



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

INPE-16718-TDI/1656

**SENSIBILIDADE DA PRECIPITAÇÃO SIMULADA NA
REGIÃO DO CENTRO DE LANÇAMENTO DE
ALCÂNTARA A ESQUEMAS DE CONVECÇÃO
EXPLÍCITA: ESTUDOS DE CASO**

José Hélio Abreu Nogueira

Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Meteorologia, orientada pelo Dr. Marcos Daisuke Oyama, aprovada em 05 de maio de 2010.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP8W/37AUJDB>>

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) 3208-6923/6921

Fax: (012) 3208-6919

E-mail: pubtc@sid.inpe.br

CONSELHO DE EDITORAÇÃO E PRESERVAÇÃO DA PRODUÇÃO INTELLECTUAL DO INPE (RE/DIR-204):**Presidente:**

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

Membros:

Dr^a Inez Staciarini Batista - Coordenação Ciências Espaciais e Atmosféricas (CEA)

Dr^a Maria do Carmo de Andrade Nono - Conselho de Pós-Graduação

Dr^a Regina Célia dos Santos Alvalá - Centro de Ciência do Sistema Terrestre (CST)

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)

Dr. Horácio Hideki Yanasse - Centro de Tecnologias Especiais (CTE)

BIBLIOTECA DIGITAL:

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

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

Deicy Farabello - Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPT)

REVISÃO E NORMALIZAÇÃO DOCUMENTRIA:

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

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

EDITORAÇÃO ELETRÔNICA:

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



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

INPE-16718-TDI/1656

**SENSIBILIDADE DA PRECIPITAÇÃO SIMULADA NA
REGIÃO DO CENTRO DE LANÇAMENTO DE
ALCÂNTARA A ESQUEMAS DE CONVECÇÃO
EXPLÍCITA: ESTUDOS DE CASO**

José Hélio Abreu Nogueira

Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Meteorologia, orientada pelo Dr. Marcos Daisuke Oyama, aprovada em 05 de maio de 2010.

URL do documento original:

<http://urlib.net/8JMKD3MGP8W/37AUJDB>

INPE
São José dos Campos
2010

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

N689s Nogueira, José Hélio Abreu.
Sensibilidade da precipitação simulada na região do Centro de Lançamento de Alcântara a esquemas de convecção explícita: estudos de caso / José Hélio Abreu Nogueira. – São José dos Campos : INPE, 2010.
154 p. ; (INPE-16718-TDI/1656)

Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2010.
Orientador : Dr. Marcos Daisuke Oyama.

1. Precipitação. 2. Centro de Lançamento de Alcântara. 3. Esquemas de convecção. 4. Instituto de Controle do Espaço Aéreo (ICEA). 5. Modelo regional MM5. I.Título.

CDU 551.509.313.4

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. Clóvis Angeli Sansigolo



Presidente / INPE / SJCampos - SP

Dr. Marcos Daisuke Oyama



Orientador(a) / IAE/CTA / SJCampos - SP

Dr. Cleber Souza Corrêa



Convidado(a) / ICEA/CTA / São José dos Campos - SP

Aluno (a): José Hélio Abreu Nogueira

São José dos Campos, 05 de maio de 2010

À minha esposa Rita
e nossos filhos Maria Rita, João Pedro,
João Lucas e João Miguel,
pelos momentos que deixamos de passar juntos
para que este trabalho pudesse ser realizado.

AGRADECIMENTOS

A Deus Pai, por ter permitido tudo que aconteceu em minha vida.

A minha família, pelas inúmeras vezes que me apoiaram e inspiraram nos momentos de cansaço e desânimo.

A meus pais Hélio e Maria Aparecida, pelo exemplo de amor, caráter e simplicidade que me nortearam por toda a minha vida.

Ao meu orientador Dr. Marcos Daisuke Oyama, pelo extraordinário conhecimento e incansável paciência que foram fundamentais para que os objetivos fossem alcançados.

Ao Dr. Cléber Souza Corrêa, pela atenção e companheirismo que demonstrou em todas as oportunidades em que estivemos juntos durante a realização deste trabalho.

Ao Departamento de Controle do Espaço Aéreo (DECEA), ao Instituto de Controle do Espaço Aéreo (ICEA) e ao Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), por terem viabilizado esta oportunidade ímpar em minha vida.

A todos os companheiros de curso, professores e funcionários do INPE, pelo convívio harmonioso que tivemos durante este período.

A todos os companheiros do Grupo de Pesquisa e aos servidores da Divisão de Ciências Atmosféricas do IAE, pelos momentos agradáveis e pelo apoio prestado durante a realização desta pesquisa.

A todos aqueles que de alguma forma contribuíram neste trabalho e não foram citados.

E a todos os amigos e familiares, que direta ou indiretamente contribuíram para que este trabalho fosse realizado.

RESUMO

Eventos de precipitação ocorridos na região do Centro de Lançamento de Alcântara (CLA) foram simulados com o modelo regional MM5 em grades aninhadas para avaliar a sensibilidade da precipitação simulada a 1) uso de diferentes esquemas de convecção explícita e 2) retirada do esquema de convecção implícita nas grades de maior resolução horizontal. O trabalho consistiu em duas partes. Na parte I, foram utilizadas três grades aninhadas centradas sobre o CLA (27, 9 e 3 km de espaçamento). Inicialmente, diferentes esquemas de convecção explícita foram utilizados juntamente com esquema de convecção implícita nas três grades (aproximação híbrida) para simular quatro eventos de precipitação. Apesar de todos os esquemas levarem a erros expressivos, o Simple Ice apresentou melhores resultados. Então, os mesmos eventos foram simulados empregando somente o Simple Ice nas grades de 3 e/ou 9 km de espaçamento. A representação da precipitação na grade de 3 km apresentou melhorias expressivas quando se empregou somente o esquema de convecção explícita nas grades de 9 e 3 km. Na parte II, simulações para o período de 1 mês (março de 2009) foram realizadas com uma versão operacional do MM5 instalada no Instituto de Controle do Espaço Aéreo (ICEA). Grades aninhadas com espaçamento de 36 e 12 km, centrado no Nordeste do Brasil, foram utilizadas. Na grade de 12 km, o uso tanto de aproximação híbrida (ICEA1) quanto de somente esquema de convecção explícita (Simple Ice; ICEA2), levaram a uma boa representação da variabilidade interdiária da precipitação, embora tenham superestimado o total de precipitação no período. ICEA2 produziu núcleos de elevada intensidade de precipitação, enquanto ICEA1 gerou áreas de chuva mais espalhadas e com intensidade menor. Apesar de constatada sensibilidade da precipitação simulada ao uso de diferentes estratégias, os erros em relação às observações impediram que se apontasse a superioridade de uma delas. Assim como observado em trabalhos anteriores, persistem as dúvidas sobre a relação entre adequação do uso de aproximação híbrida e resolução espacial dos domínios utilizados em simulações com modelos de mesoescala, pois a utilização de somente esquemas explícitos nas grades de menor espaçamento, no presente estudo, não garantiu melhorias expressivas das previsões de precipitação.

**SENSITIVITY OF THE SIMULATED PRECIPITATION OVER THE
ALCÂNTARA LAUNCH CENTER REGION TO EXPLICIT CONVECTION
SCHEMES: CASE STUDIES**

ABSTRACT

Precipitation events over the Alcântara Launch Center (CLA, Brazil) were simulated using the MM5 regional model in nested domains to assess the sensitivity of simulated precipitation to 1) the use of different explicit convection schemes and 2) turning off the implicit convection scheme in the domains with higher horizontal resolution. This work is composed by two parts. In part I, three nested domains centered at CLA (27, 9 and 3 km grid spacing) were used. Initially, different explicit convection schemes were used along with an implicit convection scheme for all domains (hybrid approach) to simulate four precipitation events. Despite the marked errors found for all schemes, the Simple Ice scheme showed better results. Then, the same events were simulated using only the Simple Ice scheme in the 3 and/or 9 km grid spacing domains. The representation of precipitation in the 3 km grid spacing domain showed significant improvement when only explicit convection scheme was used in both 9 and 3 km grid spacing domains. In part II, simulations for a 1-month period (March 2009) were performed with an operational version of MM5 installed at the Institute of Air Space Control (ICEA, Brazil). Two nested domains with grid spacing of 36 and 12 km, centered at Northeast Brazil, were used. In the 12 km grid spacing domain, the use of either hybrid approach (ICEA1) or only explicit scheme (Simple Ice; ICEA2) led to good representation of the precipitation interdaily variability, even though the total monthly precipitation was overestimated. ICEA2 (ICEA1) generated concentrated (broader) areas with high (lower) precipitation intensity. Despite the sensitivity of the simulated precipitation to the strategy used, the errors found in relation to the observations precluded the possibility of choosing the best strategy. As noted in previous studies, the doubts on the relationship between hybrid approach use adequacy and spatial resolution of the domains used in simulations with mesoscale models do persist, because the use of explicit schemes alone in higher resolution domains, in the present study, did not assure significant improvements in precipitation forecasts.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS
LISTA DE TABELAS
LISTA DE ABREVIATURAS

1 INTRODUÇÃO	29
2 DADOS	35
2.1 Dados de Satélite.....	35
2.2 Dados de Radiossondagens	35
2.3 Dados Meteorológicos de Superfície	36
2.4 Dados de Radar Meteorológico	36
2.5 Dados de Reanálise do NCEP/NCAR.....	37
2.6 Dados de análise do NCEP.....	37
2.7 Boletim Climanálise.....	37
2.8 Dados de precipitação estimada pelo satélite TRMM	37
2.9 Dados de precipitação estimada pelo modelo Hidroestimador	38
3 MODELO DE MESOESCALA MM5.....	39
3.1 Descrição geral	39
3.2 Comparação entre os esquemas explícitos do MM5.....	41
4 SELEÇÃO E ESTUDOS OBSERVACIONAL DOS CASOS DE PRECIPITAÇÃO.....	47
4.1 Estudos de casos de precipitação sobre a região do CLA	47
4.1.1 Eventos ocorridos no dia 18/07/08.....	48
4.1.2 Eventos ocorridos no dia 30/07/08.....	56
4.1.3 Eventos ocorridos no dia 12/03/09.....	61
4.1.4 Eventos ocorridos no dia 26/03/09.....	68
4.2 Síntese descritiva dos casos de precipitação sobre a região do CLA	76
5 DESENHO DAS SIMULAÇÕES	77
5.1 Simulações com o modelo instalado na ACA/IAE.....	77
5.2 Simulações com o modelo instalado no ICEA	83

6 RESULTADOS	87
6.1 Simulações realizadas com o modelo instalado na ACA/IAE	87
6.1.1 Análise das simulações do Grupo 1	87
6.1.2 Síntese dos resultados das simulações do Grupo 1	104
6.1.3 Análise das simulações do Grupo 2	108
6.1.4 Síntese dos resultados das simulações do grupo 2.....	126
6.2 Simulações realizadas com o modelo instalado no ICEA.....	127
6.2.1 Precipitação observada na região do NEB durante março de 2009	127
6.2.2 Análise das simulações.....	128
6.2.3 Síntese dos resultados das simulações realizadas no ICEA.	136
7 CONCLUSÕES.....	137
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	141
APÊNDICE A - TESTES DE SENSIBILIDADE DE SIMULAÇÕES DE PRECIPITAÇÃO À RESOLUÇÃO VERTICAL	149
1.1 Objetivo	145
1.2 Metodologia.....	146
1.3 Resultado das simulações.....	146

LISTA DE FIGURAS

Figura 4.1 - Área delimitada (aproximada, em vermelho) para obtenção da precipitação média.....	48
Figura 4.2 - Precipitação horária registrada pelas estações de Alcântara (CLA) de São Luís (SLZ) e estimada pelo modelo Hidroestimador (HIDRO) e pelo satélite TRMM (TRMM) para o dia 18/07/08. Unidade de precipitação: mm/h.....	49
Figura 4.3 - Recorte de imagens do satélite GOES-10 + METEOSAT-09 para as 12UTC do dia 17/07/08 (a), 00UTC (b) e 06UTC (c) do dia 18/07/08. Fonte: INPE/CPTEC/DSA. Os painéis “d”, “e” e “f” referem-se a campos gerados a partir de dados de análise, sendo: (d) direção do vento horizontal (VNT, m/s) e umidade específica (Q, em g/kg) em 850 hPa para as 00UTC do dia 18; (e) perfil do fluxo de umidade específica sobre o ponto de grade que contém o CLA para as 12UTC de 18/07/08 e (f) ômega (Pa/s) em 850 hPa para as 12UTC do dia 18/07/08.....	51
Figura 4.4 - Imagens de temperatura de brilho das nuvens (TB, °C) para o dia 18/07/08. Os campos referem-se aos seguintes horários: (a) 0245UTC, (b) 0330UTC, (c) 0445UTC e (d) 0615UTC. Fonte: INPE/CPTEC/DSA.....	52
Figura 4.5 - Imagens de refletividade das nuvens geradas pelo radar localizado no CLA para o dia 18/07/08. Os campos referem-se aos seguintes horários (UTC), nesta ordem: (a) 0515, (b) 0603, (c) 0702, (d) 0904, (e) 1030 e (f) 1123. O maior círculo concêntrico representa uma distância de 120 km.....	53
Figura 4.6 - Imagens de refletividade das nuvens geradas pelo radar localizado no CLA para o dia 18/07/08. Os campos referem-se aos seguintes horários (UTC), nesta ordem: (a) 1633 e (b) 1720. O maior círculo concêntrico representa uma distância de 120 km.....	54
Figura 4.7 - (a) Recorte de imagem obtida pelo satélite NOAA-15 para as 1930UTC do dia 18/07/08. (b) Recorte de imagem obtida pelo satélite NOAA-17 para as 0026UTC do dia 19/07/08. Fonte: INPE/CPTEC/DSA. (c) Campo de precipitação (mm/h) estimado pelo satélite TRMM para as 18UTC do dia 18/07/08. (d) Campo de divergência do vento horizontal em 850 hPa (1/s) gerado a partir de dados de análise para as 00UTC do dia 19/07/08.....	55
Figura 4.8 - Precipitação horária registrada pelas estações de Alcântara (CLA) de São Luís (SLZ) e estimada pelo modelo Hidroestimador (HIDRO) e pelo satélite TRMM (TRMM) para o dia 30/07/08. Unidade de precipitação: mm/h.....	56

Figura 4.9 - Recorte de imagens do satélite GOES-10 + METEOSAT-09 para às 00UTC do dia 29/07/08 (a), 00UTC (b), 12UTC (c) e 1815UTC (d) do dia 30/07/08. Fonte: INPE/CPTEC/DSA.....	57
Figura 4.10 - Imagens de temperatura de brilho das nuvens (TB, °C) para o dia 30/07/08. Os campos referem-se aos seguintes horários: (a) 1715UTC, (b) 1830UTC, (c) 1930UTC e (d) 2045UTC. Fonte: INPE/CPTEC/DSA.....	58
Figura 4.11 - Campos gerados a partir de dados de análise, sendo: perfil do fluxo de umidade específica sobre o ponto de grade que contém o CLA para as 12UTC do dia 30 (“a”) e para as 00UTC do dia 31/07/08 (“b”); escoamento (VNT, m/s) e umidade específica (Q, em g/kg) em 700 hPa para as 12UTC do dia 30/07/08 (c) e ômega (Pa/s) em 700 hPa para as 00UTC do dia 31/07/08 (“d”).....	59
Figura 4.12 - Imagens de refletividade das nuvens geradas pelo radar localizado no CLA para o dia 30/07/08. Os campos referem-se aos seguintes horários (UTC), nesta ordem: (a) 1638 e (b) 1704, (c) 1833, (d) 1921, (e) 2037 e (f) 2116. O maior círculo concêntrico representa uma distância de 120 km.....	60
Figura 4.13 - Precipitação horária registrada pelas estações de Alcântara (CLA) de São Luís (SLZ) e estimada pelo modelo Hidroestimador (HIDRO) e pelo satélite TRMM (TRMM) para o dia 12/03/09. Unidade de precipitação: mm/h.....	61
Figura 4.14 - Análise sinótica ao nível de 250 hPa (a) e à superfície (b) para às 00Z do dia 12/03/09. Fonte: INPE/CPTEC/GPT.....	62
Figura 4.15 - Recorte de imagens do satélite GOES-10 + METEOSAT-09 para às 18UTC do dia 11/03/09 (a), 0015UTC (b) e 12UTC (c) do dia 12/03/09. Fonte: INPE/CPTEC/DSA. O painel “d” refere-se ao escoamento (VNT, m/s) e umidade específica (Q, em g/kg) em 925hPa, para as 00UTC do dia 12/03/09, gerado a partir de dados de análise.....	63
Figura 4.16 - Imagens de temperatura de brilho das nuvens (TB, °C) para o dia 12/03/09. Os campos referem-se aos seguintes horários: (a) 0245UTC, (b) 05UTC, (c) 0730UTC e (d) 11UTC. Fonte: INPE/CPTEC/DSA.....	64
Figura 4.17 - Imagens de refletividade das nuvens geradas pelo radar localizado no CLA para o dia 12/03/09. Os campos referem-se aos seguintes horários (UTC), nesta ordem: (a) 0203 e (b) 0241, (c) 0329, (d) 0531, (e) 0713 e (f) 0942, (g) 1113 e (h) 1315. O maior círculo concêntrico representa uma distância de 120 km.....	65

Figura 4.18 - Recorte de imagens do satélite GOES-10 + METEOSAT-09 para as 1815UTC do dia 11/03/09 (a) e 0015UTC do dia 12/03/09. Fonte: INPE/CPTEC/DSA.....	66
Figura 4.19 - Imagens de temperatura de brilho das nuvens (TB, °C) para o dia 12/03/09. Os campos referem-se aos seguintes horários: (a) 1615UTC, (b) 1915UTC, (c) 2015UTC e (d) 2115UTC. Fonte: INPE/CPTEC/DSA.....	66
Figura 4.20 - Campos de linhas de corrente em 200hPa, para as 18UTC do dia 12 (a) e 00UTC do dia 13/03/09 (b), gerados a partir de dados de reanálise. O retângulo vermelho delimita área usada para estudo.....	67
Figura 4.21 - Imagens de refletividade das nuvens geradas pelo radar localizado no CLA para o dia 12/03/09. Os campos referem-se aos seguintes horários (UTC), nesta ordem: (a) 1615 e (b) 1715, (c) 1830, (d) 1915, (e) 1945 e (f) 2033. O maior círculo concêntrico representa uma distância de 120 km.....	67
Figura 4.22 - Precipitação horária registrada pelas estações de Alcântara (CLA) de São Luís (SLZ) e estimada pelo modelo Hidroestimador (HIDRO) e pelo satélite TRMM (TRMM) para o dia 26/03/09. Unidade de precipitação: mm/h.....	68
Figura 4.23 - Análise ao nível de 250 hPa (a) e à superfície (b) para às 00Z do dia 26/03/09. Fonte: INPE/CPTEC/GPT. Campos de direção do vento horizontal (VNT, m/s) e umidade específica (Q, em g/kg) em 925 hPa, para as 00UTC do dia 26/03/09 (c) e 00UTC do dia 27/03/09 (d), gerados a partir de dados de análise.....	69
Figura 4.24 - Recorte de imagens do satélite GOES-10 + METEOSAT-09 para as 06UTC (a) e 18UTC do dia 26/03/09. Fonte: INPE/CPTEC/DSA.....	70
Figura 4.25 - Recorte de imagens do satélite GOES-10 + METEOSAT-09 para as 00UTC (a) e 12UTC do dia 26/03/09. Fonte: INPE/CPTEC/DSA.....	71
Figura 4.26 - (a) Campo de divergência do vento horizontal (1/s) e (b) ômega (Pa/s) em 925hPa, para as 00UTC do dia 26/03/09, gerados a partir de dados de análise.....	71
Figura 4.27 - Imagens de temperatura de brilho das nuvens (TB, °C) para o dia 12/03/09. Os campos referem-se aos seguintes horários: (a) 09UTC e (b) 1015UTC. Fonte: INPE/CPTEC/DSA.....	72
Figura 4.28 - Imagens de refletividade das nuvens geradas pelo radar localizado no CLA para o dia 26/03/09. Os campos referem-se aos seguintes horários (UTC), nesta ordem: (a) 0801 e (b) 0915, (c) 1015 e (d) 1113. O maior círculo concêntrico representa uma distância de 120 km.....	72

Figura 4.29 - Imagens de temperatura de brilho das nuvens (TB, °C) para o dia 26/03/09. Os campos referem-se aos seguintes horários: (a) 15UTC, (b) 1630UTC, (c) 1815UTC e (d) 20UTC. Fonte: INPE/CPTEC/DSA.....	73
Figura 4.30 - Imagens de refletividade das nuvens geradas pelo radar localizado no CLA para o dia 26/03/09. Os campos referem-se aos seguintes horários (UTC), nesta ordem: (a) 1315 e (b) 1403, (c) 1502, (d) 1617, (e) 1715 e (f) 1830. O maior círculo concêntrico representa uma distância de 120 km.....	74
Figura 5.1 - Domínio das grades de resolução horizontal 27 km (G1), 09 km (G2) e 3 km (G3).....	78
Figura 5.2 - Campos de topografia (a), fração de área vegetada (b), uso da terra (c) e umidade do solo entre 10 e 40 cm para à 00 UTC do dia 26/03/2009 (d) para o domínio 1.....	81
Figura 5.3 - Campos de topografia (a), fração de área vegetada (b), uso da terra (c) e umidade do solo entre 10 e 40 cm para à 00 UTC do dia 26/03/2009 (d) para o domínio 2.....	82
Figura 5.4 - Campos de topografia (a), fração de área vegetada (b), uso da terra (c) e umidade do solo entre 10 e 40 cm para à 00 UTC do dia 26/03/2009 (d) para o domínio 3.....	83
Figura 5.5 - Domínio das grades de resolução horizontal 36 km (D1) e 12 km (D2) para a região Nordeste utilizado pelo ICEA.....	86
Figura 6.1 - Comparação entre os valores horários (UTC) de precipitação para o dia 18/07/08. As barras referem-se aos valores de precipitação registrada no CLA e em SLZ e de precipitação média estimada pelo Hidroestimador (HIDRO) e pelo satélite TRMM (TRMM). As linhas referem-se aos valores médios simulados nos domínios de 27, 9 e 3 km de resolução. Os gráficos “a”, “b”, “c” e “d” referem-se, aos esquemas Warm Rain, Simple Ice, Reisner e Schultz (SC), nesta ordem. Precipitação (mm/h) em escala logarítmica.....	88
Figura 6.2 - Campos de precipitação simulada (de “d” a “p”, mm), precipitação estimada pelo TRMM (“b”) e pelo HIDRO (“c”) e de TB (“a”, °C) para as 06 UTC de 18/07/08. Cada uma das colunas, a contar da esquerda, refere-se a campos (exceto campos “a”, “b” e “c”) cujos domínios são de 27, 9 e 3 km de espaçamento de grade, respectivamente. Cada uma das linhas, a contar da segunda na descendente, refere-se a um esquema explícito, conforme a seguinte ordem: Warm Rain, Simple Ice, Reisner 2 e Schultz. Os retângulos delimitam as áreas utilizadas para análise.....	91

Figura 6.3 - Comparação entre os valores horários (UTC) de precipitação para o dia 30/07/08. As barras referem-se aos valores de precipitação registrada no CLA e em SLZ e de precipitação média estimada pelo Hidroestimador (HIDRO) e pelo satélite TRMM (TRMM). As linhas referem-se aos valores médios simulados nos domínios de 27, 9 e 3 km. Os gráficos “a”, “b”, “c” e “d” referem-se, aos esquemas Warm Rain, Simple Ice, Reisner e Schultz, nesta ordem. Precipitação (mm/h) em escala logarítmica.....92

Figura 6.4 - Campos de precipitação simulada (de “d” a “p”, mm) e de precipitação estimada pelo TRMM (de “a” a “c”) para as 06UTC (esquerda), 15UTC (centro) e 18UTC (direita) de 30/07/08. Cada uma das colunas, a contar da esquerda, refere-se a campos (exceto campos “a”, “b” e “c”) cujos domínios são de 27, 9 e 3 km de espaçamento de grade, respectivamente. Cada uma das linhas, a contar da segunda na descendente, refere-se a um esquema explícito, conforme a seguinte ordem: Warm Rain, Simple Ice, Reisner e Schultz.....95

Figura 6.5 - Comparação entre os valores horários (UTC) de precipitação para a região do CLA para o dia 12/03/09. As barras referem-se aos valores de precipitação registrada no CLA (REG), de precipitação média estimada pelo Hidroestimador (HIDRO) e pelo satélite TRMM (TRMM). As linhas referem-se aos valores médios simulados nos domínios de 27, 9 e 3 km de resolução. Os gráficos “a”, “b”, “c” e “d” referem-se, aos esquemas Warm Rain, Simple Ice, Reisner e Schultz, nesta ordem. Precipitação (mm/h) em escala logarítmica.....96

Figura 6.6 - Campos de precipitação simulada (de “d” a “p”, mm), de precipitação estimada pelo Hidroestimador (“a” e “b”) e de refletividade de radar (“c”) para as 02UTC (esquerda), 15UTC (centro) e 18UTC (direita) de 12/03/09. Cada uma das colunas, a contar da esquerda, refere-se a campos (exceto campos “a”, “b” e “c”) cujos domínios são de 27, 9 e 3 km de espaçamento de grade, respectivamente. Cada uma das linhas, a contar da segunda na descendente, refere-se a um esquema explícito, conforme a seguinte ordem: Warm Rain, Simple Ice, Reisner e Schultz. Os retângulos delimitam as áreas utilizadas para análise.....99

Figura 6.7 - Comparação entre os valores horários (UTC) de precipitação para o dia 26/03/09. As barras referem-se aos valores de precipitação registrada no CLA e em SLZ e de precipitação média estimada pelo Hidroestimador (HIDRO) e pelo satélite TRMM (TRMM). As linhas referem-se aos valores médios simulados nos domínios de 27, 9 e 3 km de resolução. Os gráficos “a”, “b”, “c” e “d” referem-se, aos esquemas Warm Rain,

Simple Ice, Reisner e Schultz, nesta ordem. Precipitação (mm/h) em escala logarítmica.....100

Figura 6.8 - Campos de precipitação simulada (de “d” a “p”, mm), de precipitação estimada pelo TRMM (“a”, “b” e “c”) para as 00UTC de 27/03/09 (esquerda), 15UTC (centro) e 18UTC (direita) de 26/03/09. Cada uma das colunas, a contar da esquerda, refere-se a campos (exceto campos “a”, “b” e “c”) cujos domínios são de 27, 9 e 3 km de espaçamento de grade, respectivamente. Cada uma das linhas, a contar da segunda na descendente, refere-se a um esquema explícito, conforme a seguinte ordem: Warm Rain, Simple Ice, Reisner e Schultz. Os retângulos delimitam as áreas utilizadas para análise.....103

Figura 6.9 - Comparação entre os valores horários (UTC) de precipitação para a região do CLA para o dia 18/07/08. As barras referem-se aos valores de precipitação registrada no CLA e em SLZ, de precipitação média estimada pelo Hidroestimador (HIDRO) e pelo satélite TRMM (TRMM). As linhas referem-se aos valores médios obtidos no domínio de 3km com as simulações SI, SI1 e SI2. Precipitação (mm/h) em escala logarítmica.....109

Figura 6.10 - Campos de precipitação estimada pelo TRMM (“a”, “e” e “i”) e simulada no domínio de resolução horizontal 09 km para o dia 18/07/08, em mm/h. As colunas da esquerda para a direita referem-se, cada uma, aos horários das 06, 15 e 21 UTC, nesta ordem. Os campos “b”, “f”, e “j” referem-se a simulações SI. Os campos “c”, “g” e “l” referem-se a simulações SI PNC. Os campos “d”, “h” e “m” referem-se a simulações SI2. Os retângulos delimitam as áreas utilizadas para análise.....111

Figura 6.11 - Campos de precipitação estimada pelo Hidroestimador (“a”) e pelo TRMM (“f” e “l”) e simulada no domínio de resolução horizontal 03 km para o dia 18/07/08, em mm/h. As colunas da esquerda para a direita referem-se, cada uma, aos horários das 06, 15 e 21 UTC, nesta ordem. Os campos “b”, “g”, e “m” referem-se a simulações SI. Os campos “c”, “h” e “n” referem-se a simulações SI PNC. Os campos “d”, “i” e “o” referem-se a simulações SI1. Os campos “e”, “j” e “p” referem-se a simulações SI2. Os retângulos delimitam as áreas utilizadas para análise.....112

Figura 6.12 - Comparação entre os valores horários (UTC) de precipitação para a região do CLA para o dia 30/07/08. As barras referem-se aos valores de precipitação registrada no CLA e em SLZ, de precipitação média estimada pelo Hidroestimador (HIDRO) e pelo satélite TRMM (TRMM). As linhas referem-se aos valores médios obtidos no

domínio de 3km com as simulações SI, SI1 e SI2. Precipitação (mm/h) em escala logarítmica.....	113
Figura 6.13 - Campos de precipitação estimada pelo modelo Hidroestimador (“a”, “e” e “i”) e simulada no domínio de resolução horizontal 09km para o dia 30/07/08, em mm/h. As colunas da esquerda para a direita referem-se, cada uma, aos horários das 12, 15 e 1800UTC, nesta ordem. Os campos “b”, “f”, e “j” referem-se a simulações SI. Os campos “c”, “g” e “l” referem-se a simulações SI PNC. Os campos “d”, “h” e “m” referem-se a simulações SI2.....	114
Figura 6.14 - Campos de precipitação estimada pelo TRMM (“a”, “f” e “l”) e simulada no domínio de resolução horizontal 03km para o dia 30/07/08, em mm/h. As colunas da esquerda para a direita referem-se, cada uma, aos horários das 12, 15 e 18UTC, nesta ordem. Os campos “b”, “g”, e “m” referem-se a simulações SI. Os campos “c”, “h” e “n” referem-se a simulações SI PNC. Os campos “d”, “i” e “o” referem-se a simulações SI1. Os campos “e”, “j” e “p” referem-se a simulações SI2.....	116
Figura 6.15 - Comparação entre os valores horários (UTC) de precipitação para a região do CLA para o dia 12/03/09. As barras referem-se aos valores de precipitação registrada no CLA e em SLZ, de precipitação média estimada pelo Hidroestimador (HIDRO) e pelo satélite TRMM (TRMM). As linhas referem-se aos valores médios obtidos no domínio de 3km com as simulações SI, SI1 e SI2. Precipitação (mm/h) em escala logarítmica.....	117
Figura 6.16 - Campos de precipitação estimada pelo modelo Hidroestimador (“a”, “e” e “i”) e simulada no domínio de resolução horizontal 09 km para o dia 12 e 13/03/09, em mm/h. As colunas da esquerda para a direita referem-se, cada uma, aos horários das 06, 18 e 00UTC (dia 13), nesta ordem. Os campos “b”, “f”, e “j” referem-se a simulações SI. Os campos “c”, “g” e “l” referem-se a simulações SI PNC. Os campos “d”, “h” e “m” referem-se a simulações SI2. Os retângulos delimitam as áreas utilizadas para análise.....	120
Figura 6.17 - Campos de precipitação estimada pelo Hidroestimador (“a”, “f” e “l”) e simulada no domínio de resolução horizontal 03 km para o dia 12 e 13/03/09, em mm/h. As colunas da esquerda para a direita referem-se, cada uma, aos horários das 06, 12 e 00UTC (dia 13), nesta ordem. Os campos “b”, “g”, e “m” referem-se a simulações SI. Os campos “c”, “h” e “n” referem-se a simulações SI PNC. Os campos “d”, “i” e “o” referem-se a simulações SI1. Os campos “e”, “j” e “p” referem-se a simulações SI2. Os retângulos delimitam as áreas utilizadas para análise.....	121

Figura 6.18 - Comparação entre os valores horários (UTC) de precipitação para a região do CLA para o dia 26/03/09. As barras referem-se aos valores de precipitação registrada no CLA e em SLZ, de precipitação média estimada pelo Hidroestimador (HIDRO) e pelo satélite TRMM (TRMM). As linhas referem-se aos valores médios obtidos no domínio de 3km com as simulações SI, SI1 e SI2. Precipitação (mm/h) em escala logarítmica.....122

Figura 6.19 - Campos de precipitação estimada pelo modelo TRMM (“a”, “e” e “i”) e simulada no domínio de resolução horizontal 09 km para o dia 26 e 27/03/09, em mm/h. As colunas da esquerda para a direita referem-se, cada uma, aos horários das 12, 15 e 00 UTC (dia 27), nesta ordem. Os campos “b”, “f”, e “j” referem-se a simulações SI. Os campos “c”, “g” e “l” referem-se a simulações SI PNC. Os campos “d”, “h” e “m” referem-se a simulações SI2. Os retângulos delimitam as áreas utilizadas para análise.....124

Figura 6.20 - Campos de precipitação estimada pelo Hidroestimador (“a”, “f” e “l”) e simulada no domínio de resolução horizontal 03 km para o dia 26 e 27/03/09, em mm/h. As colunas da esquerda para a direita referem-se, cada uma, aos horários das 12, 15 e 00 UTC (dia 27), nesta ordem. Os campos “b”, “g”, e “m” referem-se a simulações SI. Os campos “c”, “h” e “n” referem-se a simulações SI PNC. Os campos “d”, “i” e “o” referem-se a simulações SI1. Os campos “e”, “j” e “p” referem-se a simulações SI2. Os retângulos delimitam as áreas utilizadas para análise.....125

Figura 6.21 - Precipitação (mm) observada em todo o Brasil e os desvios em relação aos valores médios históricos para março de 2009.....127

Figura 6.22 - Área delimitada (retângulo no interior do mapa) para obtenção da precipitação total acumulada (mm) pelo satélite TRMM e pelas simulações ICEA1 e ICEA2.....128

Figura 6.23 - Campos de precipitação acumulada (mm) para o dia 01/03/09 simulada por ICEA2. O painel (a) refere-se à precipitação total (convectiva mais não convectiva) simulada para o domínio 1. (b) refere-se à precipitação convectiva simulada para o domínio 1. O campo (c) refere-se à precipitação convectiva simulada para o domínio 2129

Figura 6.24 - Séries de precipitação acumulada por dia (mm) para o mês de março de 2009. As linhas referem-se aos valores obtidos pelas simulações ICEA1 e ICEA2 nos domínios de resolução horizontal 36 (D1) e 12 km (D2) e estimados pelo satélite

TRMM (TRMM) para a área delimitada em D2. O gráfico “a” (“b”) refere-se às simulações para D1 (D2). Precipitação em escala logarítmica.....130

Figura 6.25 - Campos de precipitação estimada pelo satélite TRMM (“a”, “d” e “g”) e simulada no domínio de resolução horizontal 36 km, em mm/h. As colunas da esquerda para a direita referem-se, cada uma, aos horários das 03UTC do dia 02/03/09, 06UTC do dia 14/03/09 e 18UTC do dia 30/03/09, nesta ordem. Os campos “b”, “e”, e “h” referem-se às simulações ICEA1. Os campos “c”, “f” e “i” referem-se às simulações ICEA2. Os retângulos delimitam as áreas utilizadas para análise..... 134

Figura 6.26 - Campos de precipitação estimada pelo satélite TRMM (“a”, “d” e “g”) e simulada no domínio de resolução horizontal 12 km, em mm/h. As colunas da esquerda para a direita referem-se, cada uma, aos horários das 03UTC do dia 02/03/09, 06UTC do dia 14/03/09 e 18UTC do dia 30/03/09, nesta ordem. Os campos “b”, “e”, e “h” referem-se às simulações ICEA1. Os campos “c”, “f” e “i” referem-se às simulações ICEA2. Os retângulos delimitam as áreas utilizadas para análise.....135

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 - Descrição dos esquemas de microfísica do modelo MM5.....	40
Tabela 4.1 - Resumo das condições meteorológicas observadas relativas aos casos de precipitação sobre a região do CLA selecionados para as simulações.....	75
Tabela 5.1 - Número de pontos de grade para os domínios 1, 2 e 3 empregados nas simulações realizadas na ACA/IAE.....	79
Tabela 5.2 - Descrição das categorias de vegetação.....	80
Tabela 5.3 - Configuração das simulações realizadas com o modelo instalado na ACA/IAE quanto ao uso de esquemas implícitos e explícitos de convecção.....	83
Tabela 5.4 - Número de pontos de grade dos domínios empregados pelo modelo MM5 instalado no ICEA.....	84
Tabela 6.1- Precipitação Convectiva (PC), Não Convectiva (PNC) e Total (TT) Simulada obtida para o dia 18/07/08 para a região do CLA com o uso dos esquemas Warm Rain (WR), Simple Ice (SI), Reisner (RE) e Schultz (SC). Unidade de precipitação: mm/dia.....	89
Tabela 6.2 - Precipitação Convectiva (PC), Não Convectiva (PNC) e Total (TT) Simulada obtida para o dia 30/07/08 para a região do CLA com o uso dos esquemas Warm Rain (WR), Simple Ice (SI), Reisner (RE) e Schultz (SC). Unidade de precipitação: mm/h.....	93
Tabela 6.3 - Precipitação Convectiva (PC), Não Convectiva (PNC) e Total (TT) simulada obtida para o dia 12/03/09 para a região do CLA com o uso dos esquemas Warm Rain (WR), Simple Ice (SI), Reisner (RE) e Schultz (SC). Unidade de precipitação: mm/dia.....	97
Tabela 6.4 - Precipitação Convectiva (PC), Não Convectiva (PNC) e Total (TT) simulada obtida para o dia 26/03/09 para a região do CLA com o uso dos esquemas Warm Rain (WR), Simple Ice (SI), Reisner (RE) e Schultz (SC). Unidade de precipitação: mm/dia.....	101
Tabela 6.5 - Desenho das simulações do Grupo 1 (G1) e 2 (G2) com relação ao uso dos esquemas de convecção explícita (EE) e implícita (EI) nos espaçamentos de grade de 27, 9 e 3 km.....	108
Tabela 6.6 - Precipitação estimada pelo satélite TRMM, Precipitação convectiva (PC), Não convectiva (PNC) e Total obtidas pelas simulações ICEA1 e ICEA2 para os	

domínios de resolução horizontal 36 e 12 km, para o mês de março de 2009. Valores de precipitação em mm.....129

LISTA DE ABREVIATURAS

CLA	Centro de Lançamento de Alcântara
ICEA	Instituto de Controle do Espaço Aéreo
MREG	Modelos Atmosféricos Regionais
CPT	Centro de Previsão do Tempo
PNT	Previsão Numérica do tempo
NMOC	National Meteorological Operations Centre
IAE	Instituto de Aeronáutica e Espaço
ZCIT	Zona de Convergência Intertropical
ZCAS	Zona de Convergência do Atlântico Sul
SF	Sistemas Frontais
VCAS	Vórtices Ciclônicos de Ar Superior
DOL	Distúrbios Ondulatórios de Leste
SCM	Sistemas Convectivos de Mesoescala
LI	Linhas de Instabilidade
ARPS	Advanced Regional Prediction System
BRAMS	Brazilian Regional Atmospheric Modeling System
KF2	Esquema de convecção Kain-Fritsch, versão 2 (Kain, 2004)
NCEP	National Centers for Environmental Prediction
DSA	Divisão de Satélites Ambientais do CPTEC
CPTEC	Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos
GOES-12	Geostationary Operational Environmental Satellites, número 12
UTC	Universal Time Coordinated (tempo universal coordenado) ou hora Z
ACA	Divisão de Ciências Atmosféricas do IAE
T126	Modelo com resolução horizontal de aproximadamente 100 km
PSU	Pennsylvania State University
NCAR	National Center of Atmospheric Research
UFRJ	Universidade Federal do Rio de Janeiro
USP	Universidade de São Paulo
TSM	Temperatura da superfície do mar
KF	Esquema de convecção Kain-Fritsch (Kain e Fritsch, 1993)
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration
TB	Temperatura de brilho das nuvens (°C)

LPM	Laboratório de Prognóstico de Mesoescala
EE	Esquemas de convecção explícita
EI	Esquemas de convecção implícita
ES	Esquema de convecção explícita selecionado
SLZ	Cidade de São Luís (MA)
TRMM	Satélite TRMM
HIDRO	Modelo Hidroestimador
SI	Simulações que usaram o esquema explícito Simple Ice nos 3 domínios
RE	Simulações que usaram o esquema explícito Reisner 2 nos 3 domínios
WR	Simulações que usaram o esquema explícito Warm Rain nos 3 domínios
SC	Simulações que usaram o esquema explícito Schultz nos 3 domínios
PC	Precipitação convectiva
PNC	Precipitação não-convectiva
G1	Grupo de simulações que usaram aproximação híbrida nos 3 domínios, realizadas na ACA/IAE
G2	Grupo de simulações que utilizaram somente esquemas explícitos nos domínios de 9 e 3 km de resolução horizontal, realizadas na ACA/IAE
SI1	Simulações que utilizaram somente o esquema Simple Ice no domínio de 3 km de resolução horizontal, realizadas na ACA/IAE
SI2	Simulações que utilizaram somente o esquema Simple Ice nos domínios de 9 e 3 km de resolução horizontal, realizadas na ACA/IAE
ICEA1	Simulações que usaram aproximação híbrida nos 2 domínios, realizadas no ICEA
ICEA2	Simulações que usaram somente esquema explícito no domínio de 12 km de resolução horizontal, realizadas no ICEA
NEB	Nordeste Brasileiro
JBN	Jatos de Baixos Níveis
EMAQS	Estagnações de Massas de Ar Quente e Seco

1 INTRODUÇÃO

Com o aumento da capacidade de processamento de computadores de menor porte e a necessidade de prognósticos de tempo mais rápidos para domínios mais localizados, os modelos atmosféricos regionais (MREG), também chamados de modelos de mesoescala ou de área limitada, têm se constituído numa ferramenta indispensável para os grupos de previsão de tempo e pesquisa atmosférica. Os MREG podem fazer o “downscaling” de previsões obtidas por modelos globais e, assim, reproduzir com maior detalhamento espacial os campos atmosféricos nas áreas de interesse. Por exemplo, o Laboratório de Prognósticos em Mesoescala da Universidade Federal do Rio de Janeiro (LPM/UFRJ) faz previsões utilizando dois MREG (MM5 e WRF) no espaçamento de grade de 20 km para o Estado do Rio de Janeiro (<http://www.lpm.meteoro.ufrj.br/>).

Apesar dos contínuos avanços na área de modelagem atmosférica, a comunidade meteorológica em geral concorda sobre as dificuldades envolvidas na previsão quantitativa de precipitação tanto por modelos globais quanto por MREG. A precipitação, segundo Bélair e Mailhot (2001) e Colle et al (2003), é um dos parâmetros mais complexos no contexto da previsão numérica do tempo (PNT), e sua representação em modelos atmosféricos está sujeita a erros expressivos devido a diversos fatores, tais como inconsistências nas condições iniciais e deficiências nas parametrizações convectiva e de microfísica dos modelos. Um trabalho que ilustra essa dificuldade é o de McBride e Ebert (2000), que avaliaram o desempenho de 7 modelos operacionais usados no National Meteorological Operations Centre (NMOC, Melbourne, Austrália) durante o período de setembro/1997 a agosto/1998 para duas regiões distintas da Austrália: o regime de monção da região tropical do norte e a região subtropical do sudeste. Os modelos superestimaram (subestimaram) a precipitação no verão (inverno) para as duas regiões, obtendo melhor desempenho para a região subtropical. O fraco desempenho para o regime de monção foi associado à incapacidade de simular adequadamente sistemas convectivos tropicais.

Em modelos atmosféricos, a precipitação é obtida de duas formas: parametrizadas por esquemas de convecção profunda (EI, implícita ou sub-grade) ou resolvida por esquemas explícitos (EE, ou de microfísica de nuvens). Conceitualmente, esquemas implícitos deveriam ser utilizados somente em espaçamentos de grade maiores (por

exemplo, maiores que 20 ou 30 km; modelos de média e baixa resolução); em espaçamentos de grade menores (por exemplo, menores que 5 km; modelos de alta resolução), somente esquemas explícitos deveriam ser usados (Molinari e Dudek, 1992). Em espaçamentos de grade maiores, esquemas explícitos são usados (juntamente com esquemas implícitos) para principalmente evitar supersaturação no ponto de grade, ou seja, possuem uma importância secundária na produção de precipitação.

Em espaçamentos de grade menores, particularmente para espaçamentos próximos a 10 km ou na ordem de 1 km, existem divergências quanto à necessidade do uso de esquemas implícitos. Weisman et al (1997) mostram que um espaçamento de grade de 4 km, que emprega somente esquemas explícitos, pode reproduzir a precipitação tão bem quanto um espaçamento de grade de 1 km. Já Cram et al (1992) mostram que o uso de somente esquemas explícitos em espaçamento de grade de 5 km não é adequado para simular satisfatoriamente a precipitação de linhas de instabilidade; seria necessário, neste espaçamento, o uso simultâneo de esquemas de convecção implícita. Segundo Molinari e Dudek (1992), o uso de aproximações híbridas (emprego simultâneo de esquemas explícitos e implícitos) em modelos de alta resolução pode tornar as simulações de sistemas de mesoescala mais realistas.

