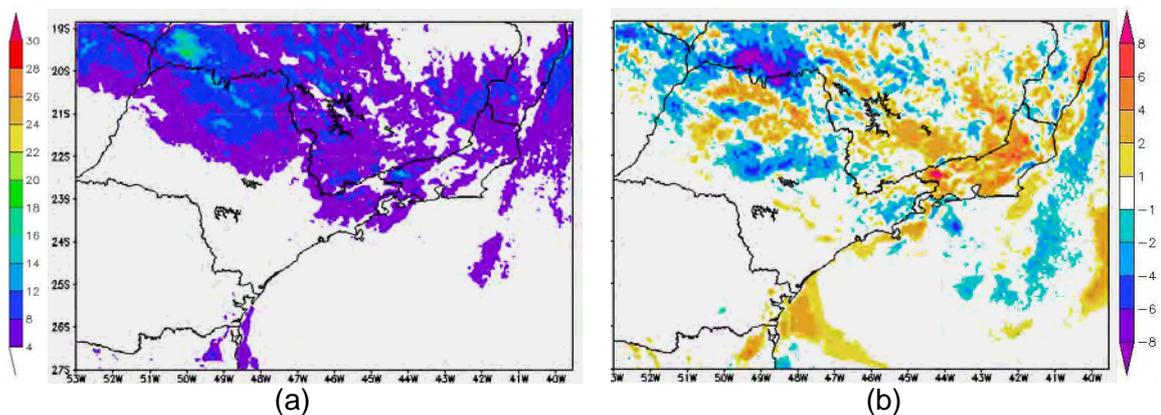


Figura 4.35 - (a) Precipitação convectiva (mm) do experimento com a redução da USL de 50 para 10 hPa e a (b) diferença entre o experimento e a simulação controle, acumulada em 24h das 12Z do dia 17 as 12Z do dia 18 de março de 2009.

#### 4.2.2.3.3 Redução do w

A redução do w praticamente removeu a precipitação sobre o oceano, que não foi observada, mas também não causou nenhum impacto sobre a Capital Paulista, além de aumentar as chuvas na região Sul de Minas, o que não foi

observado (figura 4.36). Este experimento apresentou resultados favoráveis sobre o oceano, mas desfavorável a simulação da precipitação sobre o continente.

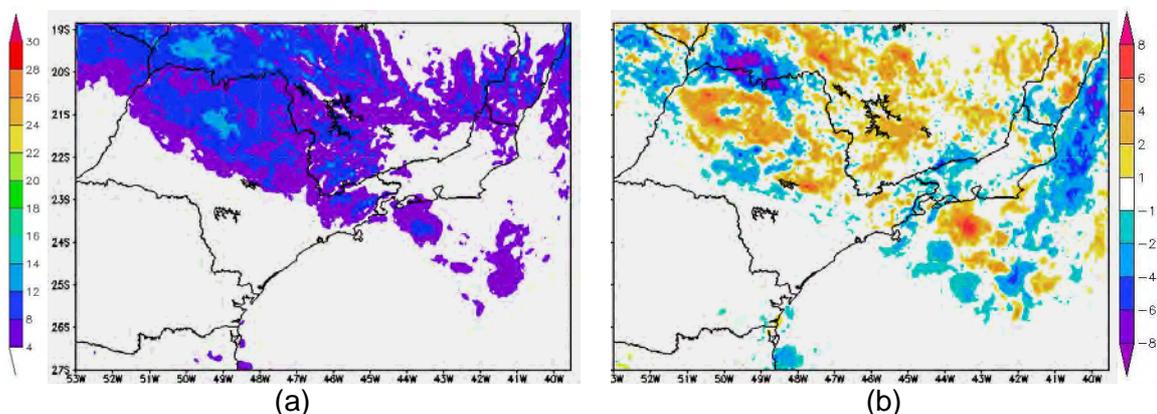


Figura 4.36 - (a) Precipitação convectiva (mm) do experimento com a redução do  $w$  de 0,2 para zero e a (b) diferença entre o experimento e a simulação controle, acumulada em 24h das 12Z do dia 17 as 12Z do dia 18 de março de 2009.

#### 4.2.2.4 Mudanças no mapa de vegetação e na parametrização convectiva KF

Ao incluir a vegetação urbana e diminuir a camada fonte para 30 hPa no esquema de convecção o núcleo observado de precipitação entre SP e MG aparece mais intenso (figura 4.37a), assim como no interior do Estado e no Vale do Paraíba.

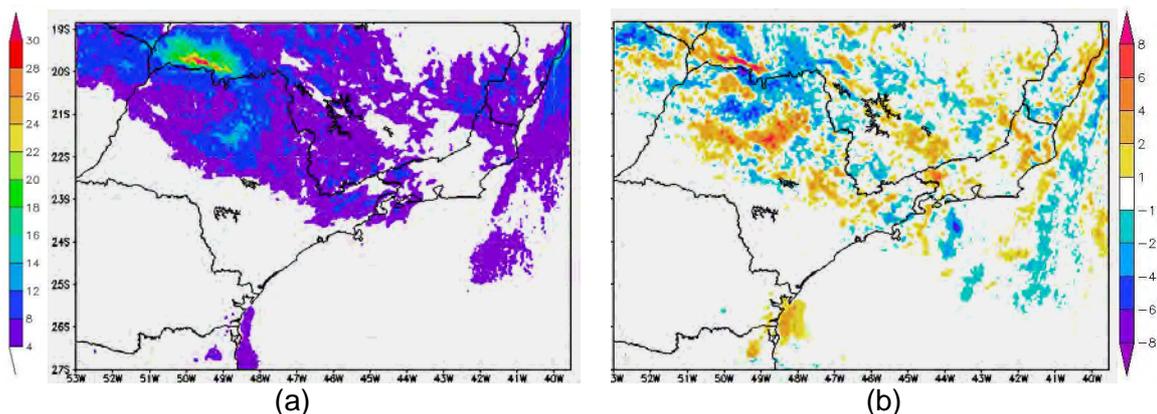


Figura 4.37 - (a) Precipitação convectiva (mm) do experimento com a redução do  $w$  de 0,2 para zero e a (b) diferença entre o experimento e a simulação controle, acumulada em 24h das 12Z do dia 17 as 12Z do dia 18 de março de 2009.

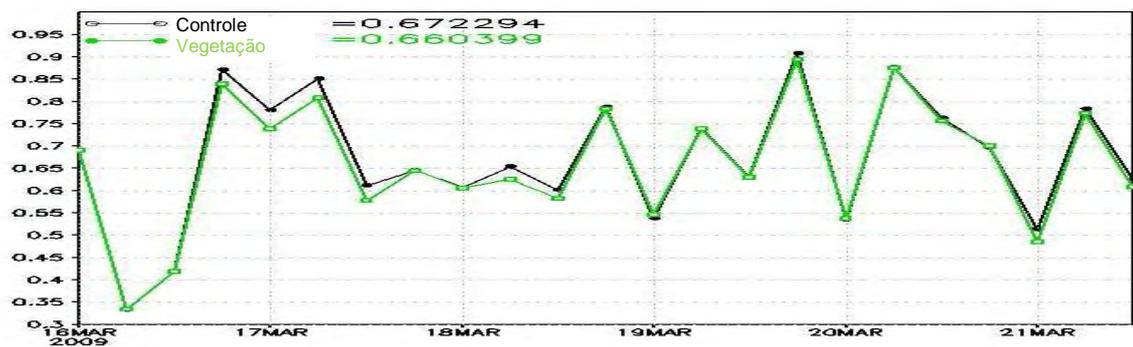
### 4.2.3 Avaliação estatística

O experimento com a inclusão do tipo urbano gerou uma REQM da temperatura em 850 hPa menor ou igual a simulação controle durante todo o período de integração, o que refletiu em uma REQM média para o todo período também menor (figura 4.38a), assim como foi encontrado no caso de fevereiro de 2008 (figura 4.20a).

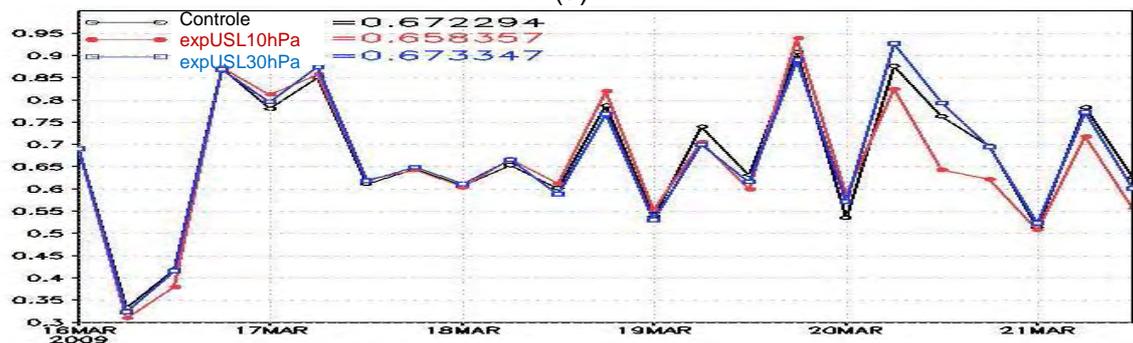
Os experimentos com a redução da USL tiveram para este caso resultados diferentes, onde o experimento com a redução da USL para 10 hPa resultou em uma REQM média menor que a simulação controle, enquanto o experimento com a redução para 30 hPa teve uma REQM média praticamente igual a da simulação controle. Embora a REQM média para todo o período de integração no experimento com a USL de 10 hPa seja menor que a da simulação controle, em alguns momentos o erro da temperatura em 850 hPa deste experimento é um pouco maior que a controle (figura 4.38b).

Assim como no caso de fevereiro de 2008 a REQM da temperatura em 850 hPa para este caso é maior que a simulação controle em praticamente todo o período de integração, assim como a REQM média (figura 4.38c). Portanto a alteração do  $w$  não produziu bons resultados para a temperatura em nenhum dos dois casos.

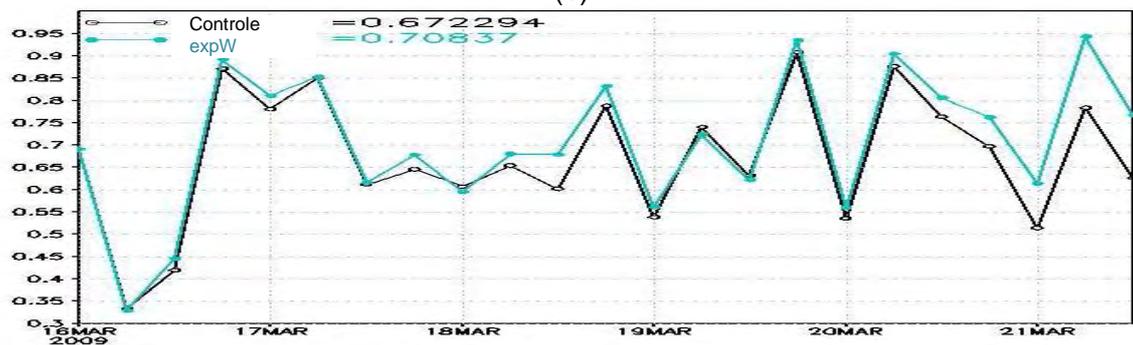
A inclusão da vegetação urbana com redução da USL para 30 hPa para este caso produziu resultados semelhantes ao caso anterior em relação a temperatura, ou seja, a REQM deste experimento foi menor que a simulação controle em quase todo o período de integração (figura 4.38d).