O problema de utilizar ou não a aproximação híbrida em grades de alta resolução vem se tornando particularmente importante nos dias atuais, quando a estratégia de aninhamento (“nesting”) vem se tornando popular. No “nesting”, grades aninhadas de dimensões decrescentes e resoluções horizontais crescentes em um domínio são executadas simultaneamente. A estratégia de aninhamento é muito utilizada para obter maior detalhamento espacial nas áreas de interesse sem aumentar excessivamente o custo computacional. Nesse contexto, surge a seguinte questão: deve-se utilizar aproximação híbrida ou somente esquema explícito nas grades aninhadas de maior resolução horizontal para uma boa representação da precipitação?

Nas simulações o ideal é obter uma boa representação da precipitação em todas as grades, com melhor desempenho quanto maior a resolução horizontal. Esse aspecto é crucial para fins operacionais, pois quanto maior o número de grades (de alta resolução), maior é o custo computacional; o aumento desse custo somente se justificaria com um melhor desempenho nas grades de resolução espacial mais alta.

Colle et al (2000) avaliaram os efeitos do aumento da resolução horizontal em simulações com o modelo MM5 de eventos de precipitação ocorridos no oeste dos Estados Unidos durante as estações de outono e primavera de 1997 a 1999. Para tal utilizaram grades aninhadas de 36, 12, 4 e 1,33 km, e não foram utilizados esquemas implícitos nas grades de 4 e 1,33 km. As simulações nas grades de mais alta resolução apresentaram melhores resultados. Hass et al (2002) analisaram os mecanismos físicos associados a eventos de enchentes no Sul do Brasil com o modelo ARPS e o desempenho quanto à previsão da chuva em grades aninhadas de 40, 10, 5 e 3 km de espaçamento. O esquema de convecção implícita foi utilizado em todas as grades. Os resultados mostraram que o aumento de resolução e o uso da estratégia adequada (aproximação híbrida ou somente esquema explícito) nas grades de resolução espacial mais alta resultaram em simulações mais realistas. Esses estudos mostram que o uso de aninhamento pode ser viável e interessante. Para uma dada região de interesse, a questão em aberto é justamente identificar a estratégia adequada nas grades de resolução mais alta; note que, nos dois estudos citados, as estratégias adotadas foram distintas.

Neste trabalho, a região de interesse é o Centro de Lançamento de Alcântara (CLA, Alcântara, Maranhão) localizado na costa norte do nordeste do Brasil (NEB), na latitude de 02° 22'S, longitude 44° 23'W e 49 m de altitude. Pertencente ao Comando da Aeronáutica, o CLA realiza atividades de interesse tecnológico e de defesa estratégica por meio de lançamento de foguetes projetados e construídos no Instituto de Aeronáutica e Espaço (IAE, São José dos Campos, SP). Para as atividades de lançamento de foguetes são necessárias informações detalhadas de elementos meteorológicos que atendam os requisitos de segurança de voo no instante do lançamento, o que demanda previsões de tempo com maior desempenho para a região do CLA.

As principais características climatológicas da região que abrange o CLA foram descritas por Pereira et al (2002), utilizando um conjunto de informações meteorológicas (dados de superfície, de ar superior, de satélite, entre outros). A variação sazonal da temperatura média mensal é pequena, sendo que o mês de novembro (março) apresenta temperatura média mensal maior (menor) do que a temperatura de outros meses, com 28,1°C (26,7°C). O regime de precipitação é caracterizado por alternância de estações seca e chuvosa: a estação chuvosa (seca) ocorre entre os meses de janeiro e

junho (julho e dezembro), e os máximos (mínimos) de precipitação ocorrem nos meses de março e abril (setembro e novembro). A precipitação na região do CLA está associada a fatores de escala sinótica tais como Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS), Sistemas Frontais (SF), Vórtice Ciclônico de Ar Superior (VCAS) e Distúrbios Ondulatórios de Leste (DOL); de mesoescala, como Sistemas Convectivos de Mesoescala (SCM) e Linhas de instabilidade (LI); e também de escala local, como tempestades isoladas. Segundo Barros (2008) o principal fator de grande escala associado à precipitação na região do CLA é a ZCIT; de mesoescala, as LI que, em muitos casos, se associam à ZCIT. Em cerca da metade dos casos, a precipitação esteve associada a um sistema convectivo com núcleos convectivos (temperatura de brilho, $TB < 230K$) em seu interior.

Barros (2008) avaliou o desempenho das previsões de precipitação na região do CLA com o MREG MM5 por meio de simulações de 24 h para os anos de 2005 e 2006, utilizando um espaçamento de grade de 30 km com domínio centrado no CLA. Resultados mostraram que o modelo superestimou a precipitação para todo o período. Para o mesmo domínio e espaçamento de grade, simulações de eventos de precipitação para os períodos de seca e de chuva sobre o CLA foram realizadas por Pereira Neto (2009) com o objetivo de ajustar o esquema de convecção implícita Kain-Fritsch 2 (KF2; Kain 2004). Os resultados mostraram que, com os ajustes, houve expressiva melhoria na representação do total de precipitação e da fração dos dias do mês com chuva na escala mensal. O padrão espacial de erros no domínio, no entanto, não sofreu muitas alterações (em geral, a precipitação é melhor representada sobre o continente que sobre o oceano). Assim, considerando que o esquema de convecção implícita conseguiria representar a precipitação na região do CLA no espaçamento de grade de 30 km, o objetivo geral deste trabalho consiste em **verificar qual estratégia (aproximação híbrida ou esquema explícito somente) nas grades de maior resolução traria ganhos para a previsão quantitativa de precipitação na região do CLA em simulações com o MREG MM5.**

Na literatura científica, não são muitos os trabalhos relacionados ao uso de esquemas explícitos em grades de alta resolução com o uso do modelo MM5 (as pesquisas envolvendo o modelo MM5 estão apresentadas na seção 3.2). No Brasil, pesquisas foram feitas para avaliar o desempenho de modelos com alta resolução e conveniência

do uso combinado de esquemas explícitos e implícitos (Silva e Santos, 2002; Hass et al, 2002; Hallak, 2006; Mendes, 2006). Por exemplo, um caso extremo de chuva ocorrido em Angra dos Reis/RJ foi simulado por Mendes (2006), com o intuito de identificar os principais mecanismos meteorológicos atuantes neste sistema. Com o emprego de grades de resoluções 40, 10 e 3 km e distintos perfis de umidade, foram feitas simulações com o modelo ETA. Em todas as grades se usaram esquemas implícitos e os esquemas explícitos foram empregados nas grades de 10 e 3 km. Os resultados mostraram que o aumento da resolução permitiu que o modelo pudesse simular mais adequadamente a precipitação e a localização das nuvens. Outros trabalhos enfocaram a região amazônica (Silva e Avissar, 2006; Saad, 2008). Por exemplo, Saad (2008) avaliou os efeitos do desmatamento na Amazônia, em diferentes regiões do Pará, utilizando o modelo regional BRAMS (Brazilian Regional Atmospheric Modeling System). Para as simulações foram usadas grades de tamanho e forma geométrica variados. Uma das etapas do trabalho consistia em avaliar se a resolução das grades (16 e 8 km de resolução) e os esquemas de convecção implícita e explícita adotados nas simulações representariam a variabilidade da precipitação em função do desmatamento. Resultados mostraram que as variações de precipitação nos experimentos com esquemas de microfísica aplicados na grade maior foram pouco expressivas. A precipitação simulada pela microfísica de nuvens na grade de 8 km não respondeu ao efeito esperado do desmatamento, enquanto que o uso combinado dos esquemas na mesma grade foi melhor.

Em geral, os estudos que se dedicam a avaliar o desempenho de modelos na previsão de precipitação envolvendo diversas grades enfocam um único caso ou evento; neste caso, pode ser que uma estratégia particular (aproximação híbrida ou esquema explícito somente) seja melhor. No entanto é arriscado tomar os resultados obtidos em simulações de um único evento como base para propor mudanças operacionais. O ideal seria a realização de testes para o maior conjunto de situações possíveis. Todavia, diante do alto custo computacional que isto implica, uma possibilidade mais viável consiste em realizar testes para alguns casos distintos. Sendo assim, neste trabalho, numa primeira etapa, adotou-se a seguinte estratégia: foram simulados eventos de convecção noturna e diurna, eventos organizados (LI), sistemas isolados (escala local), etc., ocorridos durante a estação chuvosa e de transição na região do CLA. Numa segunda etapa, foram

realizadas simulações para um período mais longo (1 mês) com o modelo MM5 utilizado em um ambiente operacional.

Os objetivos específicos para este trabalho são:

- a) avaliar o desempenho dos esquemas explícitos de convecção Warm Rain, Simple Ice, Reisner e Schultz, disponíveis no modelo MM5, na simulação de eventos de precipitação sobre a região do CLA usando grades de alta resolução, ou seja, testar a sensibilidade do modelo aos diferentes esquemas explícitos (sobretudo nas grades de mais alta resolução espacial);
- b) avaliar se o modelo é capaz de representar realisticamente eventos de precipitação com o uso de somente esquemas explícitos nas grades de alta resolução; e
- c) verificar se as conclusões obtidas com a realização dos objetivos anteriores (itens “a” e “b”) são válidas ou aplicáveis em um ambiente operacional que utilize o modelo MM5 com diferente configuração, através de simulações de precipitação referentes a um período mais extenso.

O trabalho está organizado da seguinte forma. Na seção 2, mostra-se o conjunto de dados utilizado para o desenvolvimento do trabalho. Na seção 3, descrevem-se sucintamente o modelo MM5 e os esquemas de convecção explícita. Na seção 4, realiza-se um estudo observacional dos casos de precipitação selecionados para as simulações. Na seção 5, encontra-se o desenho experimental utilizado nas simulações. Na seção 6, os resultados obtidos são apresentados e analisados. Finalmente, as conclusões são mostradas na seção 7.

2 DADOS

O conjunto de dados usado, tanto para fins observacionais nos estudos de caso quanto para fins de comparação com os valores simulados, é composto de dados de satélite meteorológico, dados meteorológicos de superfície e de radiossondagens, dados de radar meteorológico, dados de precipitação estimados pelo satélite TRMM e pelo modelo Hidroestimador, informações do Boletim Climanálise, além de dados de análise do NCEP e Reanálise do NCEP/NCAR. Os dados de análise do NCEP referentes ao período dos eventos selecionados também são usados como condições iniciais e de contorno para simulações com o modelo MM5 (ver seção 5).

2.1 Dados de Satélite

Os dados de satélite provêm da DSA (Divisão de Satélites e Sistemas Ambientais) do CPTEC. São dados da temperatura de brilho (TB) do canal 4 do satélite GOES-12 (Geostationary Operational Environmental Satellites) posicionado sobre o equador em 75°W com o domínio de 100°W - 28°W e 50°S - 21°N e resolução temporal (espacial) de 30 minutos (4 km). Essas imagens podem apresentar falhas ou não terem sido recebidas, porém, a cada 3h são realizadas transmissões do globo terrestre que costumam não falhar. O canal 4 do GOES-12, que corresponde ao comprimento de onda de 10,7 μm na faixa do infravermelho do espectro eletromagnético, permite identificação de nuvens nos períodos noturno e diurno, sendo apropriado para o estudo de eventos de chuvas ocorridos a qualquer hora do dia.

2.2 Dados de Radiossondagens

Os dados de radiossondagens das 12 UTC do CLA são disponibilizados pela Divisão de Ciências atmosféricas (ACA) do Instituto de Aeronáutica e Espaço (IAE). Embora existam radiossondagens às 00 UTC, particularmente para o período mais recente, a sua quantidade é muito menor que as das 12 UTC.

2.3 Dados meteorológicos de superfície

São disponibilizados pela ACA/IAE os dados horários da precipitação ocorrida no CLA, provenientes de um pluviômetro instalado numa estação automática localizada no próprio local. Vale destacar que a série temporal pode apresentar falhas devido a fatores como pane na estação automática e atraso na recuperação do equipamento, por exemplo. Também são utilizados os dados de precipitação registrados pela estação meteorológica do Aeroporto Marechal Cunha Machado, em São Luís, (SBSL, Maranhão). Esta estação, que opera continuamente, está localizada na latitude de 02° 35'S e longitude de 44° 14'W, com 54 m de altitude.

2.4 Dados de radar meteorológico

As imagens de radar usadas neste trabalho são geradas pelo radar doppler DWSR-2001X-SDP (Doppler Weather Surveillance Radar), fabricado pela Enterprise Electronics Corporation (Alabama, Estados Unidos), instalado no CLA. Seu alcance máximo é de 480 km e sua frequência é limitada a banda de 150 MHz para a recepção dos sinais. O software de operação do equipamento (chamado EDGE) permite configurar características como tipo de varredura, alcance, ângulo de elevação, frequência de recepção de pulsos e saída de produtos. Algumas das variáveis calculadas pelo seu sistema são velocidade zonal, meridional e vertical do vento, taxa de precipitação e refletividade. Maiores detalhes técnicos encontram-se na publicação *DWSR-2001X-SDP Doppler Weather Surveillance Radar Technical Description* (2006, Alabama, US), fornecida pelo fabricante. No entanto, como o radar no CLA foi instalado recentemente e os procedimentos operacionais ainda não foram definidos, há períodos com falhas na gravação das varreduras volumétricas, não há uniformidade nos padrões de varredura (VCP, “volume coverage pattern”) e o acesso aos dados não é em tempo real. Apesar desses problemas, os campos de refletividade permitem localizar adequadamente os sistemas de precipitação (Marcos Daisuke Oyama, 2010, comunicação pessoal). Neste trabalho são usados os dados disponíveis na ACA/IAE.

2.5 Dados de Reanálise do NCEP/NCAR

São utilizados dados de Reanálise do NCEP/NCAR com resolução temporal de 6 h e resolução espacial de $2,5^\circ \times 2,5^\circ$ cobrindo todo o globo terrestre, com 17 níveis na vertical (1000, 925, 850, 700, 600, 500, 400, 300, 250, 200, 150, 100, 70, 50, 30, 20 e 10 hPa). Maiores detalhes sobre os dados encontram-se em Kalnay et al (1996). Os dados estão disponíveis no sítio da internet do Climate Diagnostics Center/ National Oceanic and Atmospheric Administration (CDC / NOAA).

2.6 Dados de análise do NCEP

As análises globais do NCEP disponibilizadas pelo CPTEC/INPE são utilizadas como condições iniciais e de contorno para as simulações com o MM5 instalado na ACA/IAE. Essas análises possuem uma resolução temporal de 12 horas (2 vezes ao dia) e resolução horizontal de aproximadamente 1° (T126). Dados de análise com resolução horizontal de 0.5° (formato GRIB2), disponibilizados pelo NOAA/NCEP são usados como condições iniciais e de contorno nas simulações com o MM5 instalado no ICEA.

2.7 Boletim Climanálise

Editado e disponibilizado pelo CPTEC/INPE, o Boletim Climanálise descreve e analisa, em escala mensal, os sistemas meteorológicos que atuam no Brasil. As edições deste boletim referentes aos períodos dos casos de precipitação selecionados para simulação são utilizadas para complementar as informações obtidas a partir de dados observados. Os boletins podem ser acessados através do seguinte sítio do CPTEC na internet: <http://climanalise.cptec.inpe.br>.

2.8 Dados de precipitação estimada pelo satélite TRMM

O satélite *Tropical Rainfall Measuring Mission* (TRMM), projeto conduzido em parceria entre a NASA e a Agência Japonesa de Exploração Aeroespacial (JAXA), tem como missão monitorar e estudar a distribuição de precipitação nos trópicos. Os produtos gerados pelo projeto TRMM variam de acordo com a combinação de instrumentos usada no algoritmo de cálculo. Neste estudo são usadas estimativas do

produto 3B42, o qual utiliza estimativas de precipitação por microondas (TMI) corrigidas através de informações da estrutura vertical das nuvens, que são obtidas por meio de precipitação estimada por radar (PR). Os dados gerados (disponibilizados gratuitamente pela NASA) têm resolução temporal (espacial) de 3 horas (0.25°), cobrindo uma área que se estende de 50°S a 50°N de latitude e de 180°W a 180°E de longitude. Trabalhos realizados com o uso destes dados mostram que as estimativas de precipitação deste satélite podem ser uma fonte alternativa de dados em caso de escassez de informação (Collischonn et al., 2006). Este último mostrou que a estimativa de precipitação do satélite TRMM foi relativamente precisa quando comparada com dados de solo na bacia do Rio São Francisco. O projeto TRMM possui um programa de validação para minimizar as diferenças entre as estimativas do satélite e as medições feitas no solo.

2.9 Dados de precipitação estimada pelo modelo Hidroestimador

O Hidroestimador é um método usado para gerar valores de precipitação em tempo real através do uso de uma relação empírica exponencial entre a precipitação (estimada por radar) e a temperatura de brilho do topo das nuvens (obtidas por meio do canal infravermelho do satélite GOES-12). Através da avaliação da tendência da temperatura da nuvem juntamente com informações de textura da mesma, é realizado um ajuste da área coberta pela precipitação. A taxa de precipitação é ajustada com o uso de variáveis como água precipitável, umidade relativa, orografia, paralaxe e um ajuste do nível de equilíbrio convectivo para eventos de topos quentes (Scofield, 2001). Os arquivos empregados (em formato binário, de resolução 4×4 km) obtidos junto à Divisão de Satélites Ambientais (DSA) do CPTEC, contêm valores de precipitação instantânea (mm/h). Contudo, a série temporal pode apresentar falhas, principalmente devido à ausência de imagens do satélite GOES ou de dados de vento gerados pelo modelo global do CPTEC.

3 MODELO DE MESOESCALA MM5

3.1 Descrição Geral

O modelo de mesoescala MM5 pertence à quinta geração do sistema de modelagem desenvolvido em conjunto pela Pennsylvania State University (PSU) e pelo National Center for Atmospheric Research (NCAR). A primeira versão está descrita em Grell et al (1995) e a mais atualizada, versão 3, foi lançada em 1999. Como as primeiras gerações do modelo são oriundas dos anos de 1970, progressivos melhoramentos têm sido feitos. O MM5 tem sido amplamente empregado tanto para fins de pesquisa quanto para operação. No Brasil tem sido utilizado por diversas instituições: Universidade do Rio de Janeiro (UFRJ), Instituto de Controle do Espaço Aéreo (ICEA), Centro Nacional de Meteorologia Aeronáutica (CNMA, projeto em andamento) entre outros. Algumas características gerais do modelo são: não-hidrostático, uso da coordenada vertical sigma, portátil (pode ser instalado e executado em diversas plataformas e sob os sistemas operacionais Linux e Unix), possibilidade de uso em altas resoluções horizontais, aninhamento de grades (permite até nove domínios que podem ao mesmo tempo interagir entre si), assimilação de dados quadridimensional e disponibilidade de variados esquemas de parametrização de processos físicos (6 opções de convecção profunda, 6 de microfísica de nuvens, 4 de radiação, 6 de camada limite e 7 de superfície).

Desenvolvido para simular ou prever a circulação atmosférica de área limitada, o modelo é apoiado por programas de pré e pós-processamento, que no seu conjunto são designados como sistema de modelagem MM5. Esse sistema compreende diversas componentes; o conjunto de componentes mínimo necessário para executar o modelo é composto por TERRAIN (interpola as informações de topografia e uso da terra para a grade do modelo), REGRID (interpola horizontalmente as análises e previsões), INTERPF (interpola verticalmente as coordenadas de pressão para coordenadas sigma e gera condições iniciais e de contorno), MM5 (definição dos esquemas de parametrização, períodos de integração e assimilação de dados, e execução do modelo) e MM5toGrADS (gera saídas convertidas para o formato do GrADS, pós-processamento).

O MM5 possui 6 esquemas de microfísica disponíveis sendo que alguns esquemas são variações ou melhorias de outros esquemas. Na tabela 3.1 encontra-se uma descrição sucinta dos esquemas.

Tabela 3.1 - Descrição dos esquemas de microfísica do modelo MM5

Número	Esquema	Descrição	Referências
1	Warm Rain	As quantidades de água de chuva e de nuvem são prognosticadas explicitamente. Permite a evaporação de água de chuva, o arrasto provocado pelas gotas de chuva e a conversão de gotas de nuvens em chuva. A distribuição do tamanho das gotas é considerada (distribuição de Marshall-Palmer). Não considera processos da fase gelo.	Hsie et al (1984)
2	Simple Ice	Baseado no esquema anterior (Warm Rain), com a introdução da fase gelo. Para temperaturas menores (maiores) que 0°C só considera gelo (água); assim, não considera água supercongelada. Ao passar pelo nível de 0°C, a água (o gelo) automaticamente se congela (derrete).	Dudhia (1989)
3	Mixed-Phase ou Reisner	Difere do anterior por permitir água super-resfriada. Possui equações que permitem derretimento de gelo e congelamento de água de forma diferente do esquema Simple Ice, pois ao passar pelo nível de 0°C, a água (o gelo) não se congela (derrete) automaticamente.	Reisner et al (1998)
4	Mixed-Phase com graupel	Também chamado Reisner 2, inclui 2 equações para previsão de graupel e concentração de cristais de gelo (esquema de 2 momentos).	Reisner et al (1998), Thompson et al (2004)
5	Goddard	Adotado da National Aeronautics Space Administration (NASA), semelhante ao anterior além de incluir processos de formação de granizo e tratamento mais detalhado dos processos microfísicos.	Lin et al (1983), Tao et al (1993), Dudhia et al (2004)
6	Schultz	Semelhante ao esquema Goddard com maior detalhamento dos processos de água, gelo e água supercongelada.	Schultz (1995)

Além dos esquemas descritos na Tabela 3.1, o modelo dispõe de 2 outras opções de microfísica: *Dry*, opção onde não existe umidade ou vapor d'água e *Stable*, na qual a supersaturação de grande escala é removida como precipitação não-convectiva.

3.2 Comparação entre os Esquemas Explícitos do MM5

Na literatura encontram-se trabalhos cujo objetivo principal é comparar o desempenho dos diversos esquemas de microfísica utilizados nos modelos de mesoescala. Nesta subseção, abordam-se os trabalhos que utilizam o modelo MM5.

Wenshi et al (2000) testou a sensibilidade dos esquemas Stable, Warm Rain, Simple Ice, Mixed-Phase e Goddard em simulações de evento de precipitação ocorrido no sul da China em 1994. Para isso usaram grades aninhadas de 54 e 18 km, nas quais se usou o esquema implícito Kain-Fritsh. Simulações apontaram pequenas diferenças na representação da distribuição da precipitação na grade de menor resolução. Os esquemas explícitos mais sofisticados (Goddard e Reisner 2) que incluem tratamento para granizo e/ou graupel causaram superestimativa; por outro lado esquemas que não incluem gelo (Stable e Warm Rain) subestimaram a quantidade de precipitação. A distribuição espacial e temporal de precipitação simulada pelo modelo com o uso de diferentes esquemas apresentou variações significativas, associadas ao tratamento dos processos de microfísica dado pelos esquemas e ainda ao tamanho de grade onde se aplicaram os esquemas explícitos (18 Km). Assim, para este caso, o uso de esquemas explícitos nas grades de maior resolução não acarretou em melhoria expressiva na previsão de precipitação do modelo.

Simulações de um evento de forte precipitação que ocasionou enchente nos estados americanos de Washington e Óregon em 1996 foram realizadas por Colle e Mass (2000). Para tal usaram grades aninhadas de 36, 12, 4 e 1,33 km de resolução com o uso dos esquemas Warm Rain, Simple Ice, Reisner e Reisner 2. Na rodada de controle usou os esquemas Kain-Fritsh nas 2 grades externas e Warm Rain (nas grades internas) modificado de forma a permitir fase mista água-gelo acima do nível de congelamento. Resultados das simulações mostraram que, embora o aumento da resolução das grades levasse a representações melhores de distribuição de precipitação, principalmente quando se passou de 36 km para 12 km de resolução (grades em que não se usaram esquemas explícitos), o uso de esquemas mais complexos não acarretou em melhores previsões de precipitação.

É fato que as operações militares são bastante sensíveis às condições de tempo. As atividades militares dos Estados Unidos na Coreia e Japão são muito afetadas pelas precipitações que ocorrem na região, especialmente no inverno (Carter, 2002). Sendo assim, este autor propôs-se a comparar o desempenho dos esquemas Mixed-Phase e Reisner 2 do MM5, modelo usado pela força aérea americana, através de simulações de um ciclone extratropical com grades aninhadas de 45 e 15 km de resolução. Resultados indicaram uma representação menos detalhada da distribuição de precipitação para a grade de menor resolução, na qual se usou o esquema de convecção Grell (Grell et al, 2004). Os esquemas explícitos apresentaram mesma tendência de erros de temperatura, umidade e precipitação, sendo que as maiores diferenças foram verificadas nos níveis mais baixos da atmosfera. No entanto, apesar de Reisner 2 ser mais detalhado (inclui processos de *riming* e formação de graupel), apresentou piores representações nas simulações. Isso pode estar relacionado ao tamanho da grade (15 km) em que se usaram os esquemas explícitos.

Segundo Tomé (2004) um dos maiores problemas encontrados nas previsões de precipitação é encontrar a parametrização ou o esquema adequados, pois a precipitação é muito sensível à convecção, que distribui quantidades de calor sensível e latente através das células convectivas de pequena escala. Diante disso, propôs-se a estudar o desempenho das diversas parametrizações físicas do MM5 em simulações de eventos de tempestades ciclônicas (furacão Charley, 1992 e ciclogênese explosiva, 2002), visando o desenvolvimento de um protótipo operacional para a região dos Açores, Portugal. O modelo foi configurado com 5 grades aninhadas de resoluções 54, 18, 6, 2 km (2 grades) e foram testados 6 esquemas de microfísica: Warm Rain, Simple Ice, Reisner, Goddard, Reisner 2 e Schultz. O esquema de convecção explícita Kain Fritsch 2 foi empregado nas grades de 54 e 18 km. As simulações de distribuição de precipitação da grade maior não foram influenciadas significativamente pelo uso de diferentes esquemas explícitos. Resultados para a simulação do furacão mostraram uma melhor representatividade da precipitação com o aumento da resolução, sendo que o esquema Schultz obteve os melhores índices. Ainda assim, todos os esquemas apresentaram deficiências na estimativa da precipitação. As simulações da ciclogênese explosiva indicaram que os esquemas tidos como mais simples (Warm Rain e Simple Ice) apresentaram menores erros e que, ao contrário do evento anterior, o esquema Schultz (tido como mais sofisticado) demonstrou pior desempenho. Diante do exposto, o autor

acaba por definir o esquema Simple Ice como o mais adequado para esses casos, devido a sua simplicidade e desempenho.

Com o objetivo de avaliar a influência da temperatura da superfície do mar (TSM) na previsão de precipitação do modelo MM5 para a cidade do Rio de Janeiro, De Sá (2005) realizou simulações de eventos alternados de precipitação ocorridos em março/2003, associados à passagem de um sistema frontal. Para tanto, usou 7 parametrizações de microfísica disponíveis do modelo, aplicando-as em grades de 3 e 1 km de resolução horizontal aninhadas a grades de 27 e 9 km, nas quais empregou o esquema implícito Grell. No cômputo geral, os esquemas Warm Rain, Simple Ice e Stable geraram boas representações, sendo que a parametrização de Schultz obteve o melhor desempenho. Contudo as parametrizações produziram chuva no período seco, o que, segundo o autor, pode estar associado ao fato de que as parametrizações são desenvolvidas para latitudes médias e ajustadas a dados de período chuvoso.

Grubisic et al (2005) simularam 4 eventos de precipitação de inverno ocorridas entre 1982 e 1986 na região orográfica de Sierra Nevada (oeste dos Estados Unidos). Para isso, usaram grades aninhadas de 40,5 e 13,5 km de resolução com o esquema KF e grades de 4,5 e 1,5 km para os esquemas explícitos Simple Ice, Goddard, Reisner 2 e Schultz. O objetivo era testar o desempenho de diferentes esquemas de microfísica na representação dos campos de precipitação relacionados aos eventos. Independente do esquema de microfísica, o desempenho do modelo piorou nas duas grades com menor espaçamento horizontal (4,5 e 1,5 km). Todos os esquemas superestimaram a precipitação nos dois lados da montanha (sobretudo com o aumento da resolução horizontal) e indicaram diferenças marcantes na distribuição espacial de precipitação. Isso sugere que o refinamento dos parâmetros de microfísica e as características de cada região têm forte influência sobre o desempenho do modelo.

Serafin e Ferreti (2007) simularam dois eventos de precipitação ocorridos em 1999, na região montanhosa do Mediterrâneo, com o intuito de comparar os efeitos do uso dos esquemas Reisner, Reisner 2 e Goddard numa grade de 3 km aninhada a grades de 27 e 9 km de resolução, nas quais se utilizou esquema implícito de Kain-Fritsch (Fritsch e Kain 1993). Houve tendência do MM5 em subestimar o total de precipitação em ambos os lados da montanha. Em síntese, os esquemas produziram diferentes distribuições

verticais de hidrometeoros, contudo não houve diferenças marcantes na distribuição temporal e espacial de precipitação, inclusive para as grades onde se empregou esquema KF.

Segundo Liu e Moncrieff (2007), o lento avanço das parametrizações convectivas existentes como também o progressivo avanço computacional sugerem o uso de esquemas explícitos em grades de alta resolução, mesmo estes esquemas sendo a principal fonte de incertezas para os modelos de previsão de precipitação. Desta forma, os autores investigaram os efeitos de 4 diferentes esquemas de microfísica (Simple Ice, Reisner, Reisner 2 e Goddard) do MM5, aplicados a um único domínio amplo, com espaçamento horizontal de grade de 3 km, na simulação de um evento de precipitação de 7 dias ocorrido nos Estados Unidos, em 2003. Uma grade de 40 km de análise do modelo Eta forneceu as condições iniciais e de contorno. Resultados mostraram que a distribuição temporal e espacial da precipitação é pouco sensível aos diferentes esquemas. Embora os esquemas de fase misturada água-gelo (fase mista) apresentassem melhores representações, tanto no quantitativo quanto na distribuição da precipitação, que o Simple Ice, o tratamento mais detalhado dos processos de microfísica desses esquemas não resultou em melhorias expressivas na comparação com as observações.

Diante do exposto, conclui-se que os esquemas de microfísica do MM5, diferenciados pelos níveis de tratamento dos processos de formação de hidrometeoros e suas interações, apontam para variados resultados em simulações de eventos de precipitação. Não se deve descartar a influência das características particulares dos eventos simulados (duração, época do ano, região de ocorrência, etc.), das condições iniciais e de contorno disponíveis, dos métodos utilizados para verificação das simulações, da resolução do modelo, além das próprias deficiências na determinação dos parâmetros dos esquemas. O desafio consiste em conseguir um bom desempenho na previsão quantitativa de precipitação utilizando somente esquemas explícitos quando o espaçamento de grade torna-se suficientemente pequeno, pois, conceitualmente, não existiria justificativa para o uso de esquemas implícitos em espaçamentos de grade menores que 5 km (Molinari e Dudek, 1992). No entanto, em alguns trabalhos, esquemas implícitos foram usados em espaçamentos de grade menores que 10 km (Wenshi et al, 2000, por exemplo). Por outro lado, não é regra que o uso de esquemas explícitos mais complexos leve sempre a melhores simulações de precipitação. A escolha correta do esquema depende de cada

caso a ser estudado, pois como se nota em alguns trabalhos (p. ex., Mass e Colle, 2000; Liu e Moncrieff, 2007) esquemas mais simples, com menor custo computacional, podem produzir melhores resultados.

4 SELEÇÃO E ESTUDO OBSERVACIONAL DOS CASOS DE PRECIPITAÇÃO

Foram selecionados 4 eventos de precipitação ocorridos sobre a região do CLA entre 2008 e 2009. Para caracterizá-los foram utilizados dados de análise e reanálise, de radar meteorológico, de temperatura de brilho das nuvens, além das séries temporais de precipitação observada e estimada (Seção 2).

4.1 Estudos de casos de precipitação sobre a região do CLA

Nesta seção, faz-se uma breve descrição em escala sinótica, regional e local das condições meteorológicas atuantes durante a ocorrência e passagem dos sistemas de precipitação sobre a região do CLA. Os campos de TB e de radar foram utilizados para verificar a organização espacial do sistema precipitante, bem como acompanhar o seu ciclo de vida. Os dados de radiossondagem foram utilizados para obter a instabilidade do perfil sobre o CLA. Empregaram-se os dados de análise e Reanálise para detalhar os aspectos dinâmicos e termodinâmicos na região do CLA durante a atuação dos sistemas.

A evolução temporal e a quantidade da precipitação referente aos eventos foram obtidas não somente dos dados de precipitação registrados pelas estações de Alcântara e São Luís, mas também das estimativas de precipitação do modelo Hidroestimador e do satélite TRMM. As estimativas de precipitação por meio de satélites são uma fonte alternativa de dados em casos de escassez de informação. Para obter valores representativos de uma região que abrangesse as localidades do CLA e de São Luís, foi delimitada uma área de $0,5^{\circ} \times 0,5^{\circ}$ que se estende de 02.2°S a 02.7°S de latitude e de 315.4°W a 315.9°W de longitude (Figura 4.1). Assim, o valor obtido representa uma estimativa de precipitação média da área.



Figura 4.1 - Área delimitada (aproximada, em vermelho) para obtenção da precipitação média.
 Fonte: www.guianet.com.br/ma/mapama.htm

4.1.1 Eventos ocorridos no dia 18/07/08

Com base nos dados de precipitação, pode-se notar a ocorrência de 2 eventos no decorrer do dia 18/07/08 (Figura 4.2): um durante a madrugada e manhã, que abrange os horários de precipitação entre 02 e 12UTC; outro que se inicia a partir das 15UTC. Como mostrado adiante, o primeiro evento está associado à intensificação de sistema convectivo por convecção noturna; o segundo, por convecção diurna. O total de precipitação diária registrada no CLA foi de 63,8 mm; em SLZ, 2,8 mm. Foram estimados 48,1 mm de precipitação pelo Hidroestimador e 49,3 mm pelo TRMM. A distribuição temporal de precipitação estimada é coerente com a evolução da precipitação registrada para os eventos aqui analisados.

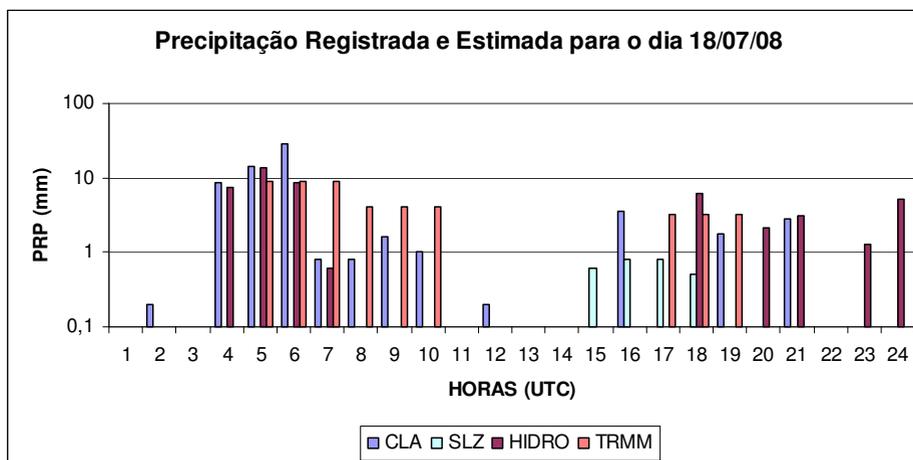


Figura 4.2 - Precipitação horária registrada pelas estações de Alcântara (CLA) de São Luís (SLZ) e estimada pelo modelo Hidroestimador (HIDRO) e pelo satélite TRMM (TRMM) para o dia 18/07/08. Unidade de precipitação: mm/h.

4.1.1.1 Evento de convecção noturna

Em imagens obtidas pelos satélites GOES-10 e METEOSAT-09 (Figura 4.3), é possível verificar uma fraca atividade da ITCZ (caracterizada por uma estreita banda de nuvens sobre o oceano Atlântico próxima a linha do equador) às 12UTC do dia 17/07/08, bem como alguma nebulosidade próxima a região norte da costa do NEB (nordeste brasileiro). Neste período, a ITCZ atuou entre 5°N e 10°N, ou seja, mais ao norte de sua posição climatológica média (Climanálise Vol. 23, nº07). Às 00UTC e principalmente às 06UTC do dia 18, observam-se aglomerados convectivos (cor branca) sobre uma linha orientada na direção SW/NE que se estende desde a região que abrange o CLA até um amplo sistema convectivo no Atlântico pertencente à ITCZ. Esses aglomerados são produto de convecção noturna que se iniciou por volta das 0330UTC do dia 18, conforme imagens de temperatura de brilho (TB) da Figura 4.4, e não tem relação com a ITCZ, de acordo com inspeção feita nas imagens anteriores ao dia 17 (não mostradas).

Essas formações de convecção noturna poderiam estar associadas à ocorrência de Jatós de Baixos Níveis (JBN). Na costa paraense, os JBN ocorrem durante a estação seca com maior frequência à noite, acima de 500 m de altitude, com direção predominante entre nordeste e sudeste no ponto de máxima velocidade (Souza et al. 2006). Os JBN intensificam o transporte de umidade e calor, sendo importantes no desenvolvimento e na manutenção de convecção noturna (Whiteman et al. 1997). Para se verificar a

ocorrência de JBN na região do CLA, dados de magnitude do vento obtidos a partir das radiossondagens das 00UTC e 12UTC do dia 18 foram analisados utilizando os critérios de Bonner (1968), modificado por Whiteman et al. (1997) e Stivari (1999), empregados por Souza et al. (2006). Apesar da existência de ventos de magnitude significativa sobre o CLA (acima de 12 m/s), não foram satisfeitos os critérios acima citados para a constatação da ocorrência de JBN. No entanto, verificou-se a ocorrência de fluxos ou Ventos Máximos (VM), denominação usada por Corrêa (2005) para ventos de magnitude de 10 m/s ou mais, em seu estudo sobre os efeitos dos JBN relacionados à forte precipitação sobre o Rio Grande do Sul. Esta classificação não considera o critério de cisalhamento vertical do vento associado às situações de ocorrência de jato, porém o transporte de umidade realizado por estes fluxos pode gerar severa precipitação (Corrêa, 2005). Deve-se destacar que mesmo ventos de magnitude inferior a 10 m/s, porém com cisalhamento vertical da ordem de 5 m/s, podem ser significativos para a ocorrência de fortes chuvas (Corrêa, 2005). Valores significativos de alguns índices de instabilidade foram obtidos através da radiossondagem realizada às 00 UTC do dia 18 no CLA: índice K acima de 30, Total-totals (Tt) acima de 40 e CAPE maior de 2000. Esses valores são favoráveis à ocorrência de convecção profunda. O comportamento do vento horizontal (U, m/s) e da umidade específica (Q, g de vapor d'água/Kg de ar) no nível de 850 hPa foi verificado por meio das análises. É possível observar na Figura 4.3d a presença dos ventos alísios vindos do oceano (aproximadamente de leste/sudeste) transportando quantidade significativa de umidade específica para a região do CLA. Em menor escala, esses ventos associam-se à circulação de brisa marítima (terrestre) formada na região costeira durante a tarde (noite). O perfil de fluxo de umidade específica sobre o ponto de grade que contém o CLA (Figura 4.3e) mostra valores mais elevados desse transporte na camada que se dispõe entre os níveis de 925 e 850 hPa. Os dados de análise mostram uma área com valores negativos de ômega (fluxo ascendente) próximo à costa do Maranhão às 12 UTC do dia 18 (Figura 4.3f). Esse movimento ascendente é resultado de convergência sobre a região devido (possivelmente) à atuação de brisa terrestre, mesmo já em fase de enfraquecimento (Kousky, 1980). Assim, pode-se considerar que o transporte de umidade mais acentuado em baixos níveis somado à ação da brisa terrestre deve ser relevante para o surgimento dos produtos de convecção noturna observados sobre a região que contém o CLA.

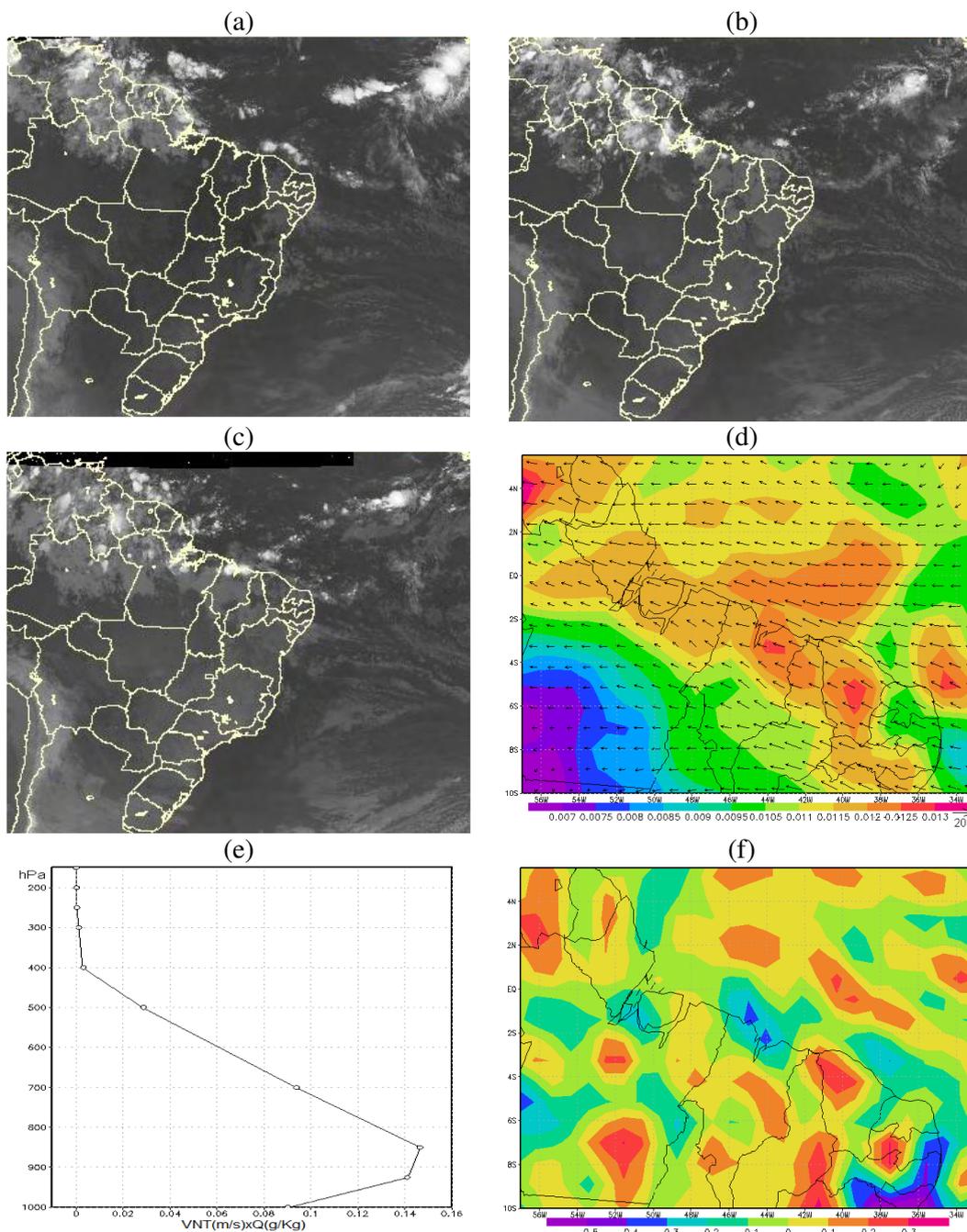


Figura 4.3 - Recorte de imagens do satélite GOES-10 + METEOSAT-09 para as 12UTC do dia 17/07/08 (a), 00UTC (b) e 06UTC (c) do dia 18/07/08. Fonte: INPE/CPTEC/DSA. Os painéis “d”, “e” e “f” referem-se a campos gerados a partir de dados de análise, sendo: (d) direção do vento horizontal (VNT, m/s) e umidade específica (Q, em g/kg) em 850 hPa para as 00UTC do dia 18; (e) perfil do fluxo de umidade específica sobre o ponto de grade que contém o CLA para as 12UTC de 18/07/08 e (f) ômega (Pa/s) em 850 hPa para as 12UTC do dia 18/07/08.