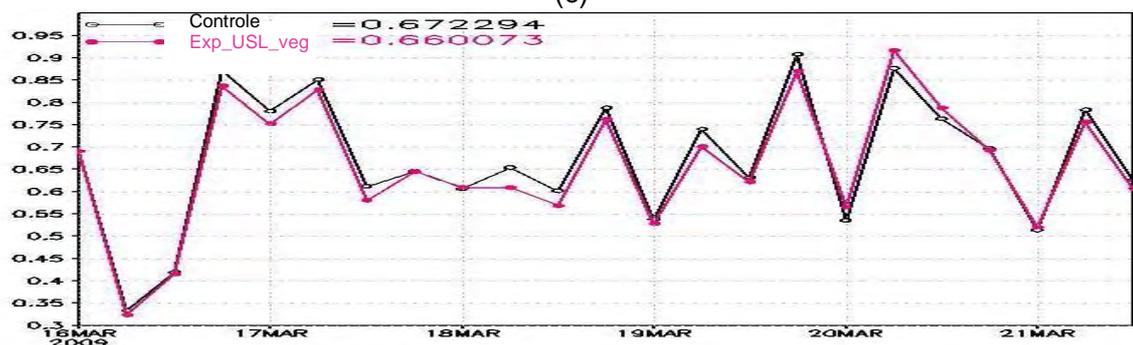
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 4.38 - Evolução temporal para 132 horas de simulação iniciada no dia 16 às 00Z da raiz do erro quadrático médio da temperatura em 850hPa (°C) para a simulação controle (preto) e (a) o experimento com a vegetação (verde), (b) o experimento com a redução da USL para 30hpa (azul) e para 10hPa (vermelho), (c) o experimento com o w (azul claro) e (d) o experimento com a USL de 30hPa e com a vegetação (rosa). Os valores mostrados dentro do gráfico representam a REQM média para todo o período.

A ETS da precipitação e o BIAS para o experimento com a vegetação urbana, assim como no caso anterior foi semelhante à simulação controle (figura 4.39).

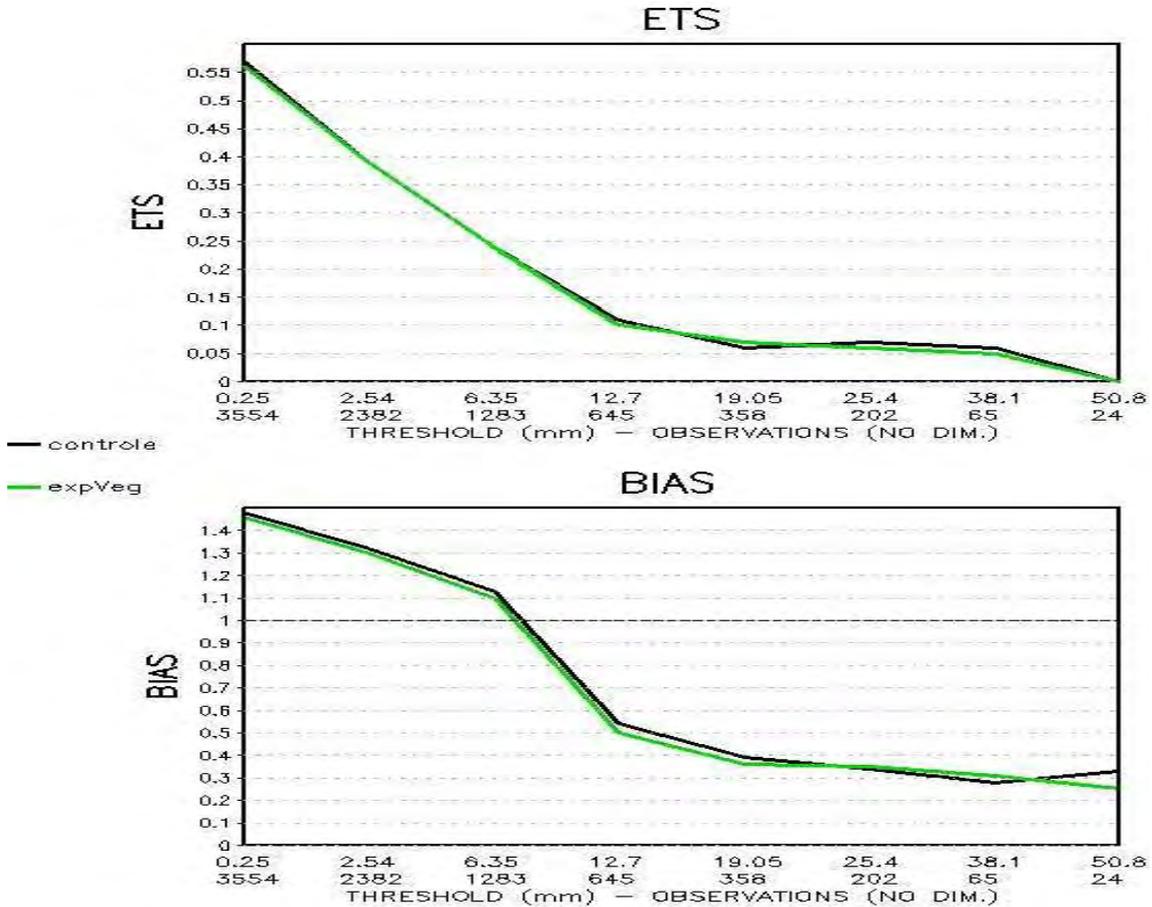


Figura 4.39 - ETS e BIAS da precipitação para a simulação controle (preto) e para o experimento com a inclusão da vegetação urbana (verde).

Os experimentos com a redução da USL apresentaram um BIAS maior que a simulação controle e um ETS menor para limiares menores que 19,05mm e maiores que 25,4mm. Para limiares entre 19,05mm e 25,4mm os dois experimentos obtiveram um ETS maior que o da simulação controle (figura 4.40), assim como no caso de fevereiro de 2008 (figura 4.22).