O desenvolvimento das formações convectivas noturnas observadas na região do CLA está apresentado nas imagens de temperatura no canal infravermelho (TB) da Figura

4.4. Nota-se a presença de núcleos de convecção de pequena extensão horizontal próximos do CLA por volta das 0330 UTC do dia 18, inseridos numa camada de nebulosidade com topo baixo que cobre grande parte da região norte da América do Sul. Esses núcleos se intensificaram e se uniram (“merge”) até atingir um máximo desenvolvimento (TB < -60°C) por volta das 0615 UTC. O sistema resultante, centrado aproximadamente sobre o CLA e que cobre quase toda a costa norte do Maranhão, adquiriu uma dimensão maior (cerca de 300 km) e se deslocou para oeste (conforme observado pelas imagens de radar, Figura 4.5).

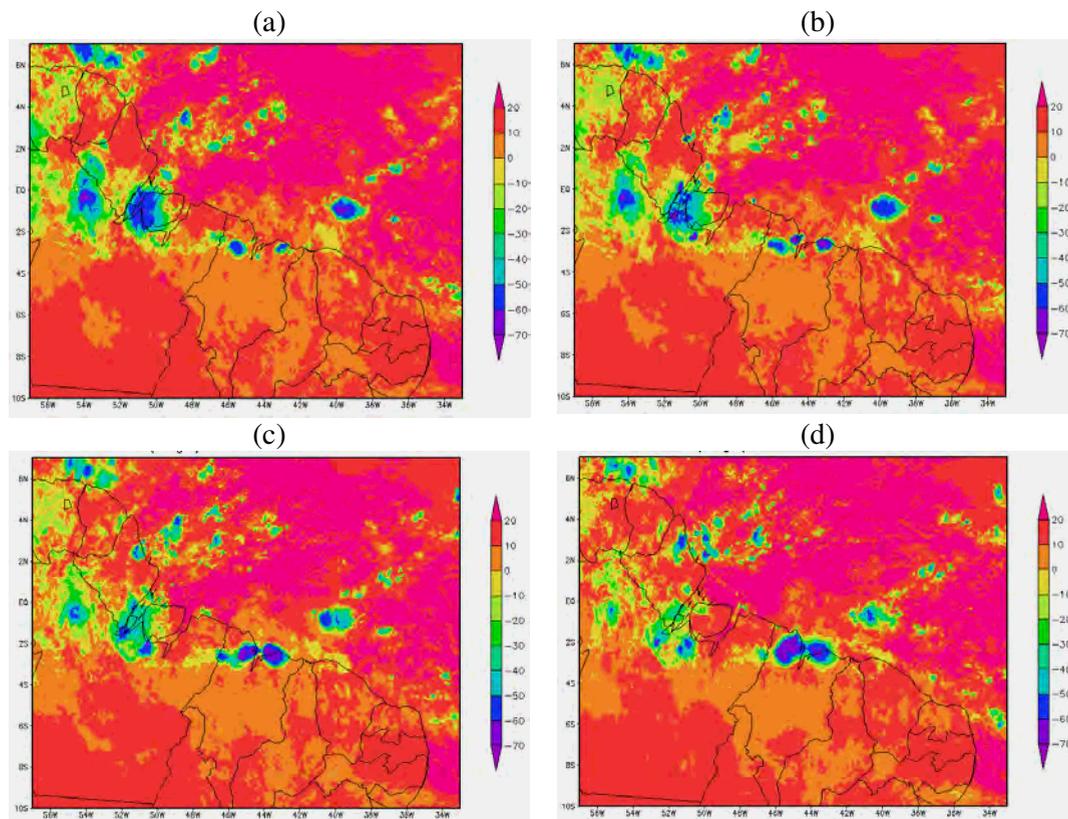


Figura 4.4 - Imagens de temperatura de brilho das nuvens (TB, °C) para o dia 18/07/08. Os campos referem-se aos seguintes horários: (a) 0245UTC, (b) 0330UTC, (c) 0445UTC e (d) 0615UTC. Fonte: INPE/CPTEC/DSA.

As imagens geradas por meio das varreduras efetuadas pelo radar localizado em Alcântara permitem uma visão mais detalhada dos sistemas que cruzam a região. Assim, desde as primeiras horas do dia 18/07/08 notam-se formações convectivas com disposição zonal se deslocando no sentido leste-oeste e cruzando o CLA (Figura 4.5). A partir das 05 UTC, as formações expandem-se e intensificam-se, apresentando máxima atividade entre 06 e 07 UTC, período em que foram registrados os maiores valores de

precipitação horária (28,4 mm e 14,2 mm, Figura 4.2). Os núcleos de precipitação se enfraquecem entre 10 e 11 UTC, mas continuam afetando o CLA até as 12 UTC (devido à pequena extensão dos núcleos e da sua proximidade do CLA, ocorre contaminação da refletividade pelos ecos de terreno, o que dificulta a identificação dos núcleos).

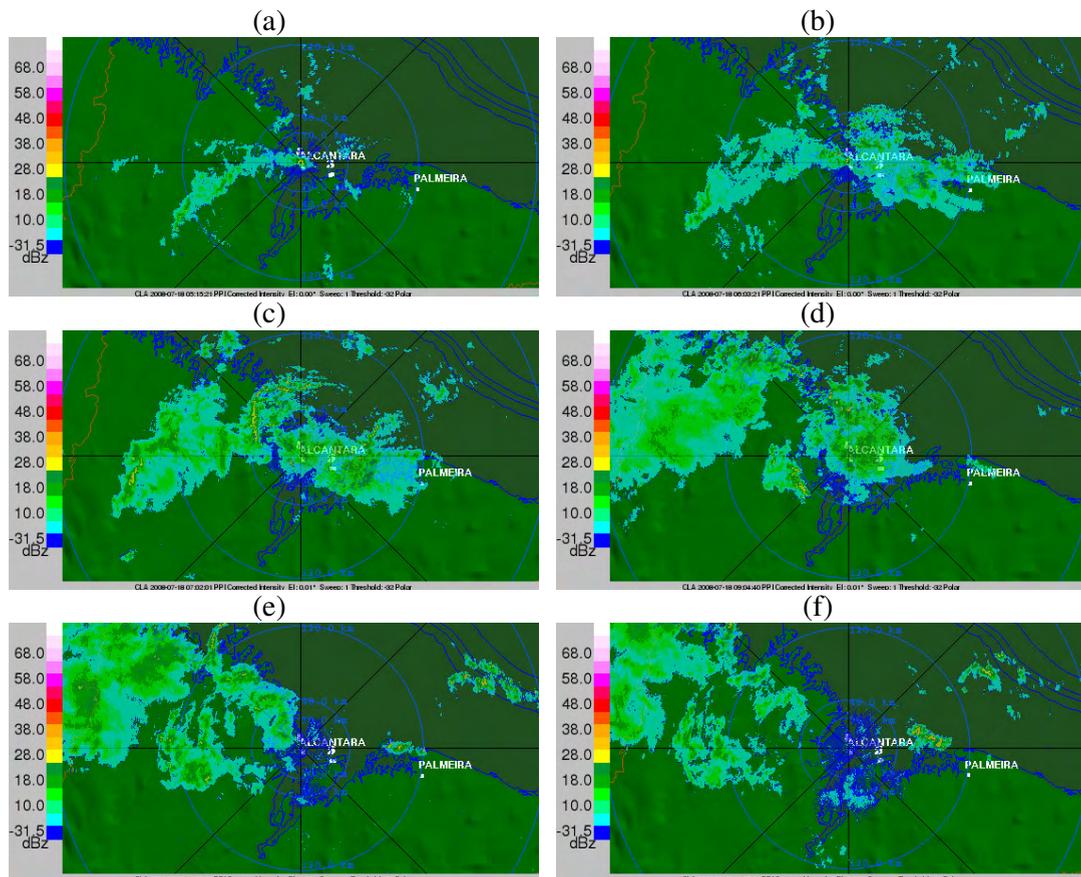


Figura 4.5 - Imagens de refletividade das nuvens geradas pelo radar localizado no CLA para o dia 18/07/08. Os campos referem-se aos seguintes horários (UTC), nesta ordem: (a) 0515, (b) 0603, (c) 0702, (d) 0904, (e) 1030 e (f) 1123. O maior círculo concêntrico representa uma distância de 120 km.

4.1.1.2 Evento de convecção diurna

Quanto ao segundo evento de chuva, formações pequenas em extensão, geradas por convecção diurna, são detectadas pelo radar localizado no CLA se deslocando de leste, por volta das 1630 UTC (Figura 4.6).

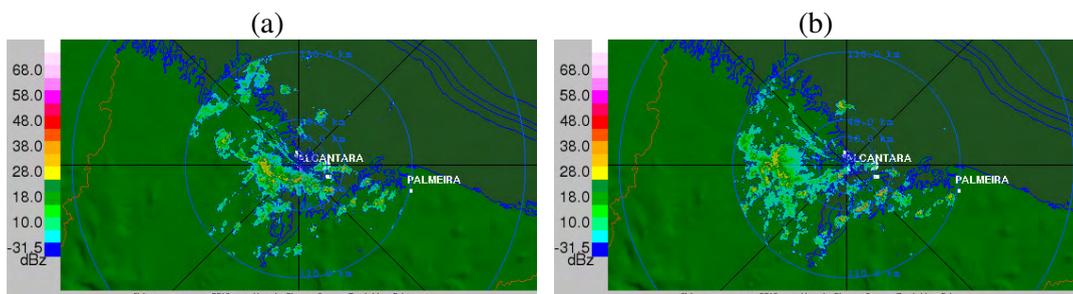


Figura 4.6 - Imagens de refletividade das nuvens geradas pelo radar localizado no CLA para o dia 18/07/08. Os campos referem-se aos seguintes horários (UTC), nesta ordem: (a) 1633 e (b) 1720. O maior círculo concêntrico representa uma distância de 120 km.

Durante a tarde, o aquecimento da superfície terrestre associado à disponibilidade de umidade nas camadas mais baixas da atmosfera dá suporte à convecção diurna (e precipitação associada), conforme se observa sobre o CLA e no campo de precipitação estimada pelo satélite TRM para as 18 UTC (Figura 4.7c). Este sistema foi responsável pela precipitação intermitente registrada sobre o CLA e São Luís entre 15 e 21 UTC. Mais tarde (por volta das 00 UTC do dia 19), outros núcleos mais afastados do CLA (predominantemente a oeste) são observados (Figura 4.7b). O campo de divergência do vento horizontal em 850 hPa, obtido a partir de dados de análise, aponta regiões de convergência numa região que se estende desde o interior do Maranhão até o estado do Amapá (Figura 4.7d). Nas imagens das Figuras 4.7a e 4.7b é possível observar a presença de núcleos convectivos nessas áreas de convergência.

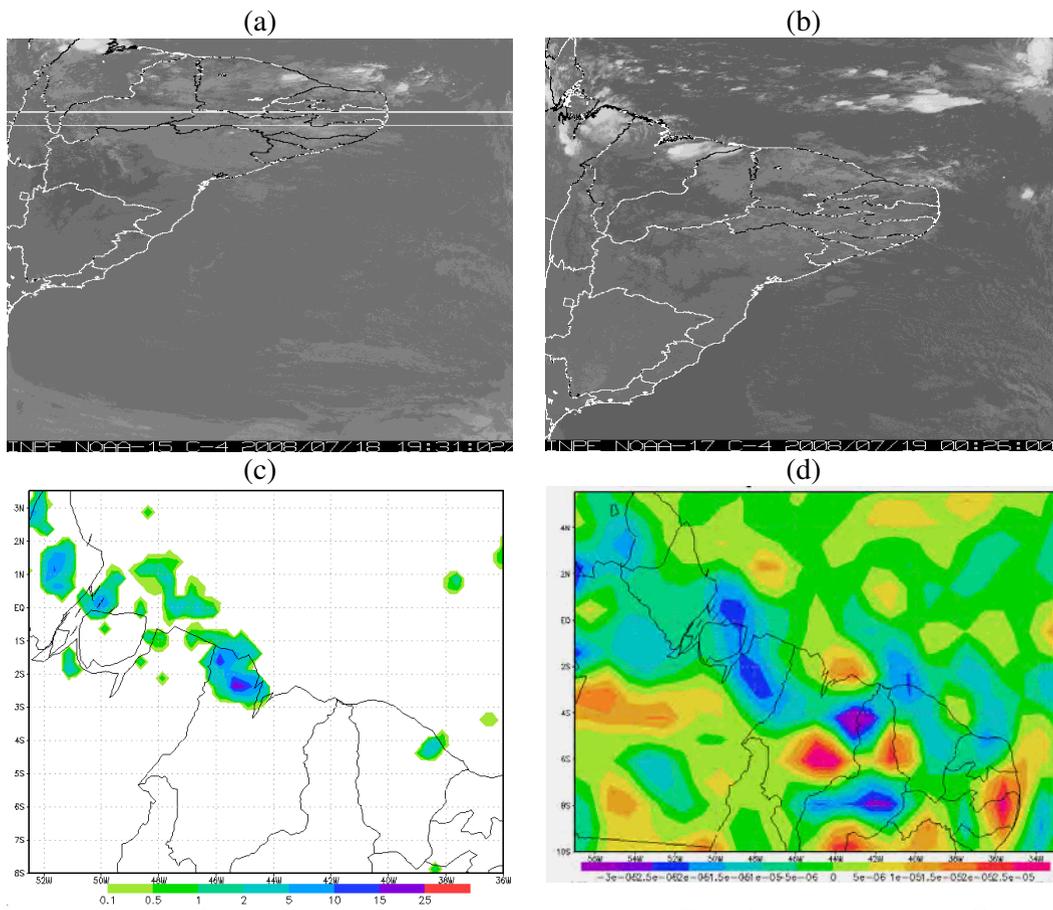


Figura 4.7 - (a) Recorte de imagem obtida pelo satélite NOAA-15 para as 1930UTC do dia 18/07/08. (b) Recorte de imagem obtida pelo satélite NOAA-17 para as 0026UTC do dia 19/07/08. Fonte: INPE/CPTEC/DSA. (c) Campo de precipitação (mm/h) estimado pelo satélite TRMM para as 18UTC do dia 18/07/08. (d) Campo de divergência do vento horizontal em 850 hPa (1/s) gerado a partir de dados de análise para as 00UTC do dia 19/07/08.

4.1.2 Evento ocorrido em 30/07/08

Trata-se de um caso de convecção diurna ocorrido durante a época de transição entre as estações chuvosa e seca da região. Embora não houvesse registro de precipitação nas estações do CLA e de SLZ e estimativas do satélite TRMM para este dia (talvez devido a sua resolução espacial de 0.25°), as estimativas geradas pelo modelo Hidroestimador (28.1 mm no total diário, Figura 4.8) para a área delimitada que envolve a região do CLA justificam considerar a ocorrência de precipitação isolada no período compreendido entre 15 e 19 UTC sobre a região.

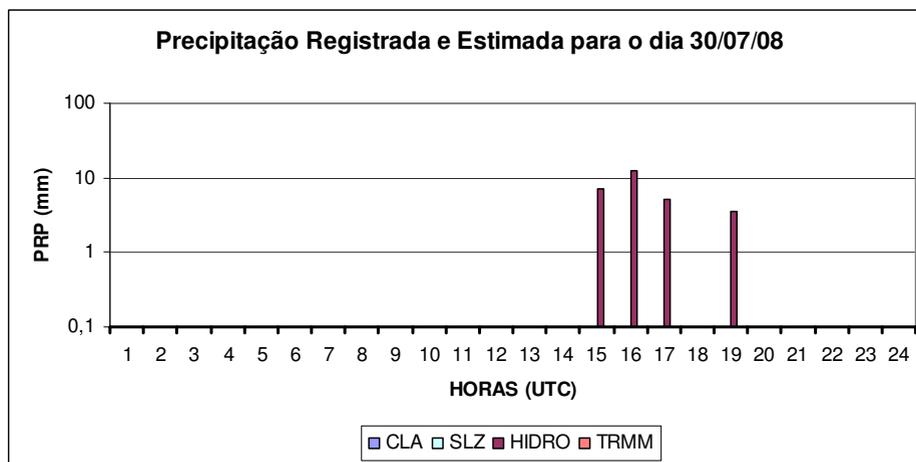


Figura 4.8 - Precipitação horária registrada pelas estações de Alcântara (CLA) de São Luís (SLZ) e estimada pelo modelo Hidroestimador (HIDRO) e pelo satélite TRMM (TRMM) para o dia 30/07/08. Unidade de precipitação: mm/h.

Ocorre atividade da ITCZ (relativamente afastada do NEB) sobre o oceano Atlântico Norte (Figura 4.9). A atividade convectiva sobre grande parte do Brasil, incluindo a região do NEB, é muito fraca ou quase nula. Em imagens de satélite abrangendo a América do Sul é difícil identificar a formação de sistemas muito localizados e isolados, como o que acontece neste caso. Mesmo assim, verifica-se sobre o NEB a presença de uma persistente camada de nuvens de fraco desenvolvimento vertical e teto baixo (possivelmente nuvens do gênero Stratocumulus) distribuída em duas bandas que se estendem até o Oceano Atlântico Sul: uma que começa na Bahia; outra se iniciando no litoral do NEB. A quase total ausência de nebulosidade cumuliforme sobre parte das Regiões Sul, Sudeste, Centro-Oeste e Nordeste do Brasil pode estar associada a “Estagnações de Massas de Ar Quente e Seco” (EMAQS), ou seja, presença de uma massa de ar seco e quente sobre estas regiões, as quais são caracterizadas por anomalias

positivas de temperatura do ar e negativas de precipitação, persistentes por vários dias. Tal fenômeno ocorre nos meses de abril a setembro (Padilha, 2006). De fato, durante o mês de julho de 2008, ocorreu a atuação de uma massa de ar seco na maior parte do Brasil Central, onde predominou um estado de ausência de precipitação e baixa umidade relativa do ar que resultou na ocorrência de temperaturas máximas acima da média (Climanálise Vol. 23, n°7). Observa-se também o deslocamento de um sistema frontal sobre o Uruguai e Sul do Brasil, que mais tarde se estaciona sobre o Paraná (Figura 4.9d) devido à massa de ar quente e seca que impede o avanço de frentes pelo Sudeste e Centro-Oeste do Brasil.

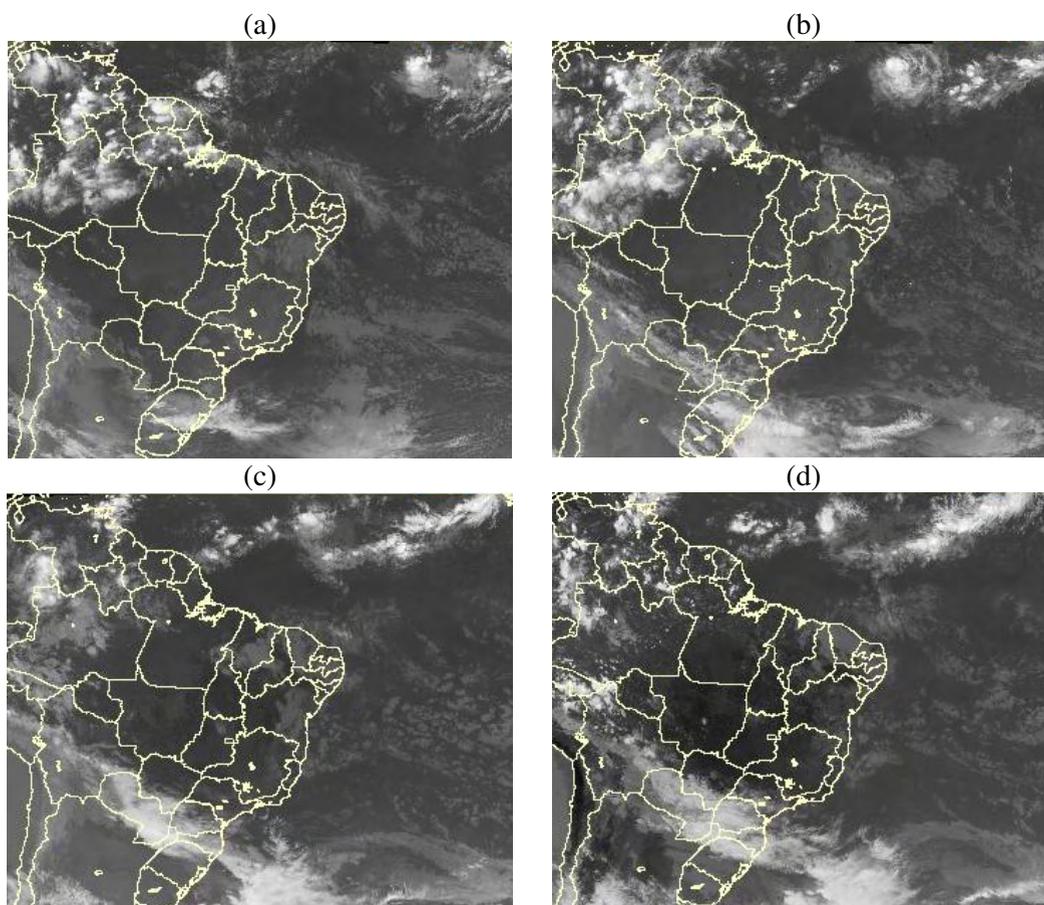


Figura 4.9 - Recorte de imagens do satélite GOES-10 + METEOSAT-09 para às 00UTC do dia 29/07/08 (a), 00UTC (b), 12UTC (c) e 1815UTC (d) do dia 30/07/08. Fonte: INPE/CPTEC/DSA.

Com base nas imagens de TB da Figura 4.10 identifica-se o surgimento de pequenas e isoladas formações convectivas na região do CLA, que nascem na borda oeste da banda de nebulosidade de topo baixo que se estende pelo litoral nordestino a partir das 1715

UTC (Figura 4.10a). Estas formações atingem seu desenvolvimento máximo entre 1830 e 1930 UTC (TB < -40°C). O enfraquecimento desse sistema se dá a partir das 2045 UTC (Figura 4.10d).

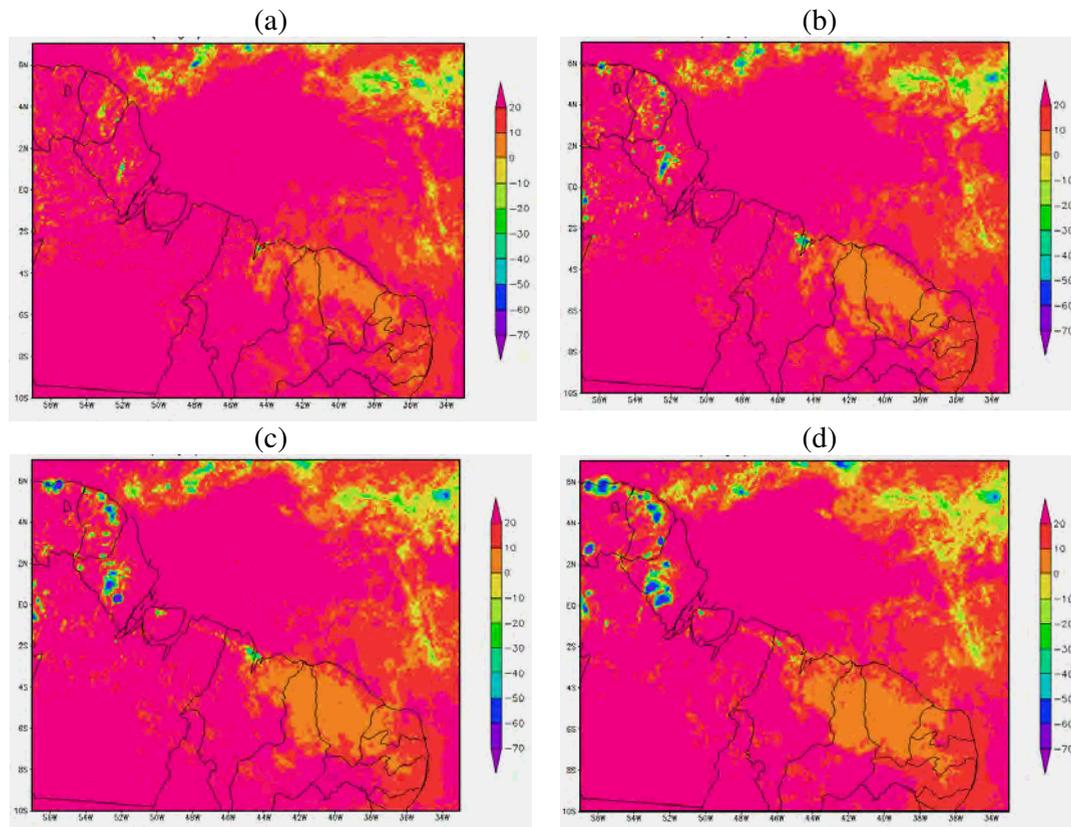


Figura 4.10 - Imagens de temperatura de brilho das nuvens (TB, °C) para o dia 30/07/08. Os campos referem-se aos seguintes horários: (a) 1715UTC, (b) 1830UTC, (c) 1930UTC e (d) 2045UTC. Fonte: INPE/CPTEC/DSA.

Os perfis de fluxo de umidade específica no ponto de grade que contém o CLA (Figura 4.11a-b) mostram valores mais acentuados entre os níveis de 925 e 700 hPa. O sistema convectivo formado durante a tarde próximo à São Luís possivelmente tem sua origem e manutenção relacionada ao aquecimento da superfície (que gera correntes ascendentes) brisa marítima e umidade transportada pelo escoamento entre esses níveis (p.ex. em 700 hPa, Figura 4.11c). Essa umidade seria oriunda da camada de nebulosidade de topo baixo que se estende pelo litoral nordestino. Apesar da subsidência em 700 hPa inibir a convecção (Figura 4.11d), o que explica o fato da ampla camada de nebulosidade no litoral nordestino possuir topo baixo, fatores locais na região do CLA devem ter atuado para a formação do sistema isolado. Índices de instabilidade obtidos através da radiossondagem realizada às 00 UTC do dia 31 no CLA apresentaram valores

favoráveis à ocorrência de convecção profunda: índice K maior que 35, Total-totals (Tt) acima de 44 e CAPE maior de 2000.

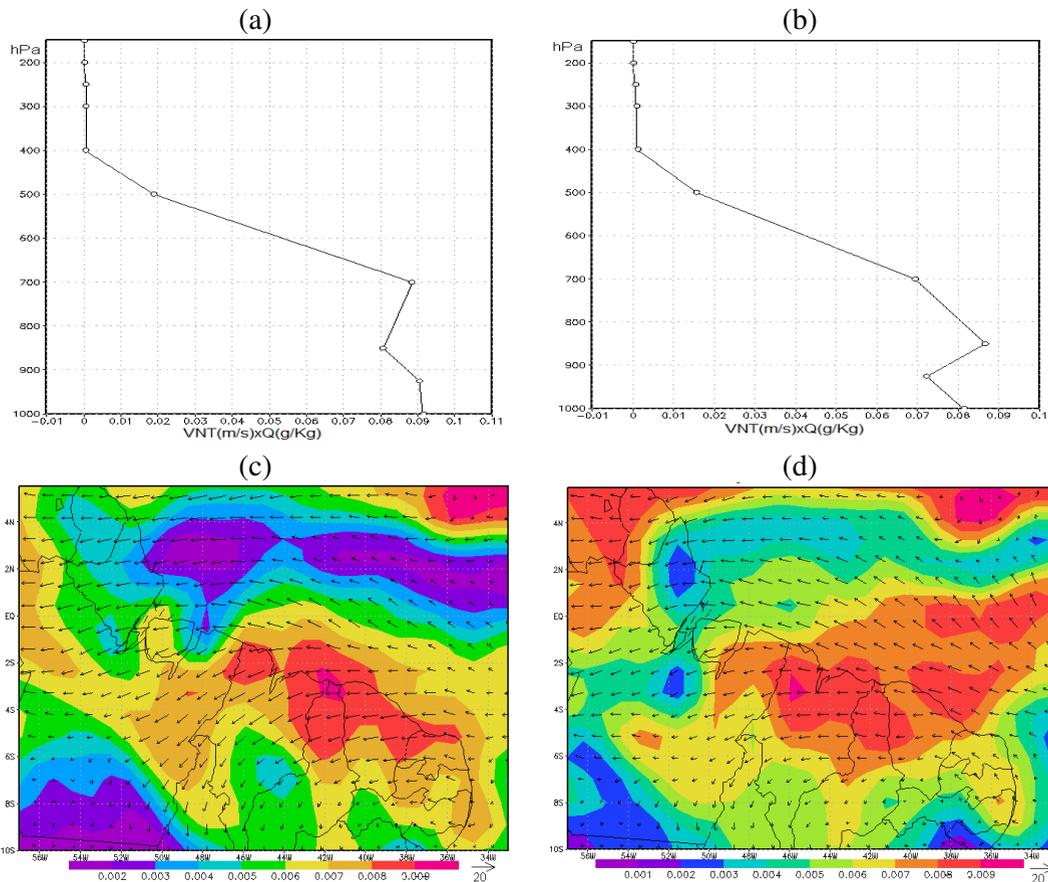


Figura 4.11 - Campos gerados a partir de dados de análise, sendo: perfil do fluxo de umidade específica sobre o ponto de grade que contém o CLA para as 12UTC do dia 30 (“a”) e para as 00UTC do dia 31/07/08 (“b”); escoamento (VNT, m/s) e umidade específica (Q, em g/kg) em 700 hPa para as 12UTC do dia 30/07/08 (c) e ômega (Pa/s) em 700 hPa para as 00UTC do dia 31/07/08 (“d”).

Um detalhamento maior das formações de convecção diurna é obtido com o uso de imagens geradas pelo radar localizado no CLA (Figura 4.12). Por volta de 1638 UTC vê-se a presença de pequenas formações convectivas dispostas aproximadamente em linha no sentido sudoeste/nordeste a uma distância pouco maior que 50 km do CLA (aproximadamente centradas em São Luís). Mais tarde, estas formações se organizaram num sistema linear maior (nas dimensões da Baía de São Marcos) que se deslocou no sentido sudeste/noroeste, passando sobre o CLA entre 1830 e 1930 UTC. A partir de então, ocorre o enfraquecimento do sistema e outras células permaneceram isoladas sobre a região.

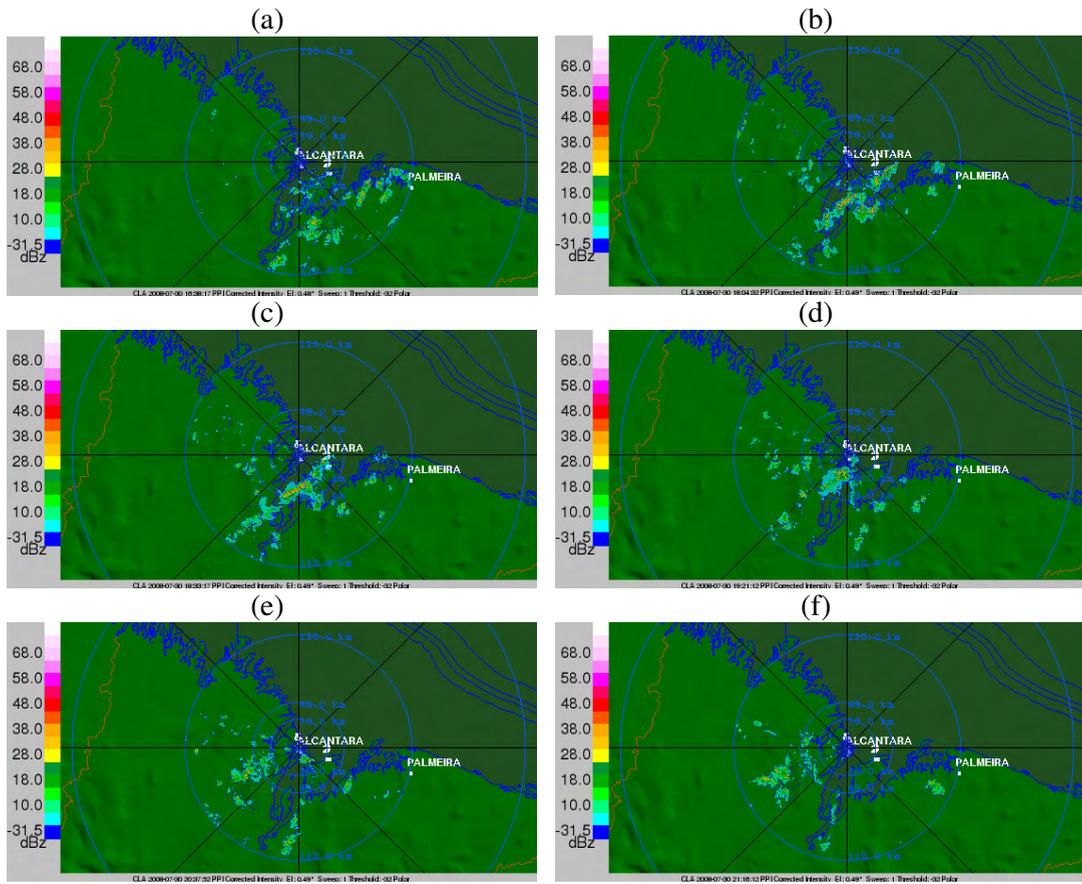


Figura 4.12 - Imagens de refletividade das nuvens geradas pelo radar localizado no CLA para o dia 30/07/08. Os campos referem-se aos seguintes horários (UTC), nesta ordem: (a) 1638 e (b) 1704, (c) 1833, (d) 1921, (e) 2037 e (f) 2116. O maior círculo concêntrico representa uma distância de 120 km.

4.1.3 Eventos ocorridos em 12/03/09

A distribuição horária de precipitação (Figura 4.13) mostra a ocorrência de 2 eventos distintos no decorrer do dia 12/03/09: um durante a madrugada e manhã, que abrange os horários de precipitação a partir de 01 até aproximadamente 14 UTC; outro que cobre o período entre 15 e 23 UTC. Como mostrado adiante, o primeiro evento está associado à intensificação de sistema convectivo por convecção noturna; o segundo, por convecção diurna. O total de precipitação diária registrada no CLA foi de 25,8 mm; em São Luís (SLZ) registrou-se 10,0 mm. Apesar de existir uma pequena discordância dos horários de máxima intensidade de precipitação entre os valores estimados e os registrados, novamente se verifica uma coerência entre esses conjuntos de dados, isto é, é possível identificar uma atividade relacionada à convecção noturna, com máximo entre 06 e 08 UTC e outra diurna, com início por volta das 16 UTC.

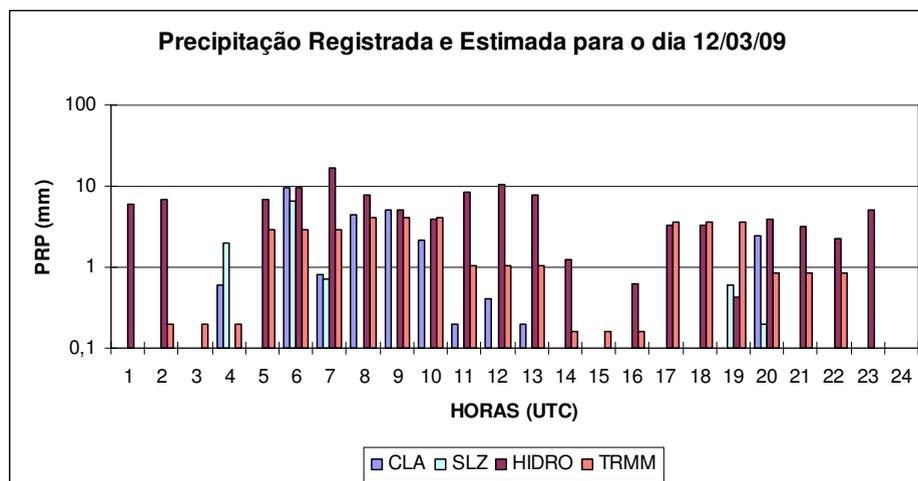


Figura 4.13 - Precipitação horária registrada pelas estações de Alcântara (CLA) de São Luís (SLZ) e estimada pelo modelo Hidroestimador (HIDRO) e pelo satélite TRMM (TRMM) para o dia 12/03/09. Unidade de precipitação: mm/h.

Durante o mês de março de 2009, a ITCZ permaneceu mais ao sul de sua posição climatológica, posicionando-se entre o Equador e 5°S, próximo à costa nordeste do Brasil. Esse sistema juntamente com a formação de LI's foram os principais mecanismos que favoreceram as chuvas na região noroeste do Maranhão neste período (Climanálise Vol. 24, n° 3; Cf. Barros, 2008). A análise sinótica elaborada pelo Grupo de Previsão do Tempo do CPTEC (GPT/CPTEC) referente às 00 UTC do dia 12 mostra que o tempo em parte da região sudeste e nordeste, onde se observa ausência de

convecção (cor escura nas imagens de satélite da Figura 4.15) está sendo influenciado pela seguinte configuração: em superfície (Figura 4.14b), presença, especialmente sobre Minas Gerais e Bahia, da borda da Alta Subtropical que está sobre o Atlântico com núcleo de 1026 hPa; em altos níveis (Figura 4.14a), observa-se um cavado estendido meridionalmente entre o Maranhão e o noroeste de Minas Gerais. Essa configuração de alta (baixa) em baixos (altos) níveis traduz-se em ocorrência de subsidência e consequentemente inibição de convecção. O campo gerado a partir de dados de análise da Figura 4.15d aponta, para a região do NEB com ausência de nuvens (especialmente a SE do Piauí) circulação anti-horária em 925 hPa com baixos valores de umidade específica. A Figura 4.15b mostra a nebulosidade que se forma na periferia desse cavado (especialmente ao norte e a oeste), ou seja, região onde há ventos divergentes (convergentes) em altos (baixos) níveis.

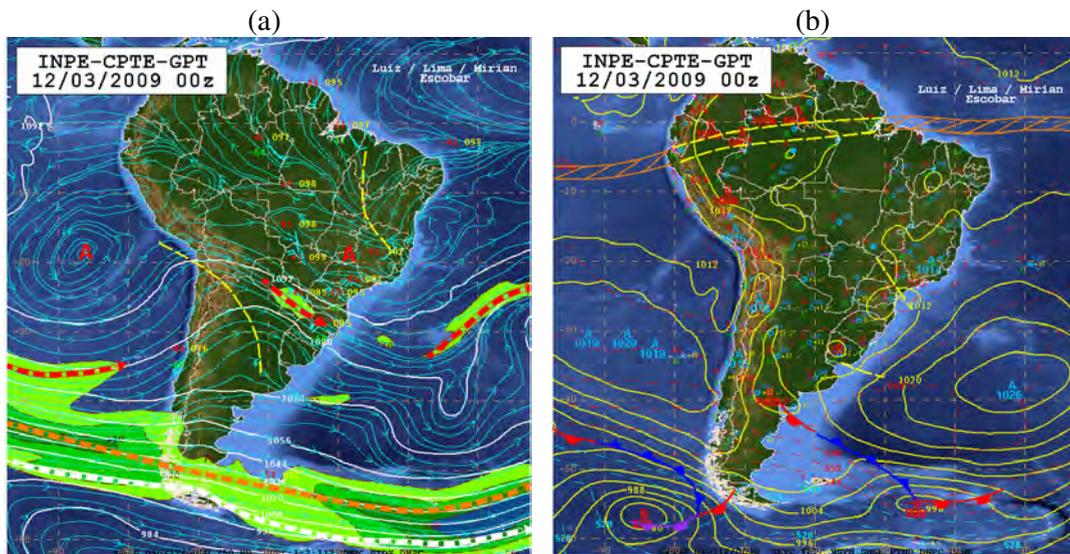


Figura 4.14 - Análise sinótica ao nível de 250 hPa (a) e à superfície (b) para às 00Z do dia 12/03/09. Fonte: INPE/CPTEC/GPT.

4.1.3.1 Evento de convecção noturna

Nas imagens de satélite das 18 UTC do dia 11 e 00 UTC do dia 12/03/09 (Figuras 4.15a-b) nota-se que ocorre convecção em grande parte do território brasileiro; particularmente ao longo da costa do Maranhão e Pará, ocorre uma banda de nuvens que se organiza em forma de Linha de Instabilidade às 18 UTC do dia 11. Esse sistema se propaga para o interior do continente, permanecendo ativo durante as primeiras horas do dia 12, quando então enfraquece. As imagens de TB (Figura 4.16) mostram o

surgimento de núcleos convectivos ao norte do Maranhão por volta das 0245 UTC (Figura 4.16a). Esses núcleos surgiram da nebulosidade que restou na retaguarda da LI formada no final da tarde do dia 11. Esses sistemas se intensificaram, tornando-se mais organizados a partir das 05 UTC, com máxima atividade sobre o CLA entre 05 e 06 UTC (valor máximo de precipitação horária registrada: 9,6 mm). O enfraquecimento desses sistemas se dá a partir das 11 UTC (Figura 4.16d).

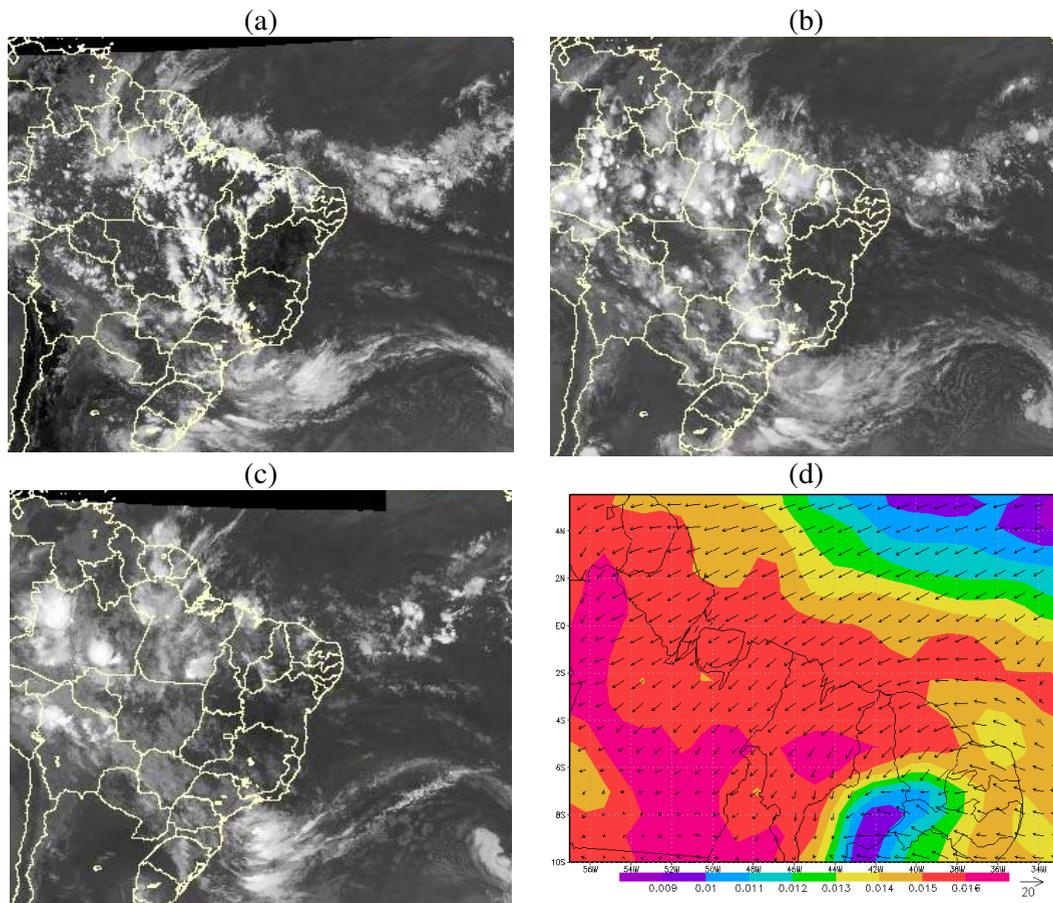


Figura 4.15 - Recorte de imagens do satélite GOES-10 + METEOSAT-09 para às 18UTC do dia 11/03/09 (a), 0015UTC (b) e 12UTC (c) do dia 12/03/09. Fonte: INPE/CPTEC/DSA. O painel “d” refere-se ao escoamento (VNT, m/s) e umidade específica (Q, em g/kg) em 925hPa, para as 00UTC do dia 12/03/09, gerado a partir de dados de análise.

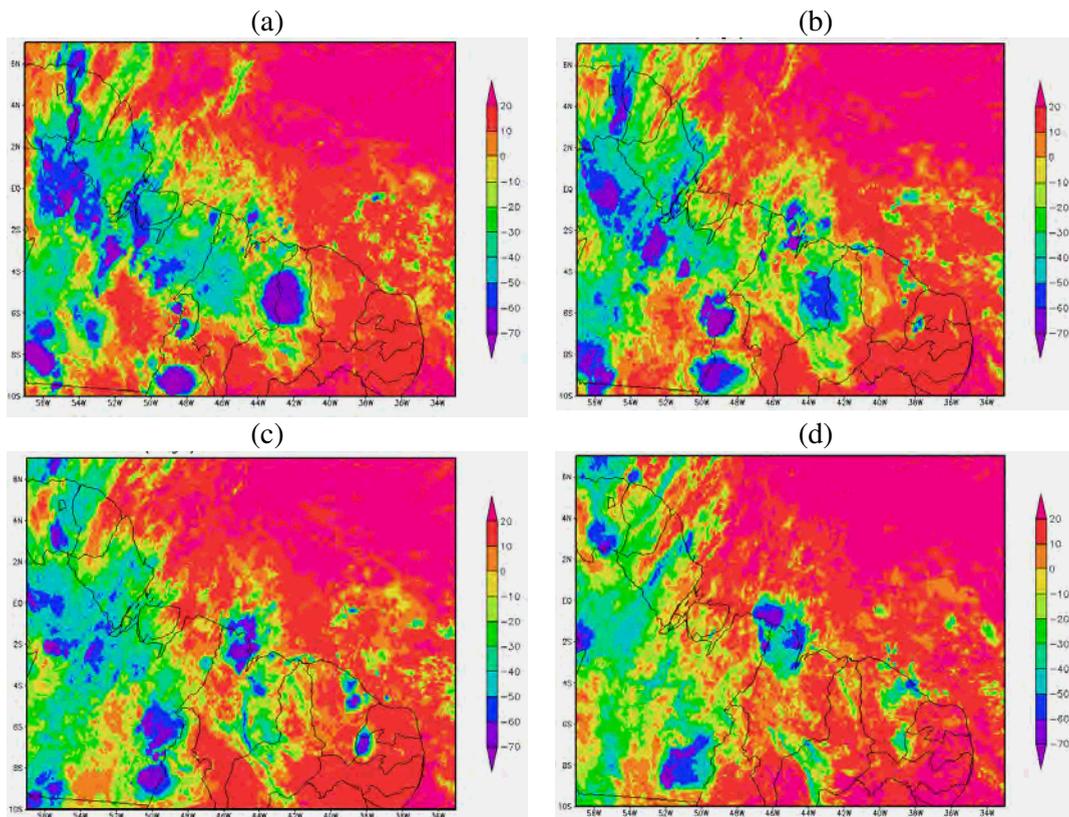


Figura 4.16 - Imagens de temperatura de brilho das nuvens (TB, °C) para o dia 12/03/09. Os campos referem-se aos seguintes horários: (a) 0245UTC, (b) 05UTC, (c) 0730UTC e (d) 11UTC. Fonte: INPE/CPTEC/DSA.

Pode-se acompanhar a evolução das formações convectivas através das imagens de radar (Figura 4.17). Às 0203 UTC (Figura 4.17a) nota-se o deslocamento vindo de leste de uma pequena banda de nuvens disposta em sentido N/S e que passa pelo CLA por volta de 03 UTC (Figura 4.17b). Entre 0530 UTC e 11 UTC formações de maior extensão espacial, deslocando no mesmo sentido que a anterior, passam pelo CLA. Essas formações se afastaram totalmente da região a partir das 1315 UTC.

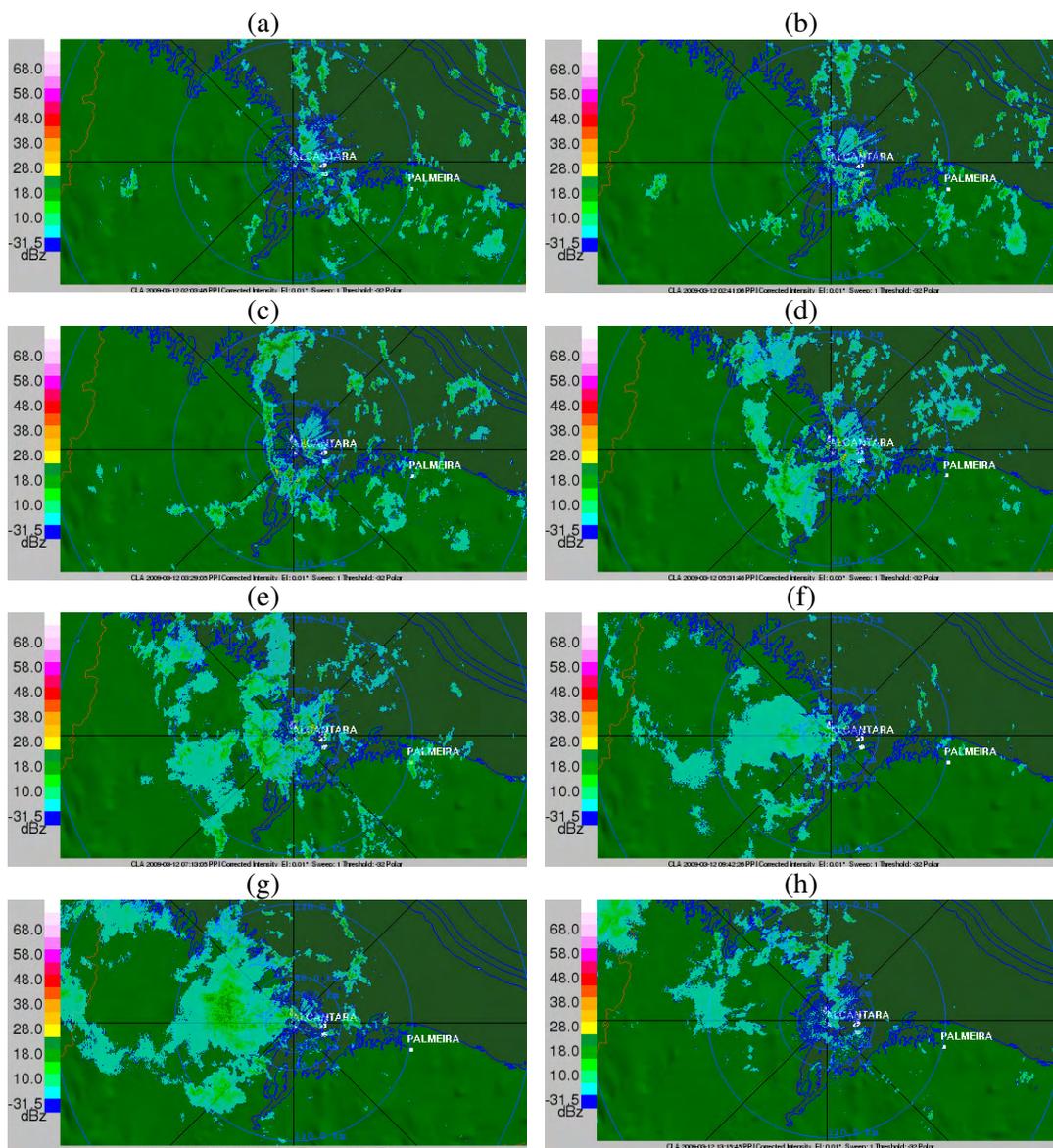


Figura 4.17 - Imagens de refletividade das nuvens geradas pelo radar localizado no CLA para o dia 12/03/09. Os campos referem-se aos seguintes horários (UTC), nesta ordem: (a) 0203 e (b) 0241, (c) 0329, (d) 0531, (e) 0713 e (f) 0942, (g) 1113 e (h) 1315. O maior círculo concêntrico representa uma distância de 120 km.

4.1.3.2 Evento de convecção diurna

Durante à tarde, notam-se núcleos convectivos oriundos de convecção diurna a leste do CLA (Figuras 4.19a e 4.21a). Essas formações parecem mais organizadas na imagem de satélite das 1815 UTC (Figura 4.18a). Observa-se, nos campos oriundos de dados de reanálise da Figura 4.20, que ocorre divergência do vento horizontal no escoamento em altos níveis (200 hPa) sobre a região onde se observam essas formações, favorecendo

seu desenvolvimento. A partir disso, aumentam de tamanho e avançam no sentido NW, passando pelo CLA entre 18 e 19 UTC (Figura 4.21c), vindo a enfraquecer por volta das 2015 UTC. Na imagem de satélite das 0015 UTC do dia 13 (Figura 4.18b), notam-se apenas algumas nuvens remanescentes da dissipação do sistema ao sul do CLA.

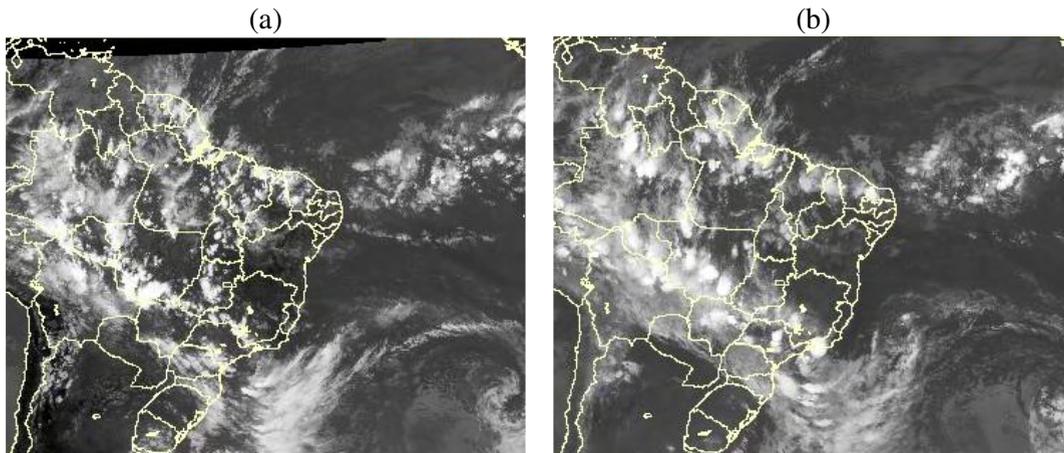


Figura 4.18 - Recorte de imagens do satélite GOES-10 + METEOSAT-09 para as 1815UTC do dia 11/03/09 (a) e 0015UTC do dia 12/03/09. Fonte: INPE/CPTEC/DSA.

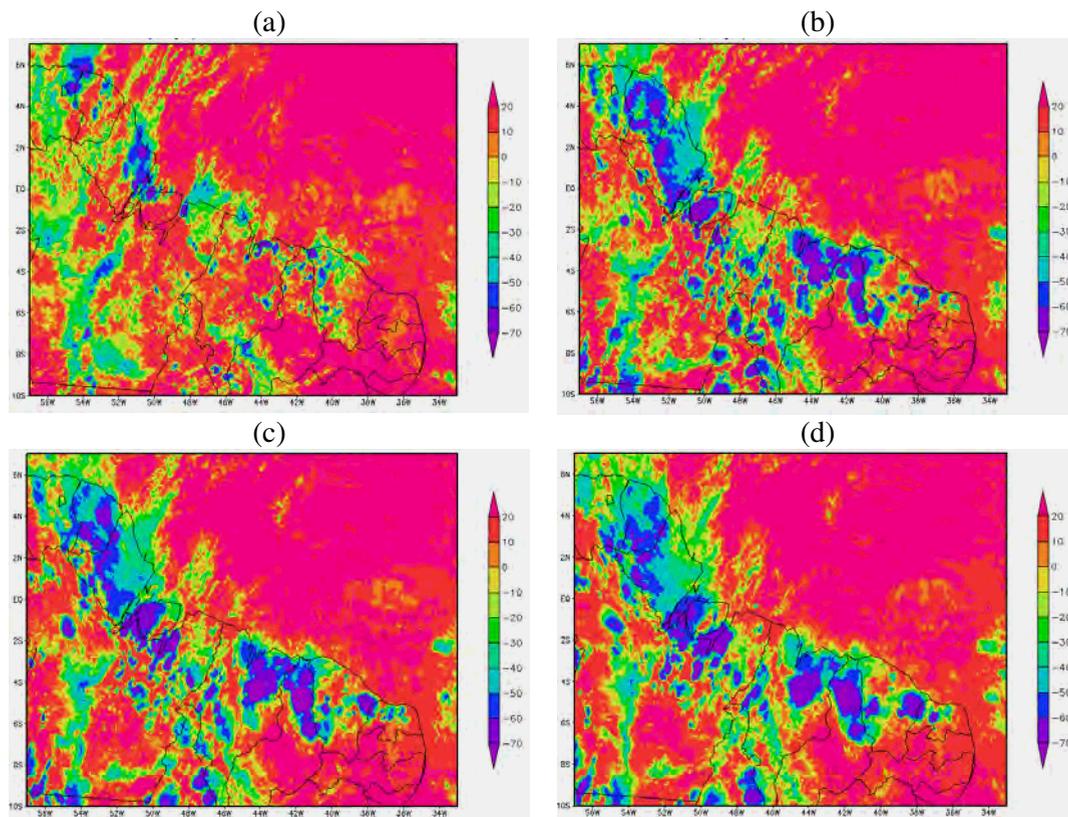


Figura 4.19 - Imagens de temperatura de brilho das nuvens (TB, °C) para o dia 12/03/09. Os campos referem-se aos seguintes horários: (a) 1615UTC, (b) 1915UTC, (c) 2015UTC e (d) 2115UTC. Fonte: INPE/CPTEC/DSA.

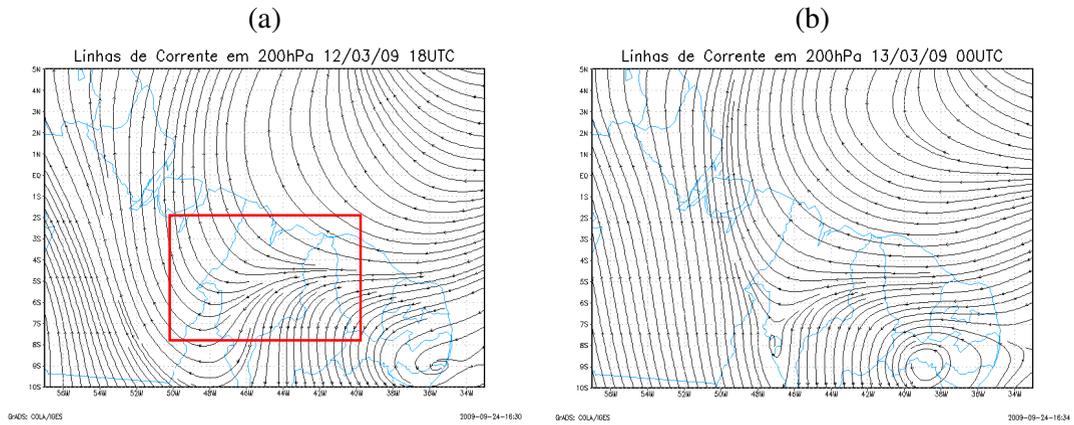


Figura 4.20 - Campos de linhas de corrente em 200hPa, para as 18UTC do dia 12 (a) e 00UTC do dia 13/03/09 (b), gerados a partir de dados de reanálise. O retângulo vermelho delimita área usada para estudo.

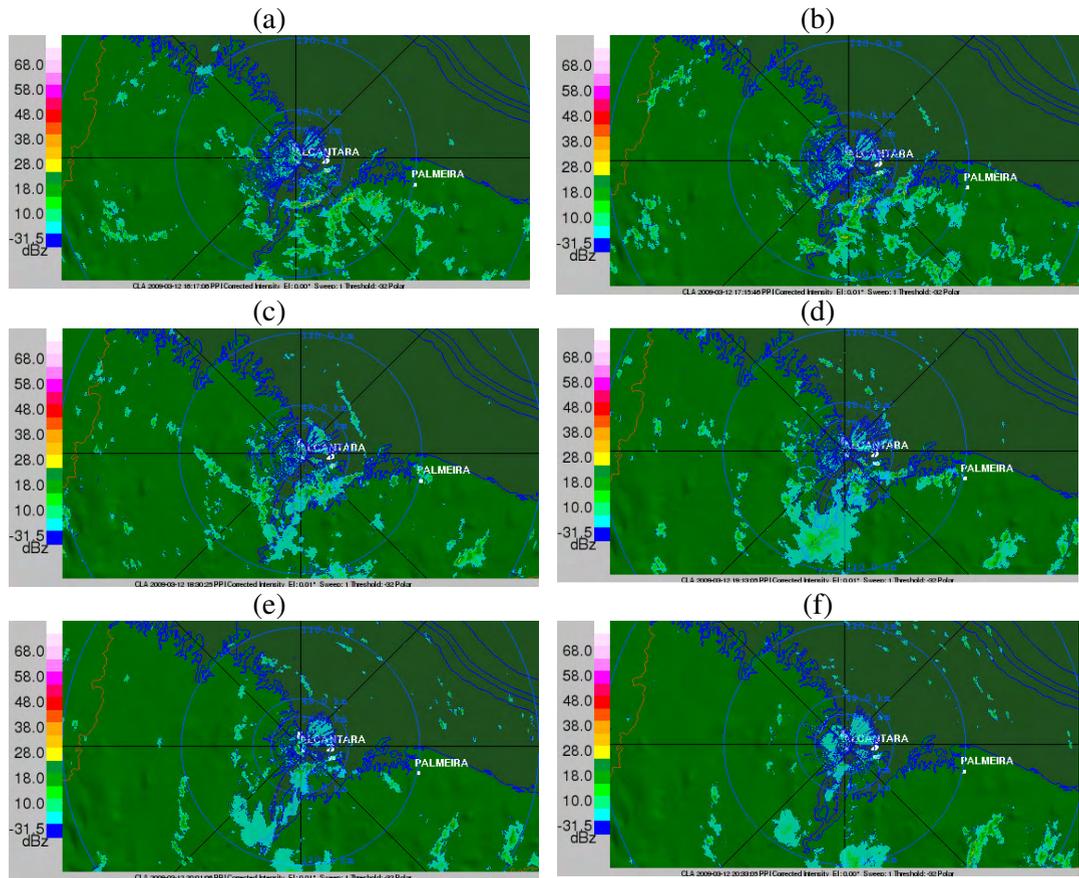


Figura 4.21 - Imagens de refletividade das nuvens geradas pelo radar localizado no CLA para o dia 12/03/09. Os campos referem-se aos seguintes horários (UTC), nesta ordem: (a) 1615 e (b) 1715, (c) 1830, (d) 1915, (e) 1945 e (f) 2033. O maior círculo concêntrico representa uma distância de 120 km.

4.1.4 Eventos ocorridos em 26/03/09

A série horária de precipitação registrada e estimada mostra a ocorrência de eventos distintos no decorrer do dia 26/03/09 (Figura 4.22): um durante a madrugada e manhã, que abrange os horários de precipitação entre 02 e 13 UTC; outro que cobre a precipitação ocorrida a partir das 17 UTC. Como mostrado adiante, o primeiro evento está associado à intensificação de sistema convectivo por convecção noturna; o segundo, por convecção diurna. O total de precipitação diária registrada pela estação do CLA foi de 32,9 mm; pela de SLZ 2,0 mm. Os valores estimados foram de 63,5 mm para o Hidroestimador e de 5,8 mm para o satélite TRMM. Apesar da diferença de magnitude entre os valores registrados e estimados, é possível notar a ocorrência de eventos distintos de convecção noturna e diurna considerando-se os dados conjuntamente.

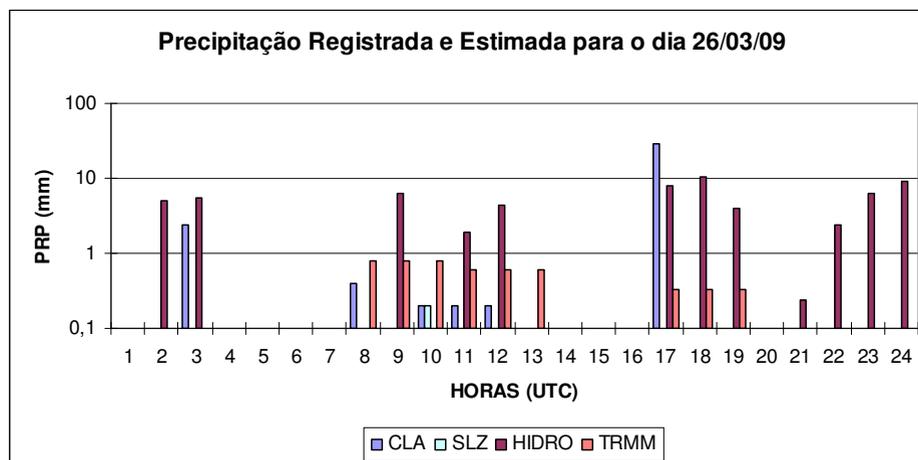


Figura 4.22 - Precipitação horária registrada pelas estações de Alcântara (CLA) de São Luís (SLZ) e estimada pelo modelo Hidroestimador (HIDRO) e pelo satélite TRMM (TRMM) para o dia 26/03/09. Unidade de precipitação: mm/h.

A ocorrência de convecção é notada em boa parte do território brasileiro nas imagens de satélite para o dia 26/03/09 (Figura 4.24). A nebulosidade que se estende pelas Regiões Norte, Centro-Oeste e parte das regiões Nordeste e Sudeste do Brasil, seguindo pelo Atlântico, associa-se à atuação da Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS), sistema que se formou a partir do dia 22 e persistiu até o início do mês seguinte nestas regiões (Climanálise Vol. 24, nº 3). As áreas com baixo valor de umidade específica em 925 hPa (Figuras 4.23c-d) referem-se à mesma região de ausência de nuvens sobre o noroeste da Bahia e sul do PiauÍ que se verifica nas imagens de satélite das Figuras

4.24a-b. A ITCZ esteve presente próxima a costa norte do NEB, contribuindo para a atividade convectiva na região (Figura 4.23b). O escoamento difluente que se configurou entre a Alta da Bolívia e o cavado a leste (Figura 4.23a) favoreceu a formação de áreas de instabilidade, principalmente sobre as Regiões Norte e Nordeste do Brasil, conforme ilustra a imagem de satélite das 18 UTC do dia 26 (Figura 4.24a).

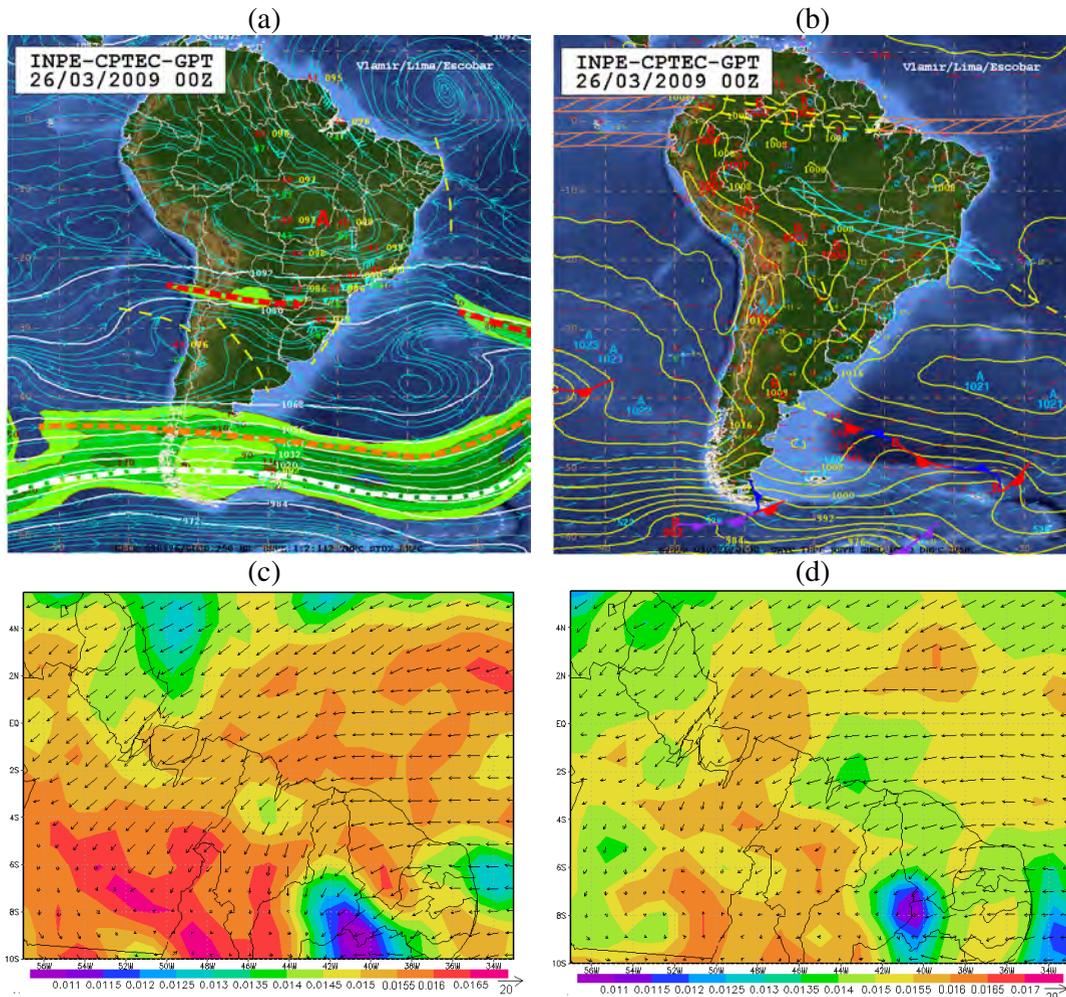


Figura 4.23 - Análise ao nível de 250 hPa (a) e à superfície (b) para às 00Z do dia 26/03/09. Fonte: INPE/CPTEC/GPT. Campos de direção do vento horizontal (VNT, m/s) e umidade específica (Q, em g/kg) em 925 hPa, para as 00UTC do dia 26/03/09 (c) e 00UTC do dia 27/03/09 (d), gerados a partir de dados de análise.

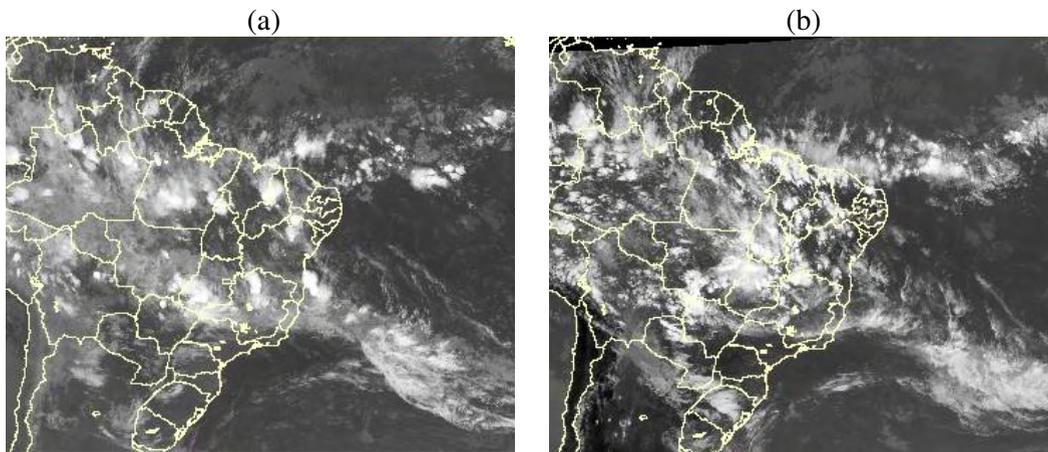


Figura 4.24 - Recorte de imagens do satélite GOES-10 + METEOSAT-09 para as 06UTC (a) e 18UTC do dia 26/03/09. Fonte: INPE/CPTEC/DSA.

4.1.4.1 Evento de convecção noturna

Às 00 UTC do dia 26 (Figura 4.25a) ocorrem formações convectivas oriundas de “restos” de convecção diurna espalhadas pelas regiões Norte e Nordeste do Brasil (inclusive na região que envolve o CLA). Índices de instabilidade gerados a partir da radiossondagem das 00 UTC do dia 26 indicam condições favoráveis à ocorrência de convecção profunda: índice K maior que 30, Total-totals (Tt) acima de 40 e CAPE maior de 1800. Os campos de divergência do vento horizontal e ômega em 925 hPa (Figuras 4.26a-b) apontam, em geral, áreas comuns com correntes ascendentes (valores negativos de ômega) e convergência (valores negativos de divergência). Essas áreas coincidem, na sua maioria, com aquelas onde se encontram os núcleos convectivos. A imagem de satélite das 12 UTC (Figura 4.25b) permite notar que essas formações enfraquecem.

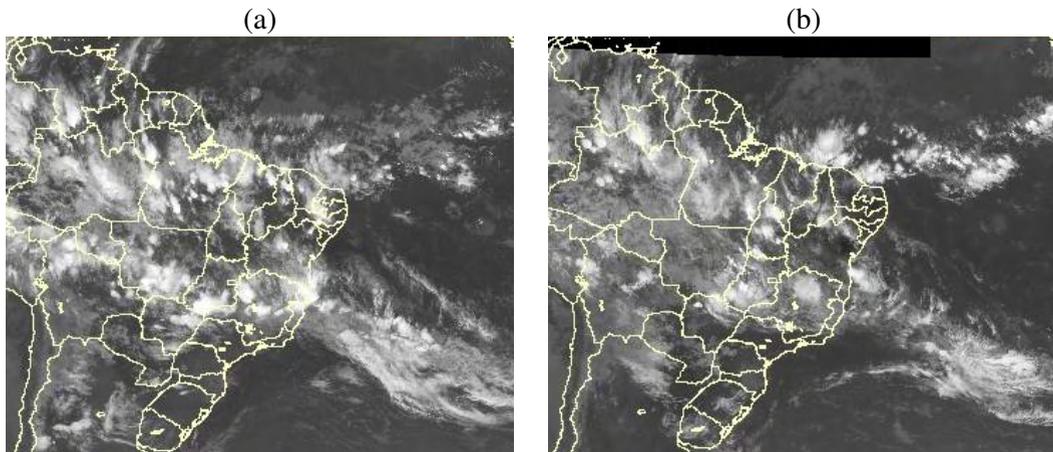


Figura 4.25 - Recorte de imagens do satélite GOES-10 + METEOSAT-09 para as 00UTC (a) e 12UTC do dia 26/03/09. Fonte: INPE/CPTEC/DSA.

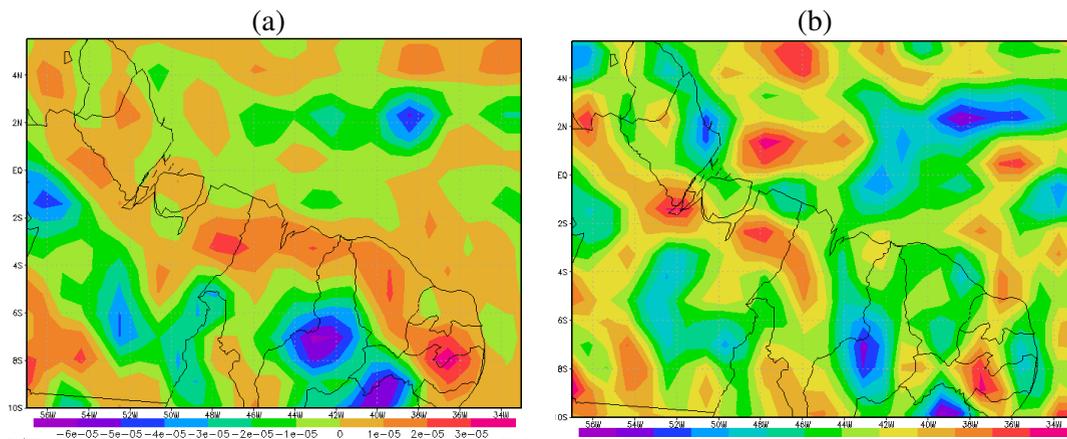


Figura 4.26 - (a) Campo de divergência do vento horizontal (1/s) e (b) ômega (Pa/s) em 925hPa, para as 00UTC do dia 26/03/09, gerados a partir de dados de análise.

As imagens de TB para o dia 26/03/09 (Figura 4.27) mostram a passagem de formações convectivas pouco intensas entre as 09 e 11 UTC sobre a região do CLA e que deram origem a precipitação registrada pela estação de Alcântara. Essas formações tiveram origem sobre o oceano, se deslocaram no sentido leste/oeste e atingiram seu máximo desenvolvimento por volta das 08 UTC antes de atingir o CLA (não mostrado).

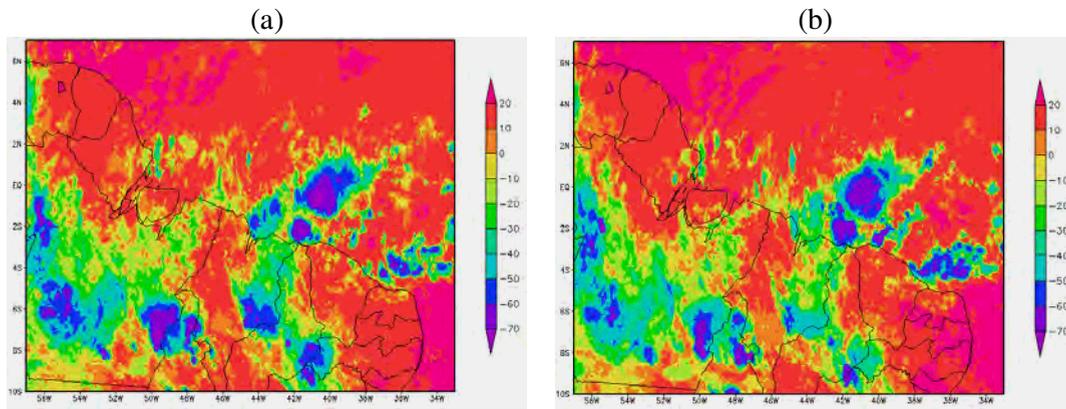


Figura 4.27 - Imagens de temperatura de brilho das nuvens (TB, °C) para o dia 12/03/09. Os campos referem-se aos seguintes horários: (a) 09UTC e (b) 1015UTC. Fonte: INPE/CPTEC/DSA.

Entre 08 e 11 UTC nota-se, nas imagens de radar (Figura 4.28), o deslocamento de um sistema vindo de leste/sudeste e que passa pelo CLA por volta das 10 UTC.

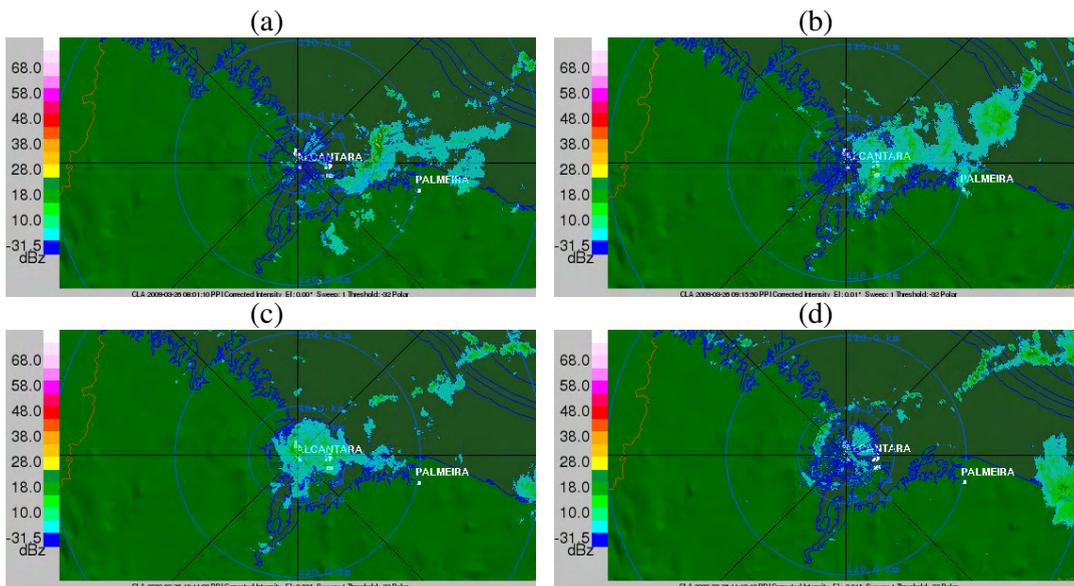


Figura 4.28 - Imagens de refletividade das nuvens geradas pelo radar localizado no CLA para o dia 26/03/09. Os campos referem-se aos seguintes horários (UTC), nesta ordem: (a) 0801 e (b) 0915, (c) 1015 e (d) 1113. O maior círculo concêntrico representa uma distância de 120 km.

4.1.4.2 Evento de convecção diurna

As imagens de TB (Figura 4.29) mostram que, durante à tarde, novas formações surgem sobre o norte do NEB, desde o norte do Rio Grande do Norte até a costa do Pará, com

início a partir das 15 UTC. Esses sistemas, ao se intensificarem, se organizaram em uma LI costeira que se propaga continente adentro. A LI atua sobre a região até por volta das 20 UTC, quando então se enfraquece. As LIs são induzidas pela brisa marítima e pelos ventos alísios de sudeste (Kousky, 1980) ou ainda acompanham a evolução da ITCZ (Cavalcanti, 1982).

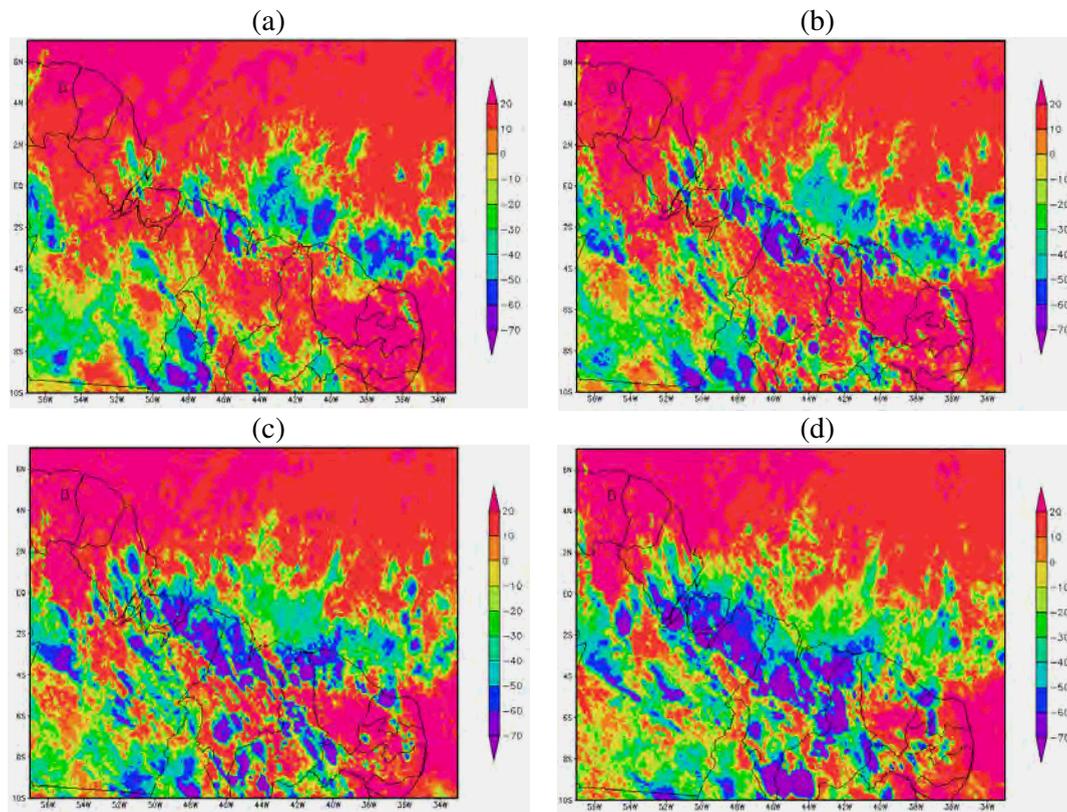


Figura 4.29 - Imagens de temperatura de brilho das nuvens (TB, °C) para o dia 26/03/09. Os campos referem-se aos seguintes horários: (a) 15UTC, (b) 1630UTC, (c) 1815UTC e (d) 20UTC. Fonte: INPE/CPTEC/DSA.

Maiores detalhes são visualizados por meio das imagens de radar da Figura 4.30. A partir das 1315 UTC observam-se formações mais numerosas. Entre 16 e 18 UTC nota-se a passagem de um sistema mais organizado a noroeste do CLA, o qual ocasionou precipitação que foi registrada pela estação meteorológica local. Com o início da noite, há um enfraquecimento desses sistemas oriundos de convecção diurna.

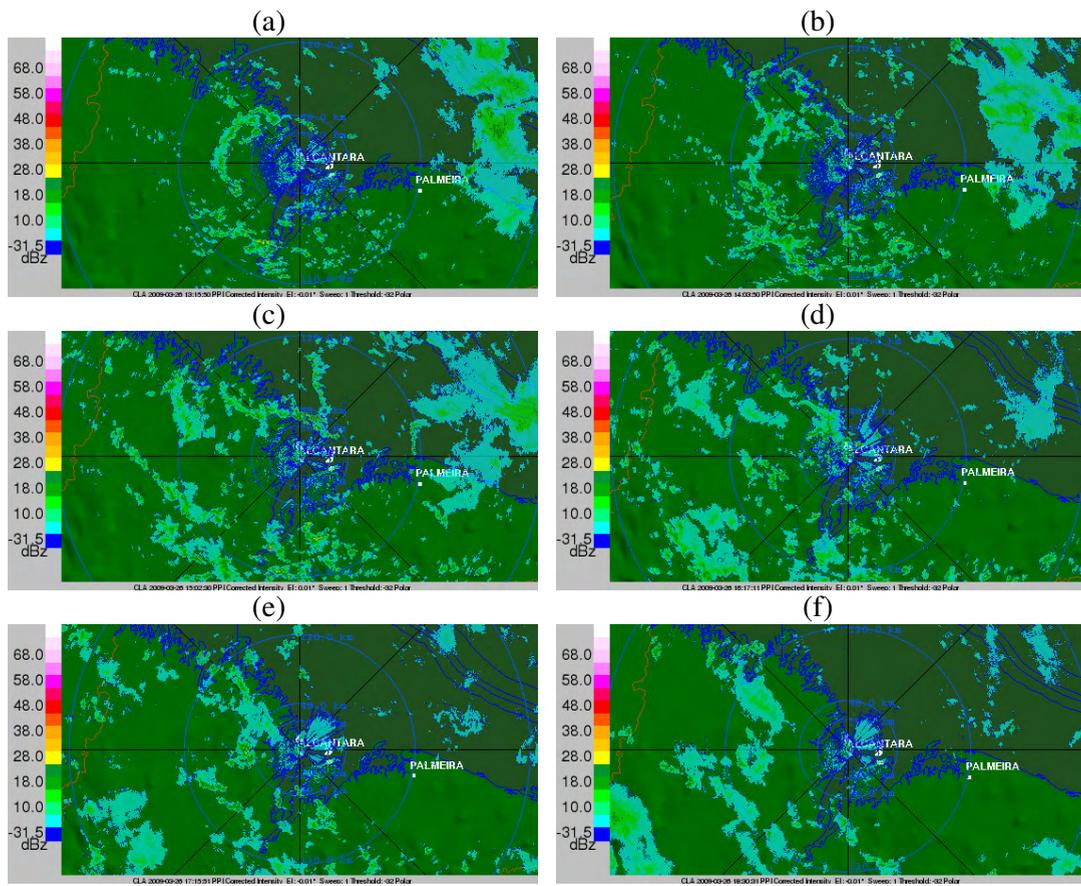


Figura 4.30 - Imagens de refletividade das nuvens geradas pelo radar localizado no CLA para o dia 26/03/09. Os campos referem-se aos seguintes horários (UTC), nesta ordem: (a) 1315 e (b) 1403, (c) 1502, (d) 1617, (e) 1715 e (f) 1830. O maior círculo concêntrico representa uma distância de 120 km.

4.2 Síntese descritiva dos casos de precipitação sobre a região do CLA

Uma síntese das condições meteorológicas observadas durante a ocorrência dos casos de precipitação que ocorreram na região do CLA encontra-se na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 - Resumo das condições meteorológicas observadas relativas aos casos de precipitação sobre a região do CLA selecionados para as simulações.

<i>Caso (Dia)</i>	<i>Horário (UTC) do(s) evento(s) e tipo de convecção</i>	<i>Estação do ano</i>	<i>Condição sinótica relevante</i>	<i>Mecanismo causador da convecção</i>
18/07/08	02/12 (noturna) e a partir das 15 (diurna)	Transição	Fraca atividade da ITCZ	Transporte de umidade em baixos níveis e atuação da brisa terrestre; aquecimento da superfície
30/07/08	15/19 (diurna)	Transição	EMAQS	Aquecimento da superfície, brisa marítima e umidade transportada pelo escoamento em baixos níveis
12/03/09	01/14 (noturna) e 15/23 (diurna)	Chuvosa	ITCZ mais ao sul, cavado estendido sobre o MA e MG e LIs	Convecção noturna surge da nebulosidade restante de uma LI formada no dia anterior. Aquecimento da superfície e divergência em altos níveis favorecem a convecção diurna
26/03/09	02/13(noturna) e a partir das 17 (diurna)	Chuvosa	Atuação de ZCAS (grande parte do Brasil), ITCZ e Alta da Bolívia	Áreas comuns de correntes ascendentes e convergência em baixos níveis (noturna). LIs que se propagam continente adentro (diurna).