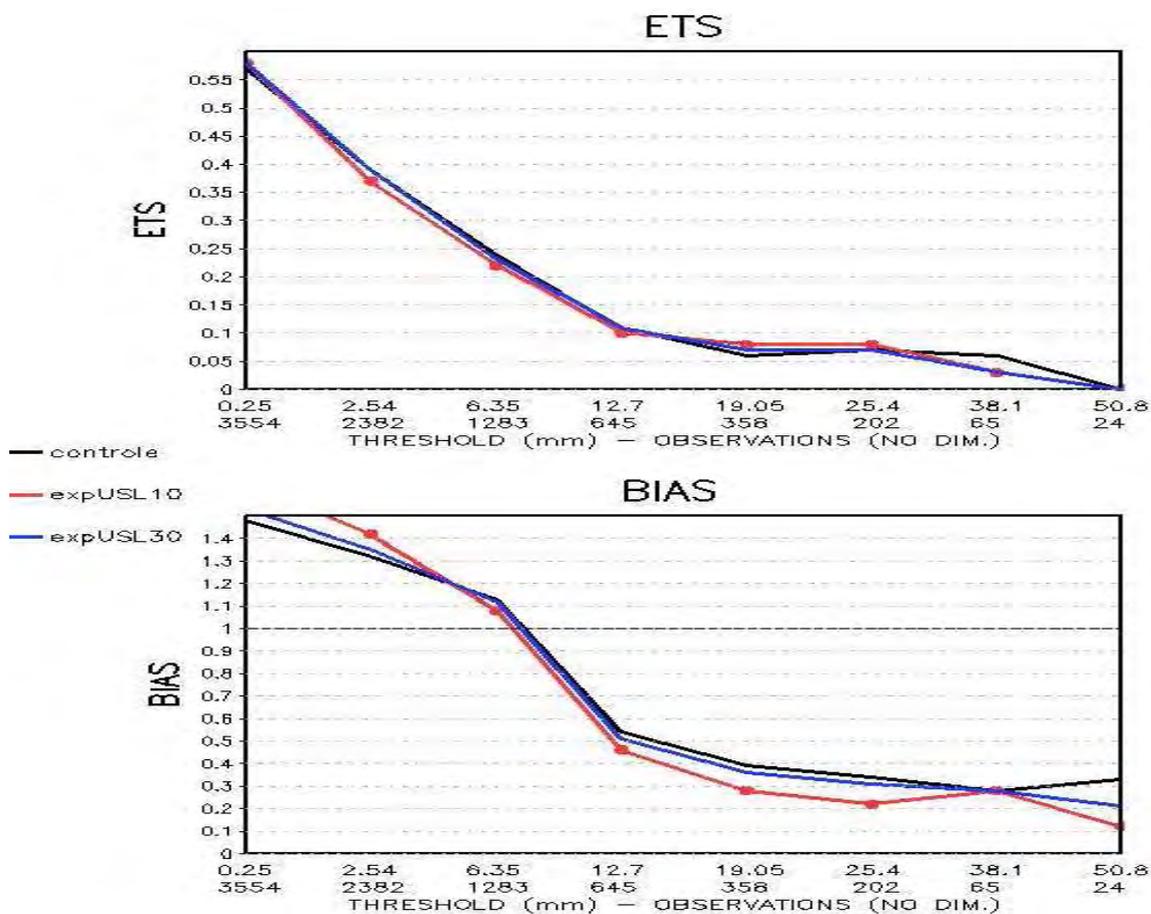


Figura 4.40 - ETS e BIAS da precipitação para a simulação controle (preto) e para o experimento com a redução da USL para 30 hPa (azul) e para 10 hPa (vermelho).

O ETS da precipitação para o experimento com mudança no  $w$  foi menor que o da simulação controle. O BIAS deste experimento teve um comportamento inferior ao BIAS da simulação controle (figura 4.41), o que mostra que a alteração do  $w$  não foi satisfatória em relação à precipitação assim como em relação à temperatura, como foi mostrado anteriormente. Este resultado é semelhante ao do caso de fevereiro de 2008.

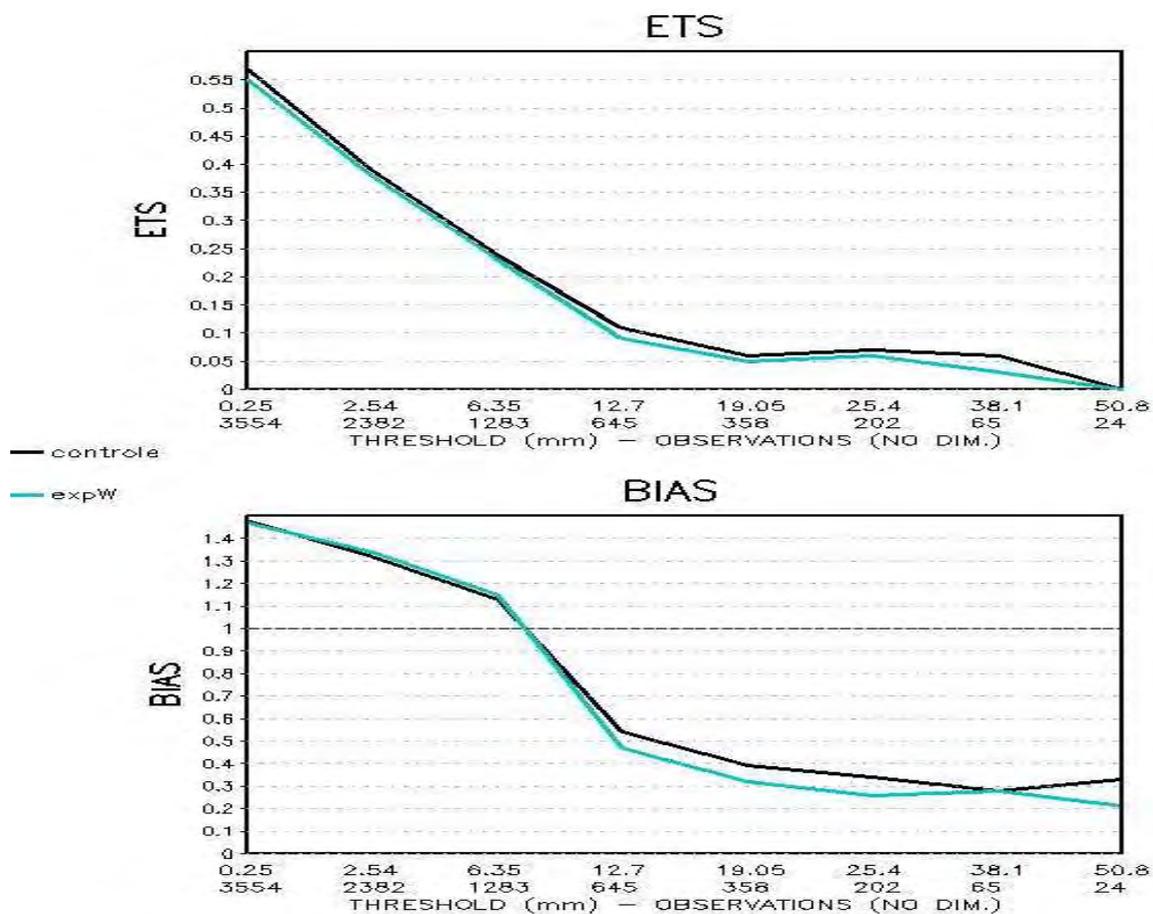


Figura 4.41 - ETS e BIAS da precipitação para a simulação controle (preto) e para o experimento com a alteração no w (azul claro).

O experimento com a vegetação urbana e a USL de 30 hPa em relação a precipitação produziu resultados semelhantes ao encontrado no caso anterior indicando que essas alterações obtiveram uma simulação de precipitação com um desempenho igual ou ligeiramente superior ao da simulação controle (figura 4.42).

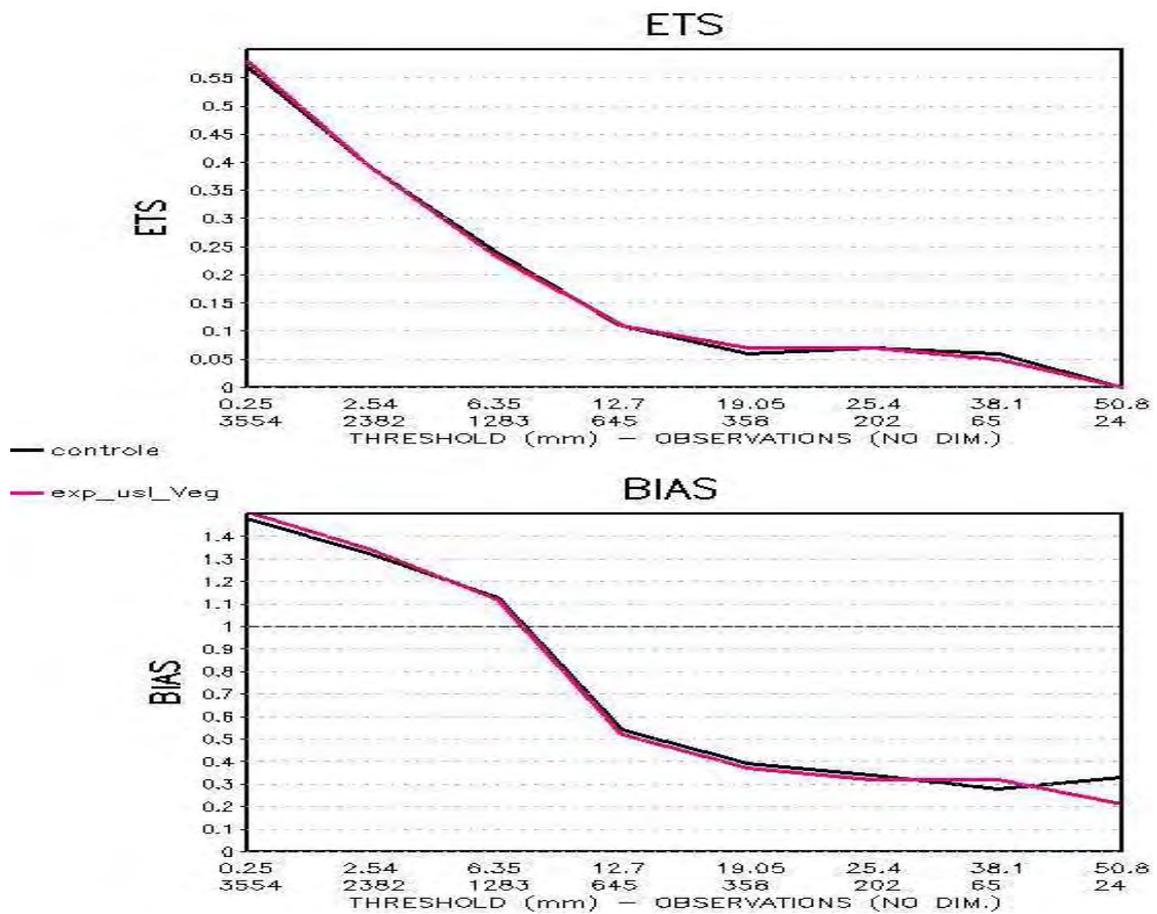


Figura 4.42 - ETS e BIAS da precipitação para a simulação controle (preto) e para o experimento com a redução da USL para 30hPa e com a inclusão da vegetação urbana (rosa).



## 5. CONCLUSÃO

Dois casos de precipitação convectiva intensa que atingiram a região da Serra do Mar Paulista foram estudados através de simulações utilizando o modelo Eta com resolução de 5km. Os dois casos estudados que ocorreram em fevereiro de 2008 e março de 2009 tiveram sua formação em um ambiente com fraca atuação de sistemas de grande escala, o que permite melhor estudar a contribuição dos efeitos locais, como circulação de brisa e aquecimento da superfície, na formação da chuva convectiva.

A inclusão do tipo urbano no mapa de vegetação e dos parâmetros associados a esse tipo de superfície resultou em um aumento da precipitação convectiva nos casos estudados, principalmente nos locais com a maior concentração deste tipo de cobertura de superfície. Para este experimento foi verificado, na Região Metropolitana de São Paulo que houve um aumento da temperatura próximo à superfície e redução da temperatura do ponto de orvalho, que era esperado por se tratar de uma região urbanizada com uma superfície que tem uma evaporação menor que superfícies com uma cobertura vegetal maior, portanto, o fluxo de calor latente diminuiu e o fluxo de calor sensível aumentou devido ao aumento da temperatura.

A componente meridional do vento à 10m em uma área entre a RMSP e o oceano mostrou uma intensificação do vento de sul no período da tarde, no experimento com o tipo urbano, caracterizando a intensificação da brisa marítima devido ao maior gradiente de temperatura gerado pelo aumento da temperatura próximo a superfície sobre região urbana, visto que a TSM utilizada não varia (não aumenta ou diminui) durante a simulação. A intensificação da brisa provocou um aumento do movimento vertical próximo a Serra que favorece a formação convectiva.

A avaliação da temperatura no experimento com a vegetação urbana foi realizada através da raiz do erro quadrático médio da temperatura em 850 hPa

utilizando a reanálise do ERA interim e o resultado mostrou uma redução do erro da temperatura simulada em relação a simulação controle nos dois casos indicando que a inclusão do tipo urbano forneceu uma simulação ligeiramente melhor da temperatura.