A evolução temporal e a morfologia da convecção sobre a região do CLA pode variar bastante, com regimes que vão desde sistemas convectivos mais organizados como linhas de instabilidade até células convectivas isoladas. Os regimes variam sazonalmente (Barros, 2008). Conforme se observa na Tabela 4.1, o transporte de umidade realizado em baixos níveis, especialmente pela atuação da brisa (marítima e terrestre) é importante para a ocorrência da convecção sobre a região do CLA. Destacam-se também as linhas de instabilidade, que se formam sobre a costa e se propagam continente adentro. Outro mecanismo bastante importante na geração de precipitação nesta região é a presença de áreas de convergência de massa em baixos níveis (evento do dia 26/03/09), favorecendo tanto a formação de convecção diurna quanto noturna. Para os modelos de mesoescala, representar todos os aspectos

mencionados é fundamental para que se obtenha uma adequada simulação da evolução temporal e morfologia das áreas de precipitação.

5 DESENHO DAS SIMULAÇÕES

O modelo MM5 foi executado em 2 plataformas com configurações e finalidades distintas: uma versão está instalada na ACA/IAE (para fins de pesquisa e desenvolvimento científicos); a outra se encontra no ICEA, sendo usada de forma operacional. Instituição associada ao conceito de defesa e segurança do espaço aéreo brasileiro, o ICEA emprega o modelo MM5 tanto para fins operacionais quanto para pesquisa e desenvolvimento científico. Atualmente, conduz um projeto em parceria com o CNMA (Centro Nacional de Meteorologia Aeronáutica, sediado em Brasília), ambos subordinados ao DECEA (Departamento de Controle do Espaço Aéreo, Comando da Aeronáutica), cujo objetivo é de pesquisa e desenvolvimento da modelagem numérica para fins aeronáuticos. Maiores informações encontram-se no sítio www.icea.gov.br/climatologia/produtos. O CNMA, órgão que se destina à prestação de serviço na área de meteorologia (previsão e informações meteorológicas) para a aviação em geral, planeja, em breve, utilizar uma versão do MM5 em suas instalações. Assim, acredita-se ser importante testar e avaliar se os resultados encontrados com as simulações do modelo instalado na ACA/IAE resultarão em algum benefício para previsões de precipitação com o modelo instalado em ambientes operacionais (p. ex., ICEA) com diferentes configurações. A seguir descreve-se o desenho experimental empregado nas simulações.

5.1 Simulações com o modelo instalado na ACA/IAE

Com base na metodologia de grades aninhadas utilizada por outros autores (p.ex. Serafin e Ferretti, 2007) neste trabalho as simulações empregaram 3 domínios aninhados de resoluções horizontais 27 (G1), 9 (G2) e 3 (G3) km, centradas aproximadamente sobre o CLA, na latitude de 02,5°S e longitude 44.5°W, conforme Figura 5.1.

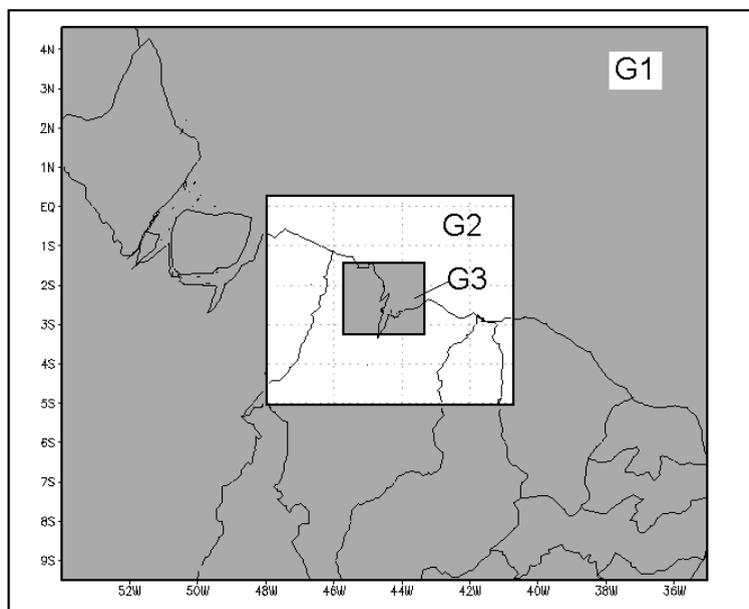


Figura 5.1 - Domínio das grades de resolução horizontal 27 km (G1), 09 km (G2) e 3 km (G3).

O número de pontos nas direções zonal e meridional e o domínio para cada grade estão descrito na Tabela 5.1. Foram utilizados 38 níveis sigma na vertical (com pressão de topo 50 hPa), mesmo número usado por Colle e Mass (2000) e que obteve bons resultados. Ainda sobre o número de níveis verticais, testes de sensibilidade de simulações de precipitação à resolução vertical foram realizados e os resultados encontram-se no Apêndice A deste trabalho.

Tabela 5.1 - Número de pontos de grade para os domínios 1, 2 e 3 empregados nas simulações realizadas na ACA/IAE.

Espaçamento de grade (km)	Nº pontos zonal	Nº pontos meridional	Extensão do domínio (Km)
27	80	60	2160X1620
9	91	67	819X603
3	91	67	273X201

Conforme descrito na seção 2, as simulações foram inicializadas com dados de análise cuja resolução espacial é de 1°. O uso de condições iniciais e de contorno com resolução espacial mais baixa pode ser visto como uma limitação deste trabalho. Chan et al. (2003), ao simular um evento extremo de precipitação sobre Caracas, Venezuela, constataram que o aumento de resolução das condições iniciais e de contorno foi necessária para que se alcançasse uma previsão de precipitação mais próxima aos valores aproximados. Forçantes laterais de maior resolução proporcionaram o aumento

do suprimento de umidade, o que acarretou condições mais favoráveis para a convecção profunda.

Os dados de TSM obtidos junto a NOAA possuem resolução horizontal (temporal) de 1° (7 dias). Adotaram-se as seguintes parametrizações físicas do modelo: RRTM (Mlawer et al, 1997) para radiação; MRF-PBL (Hong e Pan, 1998) para camada limite planetária; Kain-Fritsch2 [KF2, Kain e Fritsch (2004)] para convecção profunda e NOAH-LSM (Chen e Dudhia, 2001) para processos de superfície. Este último é capaz de prever a temperatura e umidade do solo em quatro camadas. O NOAH-LSM calcula os balanços radiativo, de energia e de água sobre superfícies continentais e contém também processos para melhor tratar a cobertura de neve e os efeitos do solo congelado. Apesar da conhecida influência dos processos de superfície na formação de precipitação (Cândido, 2002) para o CLA, considera-se que a fonte de umidade para a formação de nuvens e chuva se deve mais ao transporte de umidade do oceano efetuado pelos alísios do que à evapotranspiração ou aos processos de superfície. Assim, a temperatura e a umidade do solo foram inicializadas de forma simples com valores provenientes da Reanálise do NCEP/NCAR (referentes à data e o horário da condição inicial). As Figuras 5.2, 5.3 e 5.4 mostram os campos de topografia, umidade do solo entre 10 e 40 cm para à 00 UTC do dia 26/03/2009, fração de área vegetada e uso da terra para os três domínios, já interpolados para as grades dos domínios.

No caso dos processos de microfísica, os seguintes esquemas foram testados: Warm Rain, Simple Ice, Reisner e Schultz (estes últimos por serem considerados mais sofisticados que os dois primeiros).

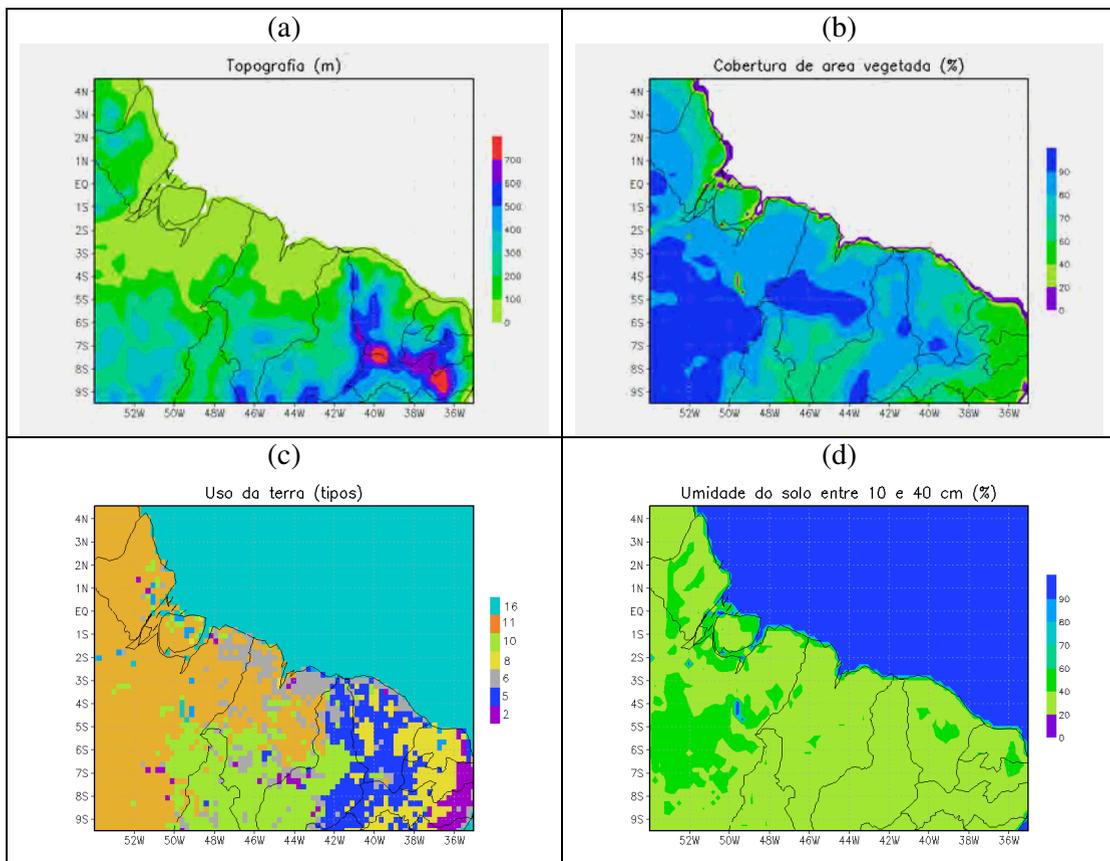


Figura 5.2 - Campos de topografia (a), fração de área vegetada (b), uso da terra (c) e umidade do solo entre 10 e 40 cm para à 00 UTC do dia 26/03/2009 (d) para o domínio 1. As categorias de vegetação estão especificadas na Tabela 5.2.

Tabela 5.2 - Descrição das categorias de vegetação.

Número	Tipo de vegetação
2	Pastagem e agropecuária
5	Mosaico de agropecuária e gramíneas
6	Mosaico de floresta e agropecuária
8	Caatinga
10	Savana (cerrado)
11	Floresta tropical decídua e semi-decídua
16	Água

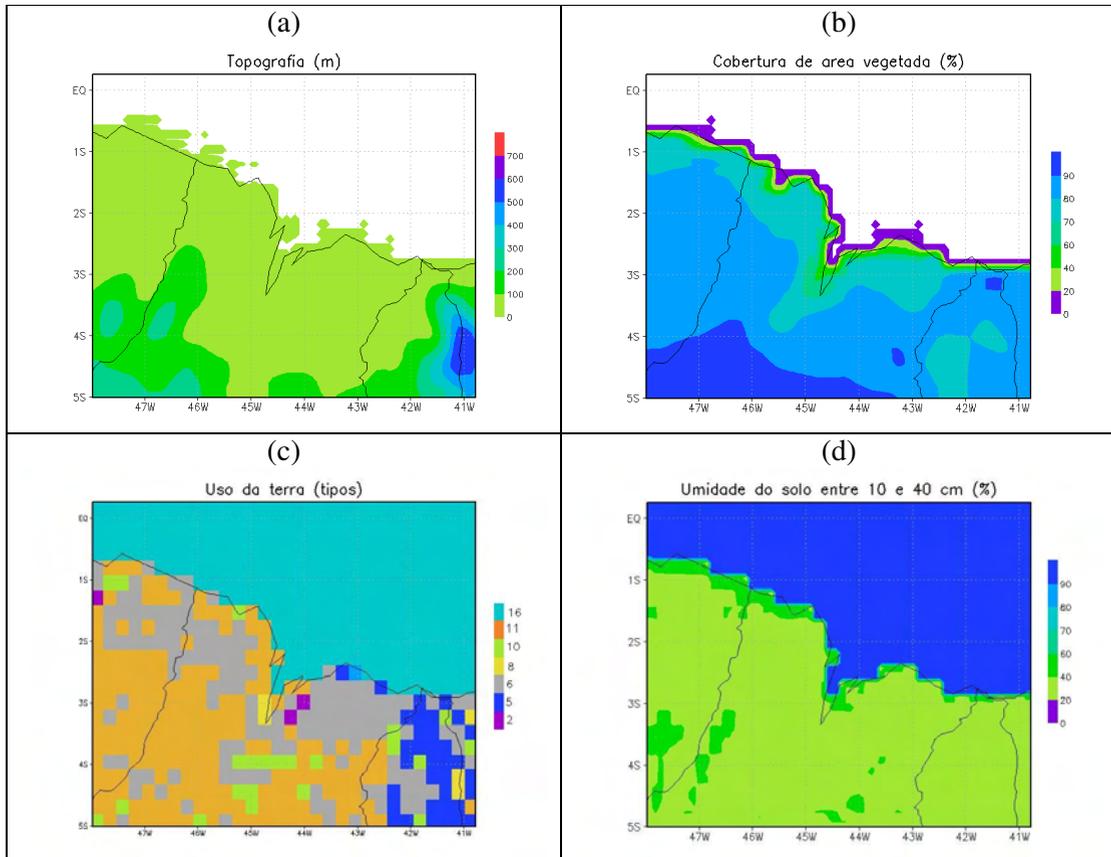


Figura 5.3 - Campos de topografia (a), fração de área vegetada (b), uso da terra (c) e umidade do solo entre 10 e 40 cm para à 00 UTC do dia 26/03/2009 (d) para o domínio 2. As categorias de vegetação estão especificadas na Tabela 5.2.

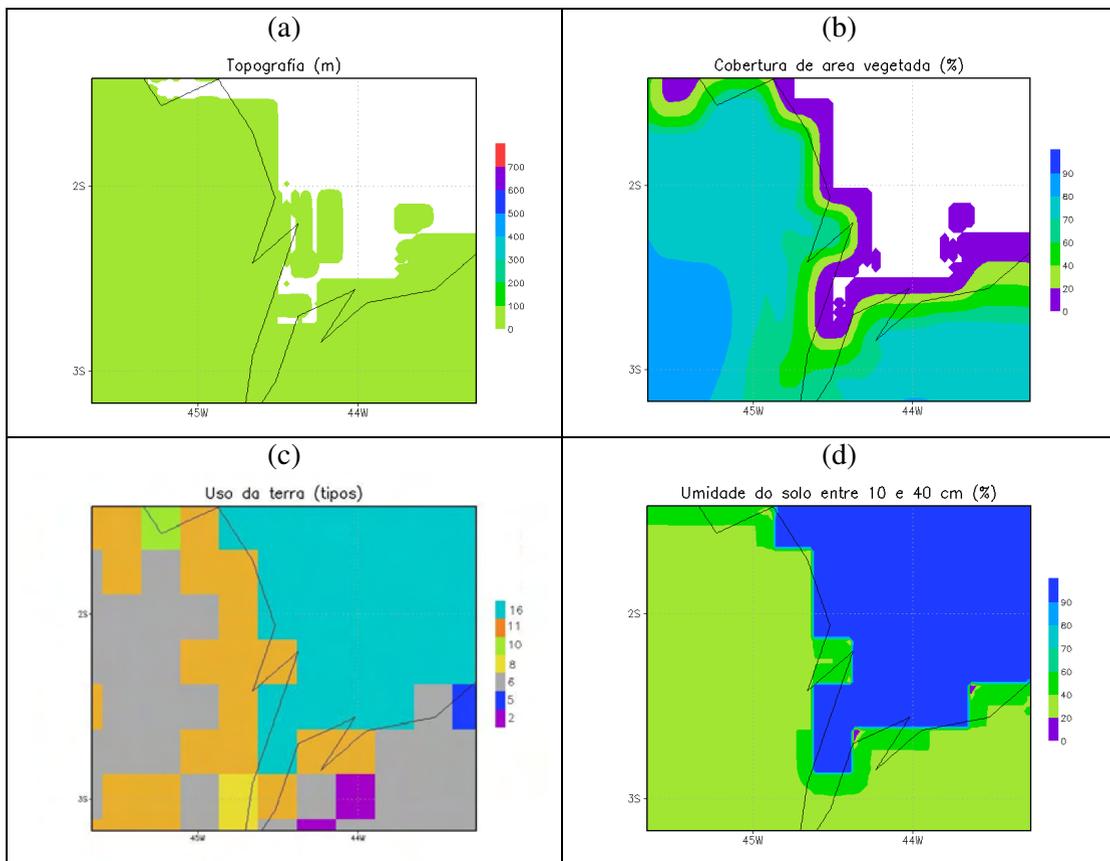


Figura 5.4 - Campos de topografia (a), fração de área vegetada (b), uso da terra (c) e umidade do solo entre 10 e 40 cm para à 00 UTC do dia 26/03/2009 (d) para o domínio 3. As categorias de vegetação estão especificadas na Tabela 5.2.

Com passo de tempo de 60 s, o tempo total de integração para cada simulação foi de 36 h, com saídas a cada 60 min, sendo que as 12 primeiras horas foram descartadas como *spin-up* (tempo necessário para ajuste dos campos atmosféricos); assim, somente se consideraram as últimas 24 h de cada integração para fins de análise. Baseado nos trabalhos de Warner e Hsu (2000) e Grubisic (2005) realizaram-se, para cada evento de precipitação selecionado, as seguintes simulações do modelo, conforme Tabela 5.3.

Visando a definição do esquema que apresentasse melhores resultados nas simulações de precipitação na região do CLA, foram realizadas 4 simulações para cada um dos quatro casos selecionados (simulações 1, 2, 3 e 4). Cada rodada empregou um esquema explícito diferente: Warm Rain (WR), Simple Ice (SI), Reisner (RE) e Schultz (SC). Usou-se aproximação híbrida [uso conjunto de esquemas implícitos (neste caso, KF2) e explícitos] nos 3 domínios. Essas simulações foram chamadas de Grupo 1 (G1).

Definido o esquema explícito mais eficiente (ES), realizaram-se novas simulações (simulações 5 e 6, denominadas Grupo 2, G2) alternando o uso do esquema implícito nos domínios 2 e 3. Foram comparados os aspectos da precipitação entre as simulações dos Grupos 1 e 2 para o mesmo esquema explícito, visando definir a melhor combinação do uso de esquemas implícitos e explícitos nos domínios de 9 e 3 km de resolução horizontal.

Tabela 5.3 - Configuração das simulações realizadas com o modelo instalado na ACA/IAE quanto ao uso de esquemas implícitos e explícitos de convecção.

Espaçamento de grade (km)	Simulações					
	Grupo 1				Grupo 2	
	1	2	3	4	5	6
27	KF2/WR	KF2/SI	KF2/RE	KF2/SC	KF2/ES	KF2/ES
9	KF2/WR	KF2/SI	KF2/RE	KF2/SC	KF2/ES	ES
3	KF2/WR	KF2/SI	KF2/RE	KF2/SC	ES	ES

5.2 Simulações com o modelo instalado no ICEA

O modelo instalado no ICEA, atualmente, faz previsões operacionais duas vezes ao dia (para os horários da 00 e 12 UTC), com saídas a cada 3 horas, para 3 diferentes regiões do território brasileiro: Norte, Nordeste e Sul/Sudeste, utilizando, cada uma delas, grades aninhadas de resolução horizontal 36 e 12 km. Estas grades ou domínios usam o método “two way” de aninhamento (os resultados das integrações são transmitidos entre os domínios, nos dois sentidos, a cada passo de tempo). Futuramente, pretende-se empregar um novo domínio, centrado aproximadamente sobre o CLA, com grades de resolução horizontal 18 e 6 km.

Por padrão, as rodadas do modelo realizadas no ICEA utilizam esquemas implícitos e explícitos de convecção (esquemas Grell e Simple Ice, respectivamente) para todos os domínios. Conforme verificado nas simulações realizadas com o modelo instalado na ACA/IAE, o uso de somente esquema de microfísica para o domínio de espaçamento de grade 9 km produz variados resultados nas simulações de precipitação para a região do CLA, quando comparados aos resultados obtidos com as simulações que empregaram aproximação híbrida. Diante disso, foram realizadas simulações com o objetivo de testar o uso de somente esquemas explícitos de convecção para o domínio de espaçamento de grade 12 km utilizado nas previsões realizadas pelo ICEA. Esta resolução (12 km)

encontra-se dentro da faixa de espaçamento de grade na qual ainda não se tem claramente estabelecida a necessidade ou não do uso de esquemas de convecção profunda (Molinari e Dudek, 1992).

Para que se alcançasse o objetivo proposto, o modelo foi executado para os domínios que cobrem a região Nordeste (em função do tempo gasto com as simulações, as demais regiões não foram utilizadas). A Figura 5.5 ilustra a extensão dos domínios para esta região. A seguir descrevem-se as características das simulações. O número de pontos nas direções zonal e meridional para os diferentes domínios está indicado na Tabela 5.4. A resolução vertical compreende 23 níveis sigma, com pressão de topo 100 hPa. Os dados de TSM obtidos junto a NOAA possuem resolução horizontal (temporal) de 1° (7 dias). A temperatura e a umidade do solo são inicializadas com valores climáticos de Reanálise do NCEP. As parametrizações físicas do modelo são as seguintes: *cloud radiation scheme* para radiação; MRF-PBL (Hong e Pan, 1996) para camada limite planetária; *multi layer* para processos de superfície; Grell (Grell, 1995) para convecção implícita e Simple Ice (Dudhia, 1989) para microfísica de nuvens. Estas parametrizações são empregadas nos 2 domínios e foram adotadas nas simulações de controle (chamadas ICEA1).

Tabela 5.4 - Número de pontos de grade dos domínios empregados pelo modelo MM5 instalado no ICEA.

Região	Resolução (km)	Nº Pontos Zonal e Meridional
Norte	36	120x120
	12	103x103
Nordeste	36	90x95
	12	70x70
Sul/Sudeste	36	90x90
	12	67x70

Com passo de tempo de 90 s, foram feitas rodadas de 36 h de integração (descartando-se as doze horas iniciais), para todos os dias do mês de março de 2009 (escolhido em função da disponibilidade dos dados de análise e de precipitação, além da freqüente ocorrência de precipitação sobre a região Nordeste). As simulações foram inicializadas a partir das 12 UTC do dia anterior ao do dia considerado, utilizando-se para isso, dados de análise com resolução horizontal de 0.5° (formato GRIB2), disponibilizados pelo NOAA/NCEP. Tais dados se encontravam disponíveis no ICEA. Realizaram-se duas

rodadas para cada dia, chamadas ICEA1 (simulações de controle) e ICEA2. Ambas utilizaram esquemas de convecção implícita (Grell) e explícita (Simple Ice) para o Domínio 1 (D1, 36 km de resolução horizontal). No entanto, para o Domínio 2 (D2, 12 km de resolução horizontal), enquanto ICEA1 usou a mesma combinação (híbrida) de esquemas utilizada em D1, ICEA2 utilizou somente esquema explícito (Simple Ice) neste espaçamento de grade. Esta é a única diferença entre as simulações.

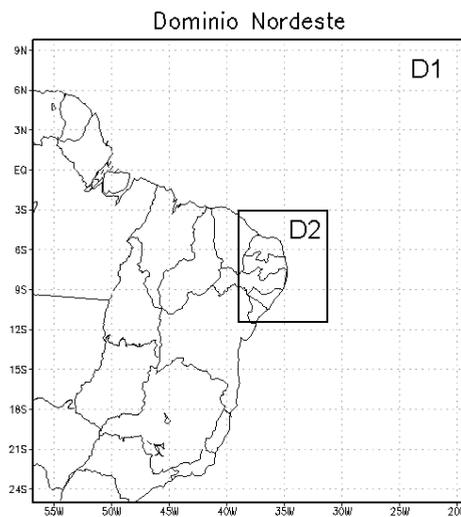


Figura 5.5 - Domínio das grades de resolução horizontal 36 km (D1) e 12 km (D2) para a região Nordeste utilizado pelo ICEA.

6 RESULTADOS

A seguir, descreve-se a análise dos resultados obtidos a partir das simulações realizadas com o modelo MM5 instalado na ACA/IAE e ICEA.

6.1 Simulações realizadas com o modelo instalado na ACA/IAE

6.1.1 Análise das simulações do Grupo 1

A seguir, faz-se uma análise dos aspectos das simulações do Grupo 1 referentes aos 4 casos de precipitação ocorridos na região do CLA. Para se analisar a magnitude da precipitação, os valores obtidos pelas simulações foram comparados com os valores de precipitação registrados pelas estações do CLA e São Luís (SLZ), além dos valores médios de precipitação estimados pelo método Hidroestimador (HIDRO) e pelo Satélite TRMM (TRMM) para a mesma área usada na análise observacional dos casos. O posicionamento e evolução dos sistemas precipitantes simulados nos 3 domínios foram comparados com os campos de TB, campos de precipitação estimada pelo HIDRO e TRMM e imagens de refletividade das nuvens obtidas por radar (especificamente para o domínio 3). É importante ressaltar que os campos gerados possuem diferente resolução espacial e temporal, portanto a comparação dos resultados obtidos com as simulações e as observações foi feita de forma subjetiva.

6.1.1.1 Eventos de precipitação ocorridos no dia 18/07/08

Durante o dia 18/07/08 houve a ocorrência de eventos distintos de convecção/precipitação noturna (entre 2 e 12 UTC) e diurna (a partir das 15 UTC) na região que abrange o CLA. O total de precipitação diária registrada (estimada) foi de 63,2 mm para o CLA e de 2,8 mm em SLZ (48,1 mm para o HIDRO e 49,4 mm para o TRMM). Para este caso, somente o esquema WR não conseguiu simular precipitação referente à convecção noturna (Figura 6.1a). Além disso, pode-se observar que houve similaridade (mas não coincidência) tanto da quantidade diária de precipitação simulada quanto da evolução da mesma para os três domínios, para todos os esquemas de microfísica. Os esquemas SI e RE apontaram um comportamento muito semelhante no que se refere à evolução temporal dos eventos de precipitação.

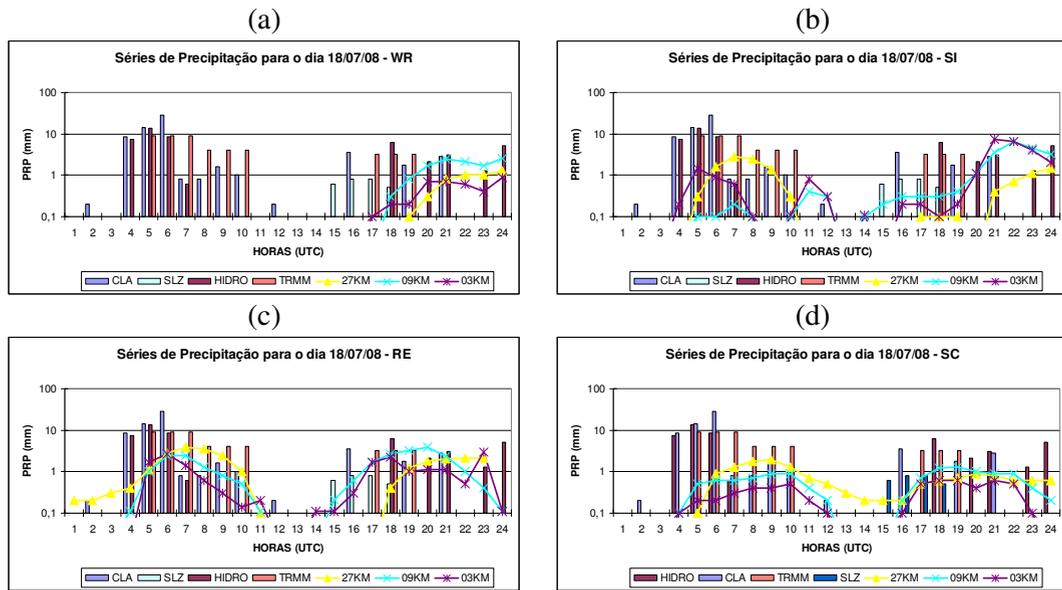


Figura 6.1 - Comparação entre os valores horários (UTC) de precipitação para o dia 18/07/08. As barras referem-se aos valores de precipitação registrada no CLA e em SLZ e de precipitação média estimada pelo Hidroestimador (HIDRO) e pelo satélite TRMM (TRMM). As linhas referem-se aos valores médios simulados nos domínios de 27, 9 e 3 km de resolução. Os gráficos “a”, “b”, “c” e “d” referem-se, aos esquemas Warm Rain, Simple Ice, Reisner e Schultz (SC), nesta ordem. Precipitação (mm/h) em escala logarítmica.

Os 4 esquemas testados subestimaram a quantidade de precipitação diária, sendo que os esquemas SI e RE foram os que mais se aproximaram dos valores observados (Tabela 6.1). Quanto à divisão da precipitação simulada em parte convectiva (PC, relacionada aos esquemas implícitos) e não-convectiva (PNC, associada aos esquemas explícitos), somente os esquemas RE e SI geraram PNC na região mais próxima do CLA nos domínios 2 e 3 (não mostrado), tendo este último (SI) apresentado melhores resultados. As simulações também mostraram que a participação da PC diminui com o aumento da resolução das grades. Isso é coerente com a idéia de que, em resoluções mais altas, esquemas explícitos são suficientes para simular adequadamente a precipitação (Molinari e Dudek, 1992; Weisman et al., 1997).

Tabela 6.1- Precipitação Convectiva (PC), Não-Convectiva (PNC) e Total (TT) simulada obtida para o dia 18/07/08 para a região do CLA com o uso dos esquemas Warm Rain (WR), Simple Ice (SI), Reisner (RE) e Schultz (SC). Unidade de precipitação: mm/dia.

Precipitação Convectiva, Não Convectiva e Total Simulada (mm/dia)												
Esquemas	WR			SI			RE			SC		
Resolução	PC	PNC	TT	PC	PNC	TT	PC	PNC	TT	PC	PNC	TT
27 km	4.5	0	4.5	12.6	0	12.6	27.8	0	27.8	14.8	0	14.8
09 km	11.7	0	11.7	16.6	5.1	21.7	23.8	0.9	24.7	11.5	0	11.5
03 km	3.9	0	3.9	11.9	14.7	26.6	8.5	6.7	15.2	5.9	0	5.9

Os campos de precipitação simulada, estimada e de TB referentes ao horário das 06 UTC foram usados para análise da distribuição espacial e intensidade das áreas de chuva (Figura 6.2). Além de todos os dados para comparação da precipitação simulada com a observada estarem disponíveis, neste horário houve o maior registro de precipitação (oriunda de convecção noturna) na estação do CLA (28,4 mm). Quanto ao posicionamento das regiões de precipitação, houve relativa coerência e uniformidade entre os 3 domínios para todas as simulações (Figura 6.2). Se considerarmos as formações convectivas no campo de TB (baixos valores de TB, Figura 6.2) como áreas prováveis de precipitação, nos domínios 1 e 2, para os 4 esquemas, 2 regiões de precipitação foram geradas erroneamente: uma sobre o interior do Maranhão (ao sul do CLA) e outra a leste do CLA.

Para a grade de 3 km de resolução todos os esquemas (exceto WR) simularam corretamente chuva na região do CLA, porém não localizaram a região de precipitação mais próxima de SLZ (à leste do CLA). Destacam-se as simulações realizadas com os esquemas SI e RE, que representaram melhor o padrão de precipitação neste domínio, onde se pode notar que a “linha” de precipitação na região ao norte entre CLA e SLZ nos domínios 1 e 2 (e que não aparece nas observações) não é simulada no domínio 3. Assim, pode-se dizer que, neste caso, o uso de grades de maior resolução espacial melhorou a representação da precipitação, isto é, eliminou os erros simulados nas grades de maior espaçamento. Nota-se ainda nas Figuras 6.2i e 6.2m (referentes aos esquemas SI e RE respectivamente), a presença de núcleos com valores de precipitação acima de 15 mm que estão coerentes com o campo observado (Figura 6.2c). Tais núcleos estão relacionados à parte não convectiva da precipitação (não mostrado).

Em geral, pode-se dizer que, neste caso, os esquemas SI e RE apresentaram melhores resultados na representatividade da precipitação. Especificamente para o domínio de 3 km de resolução, destacam-se o maior detalhamento das áreas de precipitação e principalmente, a filtragem de alguns erros (com relação ao domínio 2) conseguida neste espaçamento de grade.

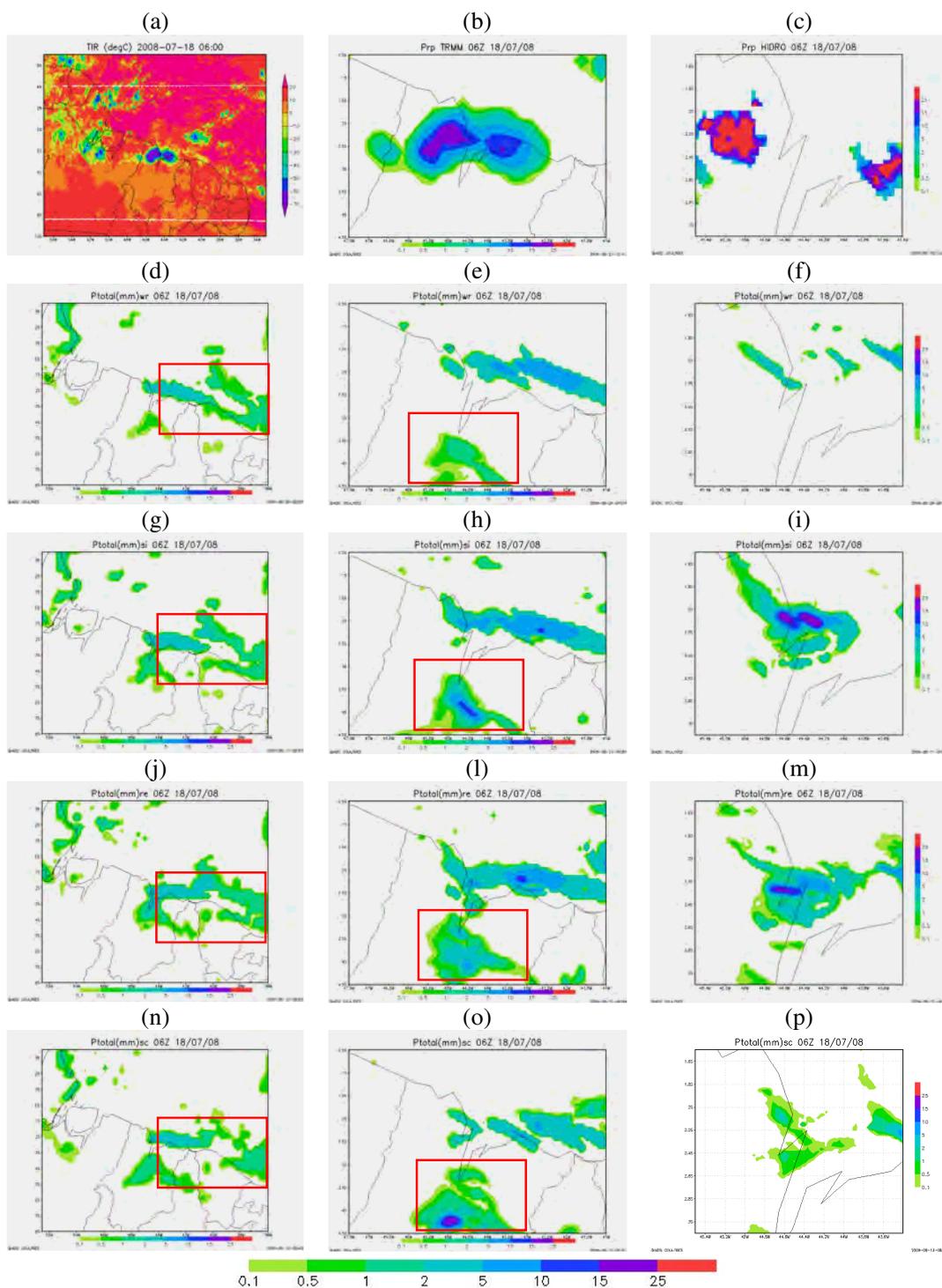


Figura 6.2 - Campos de precipitação simulada (de “d” a “p”, mm), precipitação estimada pelo TRMM (“b”) e pelo HIDRO (“c”) e de TB (“a”, °C) para as 06 UTC de 18/07/08. Cada uma das colunas, a contar da esquerda, refere-se a campos (exceto campos “a”, “b” e “c”) cujos domínios são de 27, 9 e 3 km de espaçamento de grade, respectivamente. Cada uma das linhas, a contar da segunda na descendente, refere-se a um esquema explícito, conforme a seguinte ordem: Warm Rain, Simple Ice, Reisner e Schultz. Os retângulos delimitam as áreas utilizadas para análise.

6.1.1.2 Eventos de precipitação ocorridos no dia 30/07/08

Valores de precipitação (28 mm) foram estimados pelo modelo Hidroestimador referentes a um sistema isolado que atravessou a região do CLA entre 15 e 19 UTC aproximadamente. No entanto, nenhuma simulação foi capaz de prever adequadamente a evolução e quantidade de precipitação neste caso (Figura 6.3). Todos os esquemas anteciparam o início da precipitação (entre 9 e 10 UTC) e somente o esquema SC simulou precipitação nos horários em que foi observada (HIDRO). Os valores de precipitação obtidos pelos 3 domínios foram mais similares entre si nas simulações com os esquemas RE e SC.

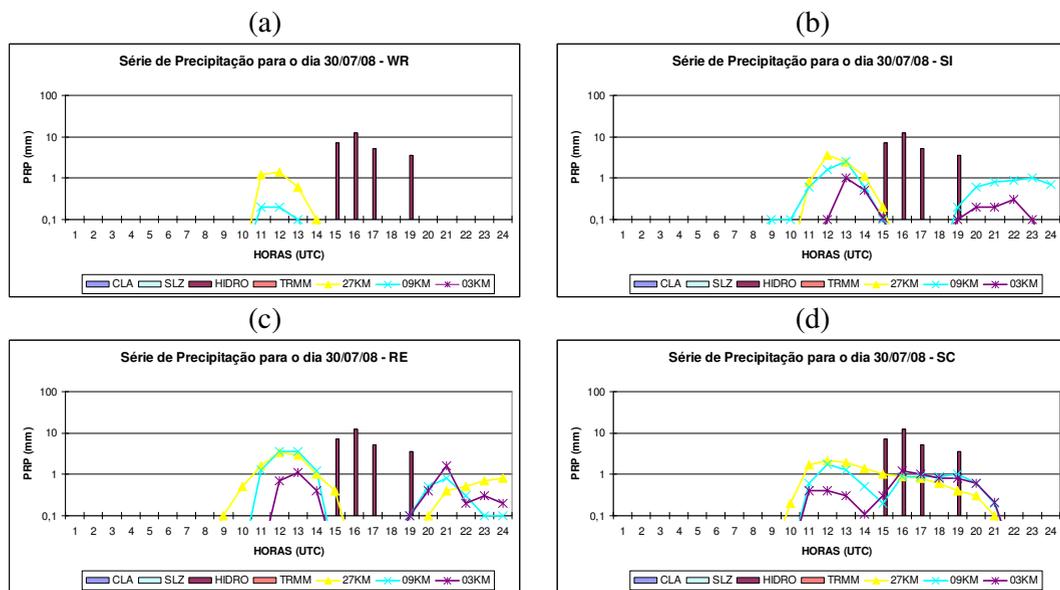


Figura 6.3 - Comparação entre os valores horários (UTC) de precipitação para o dia 30/07/08. As barras referem-se aos valores de precipitação registrada no CLA e em SLZ e de precipitação média estimada pelo Hidroestimador (HIDRO) e pelo satélite TRMM (TRMM). As linhas referem-se aos valores médios simulados nos domínios de 27, 9 e 3 km. Os gráficos “a”, “b”, “c” e “d” referem-se, aos esquemas Warm Rain, Simple Ice, Reisner e Schultz (SC), nesta ordem. Precipitação (mm/h) em escala logarítmica.

A Tabela 6.2 mostra os valores totais de precipitação obtidos com as simulações: nota-se que o esquema WR apresentou os maiores erros de magnitude quando comparados aos valores gerados pelo HIDRO. Em geral, as simulações para os domínios de resolução horizontal 27 e 9 km foram mais similares quanto à evolução temporal e quantidade de precipitação, apresentando valores mais próximos do valor total observado (HIDRO), embora ainda o subestimando. Para este caso, a precipitação

simulada pelo domínio 3 para a região que envolve o CLA foi bem abaixo do observado (num máximo de 25% desse valor).

Tabela 6.2 - Precipitação Convectiva (PC), Não-Convectiva (PNC) e Total (TT) simulada obtida para o dia 30/07/08 para a região do CLA com o uso dos esquemas Warm Rain (WR), Simple Ice (SI), Reisner (RE) e Schultz (SC). Unidade de precipitação: mm/h.

Precipitação Convectiva, Não Convectiva e Total Simulada (mm/dia)												
Esquemas	WR			SI			RE			SC		
Resolução	PC	PNC	TT	PC	PNC	TT	PC	PNC	TT	PC	PNC	TT
27 km	3.5	0	3.5	8.3	0	8.3	12.6	0	12.6	11.5	0	11.5
09 km	0.7	0	0.7	9.8	0.2	10	11.5	0	11.5	9	0	9
03 km	0	0	0	2.2	0.6	2.8	4.2	1.0	5.2	6.1	0.2	6.3

Quanto à divisão da precipitação em parte convectiva e não-convectiva, conforme se esperava, a porção não convectiva aumenta sua contribuição para o valor total com o aumento da resolução das grades (Tabela 6.2). No entanto, os valores da parte não-convectiva foram bem menores que os da parte convectiva.

Houve similaridade entre os campos gerados pelas quatro simulações quanto ao posicionamento das áreas de precipitação e sua evolução no tempo, exceto para o domínio de 3 km (Figura 6.4). No domínio de 27 km notam-se diferenças entre as simulações e o observado. Na Figura 6.4a nota-se a existência de apenas uma área de chuva sobre o oceano, próximo a costa do Ceará. No entanto, todas as simulações produziram (erroneamente) uma área de precipitação que se estende desde o estado do Amapá até a Ilha de Marajó. Nota-se ainda outra área precipitante (em posição deslocada com relação ao campo observado e que permanece existindo por praticamente toda a simulação) entre a costa do Ceará e o nordeste do Maranhão.

No domínio de resolução horizontal 9 km, para o horário das 15 UTC, ocorre o aparecimento de células de precipitação maiores a leste do CLA (Figuras 6.4b). Contudo, nenhuma simulação foi capaz de representar isoladamente tais células, produzindo (equivocadamente) uma grande e única área de precipitação disposta desde a costa do Maranhão até o Pará. Em síntese, em todas as simulações, os domínios 1 e 2 não representaram bem o evento diurno de precipitação ocorrido na região do CLA.

Para o domínio 3, as simulações também não apontaram resultados melhores: os quatro esquemas geraram áreas de precipitação ao norte do CLA a partir das 10 UTC (não mostrado). Estas formações se intensificaram e deslocaram de leste, apresentando núcleos com elevadas taxas de precipitação em horários e locais não observados tanto nas imagens de radar quanto nos campos estimados pelo TRMM. Às 18 UTC, uma área de chuva isolada vinda de leste (não mostrada) passa pelo CLA (Figura 6.4c). O resultado mais próximo do real foi obtido com a simulação de precipitação não convectiva com os esquemas SC e WR, mesmo deslocado mais ao norte que o observado. Importante destacar que apesar do erro no posicionamento, a extensão (localizada) e a quantidade (pequena) dos núcleos foram bem simulados.

Pode-se afirmar que os erros verificados quanto aos valores gerados e a evolução temporal da precipitação decorrem dos erros de posicionamento dos sistemas e seu deslocamento observado nas simulações. Diante dos resultados, ficou evidente a dificuldade do modelo em representar este caso de formação convectiva isolada. Não se pode apontar o esquema explícito que tenha produzido melhores resultados, pois o evento não foi bem representado em nenhum domínio, para as quatro simulações.

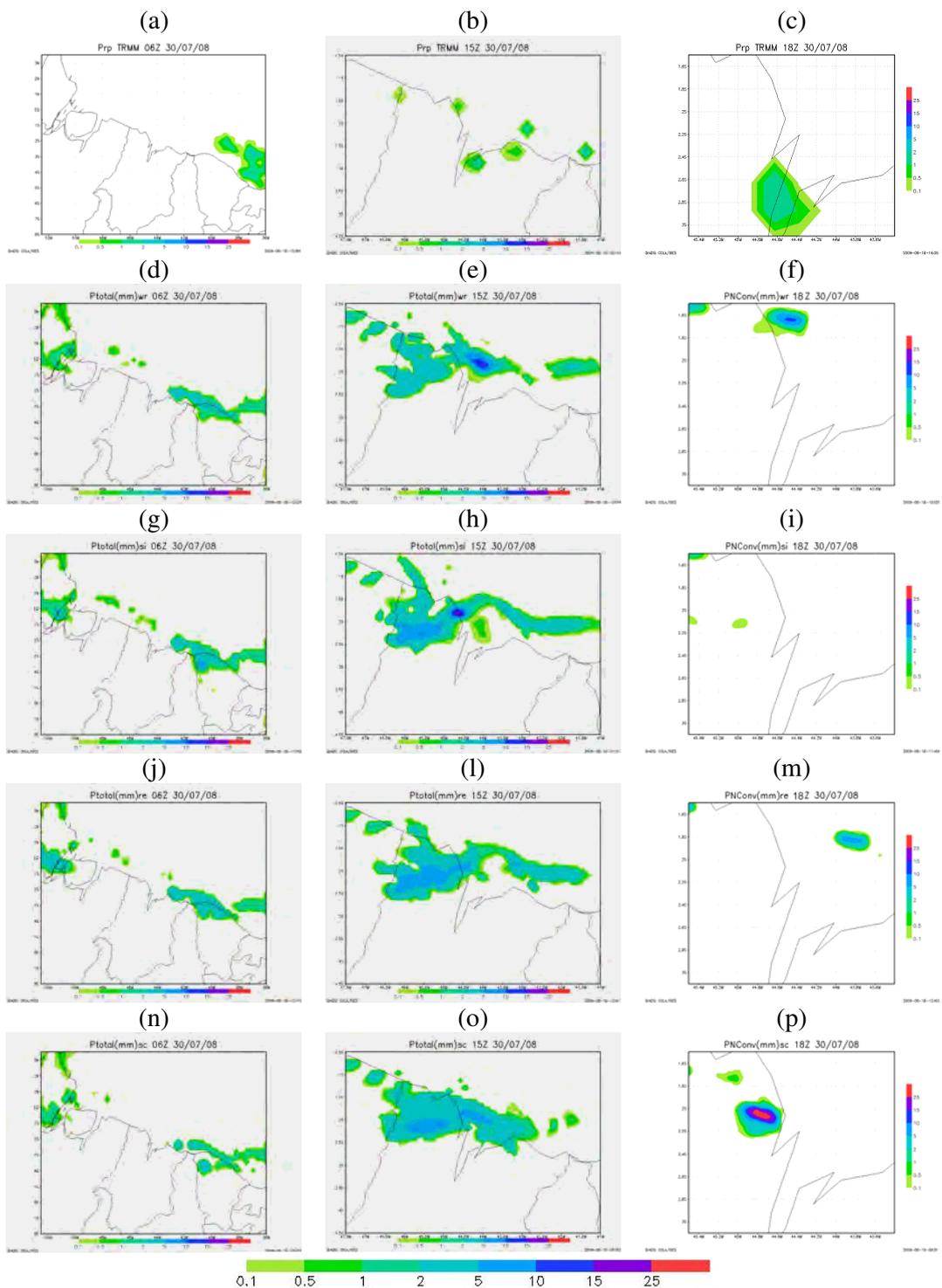


Figura 6.4 - Campos de precipitação simulada (de “d” a “p”, mm) e estimada pelo TRMM (de “a” a “c”) para as 06UTC (esquerda), 15UTC (centro) e 18UTC (direita) de 30/07/08. Cada uma das colunas, a contar da esquerda, refere-se a campos cujos domínios são de 27, 9 e 3 km de espaçamento de grade, respectivamente. Cada uma das linhas, a contar da segunda na descendente, refere-se a um esquema explícito, conforme a seguinte ordem: Warm Rain, Simple Ice, Reissner e Schultz.

6.1.1.3 Eventos de precipitação ocorridos no dia 12/03/09

As séries de precipitação observada para este dia alcançaram 25,8 mm para o CLA, 10,0 mm para SLZ, 112,8 mm para o modelo Hidroestimador e 38,7 mm para o TRMM. Esses totais referem-se aos dois eventos de convecção (um noturno, outro diurno) que atingiram o CLA. Quanto às simulações, nenhuma foi capaz de prever adequadamente a quantidade de precipitação para a região do CLA neste caso (Figura 6.5). As simulações não conseguiram ilustrar com clareza os dois grupos de precipitação das séries observadas, especialmente para os domínios de 27 e 9 km de resolução. Aparentemente, as séries representadas pelos valores simulados com o esquema SI, para a grade de 3 km e pelo RE para o domínio de 9 km (Figura 6.5b-c) mostram alguma similaridade com a série observada. As séries os três domínios foram mais similares nas simulações com o esquema WR (Figura 6.5a).

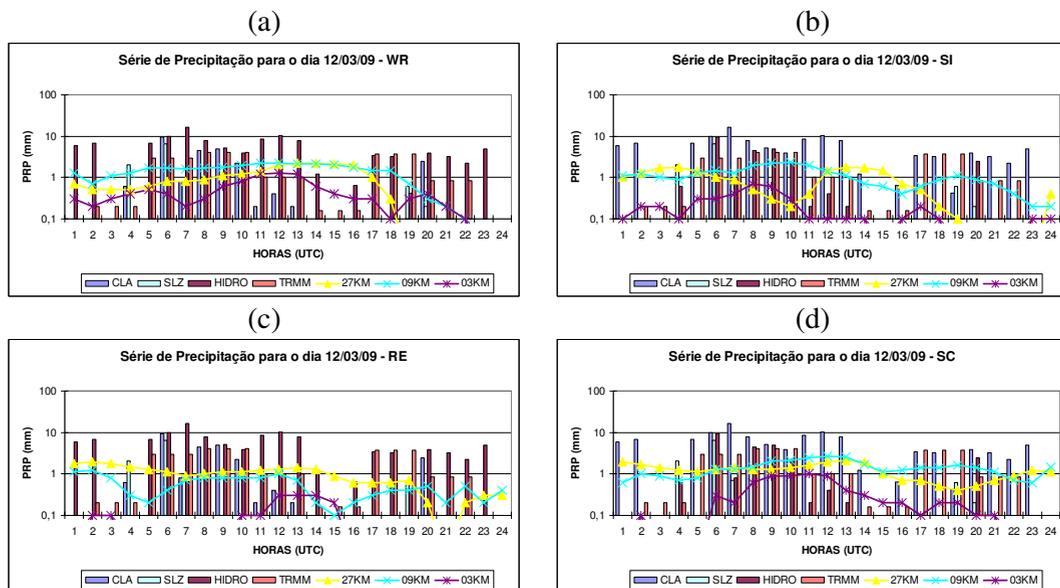


Figura 6.5 - Comparação entre os valores horários (UTC) de precipitação para a região do CLA para o dia 12/03/09. As barras referem-se aos valores de precipitação registrada no CLA (REG), de precipitação média estimada pelo Hidroestimador (HIDRO) e pelo satélite TRMM (TRMM). As linhas referem-se aos valores médios simulados nos domínios de 27, 9 e 3 km de resolução. Os gráficos “a”, “b”, “c” e “d” referem-se, aos esquemas Warm Rain, Simple Ice, Reisner e Schultz, nesta ordem. Precipitação (mm/h) em escala logarítmica.

A Tabela 6.3 mostra os valores totais de precipitação simulada para os três domínios. No geral, ao se comparar os valores simulados e observados, nota-se que ocorre subestimativa de precipitação, especialmente para a grade de 3 km de resolução. Quanto

aos totais simulados, os esquemas WR e SC geraram resultados mais similares aos observados, seguido pelos esquemas SI e RE. Constata-se ainda os baixos resultados obtidos com o domínio 3, especialmente para o esquema RE. Exceto para o WR (0,4 mm), todos os outros esquemas não foram capazes de simular precipitação não-convectiva para a região delimitada para este estudo.

Tabela 6.3 - Precipitação Convectiva (PC), Não-Convectiva (PNC) e Total (TT) simulada obtida para o dia 12/03/09 para a região do CLA com o uso dos esquemas Warm Rain (WR), Simple Ice (SI), Reisner (RE) e Schultz (SC). Unidade de precipitação: mm/dia.

Precipitação Convectiva, Não Convectiva e Total Simulada (mm/dia)												
Esquemas	WR			SI			RE			SC		
Resolução	PC	PNC	TT									
27 km	21.9	0	21.9	18.9	0	18.9	23.1	0	23.1	29.2	0	29.2
09 km	31.5	0	31.5	20	0	20.2	13	0	13	33.6	0	33.6
03 km	10	0.4	10.4	4.3	0	4.3	1.7	0	1.7	6.8	0	6.8

Nota-se nos campos de precipitação simulada para o domínio 1 (Figura 6.6) uma área de chuva que se estende desde a costa leste do Maranhão até o leste do Ceará, com prolongamentos continente adentro, gerada erroneamente pelos 4 esquemas às 02 UTC. Outra região de precipitação não-observada foi simulada em forma de linha desde o noroeste do Maranhão até a Ilha de Marajó. Também são notadas diferenças quanto à distribuição espacial das regiões de chuva entre as simulações e os campos observados, especialmente sobre o continente. Contudo, destaca-se positivamente que todos os esquemas foram capazes de representar satisfatoriamente as áreas de chuva que se estendem desde o Piauí, passando pelo interior do Maranhão indo até o Pará.

Quanto ao domínio 2, para o horário das 06 UTC, todos os esquemas foram capazes de simular as áreas de precipitação sobre o CLA e suas adjacências. Contudo, diferenças quanto ao posicionamento, extensão e disposição espacial dessas áreas são evidentes. Enquanto os esquemas WR e SI (Figuras 6.6e-h) mostram claramente uma separação espacial entre uma área de precipitação que envolve o CLA e outra mais ao sul dessa localidade, os esquemas RE e SC (Figuras 6.6i-o) localizam as duas regiões como uma só, diferentemente do que se observa no campo de precipitação estimada (Figuras 6.6b). Nessa resolução, é possível notar que houve ligeira melhora (ruptura e

enfraquecimento) na representação da área de precipitação que se estende pelo noroeste do Maranhão em direção a Ilha de Marajó com relação ao domínio 1.

Para o mesmo horário as simulações para o domínio 3 não indicam uma melhora na representação espacial das áreas de precipitação. Enquanto o esquema RE (Figura 6.6m) gera uma área menor e menos intensa de precipitação, o esquema SC (Figura 6.6p) simula uma área mais extensa que os demais. WR (Figura 6.6f) não conseguiu simular as formações mais ao norte do CLA, enquanto que o esquema SI (Figura 6.6i) gera áreas de precipitação muito espalhadas.

Para este caso, as maiores diferenças nas características da precipitação fazem referência à sua representação espacial (intensidade, tamanho e disposição). Isso retrata a atuação diferenciada de cada esquema de microfísica nos aspectos da convecção/precipitação simulada. Apesar da magnitude dos erros apresentados nos resultados das simulações, pode-se considerar aqueles obtidos com o uso do esquema Simple Ice, especialmente para o domínio de 9 km de resolução espacial, como os que melhor representaram os eventos de precipitação.

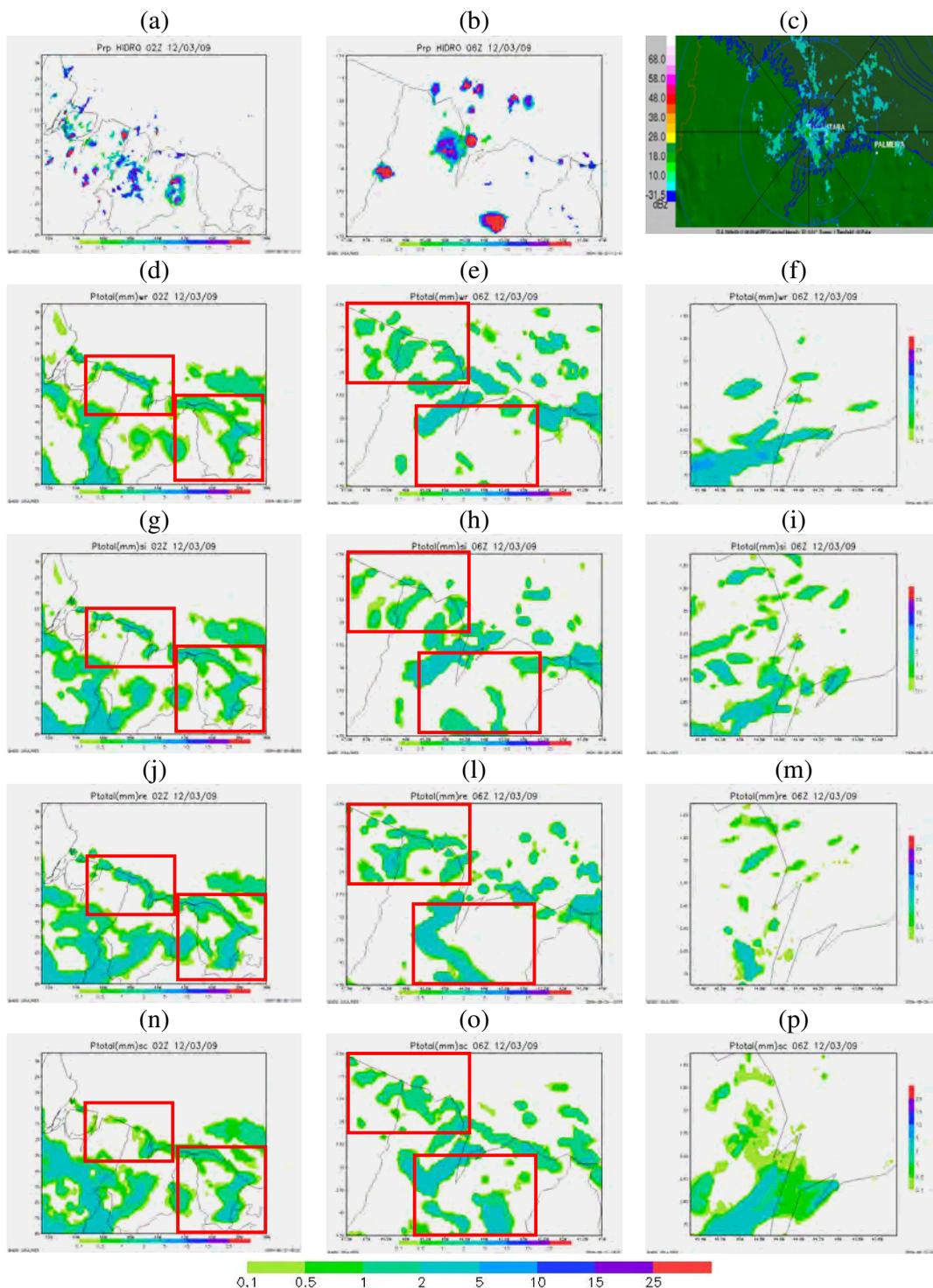


Figura 6.6 - Campos de precipitação simulada (“d” a “p”), estimada pelo Hidroestimador (“a” e “b”) e de refletividade de radar (“c”) para as 02UTC (esquerda), 15UTC (centro) e 18UTC (direita) de 12/03/09. Cada uma das colunas, a contar da esquerda, refere-se a campos cujos domínios são de 27, 9 e 3 km de espaçamento de grade, respectivamente. Cada uma das linhas, a contar da segunda na descendente, refere-se a um esquema explícito, conforme a seguinte ordem: Warm Rain, Simple Ice, Reisner e Schultz. Os retângulos delimitam as áreas utilizadas para análise.

6.1.1.4 Eventos de precipitação ocorridos no dia 26/03/09

As séries de precipitação observada para este dia alcançaram 32,9 mm para o CLA, 0,2 mm para SLZ, 63,5 mm para o modelo Hidroestimador e 5,7 mm para o TRMM. Esses totais referem-se aos dois eventos de convecção (um noturno, outro diurno) que atingiram a região de Alcântara. Todas as simulações não representaram adequadamente a quantidade de precipitação total e sua distribuição horária (Figura 6.7). As simulações não conseguiram distinguir os dois eventos de precipitação em nenhum dos 3 domínios. Em geral, as séries de precipitação simulada têm o mesmo comportamento para todos os esquemas: início nas primeiras horas do dia (entre 01 e 04 UTC), intensificação com pico à tarde (entre 13 e 16 UTC) para em seguida se dissiparem no início da noite (entre 18 e 21 UTC). As séries para os três domínios foram mais similares (diferentes) nas simulações com o esquema WR (RE e SC). As séries obtidas para o domínio 3, em todas as simulações, apresentaram os piores resultados.

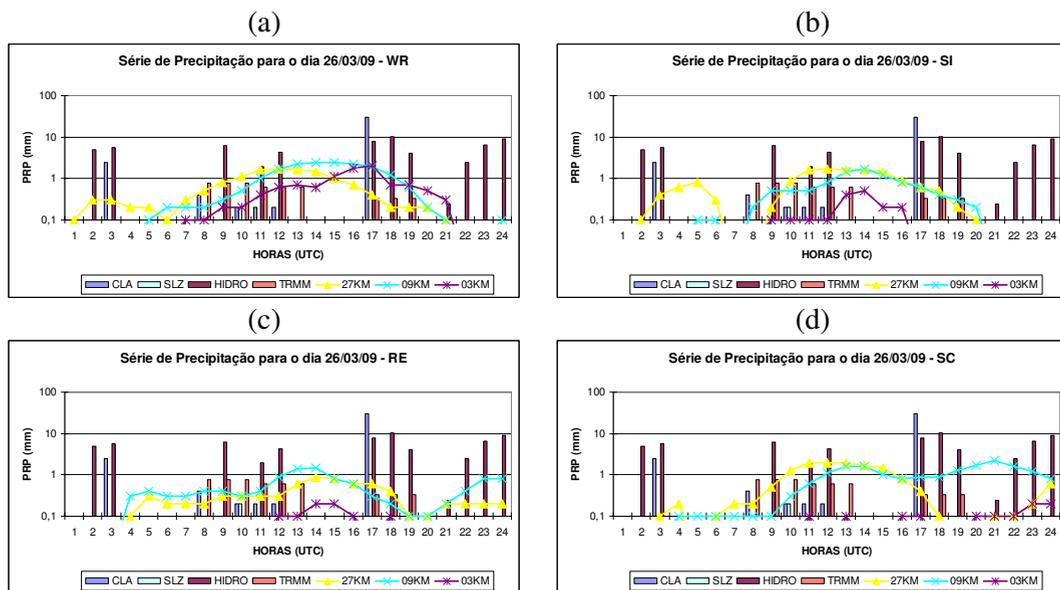


Figura 6.7 - Comparação entre os valores horários (UTC) de precipitação para o dia 26/03/09. As barras referem-se aos valores de precipitação registrada no CLA e em SLZ e de precipitação média estimada pelo Hidroestimador (HIDRO) e pelo satélite TRMM (TRMM). As linhas referem-se aos valores médios simulados nos domínios de 27, 9 e 3 km de resolução. Os gráficos “a”, “b”, “c” e “d” referem-se, aos esquemas Warm Rain, Simple Ice, Reisner e Schultz (SC), nesta ordem. Precipitação (mm/h) em escala logarítmica.

Tabela 6.4 - Precipitação Convectiva (PC), Não-Convectiva (PNC) e Total (TT) simulada obtida para o dia 26/03/09 para a região do CLA com o uso dos esquemas Warm Rain (WR), Simple Ice (SI), Reisner (RE) e Schultz (SC). Unidade de precipitação: mm/dia.

Precipitação Convectiva, Não Convectiva e Total Simulada (mm/dia)												
Esquemas	WR			SI			RE			SC		
Resolução	PC	PNC	TT									
27 km	13.1	0	13.1	13.7	0	13.7	7.1	0	7.1	13.8	0	13.8
09 km	17.6	0	17.6	9.5	0	9.5	10.9	0	10.9	18.2	0	18.2
03 km	8.4	1.7	10.1	1.8	0	1.8	1.0	0	1.0	1.2	0	1.2

Principalmente com relação aos valores estimados pelo HIDRO ocorre subestimativa de precipitação em todos os domínios, especialmente para a grade de resolução horizontal de 3 km (Tabela 6.4). Neste domínio, os melhores resultados para os totais diários de precipitação foram obtidos com o esquema WR. Para a região delimitada que abrange o CLA, houve precipitação de origem não-convectiva apenas para o esquema WR (1,7 mm).

As principais diferenças destacadas nas simulações fazem referência à representação do tamanho e intensidade das áreas de chuva. Para o horário das 00 UTC do dia 27, todos os esquemas representam de forma satisfatória o desenvolvimento de uma área de precipitação em forma de linha observada nos campos de TRMM (Figura 6.8a). As melhores simulações quanto à morfologia dessa região parecem ter sido alcançadas pelo esquema SI (Figura 6.8g) e SC (Figura 6.8n), nesta ordem, apesar de grande similaridade entre as simulações. O esquema RE (Figura 6.8j) fragmentou a região de precipitação.

Para o domínio 2, o esquema WR (Figura 6.8e) parece levar a uma melhor representação da distribuição espacial das áreas de precipitação, seguido pelos esquemas SI e RE (Figura 6.8h e 6.8l, respectivamente). O esquema SC, pelo contrário, superestimou a extensão das áreas precipitantes. No que concerne à intensidade das formações, nota-se na Figura 6.8b a existência de núcleos com precipitação acima de 10 mm/h em seu interior (p. ex., a oeste do CLA). Nota-se que os quatro esquemas foram capazes de gerá-los com intensidade equivalente ao observado.

Para o domínio 3, às 15 UTC, exceto para o esquema SC (Figura 6.8p), todos os esquemas simularam áreas de precipitação em locais onde o radar detectou nebulosidade, especificamente ao norte e noroeste do CLA. Cabe mencionar que em WR, SI e RE, as áreas de precipitação são “espalhadas”, o que é semelhante às observações. Assim como aconteceu para o domínio 2, SC também superestimou a dimensão da área de precipitação na região ao sul do CLA.

Confrontando os campos da Figura 6.8 referentes aos domínios 1 e 2, é possível dizer que houve melhora significativa na representatividade das áreas de precipitação com o aumento da resolução horizontal, especialmente quanto ao detalhamento e posicionamento dessas áreas. Com base nos erros obtidos nas simulações podem-se considerar os resultados obtidos com o uso do esquema SC como os piores, seguido pelo esquema RE e deixando WR e SI num mesmo nível de acerto.

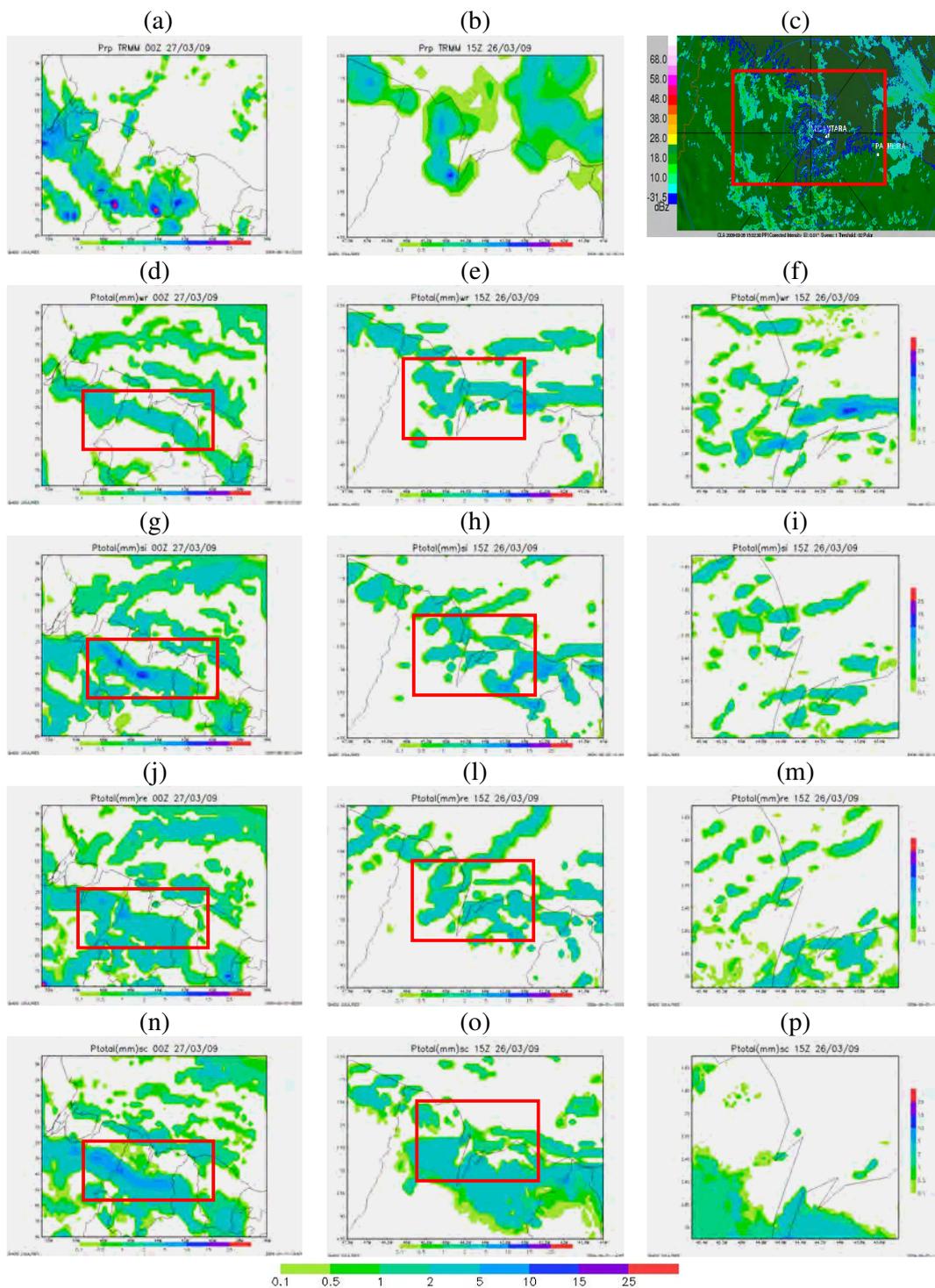


Figura 6.8 - Campos de precipitação simulada (de “d” a “p”), estimada pelo TRMM (“a” e “b”) e de refletividade do radar para as 00UTC de 27/03/09 (esquerda) e 15UTC (centro e esquerda) de 26/03/09. Cada uma das colunas, a contar da esquerda, refere-se a campos cujos domínios são de 27, 9 e 3 km de espaçamento de grade, respectivamente. Cada uma das linhas, a contar da segunda na descendente, refere-se a um esquema explícito, conforme a seguinte ordem: Warm Rain, Simple Ice, Reisner e Schultz. Os retângulos delimitam as áreas utilizadas para análise.

6.1.2 Síntese dos resultados das simulações do Grupo 1

Caso do dia 18/07/08

1. Todos os esquemas subestimaram a quantidade de precipitação diária, sendo que os esquemas Simple Ice (SI) e Reisner 2 (RE) foram os que mais se aproximaram dos valores observados.

2. Quanto ao posicionamento das regiões de precipitação, houve relativa coerência e uniformidade entre os 3 domínios para todas as simulações

3. As simulações realizadas com os esquemas SI e RE foram as que melhor representaram o padrão de precipitação no domínio de 3 km de resolução horizontal. Destacam-se o maior detalhamento das áreas de precipitação e a filtragem de alguns erros (com relação ao domínio 2) conseguida com o uso destes esquemas.

Caso do dia 30/07/08

1. Nenhuma simulação foi capaz de prever adequadamente a evolução temporal e quantidade de precipitação para a região do CLA. Todos os esquemas apresentaram problema de *timing*, ou seja, anteciparam o início da precipitação. Somente a série temporal obtida com o esquema Schultz (SC) simulou precipitação para o período em que foi observada.

2. Em todas as simulações, os domínios 1 e 2 não representaram bem o evento de precipitação. Para o domínio 3, todas as simulações apresentaram valores de chuva bem abaixo do observado. Contudo, neste espaçamento de grade (3 km) cabe destacar que apesar do erro no posicionamento, a extensão (localizada) e a quantidade (pequena) dos núcleos de chuva foram bem simulados.

3. Ficou evidente a dificuldade do modelo em representar este caso de formação convectiva isolada. Neste caso, como o evento não foi bem representado em nenhum domínio, para as quatro simulações, não se pode apontar o esquema explícito que tenha produzido melhores resultados.

Caso do dia 12/03/09

1. Nenhuma simulação foi capaz de prever adequadamente a evolução e a quantidade de precipitação para a região do CLA.
2. As séries com os valores de precipitação obtidos pelos três domínios foram mais similares nas simulações com o esquema WR.
3. Ao se comparar os valores simulados e observados verifica-se que ocorre subestimativa de precipitação, especialmente para a grade de 3 km de resolução horizontal. Analisando os valores totais simulados é possível afirmar que os esquemas Warm Rain e Schultz geraram resultados mais similares aos observados.
4. Para este caso, as maiores diferenças nas características da precipitação fazem referência à sua representação espacial (intensidade, tamanho e disposição). Considerando a magnitude dos erros destacados, é possível afirmar que aqueles obtidos com o uso do esquema Simple Ice, especialmente para o domínio de 9 km de resolução espacial, foram os que melhor representaram os eventos de precipitação.

Caso do dia 26/03/09

1. As simulações não representaram adequadamente a quantidade de precipitação total e sua distribuição horária para a região do CLA. Os 4 diferentes esquemas explícitos usados não conseguiram distinguir os dois eventos de precipitação em nenhum dos três domínios.
2. Ocorre subestimativa de precipitação em todos os domínios, especialmente para a grade de resolução horizontal de 3 km. Neste domínio, os melhores resultados quanto aos valores totais diários de precipitação foram obtidos com o esquema WR.
3. Para o domínio 2, o esquema WR parece levar a uma melhor representação da distribuição espacial das áreas de precipitação, seguido pelos esquemas SI e RE. O esquema SC, pelo contrário, superestimou a extensão das áreas precipitantes. Os quatro

esquemas foram capazes de simular núcleos de precipitação com intensidade equivalente ao observado.

4. Mediante a significância dos erros observados nas simulações, pode-se classificar os resultados obtidos com o uso do esquema Schultz como os piores, seguido pelo esquema Reisner, deixando Warm Rain e Simple Ice num mesmo nível de acerto

Aspectos gerais:

1. As simulações mostraram dificuldade em prever adequadamente tanto o evento de chuva isolada (caso do dia 30/07/08) como também a evolução temporal dos eventos de muita precipitação (como os ocorridos nos dias 12 e 26/03/09).

2. Em praticamente todas as simulações, para todos os domínios, ocorre subestimativa da quantidade diária de precipitação. É possível afirmar que os erros verificados quanto aos valores gerados decorrem dos erros de posicionamento dos sistemas e seu deslocamento observado nas simulações.

3. Outro aspecto observado nas simulações foi que a morfologia e distribuição temporal e espacial da precipitação são praticamente insensíveis ao esquema de microfísica usado para o domínio de 27 km de resolução espacial. No entanto, as diferenças morfológicas tornam-se mais evidentes conforme diminui o espaçamento de grade utilizado (9 e 3 km). Constatou-se ainda, em todos os casos, a ocorrência de um problema de *timing*, isto é, a convecção antecipa sua formação quando comparada com o observado.

4. Observou-se também que a porção não-convectiva da precipitação aumenta com a diminuição do espaçamento de grade. Isso retrata a atuação diferenciada de cada esquema de microfísica nos aspectos da convecção/precipitação simulada.

5. As simulações confirmaram que o uso de esquemas de microfísica mais complexos em sua formulação (p.ex. Schultz) não garantem melhores simulações de precipitação. Os resultados mostraram que, apesar de terem gerado erros significativos esquemas mais simples, como Simple Ice e Warm Rain, apresentaram melhores desempenhos nas previsões de chuva para a região do CLA.

6. Os erros apontados nas simulações não devem ser atribuídos apenas ao uso dos esquemas de convecção explícita, pois ocorrem erros comuns a todos os esquemas. Tais discrepâncias podem ter relação com as condições iniciais e de contorno empregadas (baixa resolução), com o tempo de integração, com a resolução horizontal e vertical dos domínios, com a escala dos sistemas meteorológicos simulados, etc.

7. Para que se pudesse dar continuidade aos trabalhos, um esquema de microfísica deveria ser apontado como o de melhor desempenho nas simulações. Os resultados mostraram uma similaridade considerável entre os esquemas Simple Ice e Reisner. Então, testes adicionais (não mostrados) foram realizados com o uso de somente estes esquemas explícitos em grades de mais alta resolução, visando determinar qual deles seria usado nas simulações do Grupo 2. Os resultados obtidos com o Simple Ice foram pouco melhores. Sendo assim, considerando também importante a preferência por esquemas mais simples, o Simple Ice foi apontado como o de melhor desempenho e usado nas simulações do Grupo 2.

6.1.3 Análise das simulações do Grupo 2

As simulações do Grupo 2 (G2) foram realizadas da seguinte forma: para cada caso de precipitação, realizaram-se 2 novas rodadas com as mesmas características usadas nas simulações do G1, somente com o esquema Simple Ice. A diferença está relacionada ao uso ou não do esquema implícito KF2 nos domínios 2 e 3. As simulações do G2 foram assim caracterizadas: SI1, na qual se usou esquemas implícito e explícito no D2 e somente explícito no D3; SI2, na qual se usou somente esquema explícito no D2 e D3. Para esse estudo, as simulações do Grupo 1 realizadas com o esquema Simple Ice, que empregaram a aproximação híbrida nos 3 domínios, foram denominadas de SI (Tabela 6.5).

Tabela 6.5 - Desenho das simulações do Grupo 1 (G1) e 2 (G2) com relação ao uso dos esquemas de convecção explícita (EE) e implícita (EI) nos espaçamentos de grade de 27, 9 e 3 km.

Espaçamento de grade	Simulações		
	Grupo 1	Grupo 2	
	SI	SI1	SI2
27 km	EI e EE	EI e EE	EI e EE
09 km	EI e EE	EI e EE	EE
03 km	EI e EE	EE	EE

6.1.3.1 Eventos de precipitação ocorridos no dia 18/07/08

As séries de precipitação geradas pelas simulações do G2 são bastante similares a do G1, e com isso não resultaram em melhores representações (Figura 6.9). Quanto aos valores totais simulados no domínio 3, obteve-se similaridade entre as simulações: 19,5 mm para SI1 e 13,2 mm para SI2, contra 14,6 mm de precipitação não-convectiva simulada pela SI). Contudo esses valores são menores quando comparados com a precipitação total gerada pela SI (26,6 mm). Quanto à grade de 9 km de resolução, o resultado também não mostrou melhoras: enquanto somente SI2 gerou precipitação para a área do CLA (2,0 mm), SI havia obtido valores bem mais expressivos (5,2 mm de PNC e 21,7 mm no total). Assim, em termos de magnitude de precipitação, pode-se dizer que não se alcançaram resultados melhores com as simulações do G2.

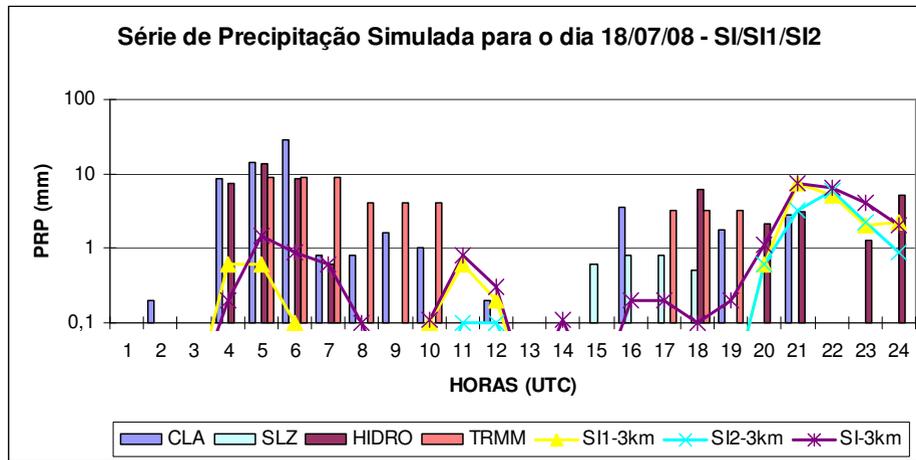


Figura 6.9 - Comparação entre os valores horários (UTC) de precipitação para a região do CLA para o dia 18/07/08. As barras referem-se aos valores de precipitação registrada no CLA e em SLZ, de precipitação média estimada pelo Hidroestimador (HIDRO) e pelo satélite TRMM (TRMM). As linhas referem-se aos valores médios obtidos no domínio de 3km com as simulações SI, SI1 e SI2. Precipitação (mm/h) em escala logarítmica.

Nota-se na Figuras 6.10 que a simulação SI2 (somente esquema explícito no domínio 2) não foi capaz de eliminar o erro mostrado nas demais simulações (área de precipitação ao sul do CLA dentro da região delimitada). Para o mesmo horário, nota-se que a simulação SI2 (Figura 6.10d) gera áreas de precipitação coincidentes com aquelas obtidas com a parte não-convectiva da chuva na simulação SI (Figura 6.10b), porém com maior intensidade. Da mesma forma, em outro horário (15 UTC) observa-se a mesma similaridade (Figuras 6.10f a 6.10h).

Outro aspecto notado foi a geração de núcleos de precipitação não-convectiva praticamente com posição, tamanho e intensidade semelhantes em todas as simulações para este horário (áreas em formato circular com alta taxa de precipitação dentro da região delimitada nos mapas). Apesar da intensidade, SI2 parece apresentar a melhor representação das áreas de chuva para este horário. Às 21 UTC nota-se o mesmo aspecto observado às 15 UTC. SI2 foi capaz de gerar precipitação na região à noroeste do CLA, porém não fez o mesmo na região à sudeste da mesma localidade (Figura 6.10m). Contudo esta simulação, para os 3 horários analisados, corrige o erro apontado nos campos da SI ao não representar a área de chuva que se estende na costa do continente (Figura 6.10b, 6.10f e 6.10j).

Para a grade de 3 km, às 06 UTC, SI2 apresentou a pior representação das áreas de chuva (Figuras 6.11a a 6.11e). A SI1 apresenta uma configuração muito similar à gerada pela precipitação não-convectiva da simulação SI. Apesar dos erros de posicionamento retratados pelas simulações SI (parte não-convectiva) e SI1, estas foram as que melhor simularam chuva para este horário. Para as 21 UTC, nota-se que, enquanto a SI2 (Figura 6.11p) representou isoladamente a área de chuva na região delimitada na Figura 6.11l, as demais simulações a representaram (equivocadamente) como uma extensão da área de precipitação que se observa ao norte do CLA (Figura 6.11m, 6.11n e 6.11o).

Quanto à evolução temporal da precipitação, o uso de esquemas explícitos nos espaçamentos de grade de 9 e 3 km não foi suficiente para corrigir as discrepâncias observadas na simulação anterior (que empregou aproximação híbrida). Mesmo assim, para este caso, a melhor representação das características da precipitação parece ter sido realizada pela simulação SI2.

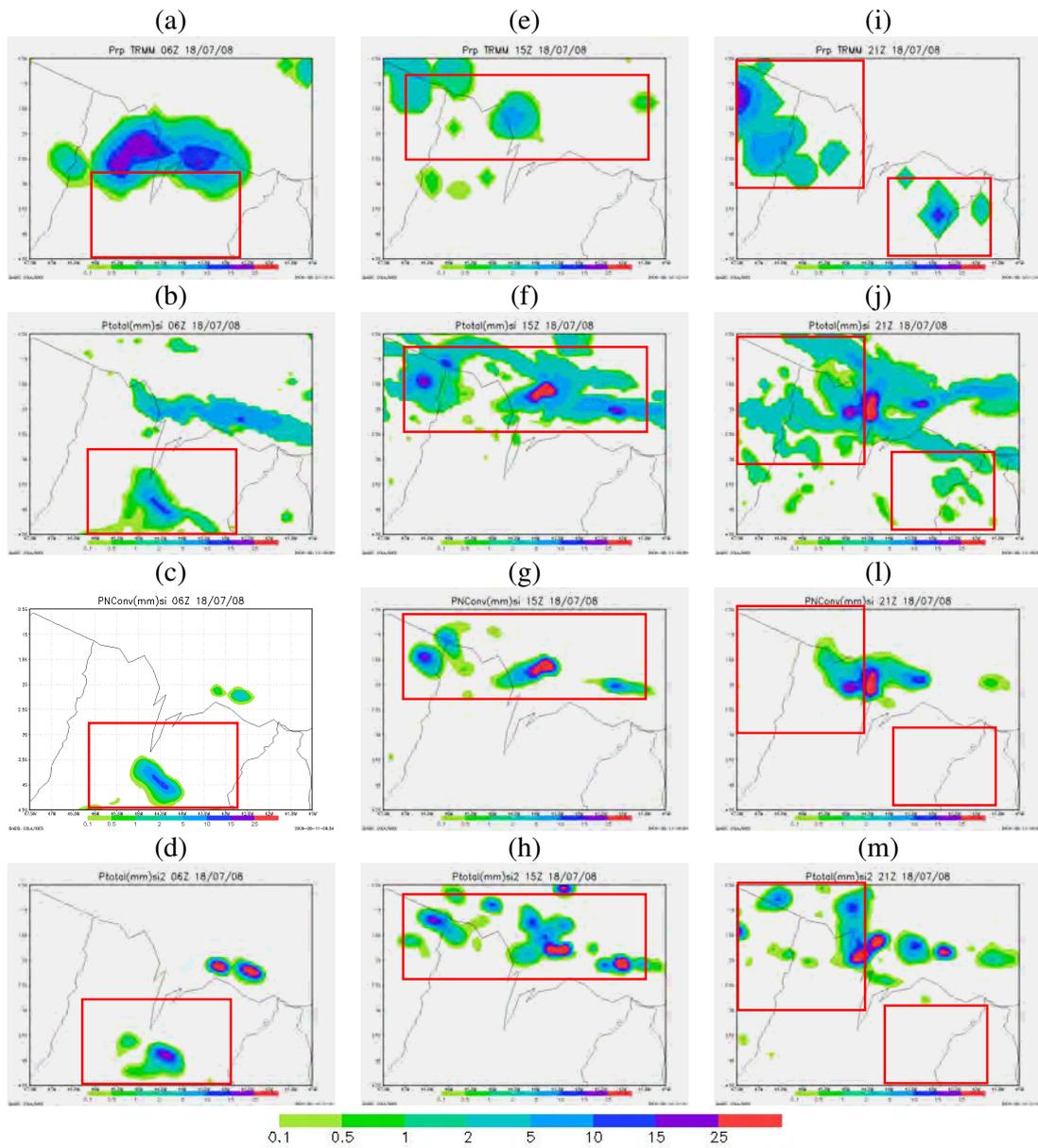


Figura 6.10 - Campos de precipitação estimada pelo TRMM (“a”, “e” e “i”) e simulada no domínio de resolução horizontal 09 km para o dia 18/07/08, em mm/h. As colunas da esquerda para a direita referem-se, cada uma, aos horários das 06, 15 e 21 UTC, nesta ordem. Os campos “b”, “f”, e “j” referem-se a simulações SI. Os campos “c”, “g” e “i” referem-se a simulações SI PNC. Os campos “d”, “h” e “m” referem-se a simulações SI2. Retângulos delimitam as áreas analisadas.