O ETS da precipitação foi calculado para a simulação controle e comparado com o experimento com a vegetação urbana com base na precipitação estimada pelo satélite TRMM, para todo o domínio de simulação e concluiu-se que a precipitação do experimento com a vegetação urbana foi ligeiramente melhor simulada em relação à simulação controle para valores abaixo de 19,05mm.

Nos experimentos com alterações no parâmetro de disparo do esquema de parametrização de convecção cumulos, os resultados encontrados para os dois casos em relação à distribuição espacial da diferença da precipitação convectiva do experimento e da simulação controle não teve um comportamento padrão, mas pode-se dizer que o teste com o  $w$  não foi satisfatório em nenhum dos dois casos e os testes com a redução da USL produziram resultados semelhantes com relação a distribuição espacial, mas com aumento da quantidade de chuva conforme a USL fosse menor. Com a redução da USL houve um disparo maior de precipitação convectiva, principalmente nos locais onde a chuva foi observada, no entanto quando a USL era muito reduzida, o esquema simulava valores mais altos de precipitação em alguns lugares onde não havia sido observada e por vezes diminuía a precipitação em locais onde ela havia ocorrido. Portanto, aparentemente a redução da USL gera um ganho na simulação da precipitação, no entanto uma redução excessiva pode não só melhorar o posicionamento como pode também aumentar o erro. O parâmetro é sensível para a produção de chuva convectiva, entretanto de difícil ajuste. O experimento com a redução do  $w$  obteve um impacto maior do que a redução da USL, mas esse impacto foi em geral mais negativo do que positivo nos dois casos estudados.

Para a temperatura em 850 hPa nos experimentos com a parametrização convectiva foi observado uma redução da REQM nos experimentos com a redução da USL e um aumento do erro no experimento com o w.

O ETS e o Bias para os experimentos com a redução da USL para os dois casos mostram um ganho na simulação da precipitação para limiares entre 19.05mm e 25.4mm. Enquanto o experimento com a redução do w se mostrou insatisfatório para os dois casos.

O experimento com a inclusão da vegetação urbana e a redução da USL para 30 hPa produziu resultados superiores que os demais experimentos mostrando que uma boa representação da superfície associada a um esquema que considera melhor os processos mais próximos a superfície é mais eficiente para a região de estudo, que tem a formação convectiva associada ao tipo de superfície e as condições atmosféricas locais térmicas e dinâmicas, como o aumento da circulação de brisa marítima devido ao aumento do gradiente de temperatura produzido pelo efeito da ilha de calor urbano. A intensificação da brisa foi constatada pela intensificação do movimento ascendente e do vento de sul no litoral e do aumento da temperatura do ar próximo a superfície sobre a RMSP.

Portanto, a configuração recomendada para melhoria da precipitação convectiva é a modificação da cobertura sobre a RMSP e a redução da USL para 30 hPa para ativar o esquema de convecção em locais com maior dependência das condições a superfície.

Tendo em vista os resultados encontrados neste trabalho propõem-se como trabalhos futuros: a inclusão da TSM (Temperatura da superfície do Mar) com maior resolução no litoral para modificar o contraste de temperatura entre terra e mar; testes com os parâmetros de superfície relacionados com a vegetação urbana, para amplificar a sensibilidade a esse tipo de cobertura de superfície e escolher mais casos de precipitação intensa para estudo.



## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANDERSON, C.J., R.W. Arritt; J.S. Kain. An Alternative Mass Flux Profile in the Kain–Fritsch Convective Parameterization and Its Effects in Seasonal Precipitation. **J. Hydrometeor.**, v. 8, p. 1128–1140, 2007.

ARAKAWA, A. Review article the cumulus parameterization problem: past, present, and future. **Journal of Climate**, v. 17, p. 2493-2525, 2004.

ARAKAWA, A.; SCHUBERT, W. H. Interaction of a cumulus cloud ensemble with the large scale environment, part I. **Journal of the Atmospheric Science**, v. 31, p. 674-701, 1974.

BASTOS, P. R. **Inclusão da perturbação de momentum no esquema de parametrização de cumulus kain-fritsch e impactos sobre um caso de chuva convectiva**. 2007. 106 p. (INPE-15145-TDI/1277). Dissertação (Mestrado em Meteorologia) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos. 2007. Disponível em: <<http://urlib.net/sid.inpe.br/mtc-m17@80/2007/12.07.12.20>>. Acesso em: 15 abr. 2010.

BECHTOLD, P., E. BAZILE, F. GUICHARD, P. MASCART; E. RICHARD. A mass-flux convection scheme for regional and global models. **Quart. J. Roy. Meteor. Soc.**, v. 127, p. 869–886, 2001.

BETTS, A. K. A new convective adjustment scheme. part i: observational and theoretical basis. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v. 112, p. 677-691, 1986.

BLACK, T. L. NMC Notes: The New NMC mesoscale Eta model: description and forecast examples. **Weather and Forecasting**, v. 9, p. 256-278, 1994.

BORNSTEIN, R. D. Observations of the urban heat island effect in New York City. **J. Appl. Meteor.**, v. 7, p. 575–582, 1968.

BRAHAM, R. R. Comments on “Urban, topographic and diurnal effects on rainfall in the St. Louis region.” **J. Appl. Meteor.**, v. 18, p. 371–374, 1979.

BROWNING, K.A. “Airflow and Precipitation Trajectories within Severe Local Storms which Travel to the right of the winds”. **J. Atmos. Sci.**, v. 21, p. 634-639, 1964.

BUSTAMANTE, J. F.; CHOU, S. C. Estudo da previsibilidade de eventos extremos sobre a serra do mar utilizando ensemble de curto prazo. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, XIV - (CBMET), , Florianópolis, SC. **Anais...** 2006. CD-ROM; Papel. (INPE-14542-PRE/9572). Disponível em: <<http://urlib.net/sid.inpe.br/mtc-m17@80/2006/12.21.13.51>>. Acesso em: 16 abr. 2010.

BYERS, H.R.; R.R. BRAHAM, Jr. **The thunderstorm**. Washington, DC, U.S. Government Printing Office, 1949. 287p.

CAVALCANTI, I. F. A.; CERQUEIRA, F. A.; ROZANTE, J. R. Caso extremo de precipitação com ocorrência de deslizamento na serra do mar. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, XIV - (CBMET), , Florianópolis, SC. **Anais...**2006. CD-ROM; Papel. (INPE-14545-PRE/9575). Disponível em: <<http://urlib.net/sid.inpe.br/mtc-m17@80/2006/12.19.17.28>>. Acesso em: 16 abr. 2010.

CHANGNON, S. A., R. G. SEMONIN; F. A. HUFF. A hypothesis for urban rainfall anomalies. **J. Appl. Meteor.**, v. 15, p. 544–560, 1976.

CHEN, F., JANJIC, Z. I., MITCHELL, K. Impact of atmospheric surface-layer parameterization in the new land-surface scheme of the NCEP mesoscale Eta model. *Bound. Layer Meteorology*, v. 85, p. 391-421, 1997.

CHOU, S. C.; BUSTAMANTE, J. F.; GOMES, J. L. Predictability of heavy rainfall events over the Serra do Mar. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON SOUTHERN HEMISPHERE METEOROLOGY AND OCEANOGRAPHY, 08., , Foz do Iguaçu (PR), Br. **Proceedings...** 2006. p. 1729-1731. CD-ROM. (INPE-13869-PRE/9050). Disponível em: <<http://urlib.net/sid.inpe.br/mtc-m15@80/2006/07.03.13.13>>. Acesso em: 16 abr. 2010.

COTTON, W.R.; ANTHES, R.A. “**Storm and Cloud Dynamics**”. Academic Press, 883 p, 1989.

DONNER, L. J. A cumulus parameterization including mass fluxes, vertical momentum dynamics, and mesoscale effects. **J. Atmos. Sci.**,v. 50, p. 889–906. 1993.

DORMAN, J. L.; SELLERS, P. J. A global climatology of albedo, roughness length and stomatal resistance for atmospheric general circulation, models as represented by the Simple Biosphere Model (SiB). **Journal of Applied Meteorology**. v.28, p.833-855,1989.

FARIAS, W. R. G., PINTO Jr. O., NACCARATO, K. P., PINTO, I. R. C. A. Anomalous lightning activity over the Metropolitan Region of São Paulo due to urban effects. **Atmospheric Research**, in press, 2008.

FELS, S. B.; SCHWARTZKOPF, M. D. The simplified exchange approximation: A new method for radiative transfer calculations. **J. Atmos. Sci.**, v. 32, p. 1475-1488, 1975.

FERRIER, B. S.; JIN, Y.; LIN, Y.; BLACK, T.; ROGERS, E.; DIMEGO, G. Implementation of a new grid-scale cloud and precipitation scheme in the NCEP Eta Model. In: Conf. on Weather Analysis and Forecasting, 19./ Conf. on Numerical Weather Prediction, v. 15., San Antonio, TX. **Proceedings...** San Antonio: Amer. Meteor. Soc., p. 280-283, 2002.

FRANK, W. M.; COHEN, C. Simulation of tropical convective systems. Part I: A cumulus parameterization. **J. Atmos. Sci.**, v. 44, p. 3787-3799. 1987.

FRITSCH, J. M., and CHAPPELL, C. F. Numerical prediction of convectively driven mesoscale pressure systems. Part I: Convective parameterization. **J. Atmos. Sci.**, v. 37, p. 1722-1733, 1980.

GOMES, J. L. **Estrutura dos sistemas precipitantes de verão sobre o Estado de São Paulo: estudo diagnóstico e numérico**. 2009. 182 p. (INPE-16659-TDI/1617). Tese (Doutorado em Meteorologia) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos. 2009. Disponível em: <<http://urlib.net/sid.inpe.br/mtc-m19@80/2009/12.07.17.33>>. Acesso em: 15 abr. 2010.

GUIMARÃES, J. M.; DEREZYNSKI, C. P.; CHOU, S. C. Avaliação do Modelo Eta durante um Episódio de Chuvas Intensas na Região da Serra do Mar. CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, XIV - (CBMET), Florianópolis, SC. **Anais...**2006. CD-ROM.

HOUZE, R. A., JR., SMULL, B. F.; DODGE, P. Mesoscale organization of springtime rainstorms in Oklahoma, **Mon. Weather Rev.**, v. 118, p. 613-654, 1990.

HOUZE, R. A., Jr. **Cloud Dynamics**, 573 pp., Academic, San Diego, Calif, 1993.

HOUZE, R. A., Jr. Mesoscale convective systems, **Rev. Geophys.**, 42, RG4003, doi:10.1029/2004RG000150, 2004.

Instituto Brasileiro de Geografia Estatística **Manual técnico de vegetação brasileira**, Rio de Janeiro, 1992. 92 p

KAIN, J. S.; FRITSCH, J. M. Convective parameterization for mesoscale models: The kain-fritsch scheme. In: EMANUEL, K. A.; RAYMOND, D. J. (Ed.). **Meteorological Monographs**. Boston: American Meteorological Society. p. 165-170, 1993.

KAIN, J. S. The Kain–Fritsch convective parameterization: An update. **J. Appl. Meteor.**, **43**, 170–181, 2004.

KAIN, J. S.; BALDWIN, M. The Kain-Fritsch Convective Scheme. **Unidata Workshop**. 2006.

KHEMANI, L. T.; B. V. R. MURTY. Rainfall variations in an urban industrial region. **J. Appl. Meteor.**, v. 12, p. 187–194, 1973.

KUO, H. Further studies of the parameterization of the influence of cumulus convection on the large scale flow. **Journal of the Atmospheric Science**, v. 31, p. 1232-1240, 1974.

LACIS, A. A.; HANSEN, J. E. A parameterization of the absorption of solar radiation in the earth's atmosphere. **Methods Comput. Phys.**, v. 17, p. 173-265, 1974.

LEMON, L.R.; C.A. DOSWELL III Severe thunderstorm evolution and Mesocyclone structure as related to tornadogenesis. **Mon. Wea. Rev.**, v. 106, p. 48-61, 1979.

LIN, C.Y.; CHEN, W.-C.; LIU, S.C.; LIOU, Y.-A.; LIU, G.-R.; LIN, T.-H. **Numerical study of the impact of urbanization on the precipitation over Taiwan. Atmospheric Environment**. doi:10.1016/j.atmosenv.2007.12.054, in press, 2007.