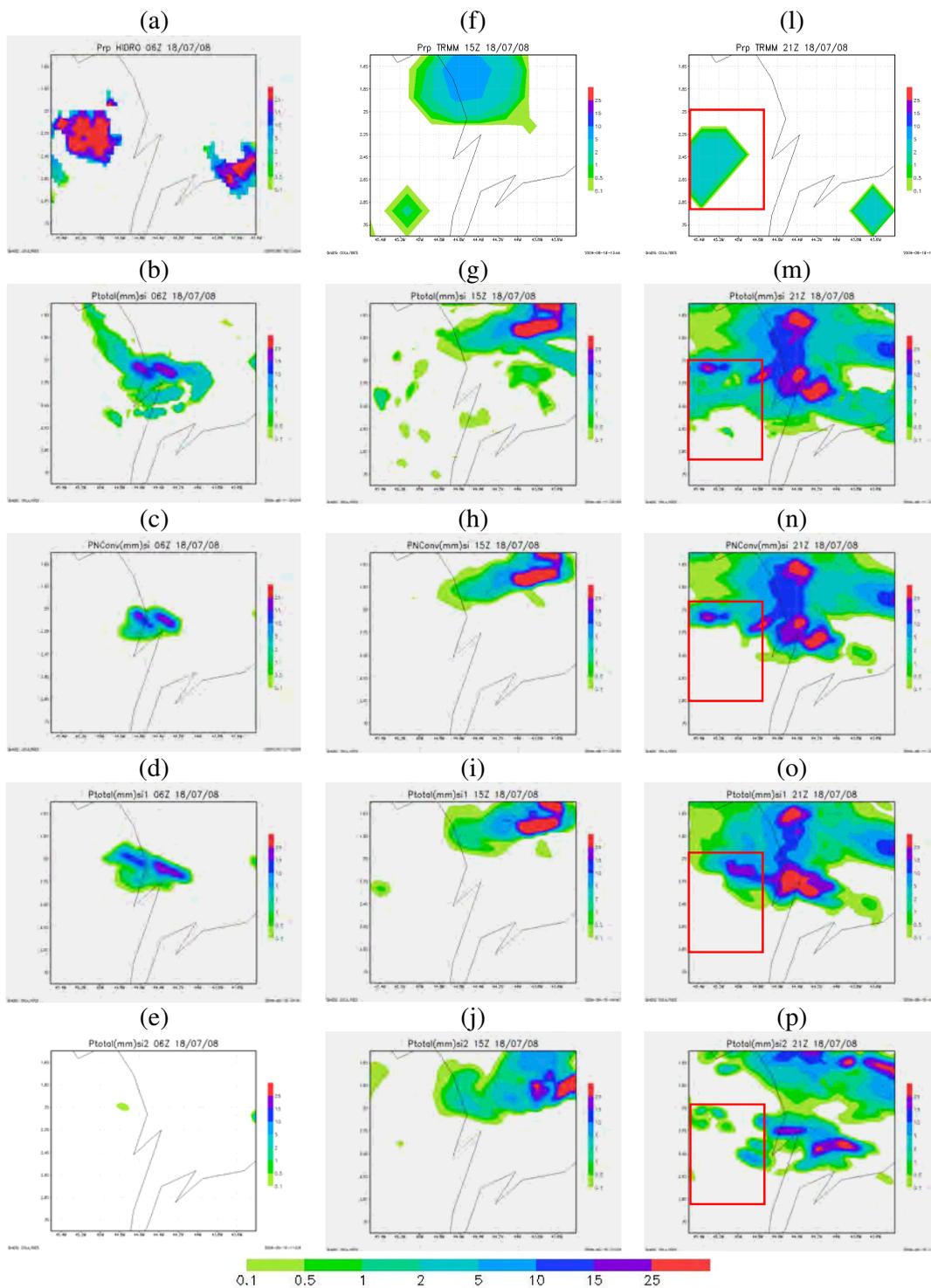


Figura 6.11 - Campos de precipitação estimada pelo Hidroestimador (“a”) e pelo TRMM (“f” e “l”) e simulada no domínio de resolução horizontal 03 km para o dia 18/07/08, em mm/h. As colunas da esquerda para a direita referem-se, cada uma, aos horários das 06, 15 e 21 UTC, nesta ordem. Os campos “b”, “g”, e “m” referem-se a simulações SI. Os campos “c”, “h” e “n” referem-se a simulações SI PNC. Os campos “d”, “i” e “o” referem-se a simulações SI1. Os campos “e”, “j” e “p” referem-se a simulações SI2. Retângulos delimitam as áreas analisadas.

6.1.3.2 Eventos de precipitação ocorridos no dia 30/07/08

A evolução temporal de precipitação referente à SI2 é bastante similar ao comportamento apresentado pela simulação anterior SI (no qual ocorrem aparentemente dois eventos de chuva), porém com valores horários mais elevados (Figura 6.12). Já a simulação SI1 (Simple Ice isoladamente somente no domínio de 3km de resolução), a série apresentou apenas um intervalo de precipitação. As simulações do Grupo 2, além de anteciparem o início da chuva na região do CLA, também não a representaram no período de sua ocorrência (entre 15 e 19 UTC). Quanto aos valores totais simulados na grade de 3 km, obteve-se melhor resultado com a SI2, a qual gerou 8,4 mm de precipitação não-convectiva na região do CLA (contra 0,9 mm para SI1 e 3,4 mm obtidos pela SI). Quanto domínio 2, apesar da simulação SI2 ter gerado maior valor de chuva que os valores de precipitação não-convectiva obtidos pela SI (1,2 mm contra 0,2 mm), esse valor ainda está bem abaixo do valor total (parte convectiva mais a não-convectiva) simulada por SI (10,2 mm). Em termos de magnitude de precipitação, pode-se dizer que a SI2 melhorou os resultados obtidos anteriormente para a o domínio 3, mas não obteve o mesmo efeito com o domínio 2.

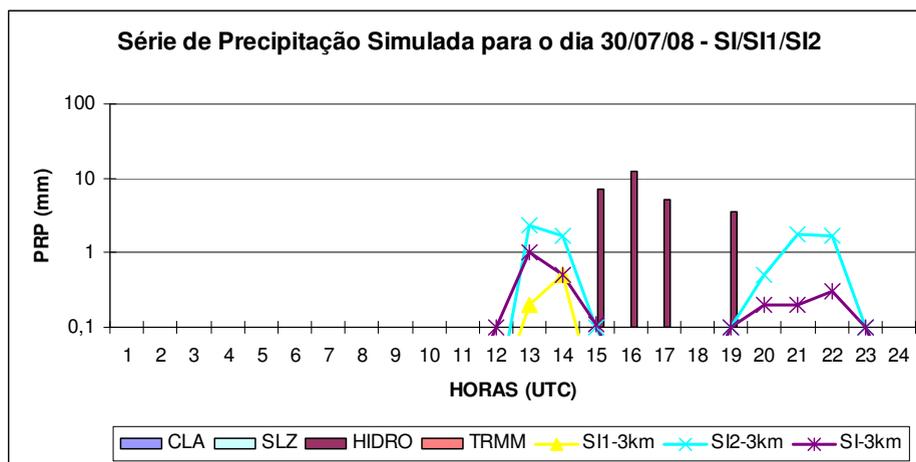


Figura 6.12 - Comparação entre os valores horários (UTC) de precipitação para a região do CLA para o dia 30/07/08. As barras referem-se aos valores de precipitação registrada no CLA e em SLZ, de precipitação média estimada pelo Hidroestimador (HIDRO) e pelo satélite TRMM (TRMM). As linhas referem-se aos valores médios obtidos no domínio de 3km com as simulações SI, SI1 e SI2. Precipitação (mm/h) em escala logarítmica.

A precipitação que atingiu a região do CLA, não foi bem representada nos domínio 2 e 3 em nenhuma das simulações (Figuras 6.13 e 6.14). Quanto à evolução temporal, as

simulações adiantaram o surgimento da área de chuva em pelo menos três horas sobre uma região que não corresponde ao observado (erro de posicionamento). Uma melhoria na representação da precipitação conseguida com a SI2 foi o refinamento da região de chuva ao eliminar a “linha” de precipitação que se observa em SI (Figura 6.13b e 6.13f). Importante citar que o núcleo isolado de chuva foi bem representado em SI2; o erro, neste caso, foi de posicionamento e *timing*. Para o domínio 3, verificam-se os mesmos erros referentes a evolução das áreas de precipitação, porém com maior detalhamento espacial das mesmas. Quanto à intensidade da precipitação, nota-se que todas as simulações geraram núcleos com taxa de chuva bem acima do observado (Figura 6.14f, 6.14g, 6.14h, 6.14i e 6.14j). Assim sendo, para este caso, a estratégia de optar pelo uso de somente esquemas explícitos nos domínios 2 e 3 não foi suficiente para alcançar melhores resultados.

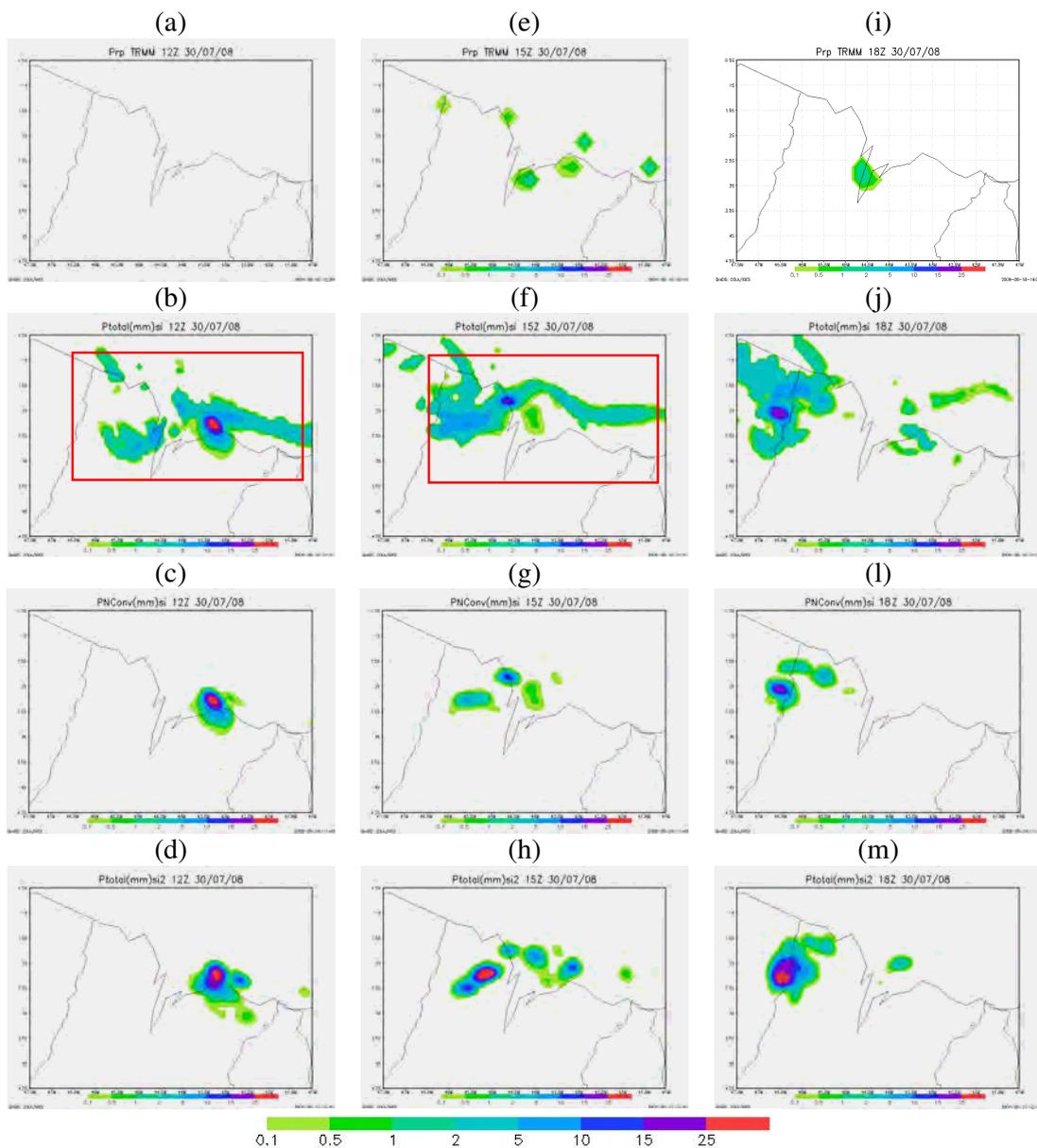


Figura 6.13 - Campos de precipitação estimada pelo modelo Hidroestimador (“a”, “e” e “i”) e simulada no domínio de resolução horizontal 09km para o dia 30/07/08, em mm/h. As colunas da esquerda para a direita referem-se, cada uma, aos horários das 12, 15 e 1800UTC, nesta ordem. Os campos “b”, “f”, e “j” referem-se a simulações SI. Os campos “c”, “g” e “i” referem-se a simulações SI PNC. Os campos “d”, “h” e “m” referem-se a simulações SI2. Retângulos delimitam as áreas analisadas.

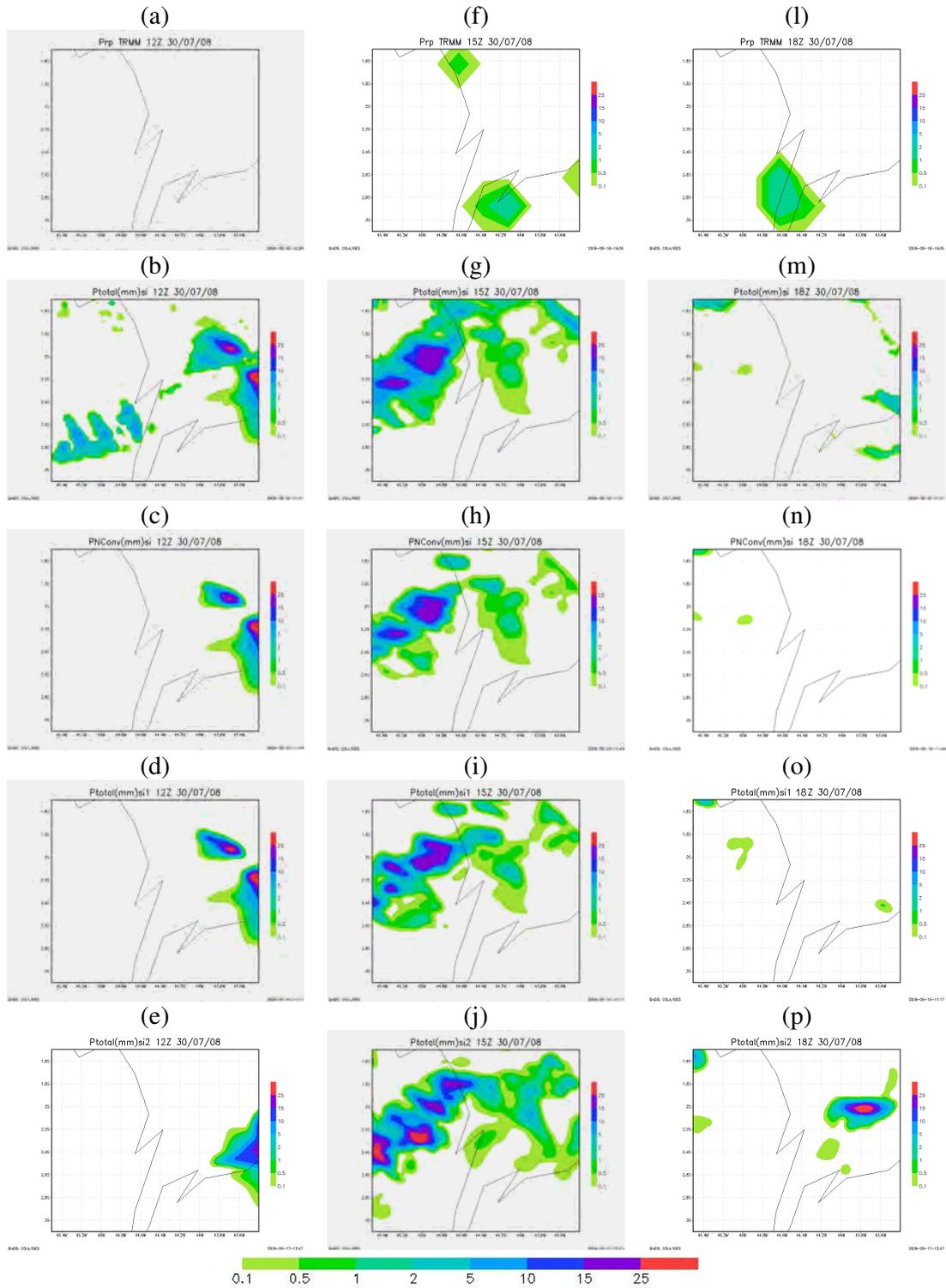


Figura 6.14 - Campos de precipitação estimada pelo TRMM (“a”, “f” e “l”) e simulada no domínio de 03km para o dia 30/07/08, em mm/h. As colunas da esquerda para a direita referem-se, cada uma, aos horários das 12, 15 e 18UTC. Os campos “b”, “g”, e “m” referem-se a simulações SI. Os campos “c”, “h” e “n” referem-se a simulações SI PNC. Os campos “d”, “i” e “o” referem-se a simulações SI1. Os campos “e”, “j” e “p” referem-se a simulações SI2.

6.1.3.3 Eventos de precipitação ocorridos no dia 12/03/09

Existem acentuadas diferenças entre as séries temporais de precipitação referentes às simulações SI, SI1 e SI2, para o domínio 3 (Figura 6.15). Enquanto as séries formadas pelos dados observados (barras) apontam chuva em praticamente todos os horários para a região do CLA, com picos no período da manhã e ao anoitecer, as séries de precipitação simulada, especialmente as do Grupo 2 (SI1 e SI2) mostram comportamentos que pouco retratam as observações. No caso da SI1, a série de precipitação ficou restrita a alguns horários (3); na simulação SI2, a série mostra a ocorrência de 3 períodos de chuva, porém, assim como foi verificado em SI, todas as rodadas geram valores baixos de precipitação horária quando comparados aos valores observados.

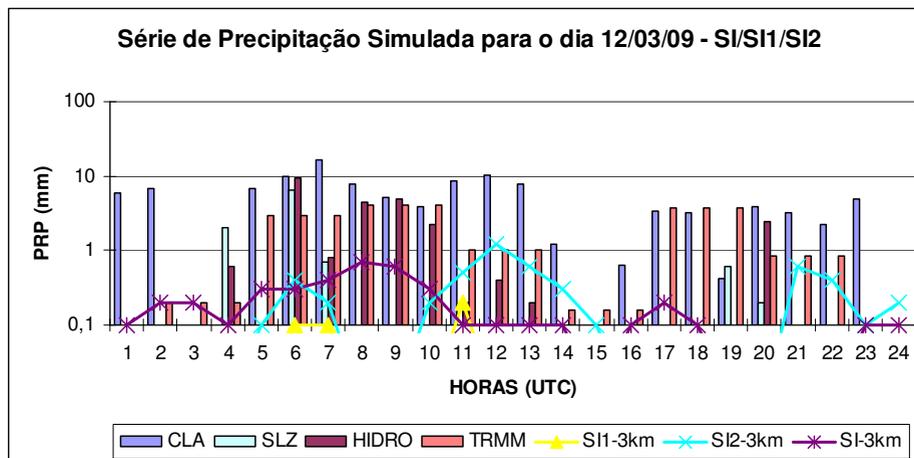


Figura 6.15 - Comparação entre os valores horários (UTC) de precipitação para a região do CLA para o dia 12/03/09. As barras referem-se aos valores de precipitação registrada no CLA e em SLZ, de precipitação média estimada pelo Hidroestimador (HIDRO) e pelo satélite TRMM (TRMM). As linhas referem-se aos valores médios obtidos no domínio de 3km com as simulações SI, SI1 e SI2. Precipitação (mm/h) em escala logarítmica.

Quanto aos valores totais simulados no domínio 3, melhor resultado foi alcançado com a SI2, a qual gerou 5,0 mm de precipitação não convectiva na região do CLA contra 0,6 mm para SI1 e 4,3 mm de precipitação total (neste caso, apenas convectiva) obtidos pela SI. Quanto ao domínio 2, a simulação SI2 não foi capaz de gerar precipitação para a região do CLA (SI havia simulado 25,8 mm). Portanto, com respeito à série temporal e magnitude da precipitação, pode-se dizer que a SI2 melhorou os resultados obtidos anteriormente para o domínio 3, não obtendo a mesma resposta com o domínio 2. A

simulação SI1, a qual empregou somente o esquema Simple Ice no domínio 3, apresentou os piores resultados.

Para os horários dos campos selecionados da Figura 6.16, SI2 melhorou significativamente a representação espacial das áreas de chuva para o domínio 2 com relação à simulação de precipitação não-convectiva que empregou esquemas implícito e explícito nos 3 domínios (SIPNC). Contudo, isso não se aplica totalmente quando se comparam SI e SI2, pois ocorrem diferenças acentuadas no posicionamento das áreas de precipitação, especialmente nos dois primeiros horários (06 e 18 UTC). Os campos simulados por SI2 (SI) mostram áreas mais concentradas (extensas) de precipitação mais (menos) intensa. Especificamente para o horário das 18 UTC verifica-se uma representação mais adequada e próxima do observado (Figura 6.16e) no campo de precipitação simulado por SI2 (Figura 6.16h), pois enquanto SIPNC (Figura 6.16g) praticamente não gerou precipitação em todo o campo, SI ao contrário, simulou (incorretamente) chuva em quase toda a extensão continental do mapa (Figura 6.16f). Para as 00 UTC do dia 13, é possível dizer que as áreas de chuva destacadas na Figura 6.16i (concentradas mais a leste e sudeste do CLA) foram mais bem representadas pela simulação SI2 (Figura 6.16m), seguida pelo campo gerado por SIPNC (Figura 6.16l). Em SI (Figura 6.16j) nota-se que ocorre um prolongamento dessas regiões (equivocadamente) no sentido sudeste/noroeste em direção ao Pará.

Quanto à disposição espacial no domínio 3 (Figura 6.17), fica claro, neste caso, que as simulações que utilizaram somente esquemas explícitos neste espaçamento de grade (SI1 e SI2, campos da 4^o e 5^o linha da Figura 6.18, respectivamente) apresentaram melhores resultados. Assim como se verificou no domínio 2, o uso de esquema implícito na grade de resolução 3 km (SI) gera áreas muito espalhadas e menos intensas de precipitação (Figuras 6.17b e 6.17g). Quando à parte não-convectiva da precipitação obtida em SI (SIPNC), praticamente não foi simulada chuva para estes horários (exceto para o campo da Figura 6.17n). Especificamente para as 12 UTC, a região de chuva sobre o CLA que se observa na Figura 6.17f, mesmo com pequenas diferenças no tamanho e intensidade, foi bem representada pelas simulações SI2 e SI1, nesta ordem. Às 00 UTC do dia 13, todas as simulações aqui comparadas representaram a área de precipitação que se posiciona mais a sudeste do CLA (aproximadamente sobre SLZ),

mesmo com diferentes intensidades. No entanto, SI e especialmente SI2, simularam (erroneamente) áreas de chuva ao redor do CLA.

Sobre a evolução temporal das formações de precipitação que se observaram sobre a região do CLA, é possível afirmar que as simulações do Grupo 2 apresentaram o mesmo comportamento verificado em SI, havendo pequenas diferenças especificamente no início e fim do período de simulação analisado. As maiores discrepâncias referem-se ao posicionamento e intensidade das regiões de chuva.

Assim, por meio da análise dos campos de precipitação obtidos no domínio 2, pode-se dizer que não ficou evidente a ocorrência de melhores resultados com o emprego de somente esquema explícito nesta resolução; para o domínio 3, SI1 e SI2 melhoraram a representação da precipitação.

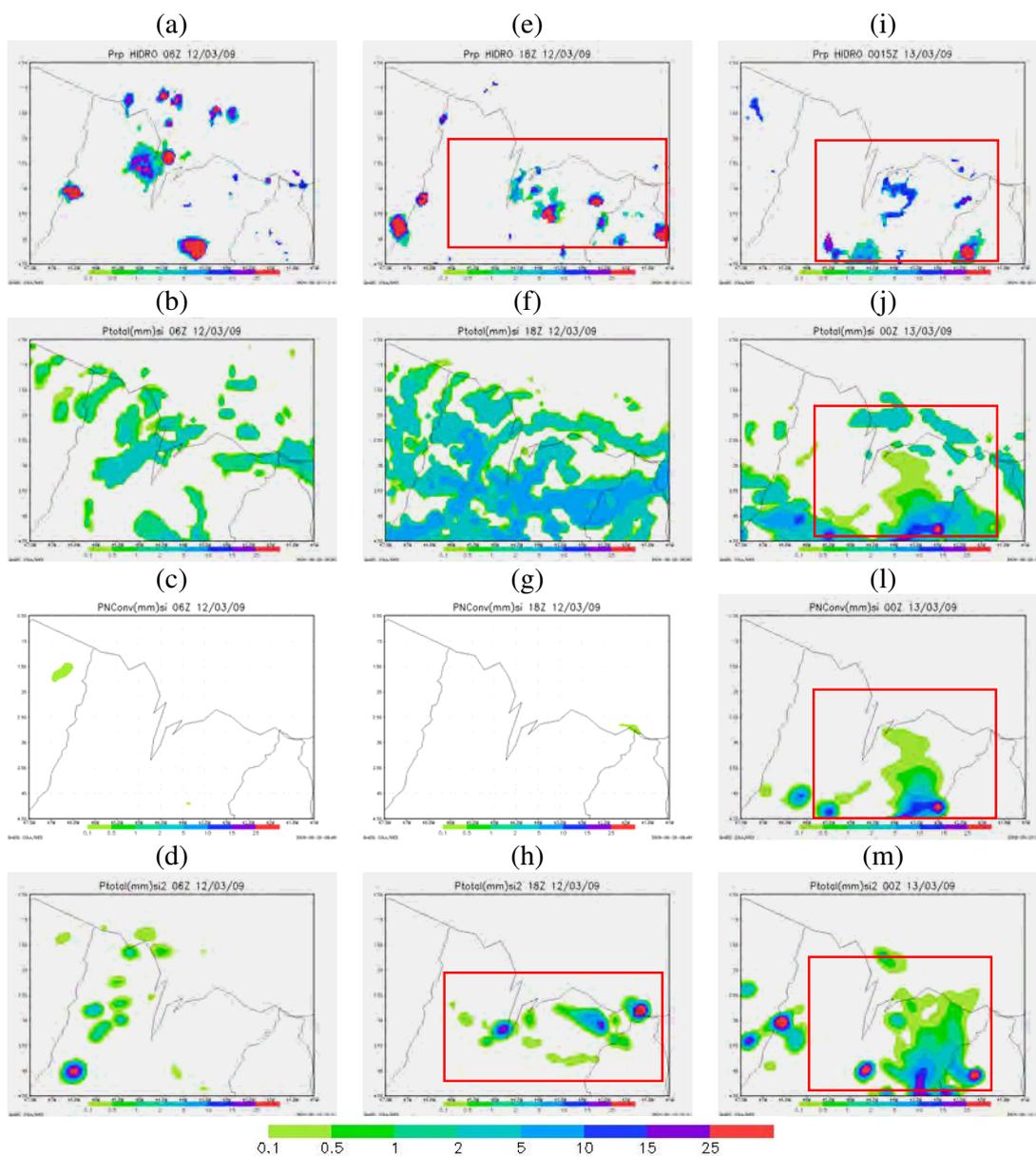


Figura 6.16 - Campos de precipitação estimada pelo modelo Hidroestimador (“a”, “e” e “i”) e simulada no domínio de resolução horizontal 09 km para o dia 12 e 13/03/09, em mm/h. As colunas da esquerda para a direita referem-se, cada uma, aos horários das 06, 18 e 00UTC (dia 13), nesta ordem. Os campos “b”, “f”, e “j” referem-se a simulações SI. Os campos “c”, “g” e “l” referem-se a simulações SI PNC. Os campos “d”, “h” e “m” referem-se a simulações SI2. Os retângulos delimitam as áreas utilizadas para análise.

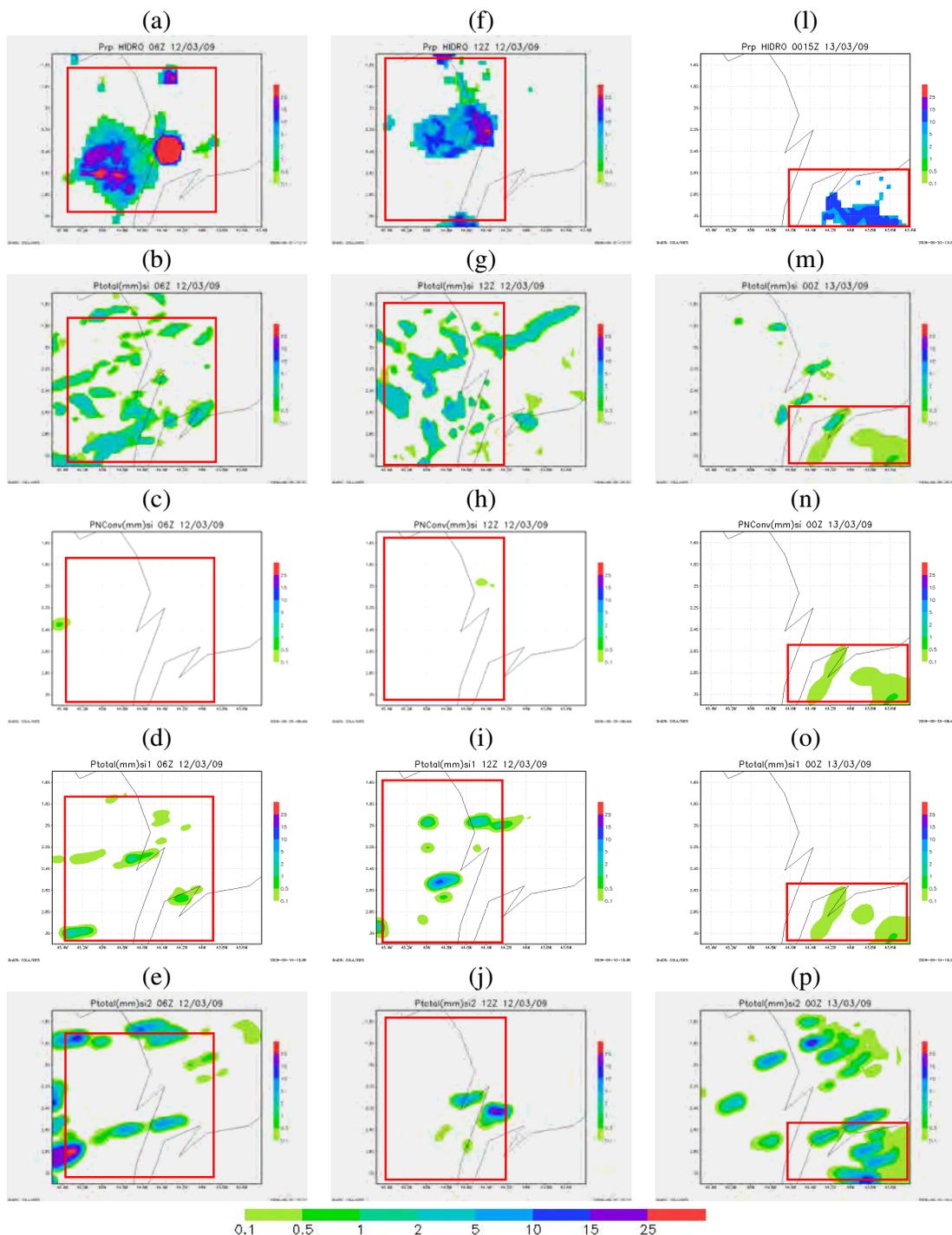


Figura 6.17 - Campos de precipitação estimada pelo Hidroestimador (“a”, “f” e “l”) e simulada no domínio de resolução horizontal 03 km para o dia 12 e 13/03/09, em mm/h. As colunas da esquerda para a direita referem-se, cada uma, aos horários das 06, 12 e 00UTC (dia 13), nesta ordem. Os campos “b”, “g”, e “m” referem-se a simulações SI. Os campos “c”, “h” e “n” referem-se a simulações SI PNC. Os campos “d”, “i” e “o” referem-se a simulações SI1. Os campos “e”, “j” e “p” referem-se a simulações SI2. Os retângulos delimitam as áreas utilizadas para análise.

6.1.3.4 Eventos de precipitação ocorridos no dia 26/03/09

As séries de precipitação para o domínio 3 referentes às simulações do Grupo 2 (SI1 e SI2) não trouxeram melhorias quando comparadas com a simulação SI, a qual também não retrata as séries de precipitação observada (Figura 6.18). Quanto aos valores totais simulados para este domínio, a SI2 gerou apenas 0,4 mm de precipitação não-convectiva na região do CLA contra nenhuma para SI1 e 1,8 mm de precipitação total (neste caso, apenas convectiva) obtidos pela SI. Quanto ao domínio 2, a simulação SI2 não foi capaz de gerar precipitação para a região do CLA (SI havia simulado 9,5 mm). No que diz respeito à série temporal e magnitude da precipitação, pode-se dizer que tanto SI1 quanto SI2 obtiveram resultados piores que os anteriores (obtidos por SI), especialmente para o domínio 2.

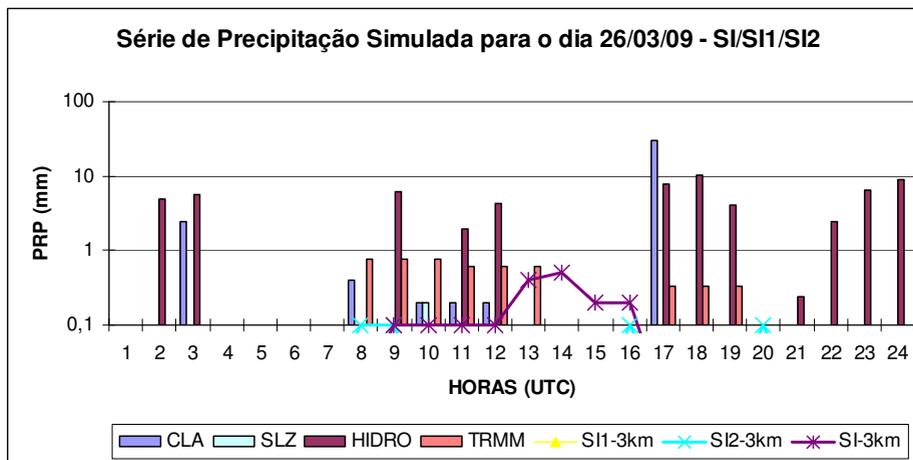


Figura 6.18 - Comparação entre os valores horários (UTC) de precipitação para a região do CLA para o dia 26/03/09. As barras referem-se aos valores de precipitação registrada no CLA e em SLZ, de precipitação média estimada pelo Hidroestimador (HIDRO) e pelo satélite TRMM (TRMM). As linhas referem-se aos valores médios obtidos no domínio de 3km com as simulações SI, SI1 e SI2. Precipitação (mm/h) em escala logarítmica.

Para o domínio 2, embora a SI apresente erros de posicionamento e evolução temporal das áreas de precipitação, esta simulação representou mais adequadamente tais áreas quando comparadas com a simulação SI2 (Figura 6.19). Esta última, por sua vez, não ou muito pouco localizou chuva na extensão deste domínio, exceção feita para o horário das 00 UTC do dia 27. Aliás, neste horário, houve a melhor representação feita por parte de SI2, quando simulou precipitação numa região deslocada mais ao sul quando comparada com o observado. De fato, para os horários analisados, as áreas de chuva

mais próximas ao CLA, especialmente para as 12 e 15 UTC (Figura 6.19a e 6.19e) foram mais bem localizadas em SI (Figura 6.19b e 6.19f). Ficou evidente, neste caso, que somente a obtenção de precipitação não-convectiva (ou o emprego de apenas esquemas explícitos) não foi suficiente para simular os campos de precipitação observada para o domínio 2, tanto em SI1 quanto em SI2, sendo necessário considerar a precipitação oriunda do esquema implícito. A precipitação não-convectiva em SI (SIPNC, Figuras 6.19c, 6.19g e 6.19l) e SI2 (Figuras 6.19d, 6.19h e 6.19m) apresentam erros de posicionamento e principalmente de evolução temporal das áreas de chuva. Nota-se que, para um mesmo dia ou duração de um evento de chuva, o uso de somente esquemas explícitos apresenta bons (00 UTC) e maus resultados (p. ex. 12 e 15 UTC).

Para o domínio 3, as áreas de chuva não foram bem simuladas tanto no posicionamento quanto na evolução temporal, em todas as simulações (Figura 6.20). Ao contrário do que ocorreu no domínio 2, desta vez a SI não apresentou boas representações. A simulação SI1, para os três horários analisados, gerou os piores resultados. Aparentemente, SI2 corrige alguns erros verificados em SI1 (Figura 6.20j) onde áreas de chuva observadas aproximadamente a leste do CLA (Figura 6.20f) são acertadamente simuladas. Também para este domínio, nenhuma simulação foi capaz de localizar a área de precipitação que se observa sobre o CLA (Figura 6.20l).

Para este caso, o uso de somente esquemas de microfísica (Simple Ice) nas grades de resolução horizontal 9 e 3 km não trouxe melhores resultados na representação das áreas de precipitação.

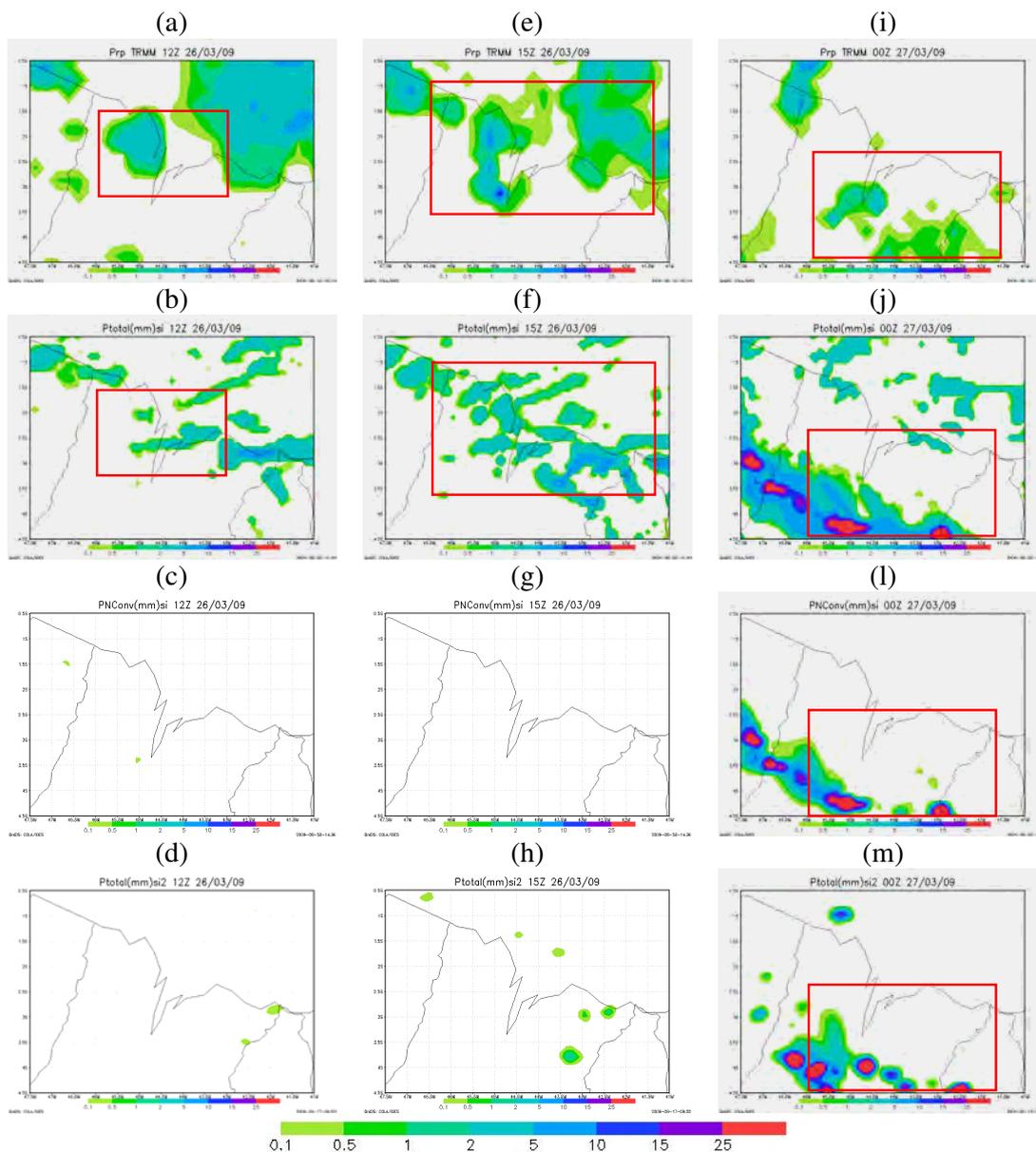


Figura 6.19 - Campos de precipitação estimada pelo modelo TRMM (“a”, “e” e “i”) e simulada no domínio de resolução horizontal 09 km para o dia 26 e 27/03/09, em mm/h. As colunas da esquerda para a direita referem-se, cada uma, aos horários das 12, 15 e 00 UTC (dia 27), nesta ordem. Os campos “b”, “f”, e “j” referem-se a simulações SI. Os campos “c”, “g” e “l” referem-se a simulações SI PNC. Os campos “d”, “h” e “m” referem-se a simulações SI2. Os retângulos delimitam as áreas utilizadas para análise.

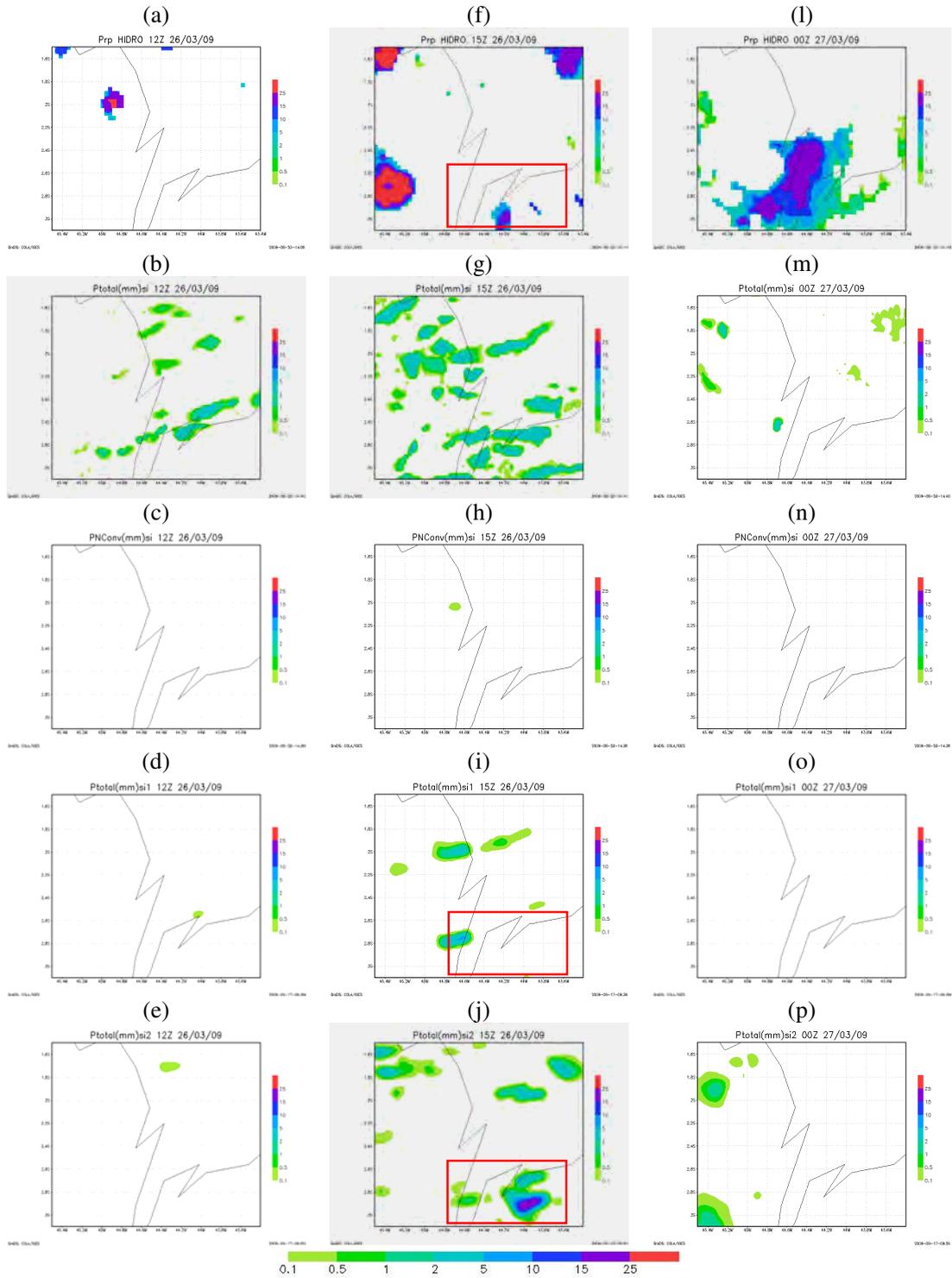


Figura 6.20 - Campos de precipitação estimada pelo Hidroestimador (“a”, “f” e “l”) e simulada no domínio de resolução horizontal 03 km para o dia 26 e 27/03/09, em mm/h. As colunas da esquerda para a direita referem-se, cada uma, aos horários das 12, 15 e 00 UTC (dia 27), nesta ordem. Os campos “b”, “g”, e “m” referem-se a simulações SI. Os campos “c”, “h” e “n” referem-se a simulações SI PNC. Os campos “d”, “i” e “o” referem-se a simulações SI1. Os campos “e”, “j” e “p” referem-se a simulações SI2. Retângulos delimitam as áreas analisadas.