LIN, C-Y; F. CHEN; J.C. HUANG; W-C. CHEN; Y.-A. LIOU; W.-N. CHEN; SHAW-C. LIU. Urban Heat Island effect and its impact on boundary layer development and land-sea circulation over northern Taiwan. **Atmospheric Environment**, **42**, 5635-5649. doi:10.1016, 2008.

LO, J.C.F.; A.K.H. LAU; F. CHEN; J.C.H. FUNG; K.K.M. LEUNG. Urban Modification in a Mesoscale Model and the Effects on the Local Circulation in the Pearl River Delta Region. **J. Appl. Meteorol. Climatol.**, v. 46, p. 457–476, 2007.

MARWITZ, J.D. “The Structure and Motion of Severe Hailstorms. Part I: Supercell Storms”. **J. Appl. Meteorol.**, v. 11, p. 166-179, 1972.

MELLOR, G. L.; YAMADA, T. Development of a turbulence closure model for geophysical fluid problems. **Rev. Geophys. Space Phys.**, v. 20, p. 851-875, 1982.

MESINGER, F. A blocking technique for representation of mountains in atmospheric models. **Riv. Meteor. Aeronautica**, v. 44, p. 195-202, 1984.

MESINGER, F.; JANJIC, Z. I. NICKOVIC, S.; GAVRILOV, D. and DEAVEN, D. G. The step-mountain coordinate: model description and performance for cases of Alpine lee cyclogenesis and for a case of an Appalachian redevelopment. **Monthly Weather Review**, v. 116, n. 7, p. 1493-1518, 1988.

MESINGER, F. Bias adjusted precipitation threat scores. **Adv. Geosciences**, 16, 137-143. Available online at <http://www.adv-geosci.net/16/index.html>. 2008.

NACCARATO, K. P., PINTO Jr. O., PINTO, I. R. C. A. Evidence of thermal and aerosol effects on the cloud-to-ground lightning density and polarity over large urban areas of Southeastern Brasil. **Geophysical Research Letter**, v. 30, n<sup>o</sup> 13, p. 1674-1677, 2003.

NEWTON, C. W.; J. C. FRANKHAUSER. "Movement and propagation of multicellular convective storms". **Pure Appl. Geophys.**, v. 113, p. 747-764. 1975.

OOYAMA, K. A theory on parameterization of cumulus convection. **Journal of the Meteorological Society of Japan**, v. 39 (Spec. issue), p. 744-756, 1971.

PAULSON, C. A. The mathematical representation of wind speed and temperature profiles in the unstable atmospheric surface layer. **J. Appl. Meteorol.**, v. 9, p. 857-861, 1970.

PINTO Jr. O., NACCARATO, K. P., PINTO, I. R. C. A. Raios em grandes centros urbanos no sudeste do Brasil. **Boletim da sociedade Brasileira de Meteorologia**. v. 32, n. 2-3, p. 14-18. 2008.

Projeto Radambrasil. (Levantamento de Recursos Naturais, v.1-26). Rio de Janeiro: DNPM, 1974-1986.

ROZANTE, J. R.; CAVALCANTI, I. F. A. Influência da condição inicial na simulação do evento de precipitação extrema na serra do mar. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, XIV - (CBMET), Florianópolis, SC. **Anais...** 2006. CD-ROM; Papel. (INPE-14581-PRE/9611). Disponível em: <<http://urlib.net/sid.inpe.br/mtc-m17@80/2006/12.21.18.25>>. Acesso em: 16 abr. 2010.

ROZANTE, J. R.; I. F. A. CAVALCANTI. Regional Eta model experiments: SALLJEX and MCS development, **J. Geophys. Res.**, 113, D17106, doi:10.1029/2007JD009566. 2008.

SAWAI, T. Formation of the urban air mass and the associated local circulation. **J. Meteor. Soc. Japan**, v. 56, p. 159–174, 1978.

SELUCHI, M. E. Padrões sinóticos associados a situações de deslizamentos de encostas na serra do mar. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, XIV - (CBMET), Florianópolis, SC. **Anais...** 2006. Papel. (INPE-14238-PRE/9326). Disponível em: <<http://urlib.net/sid.inpe.br/mtc-m15@80/2006/09.27.18.36>>. Acesso em: 16 abr. 2010.

SIMMONS A, UPPALA S, DEE D, KOBAYASHI S. ERA-Interim: New ECMWF reanalysis products from 1989 onwards. ECMWF Newsletter 110: 26–35. 2006.

TEIXEIRA, M. S.; SATYAMURTI, P. Eventos Extremos de Precipitação na Região da Serra do Mar: II – condições meteorológicas de grande escala. **XIV Congresso Brasileiro de Meteorologia**. Florianópolis, 2006.

VIANELLO, R. L.; A. R. ALVES. “**Meteorologia Básica e Aplicações**”. Viçosa: UFV, Impr. Univ., 449p, 1991.

VIEIRA, R. M. S. P.; ALVALÁ, R. C. S.; PONZONI, F. J.; FERRAZ NETO, S.; CANAVESI, V. Mapa de uso e cobertura da terra do Estado de São Paulo. São José dos Campos: INPE. (INPE ePrint sid.inpe.br/mtc-m19@80/2010/01.22.12.32). Disponível em: <<http://urlib.net/sid.inpe.br/mtc-m19@80/2010/01.22.12.32>>. 2010.

VUKOVICH, F. M. Theoretical analysis of the effect of mean wind and stability on a heat island circulation characteristic of an urban complex. **Mon. Wea. Rev.**, v. 99, p. 919–926, 1971.

WEISMAN, M.L.; J.B. KLEMP. “**Characteristics of isolated convective storms**”. In: Ray, P.S., ed. Meso. Meteor. and Forec., Boston, American Meteorology Society. P. 331-358, 1986.

XAVIER, M.C.A.: “**Estudo dos padrões atmosféricos associados a tempestade de verão no Estado do Rio de Janeiro**”. Rio de Janeiro, IGEO/UFRJ. 53 p. (monografia). 2002.

ZHANG, D.-L.; J. M. FRITSCH. Numerical simulation of the meso-b scale structure and evolution of the 1977 Johnstown flood. Part I: Model description and verification. **J. Atmos. Sci.**,v. 43, p. 1913–1943, 1986.

ZOBLER, L. **A world soil file for global climate modelling**. New York, New York, U.S.A. NASA Goddard Institute for Space Studies.1986. NASA Technical Memorandum 87802.