6.1.4 Síntese dos resultados das simulações do Grupo 2

1. Sobre a evolução temporal das formações de precipitação que se observaram sobre a região do CLA, é possível afirmar que as simulações do Grupo 2 apresentaram o mesmo comportamento verificado nas simulações do Grupo 1, destacando-se pequenas diferenças no início e fim do período de simulação analisado. Ressalta-se que as maiores discrepâncias referem-se ao posicionamento e intensidade das regiões de chuva.

2. Quanto aos aspectos morfológicos da precipitação simulada, observa-se que enquanto a chuva gerada pelos esquemas implícitos (convectiva) é menos intensa em sua magnitude e cobre áreas maiores, a precipitação chamada de não-convectiva (produzida pelos esquemas de microfísica) é mais intensa e mais concentrada no espaço. Esse aspecto é a principal diferença que se observa entre as simulações que empregam somente esquemas explícitos e aquelas que se valem de esquemas implícitos e explícitos.

3. Por meio da análise dos campos de precipitação obtidos no domínio 2, pode-se dizer que não se obteve resultados expressivos com o emprego de somente esquema explícito nesta resolução.

4. Contudo, essa conclusão não se aplica ao domínio 3, nos quais se obteve melhores representações com as simulações que empregaram somente esquemas explícitos nos domínios de 9 e 3 km de resolução horizontal (SI2, Grupo 2).

5. Em resumo, quando se pretende focar apenas no domínio 3, pode-se afirmar que são obtidos melhores resultados quando se aplicam somente esquemas explícitos nos domínios de 9 e 3 km de resolução horizontal. Por outro lado, quando se foca o domínio 2, a não utilização de esquemas implícitos não é garantia de melhores resultados (esperado, por se tratar de um espaçamento de grade para o qual não está estabelecido a relação mais adequada quanto ao uso ou não de tais esquemas). Essa incerteza vem ao encontro do propósito a que se refere às simulações realizadas com o MM5 executado no ICEA: testar o uso de somente esquemas explícitos numa grade de resolução horizontal 12 km para um período mais longo.

6.2 Simulações realizadas com o modelo MM5 instalado no ICEA

Nesta seção, faz-se uma análise dos aspectos das simulações realizadas com o modelo MM5 instalado no ICEA.

6.2.1 Precipitação observada na região do NEB durante março de 2009

Com base nas informações do Boletim Climanálise Vol. 24, nº 3, disponibilizado pelo CPTEC/INPE (<http://climanalise.cptec.inpe.br/>), descreve-se, a seguir, uma síntese dos principais aspectos da precipitação que ocorreram na região do NEB durante o mês de março de 2009.

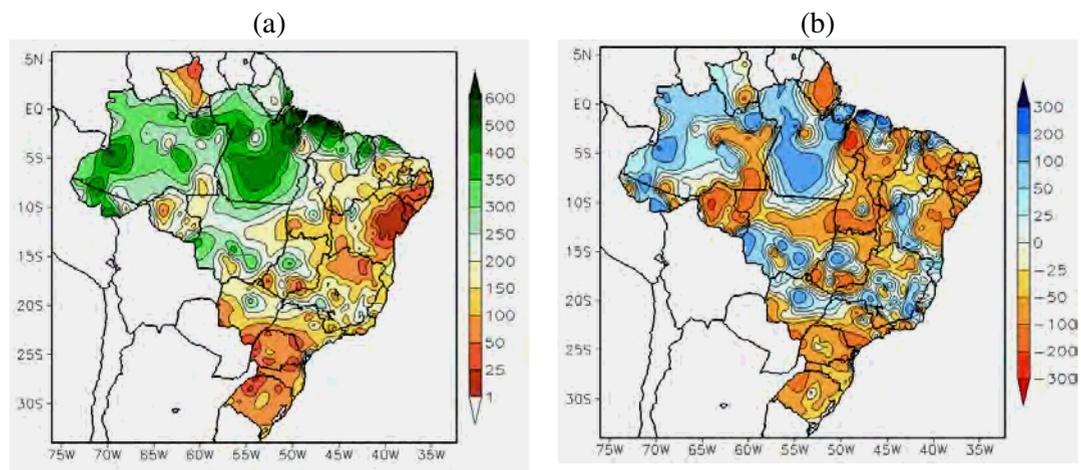


Figura 6.21 - Precipitação (mm) observada em todo o Brasil e os desvios em relação aos valores médios históricos para março de 2009. Fonte: <http://climanalise.cptec.inpe.br/>.

A Figura 6.21 mostra a precipitação observada em todo o Brasil e os desvios em relação aos valores médios históricos. Conforme a Figura 6.21a, os maiores acumulados de precipitação ocorreram nas Regiões Norte e no norte do Nordeste do Brasil. A proximidade da ITCZ junto à costa nordeste da América do Sul e a formação de LI's foram os principais mecanismos que favoreceram as chuvas no nordeste do Pará, incluindo a Ilha de Marajó, e no noroeste do Maranhão, regiões em que os totais mensais excederam 500 mm. As LI's estiveram mais bem caracterizadas em 14 dias do mês, atuando principalmente entre o Amapá e o norte do NEB. Especificamente no interior e na parte leste do Nordeste, a atuação dos VCAN's (em especial entre o período de 18 a 23 de março) inibiu a ocorrência das chuvas, fazendo com que os totais mensais ficassem até 100 mm abaixo da média climatológica (Figura 6.21b).

6.2.2 Análise das simulações

Para a análise dos resultados das simulações, foram obtidos valores médios de precipitação sobre uma área pertencente ao domínio 2. A área se estende de 5° a 7°S de latitude e de 34° a 36°W de longitude (Figura 6.22). Esta área apresenta algumas características similares às da região do CLA, tais como posicionamento geográfico, porção de terra e mar e influência de alguns sistemas meteorológicos como ITCZ e Sistemas Convectivos de Mesoescala, por exemplo.

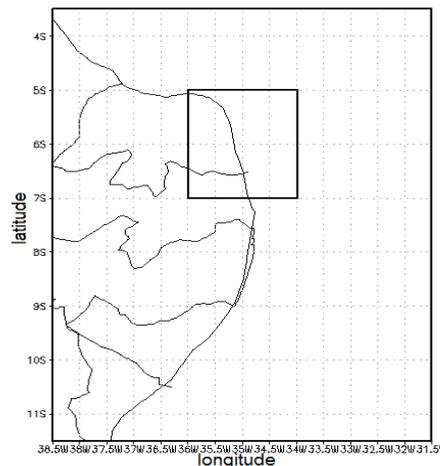


Figura 6.22 - Área delimitada (retângulo no interior do mapa) para obtenção da precipitação total acumulada (mm) pelo satélite TRMM e pelas simulações ICEA1 e ICEA2.

A magnitude e a evolução da curva com os valores diários de precipitação simulada, para a área delimitada, foram comparadas com os valores de precipitação estimados pelo satélite TRMM. De forma geral, os valores do TRMM são coerentes com os representados na Figura 6.21a. Para que se obtivesse o acumulado de 24 h de chuva com os dados estimados pelo TRMM, estes foram multiplicados por um fator de três (pois apresentam resolução temporal de três horas). O posicionamento e a intensidade das regiões de precipitação foram analisados através da comparação entre alguns campos simulados e estimados em toda a extensão dos domínios 1 e 2. A Tabela 6.6 apresenta os totais de precipitação simulada e estimada para o mês de março de 2009.

Tabela 6.6 - Precipitação estimada pelo satélite TRMM, Precipitação convectiva (PC), Não-convectiva (PNC) e Total obtidas pelas simulações ICEA1 e ICEA2 para os domínios de resolução horizontal 36 e 12 km, para o mês de março de 2009. Valores de precipitação em mm.

Espaçamento de grade	ICEA 1			ICEA 2			TRMM
	PC	PNC	Total	PC	PNC	Total	
36 km	65,8	92,0	157,8	-	209,8	209,8	98,9
12 km	66,8	93,6	160,4	-	211,9	211,9	

Pela Tabela 6.6 é possível verificar que o total mensal de precipitação estimada pelo TRMM (98,9 mm) para a área delimitada foi superestimado, em ambas as simulações, para os dois domínios. Essa superestimativa é maior em ICEA2 (211,9 mm contra 160,4 mm de ICEA1). O domínio 2 simula praticamente o mesmo total de chuva que o domínio 1, em ambas as simulações. Além disso, a porção de chuva não-convectiva (PNC) foi maior que a parte convectiva (PC) em ICEA1. Em ICEA2 não houve PC dentro da região que é comum aos domínios 1 e 2. Isto está relacionado ao aninhamento “two way” (bidirecional) usado entre os domínios, pois como as simulações do grupo ICEA2 não utilizaram esquema implícito de convecção em D2, não houve “retroalimentação” de informação referente a este esquema de D2 para D1, fazendo com que o mesmo parecesse estar desligado também em D1. A Figura 6.23 ilustra esta situação (notar o “vazio” de precipitação na área referente ao domínio 2 na Figura 6.23b).

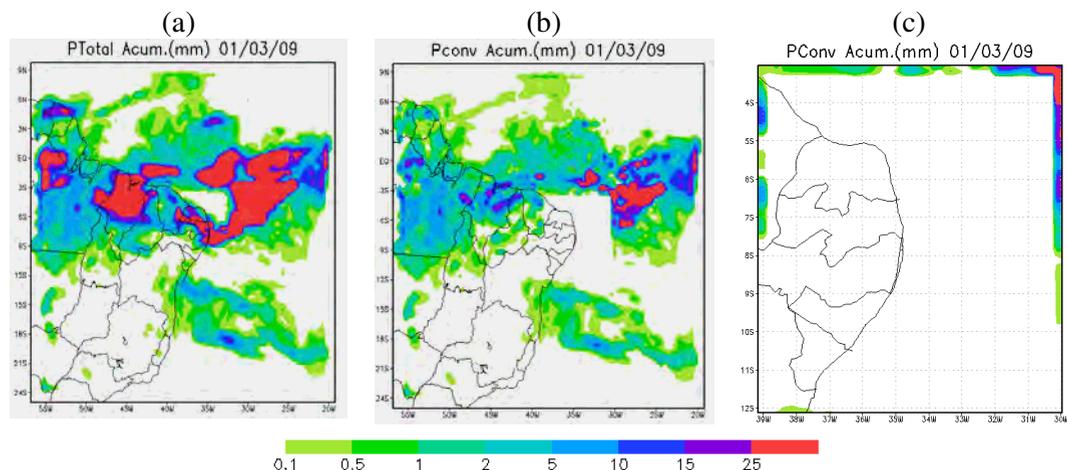


Figura 6.23 - Campos de precipitação acumulada (mm) para o dia 01/03/09 simulada por ICEA2. O painel (a) refere-se à precipitação total (convectiva mais não convectiva) simulada para o domínio 1. (b) refere-se à precipitação convectiva simulada para o domínio 1. O campo (c) refere-se à precipitação convectiva simulada para o domínio 2.

A Figura 6.24 mostra as séries de precipitação obtidas com as simulações ICEA1 e ICEA2, e a série de precipitação estimada pelo TRMM, para a área delimitada (Figura 6.23), para o mês de março. Não foi observada chuva para 08 dias do mês (TRMM). Enquanto ICEA1 simulou precipitação para todos os dias [mesmo produzindo valores baixos (cerca de 0.1 mm) em alguns deles], ICEA2 não previu precipitação em 9 dias. Sob este aspecto, ICEA2 melhor representou o número de ocorrências de dias de chuva para o mês de março sobre a área delimitada.

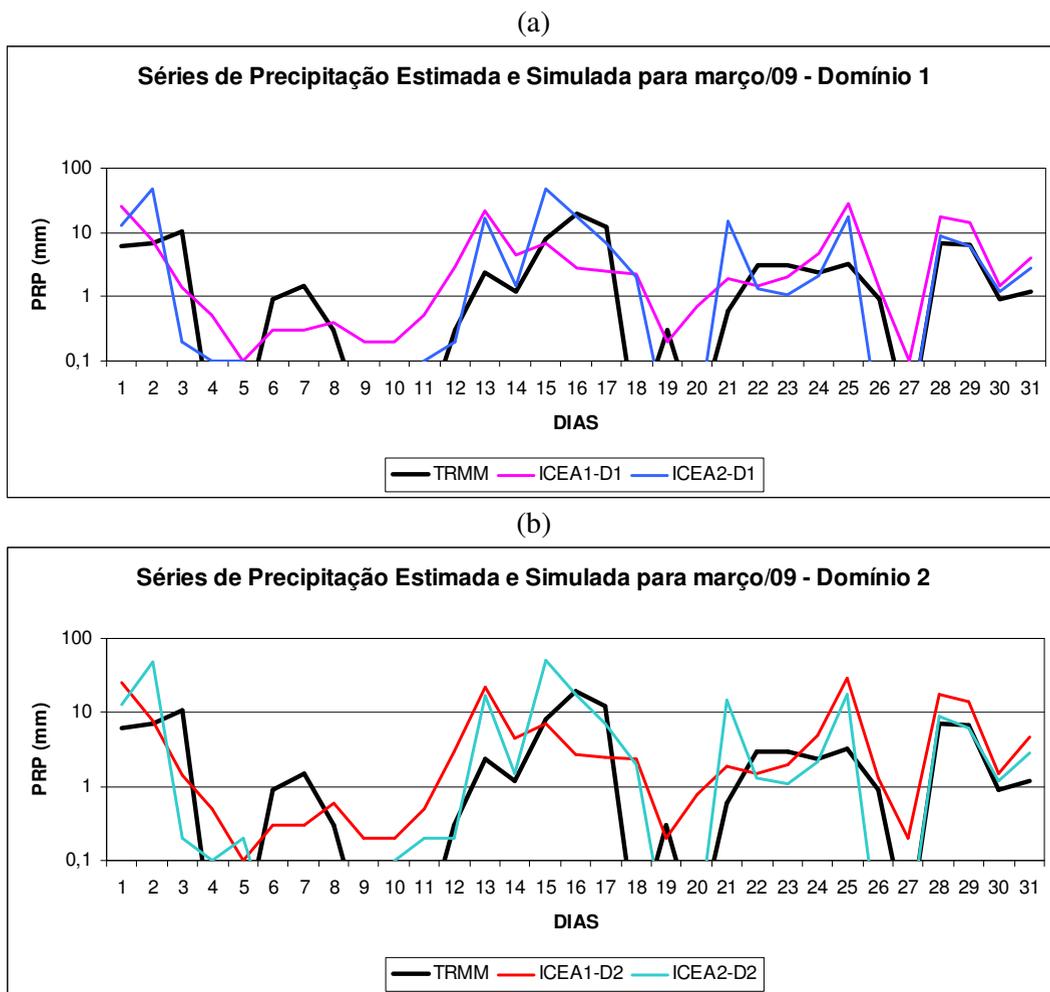


Figura 6.24 - Séries de precipitação acumulada por dia (mm) para o mês de março de 2009. As linhas referem-se aos valores obtidos pelas simulações ICEA1 e ICEA2 nos domínios de resolução horizontal 36 (D1) e 12 km (D2) e estimados pelo satélite TRMM (TRMM) para a área delimitada em D2. O gráfico “a” (“b”) refere-se às simulações para D1 (D2). Precipitação em escala logarítmica.

As curvas de precipitação simulada para os dois domínios são bastante similares entre si e a curva de precipitação estimada, especialmente a partir do início da segunda pênada.

A chuva observada (TRMM) mostra alternância de períodos de chuva e estiagem a intervalos irregulares. Os maiores valores de precipitação ocorreram entre os dias 12 e 17 e houve estiagem nos períodos compreendidos entre os dias 04 e 05 e entre 09 e 11, com dias isolados (18, 20 e 27). Os maiores valores diários de precipitação simulada (tanto ICEA1 quanto ICEA2), na maioria dos casos, coincide com o período de maiores valores observados. Apesar dos erros em magnitude, a evolução diária da série de precipitação estimada foi razoavelmente bem representada pelas séries de chuva simulada, tanto em ICEA1 quanto ICEA2, para os dois domínios.

Para que se pudesse analisar a distribuição espacial e evolução temporal das áreas de precipitação simulada, alguns campos referentes a horários e dias distintos foram selecionados de forma subjetiva. Procurou-se apresentar campos que apresentassem algum aspecto sinótico relevante ou que evidenciasse distintos aspectos entre as simulações ICEA1 e ICEA2.

Conforme se observa nos painéis da Figura 6.25, pequenas diferenças na disposição espacial e intensidade das áreas de precipitação foram verificadas entre os campos simulados (ICEA1 e ICEA2) e estimados (TRMM) para o domínio 1. Para as 03 UTC do dia 02/03/09, as observações indicam áreas de precipitação de pouca intensidade espalhadas sobre o oceano próximo à linha do equador, bem como formações de chuva mais intensa que se estendem desde a costa leste do NEB até o noroeste do Pará, associadas a Linhas de Instabilidade. Tanto ICEA1 quanto ICEA2 representam bem a disposição espacial das áreas de chuva, apesar de apresentarem intensidade mais elevada de algumas formações, especialmente sobre o oceano.

Áreas de precipitação intensa sobre o Maranhão e formações que se estendem sobre o oeste do Pará, em sentido longitudinal, são observados às 06 UTC do dia 14/03/09 (Figura 6.25d). Notam-se, ainda, áreas de precipitação que se alinham no sentido NW/SE entre o litoral de São Paulo e sul de Goiás, conseqüência da atuação pouco intensa de ZCAS sobre a região no período entre 13 e 16 de março (Climanálise Vol. 24, nº 3). Outras áreas mais fragmentadas podem ser observadas sobre o oceano a noroeste do NEB. Ambas as simulações previram corretamente as áreas de chuva sobre o Sudeste e Centro-Oeste do Brasil e também sobre o Maranhão (apesar da pouca intensidade). Contudo não produziram chuva para a região oeste do Pará e

representaram formações de chuva de intensidade maior que o observado (neste caso, principalmente ICEA2) na costa leste do NEB (Figuras 6.25e-f). Novamente, há simulação de núcleos mais intensos de precipitação sobre o oceano.

No campo de precipitação observada (TRMM) para as 18 UTC do dia 30/03/09 (Figura 6.25g), ocorrem áreas de chuva em grande parte do continente, exceto sobre uma região que se estende desde a costa sul da Bahia até o Ceará. Destaca-se, ainda, uma grande banda de precipitação sobre o oceano que se alinha às áreas de chuva sobre o continente, caracterizando a atuação de ZCAS sobre grande parte do Brasil (Climanálise Vol. 24, nº3). Apesar dos erros decorrentes da intensidade de algumas áreas, especialmente sobre o oceano (novamente) e nordeste do Maranhão, a disposição espacial da precipitação foi bem representada, neste domínio, em ambas as simulações (Figuras 6.25h-i).

De forma geral, as simulações representaram satisfatoriamente a disposição espacial das áreas de precipitação para o domínio de resolução horizontal 36 km, situação considerada necessária para uma boa representatividade nas simulações para o domínio 2. Contudo, discordâncias mais evidentes foram notadas nas simulações para este domínio, relacionadas especialmente ao uso ou não de esquemas implícitos neste espaçamento de grade (Figura 6.26).

Os campos de precipitação constantes na Figura 6.27 referem-se aos mesmos horários dos campos da Figura 6.27. Às 03 UTC de 02/03/09 (Figura 6.26a), há áreas de precipitação espalhadas pela costa e interior do continente, relativamente mais concentradas sobre a costa do estado do Rio Grande do Norte (1) e na divisa entre Pernambuco e Alagoas (2). As simulações não representaram a área (1), mas representam satisfatoriamente tanto a disposição espacial quanto a intensidade da precipitação da região (2). Um aspecto negativo presente em ICEA1 e principalmente em ICEA2 é a presença de núcleos de alta intensidade de chuva (não-convectiva) posicionados principalmente sobre o oceano.

Áreas de chuva posicionadas sobre o oceano e costa dos estados do Rio Grande do Norte e Ceará são observadas às 06 UTC de 14/03/09 (Figura 6.26d). Embora ambas as simulações tenham produzido as áreas de chuva observadas sobre o continente, somente

ICEA1 simulou as áreas de chuva observadas sobre o oceano, a nordeste do continente (apesar da intensidade ter sido superestimada). Na região oceânica a leste da costa, pequenas áreas de precipitação são observadas; ICEA1 acertou a intensidade (~ 2 mm/h) mas superestimou as áreas, enquanto ICEA2 acertou a extensão das áreas (apesar do pequeno deslocamento para leste) mas superestimou a intensidade (~25 mm/h).

Às 18 UTC do dia 30/03/09, podem-se observar áreas isoladas e de baixa intensidade de precipitação sobre o oceano (Figura 6.26g). Tanto ICEA1 quanto ICEA2 (Figuras 6.26h-i) representaram satisfatoriamente esse comportamento (áreas isoladas de chuva), com a ressalva de que, novamente, a principal diferença entre as simulações esteja relacionada à intensidade da chuva que simularam.

Conforme analisado nos campos da Figura 6.26, em domínios com espaçamentos de grade menores, o uso conjunto de esquemas implícito e explícito (estratégia híbrida) tende a representar bem a intensidade da chuva, mas a superestimar a extensão das áreas de precipitação; por outro lado, o uso de somente esquemas explícitos tende a limitar realisticamente a extensão das áreas de chuva em “famílias” de núcleos de precipitação, mas os núcleos possuem elevada (e não-realista) intensidade, sobretudo em regiões oceânicas.

Em geral, ambas as simulações foram capazes de representar a disposição espacial das áreas de chuva observadas. Assim, não se pode afirmar que uma simulação obteve resultados expressivamente superiores a outra, mas que os aspectos da precipitação simulada com o modelo MM5 são sensíveis ao uso de somente esquemas de convecção explícita para espaçamentos de grade menores (neste caso 12 km).

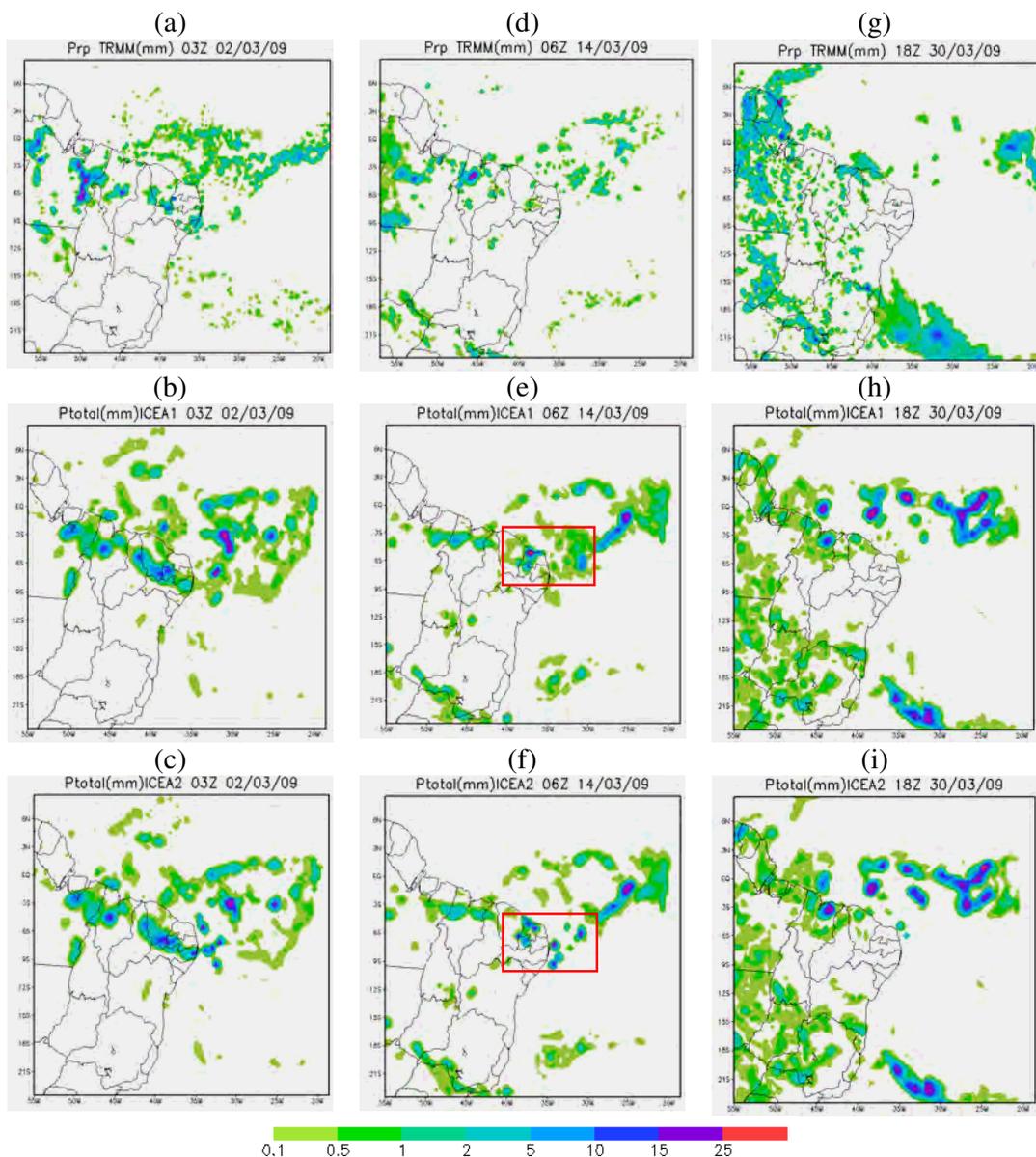


Figura 6.25 - Campos de precipitação estimada pelo satélite TRMM (“a”, “d” e “g”) e simulada no domínio de resolução horizontal 36 km, em mm/h. As colunas da esquerda para a direita referem-se, cada uma, aos horários das 03UTC do dia 02/03/09, 06UTC do dia 14/03/09 e 18UTC do dia 30/03/09, nesta ordem. Os campos “b”, “e”, e “h” referem-se às simulações ICEA1. Os campos “c”, “f” e “i” referem-se às simulações ICEA2. Os retângulos delimitam as áreas utilizadas para análise.

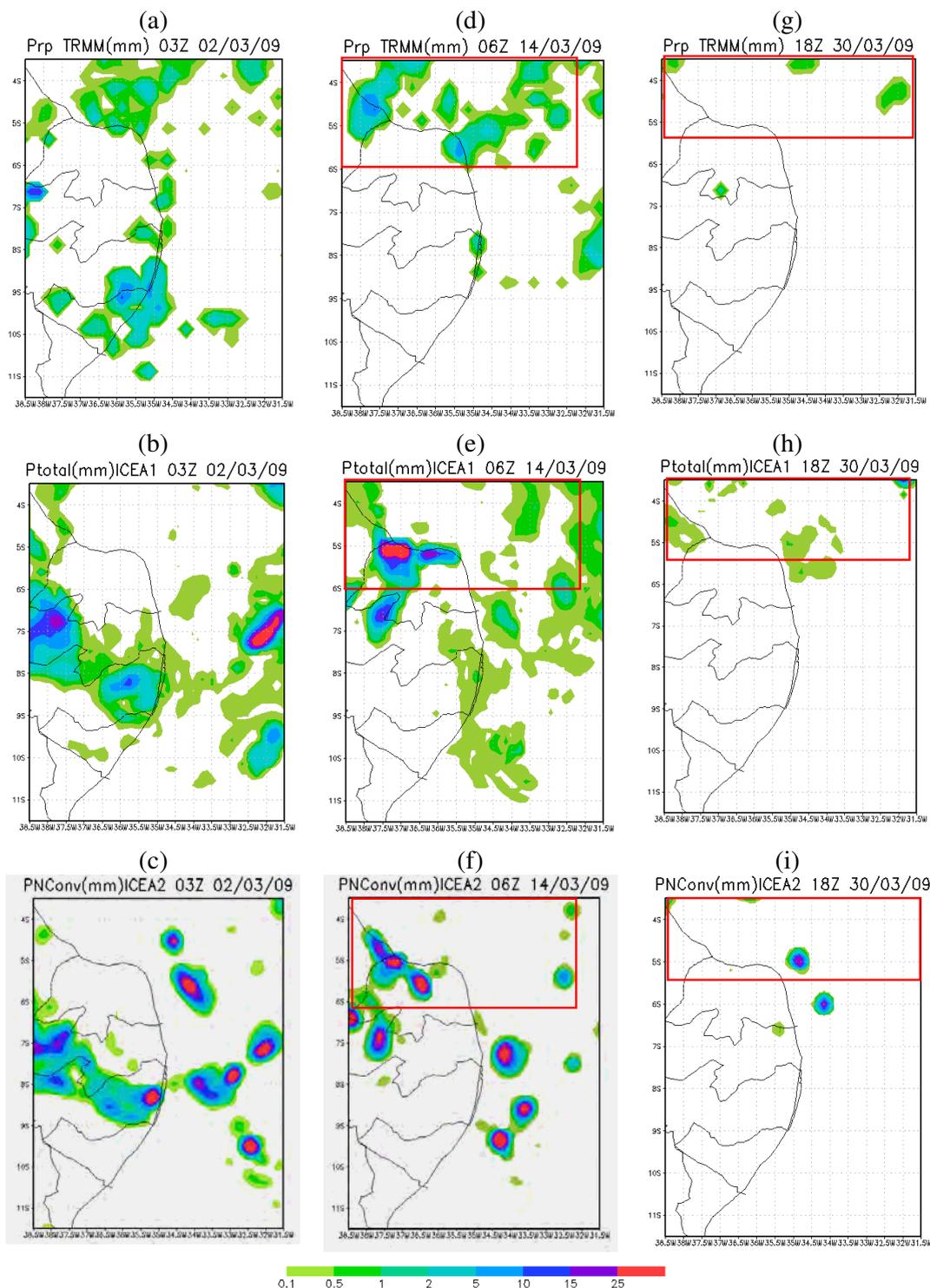


Figura 6.26 - Campos de precipitação estimada pelo satélite TRMM (“a”, “d” e “g”) e simulada no domínio de resolução horizontal 12 km, em mm/h. As colunas da esquerda para a direita referem-se, cada uma, aos horários das 03UTC do dia 02/03/09, 06UTC do dia 14/03/09 e 18UTC do dia 30/03/09, nesta ordem. Os campos “b”, “e”, e “h” referem-se às simulações ICEA1. Os campos “c”, “f” e “i” referem-se às simulações ICEA2. Retângulos delimitam as áreas analisadas.

6.2.3 Síntese dos resultados das simulações realizadas no ICEA

1. Houve similaridade entre as séries de precipitação simulada para os dois domínios e a curva de precipitação estimada, embora o total mensal de precipitação acumulada para a região delimitada para análise é superestimada em ambas as simulações.
2. Em ICEA1, houve maior produção de precipitação não-convectiva. Em ICEA2, não foi possível obter chuva de origem convectiva na área referente ao domínio 2 devido ao método de aninhamento usado entre os domínios nas simulações (“two way”).
3. Pequenas diferenças na disposição espacial e intensidade das áreas de precipitação foram verificadas entre os campos simulados (ICEA1 e ICEA2) e estimados (TRMM) para o domínio 1.
4. As diferenças entre as simulações tornam-se mais evidentes entre os campos simulados para o domínio 2. Apesar de ambas as simulações apresentarem erros de posicionamento das áreas de precipitação, a principal diferença entre o uso de somente esquemas explícitos e uso de aproximação híbrida está relacionada à intensidade da precipitação e à extensão das áreas de precipitação.
5. Em domínios com espaçamentos de grade menores, o uso conjunto de esquemas implícito e explícito tende a representar bem a intensidade da chuva, mas a superestimar a extensão das áreas de precipitação; por outro lado, o uso de somente esquemas explícitos tende a limitar realisticamente a extensão das áreas de chuva em “famílias” de núcleos de precipitação, mas os núcleos possuem elevada (e não-realista) intensidade, sobretudo em regiões oceânicas.
6. Apesar de verificada sensibilidade das simulações ao uso de somente esquemas explícitos em espaçamentos de grade menores, as diferenças observadas na disposição espacial e intensidade das áreas de precipitação simulada não permitiram apontar superioridade representativa dos resultados de uma simulação sobre a outra.

7 CONCLUSÕES

Eventos de precipitação ocorridos sobre a região do Centro de Lançamento de Alcântara (CLA) foram simulados com o modelo regional MM5. As simulações tiveram como objetivo verificar se o uso de esquemas de convecção explícita em grades de alta resolução traria ganhos para a previsão quantitativa de precipitação para esta região.

Utilizando grades aninhadas de 27, 9 e 3 km de resolução horizontal, centradas aproximadamente sobre o CLA, quatro diferentes esquemas de convecção explícita (Warm Rain, Simple Ice, Reisner 2 e Schultz) foram utilizados nas simulações, nos três domínios, visando estabelecer que esquema apontaria melhores resultados. Os testes mostraram que, em praticamente todas as simulações, para todos os domínios, ocorre subestimativa da quantidade de precipitação. Outro aspecto observado foi que a evolução temporal e disposição espacial das áreas de precipitação são praticamente insensíveis ao esquema de microfísica usado para o domínio de 27 km de resolução espacial. Contudo a sensibilidade aumenta ao mesmo tempo em que a porção não-convectiva da precipitação aumenta com a diminuição do espaçamento de grade. As simulações confirmaram que o uso de esquemas de microfísica mais complexos em sua formulação (p.ex. Schultz) não garantem melhores simulações de precipitação. Apesar de ter gerado erros significativos, o esquema Simple Ice (mais simples) apresentou melhores representações nas simulações.

Definido o esquema explícito de melhores resultados, os eventos de precipitação foram novamente simulados, com a diferença de que se optou por usar somente esquema explícito (Simple Ice) nos domínios de 9 e 3 km de resolução. O objetivo era avaliar se o modelo é capaz de representar realisticamente a precipitação com o uso de somente esquemas explícitos nas grades de alta resolução. Resultados mostraram que as maiores discrepâncias observadas entre as simulações que usaram esquemas implícitos e explícitos nestes domínios e aquelas que só utilizaram esquemas de microfísica referem-se ao posicionamento e intensidade das regiões de chuva. Pouco se distingue com relação a evolução temporal das áreas de precipitação. Quanto aos aspectos morfológicos da precipitação simulada, observou-se que enquanto a chuva gerada pelos esquemas implícitos (convectiva) é menos intensa em sua magnitude e cobre áreas maiores, a precipitação chamada de não-convectiva (produzida pelos esquemas de

microfísica) é mais intensa e mais concentrada no espaço. Essa é a principal diferença na precipitação simulada pelos esquemas de convecção explícita e implícita. Por meio da análise dos campos de precipitação, pode-se dizer que não se obteve resultados expressivos com o emprego de somente esquema explícito no domínio de 9 km de resolução. Contudo, quanto ao domínio de 3 km de espaçamento de grade, é possível afirmar que o mesmo apresentou melhorias expressivas nas simulações de precipitação quando se empregaram somente esquemas explícitos nos domínios de 9 e 3 km de resolução espacial.

Com o intuito de verificar se o uso de somente esquemas de convecção explícita em grades de menor espaçamento levaria a melhores resultados em previsões de precipitação, considerando um período mais abrangente e o aspecto de aplicabilidade (em ambientes operacionais), simulações para um período de 1 mês foram executadas com uma versão operacional do modelo MM5 instalado no ICEA. Para isso foram utilizados dois domínios aninhados (de resolução espacial 36 e 12 km), centrados aproximadamente sobre a região Nordeste do Brasil. Tanto as simulações que empregaram esquemas implícitos e explícitos quanto àquelas que somente utilizaram esquemas explícitos no domínio de 12 km apresentaram similaridade entre as séries de precipitação simulada para os dois domínios e a curva de precipitação estimada, embora tenham superestimado o total mensal de precipitação acumulada para a região delimitada para análise. Houve maior produção de precipitação não-convectiva nos dois grupos de simulações. Especialmente nas simulações que empregaram somente esquemas de convecção explícita, verificou-se que nenhuma chuva de origem convectiva foi gerada na área delimitada devido à técnica de aninhamento usada entre os domínios nestas simulações (“two way”). As diferenças entre as simulações são mais destacadas entre os campos de chuva simulados para o domínio de 12 km. Apesar de ambas as simulações apresentarem erros de posicionamento das áreas de precipitação, a principal diferença está relacionada à intensidade da precipitação. As simulações que empregaram somente esquemas explícitos em espaçamentos de grades menores produziram núcleos de elevada intensidade de precipitação, sobretudo em regiões oceânicas, enquanto as simulações que utilizaram aproximação híbrida geraram áreas de chuva mais espalhadas pelo domínio, porém com intensidade menor. Por fim, os resultados mostraram que, para este caso, apesar de constatada sensibilidade das simulações ao uso de somente esquemas explícitos em espaçamentos de grade menores,

as diferenças observadas na disposição espacial e intensidade das áreas de precipitação não foram suficientes para que se apontasse superioridade da qualidade dos resultados de uma simulação para com a outra.

Espera-se que o presente trabalho tenha contribuído para a realização de melhores previsões de precipitação para a região do CLA. É importante registrar que os erros apontados nas simulações não devem ser atribuídos apenas ao uso dos esquemas de convecção explícita, pois como se viu, ocorrem erros comuns a todos os esquemas. Tais discrepâncias podem ter relação com o tempo de integração, com a resolução horizontal e vertical dos domínios, com a escala dos sistemas meteorológicos simulados, com as condições iniciais e de contorno empregadas, etc. Apesar do uso de condições iniciais e de contorno de maior resolução espacial, como as utilizadas no modelo empregado no ICEA, deve-se ressaltar que os aspectos morfológicos dos campos de precipitação observada foram adequadamente simulados com o uso de maior resolução das condições iniciais e de fronteira lateral, sugerindo uma tendência para o uso das mesmas em simulações futuras.

Melhorar os próprios esquemas de convecção explícita através de sua relação com as demais parametrizações pode ser um caminho. Como sugestão de trabalhos que possam ser realizados futuramente, indicamos:

- 1) a realização de simulações com o uso de condições iniciais e de contorno oriundas de outras fontes e de maior resolução espacial (p. ex., geradas pelo modelo AVN/NCEP);
- 2) o estudo comparativo de dados de vento obtidos por radar meteorológico com dados gerados pelo modelo MM5 em simulações de precipitação, visando analisar a relação da representatividade do vento com os esquemas de convecção implícita; e
- 3) a busca de um conhecimento mais aprofundado da elaboração dos esquemas de convecção explícita, pois geralmente estes são formulados com base nas condições e nos sistemas meteorológicos que atuam em regiões diferentes da região do CLA, podendo assim se constituir numa fonte de erros.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BARROS, S. S. **Precipitação no Centro de Lançamento de Alcântara: aspectos observacionais e de modelagem.** 2008. 112 p. (INPE-15319-TDI/1362). Dissertação (Mestrado em Meteorologia) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos. 2008. Disponível em: <<http://urlib.net/sid.inpe.br/mtc-m18@80/2008/07.11.13.43>>. Acesso em: 09 abr. 2010.
- BÉLAIR, S.; MAILHOT, J. Impact of resolution on the numerical simulation of a midlatitude squall-line: implicit versus explicit condensation. **Monthly Weather Review**, v. 129, n. 120, p. 2362-2376, 2001.
- BONNER, W. D. Climatology of de low jet. **Monthly Weather Review**, v. 96, n.12, p. 833-850, 1968a.
- CANDIDO, L. A. **Impacto da condição inicial de água no solo na previsão de verão da América do Sul.** 2002. 224 p. (INPE-10477-TDI/931). Tese (Doutorado em Meteorologia) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos. 2002. Disponível em: <<http://urlib.net/sid.inpe.br/jeferson/2004/04.20.10.28>>. Acesso em: 04 jun. 2010.
- CARTER, D. J. **Verification of MM5 cloud microphysics schemes for East Asia.** 77p. Dissertação (Mestrado em Ciências). Department of the Air Force, USAF, Ohio. 2002.
- CAVALCANTI, I. F. A. **Um estudo sobre interações entre sistemas de circulação de escala sinótica e circulações locais.** 1982. 133 p. (INPE-2494-TDL/097). Dissertação de Mestrado - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos. 1982. Disponível em: <<http://urlib.net/sid.inpe.br/MTC-m13@80/2005/08.24.13.44>>. Acesso em: 09 abr. 2010.
- CHATTERJEE, P.; PRADHAN, D.; DE, U. K. Simulation of hailstorm event using mesoscale model MM5 with modified cloud microphysics scheme. **Ann Geophys**, v. 26, p. 3545-3555, 2008.
- COLLE, B. A.; MASS, C. F.; WESTRICK, K. J. MM5 Precipitation verification over the Pacific Northwest during the 1997-1999 cool seasons. **Weather and Forecasting**, v. 15, p. 730-744, 2000.
- COLLE, B. A.; MASS, C. F. The 5-9 february 1996 flooding event over the Pacific Northwest: sensitivity studies and evaluation of the MM5 precipitation forecasts. **Monthly Weather Review**, v. 128, p. 593-617, 2000.
- COLLE, B. A.; OLSON, J. B.; TONGUE, J. S. Multiseason verification of the MM5. Part I: comparison with the ETA model over the Central and Eastern United States and impact of MM5 resolution. **Weather and Forecasting**, v. 18, p. 431-457, 2003.
- COLLE, B. A.; OLSON, J. B.; TONGUE, J. S. Multiseason verification of the MM5. Part II: Evaluation of high-resolution precipitation forecasts over Northeastern United States. **Weather and Forecasting**, v. 18, p. 458-479, 2003.

CORRÊA, C. S. **Estudo estatístico da ocorrência de jatos no perfil vertical do vento na baixa atmosfera e a sua relação com eventos de intensa precipitação pluvial no Rio Grande do Sul.** 157p. Tese de Doutorado (Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 2005.

CRAM, J. M.; PIELKE, R. A.; COTTON, W. R. Numerical simulation and analysis of a prefrontal squall line. Part II: Propagation of the squall line as an internal gravity wave. **Journal of the Atmospheric Sciences**, v. 49, p. 209-225, 1992.

DE SÁ, R. V. **Impacto da temperatura da superfície do mar na precipitação modelada do município do Rio de Janeiro.** 55p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. 2005.

DUDHIA, J. Numerical study of convection observed during the winter monsoon experiment using a mesoscale two-dimensional model. **Journal of the Atmospheric Sciences**, v. 46, n.20, p. 3077-3107, 1989.

Enterprise Electronics Corporation (EEC). **DWSR-2001X-SDP Doppler Weather Surveillance Radar Technical Description.** Alabama, US, 2006.

FEINGOLD, G.; WALKO, R. L.; STEVENS, B.; COTTON, W. R. Simulations of marine stratocumulus using a new microphysical parameterization scheme. **Atmospheric Research**, v. 47, p. 505-528, 1998.

FERNANDEZ, J.; MONTAVEZ, J. P.; SAENZ, J.; GONZALEZ-ROUCO, J. F.; ZORITA, E. Sensitivity of the MM5 mesoscale model to physical parameterizations for regional climate studies: Annual cycle. **Journal of Geophysical Research**, v. 112, 2007.

FOVELL, R. G.; SU, H. Impact of cloud microphysics on hurricane track forecasts. **Geophysical Research Letters**, v. 34, p. 1-5, 2007.

GASIEWSKI, A. J.; JACKSON, G. M. S.; WANG, J. R. Influence of microphysical cloud parameterizations on microwave brightness temperatures. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 40, n. 1, p. 120-121, 2002.

GOMES, J. L.; CHOU, S. C. **Controle sobre a partição da precipitação implícita e explícita do modelo ETA em função da resolução horizontal.** Estudo de caso. Divisão de Ciências Meteorológicas - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos. 2007.

GRELL, G. A.; DUDHIA, J.; STAUFFER, D. R. **A description of the fifth-generation Penn State/NCAR mesoscale model (MM5).** Colorado: NCAR, 1995. 138p. NCAR Technical Note, NCAR/TN 398+STR.

GRUBISIC, V.; VELLORE, R. K.; HUGGINS, A. W. Quantitative precipitation forecasting of wintertime storms in the Sierra Nevada: sensitivity to the microphysical parameterization and horizontal resolution. **Monthly Weather Review**, v. 128, p. 2834-2859, 2005.

HAASE, G. **A physical initialization algorithm for non-hydrostatic weather prediction models using radar derived rain rates.** Bonner Meteorologische Abhandlungen: Asgard Verlag, St. Augustin, Heft 57, 2001. 108 p.

HALLAK, R.; PEREIRA FILHO, A. J.; GANDU, A. W. Simulação numérica do ciclo de vida de uma célula convectiva profunda e a parametrização de microfísica de nuvens de Lin no modelo ARPS. CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 14., 2006, Florianópolis, SC. **Anais...** Rio de Janeiro: SBMet, 2006.

HASS, R.; PEREIRA FILHO, A.; AMBRIZI, T. Previsão de chuva quantitativa com o modelo ARPS: teste de sensibilidade com o esquema de Kain e Fritsch para três eventos de enchente no Sul do Brasil. CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 12., 2002, Foz do Iguaçu, PR. **Anais...** Rio de Janeiro: SBMet, 2002.

HONG, S. Y.; PAN, H. L. Convective trigger function for a mass-flux cumulus parameterization. **Monthly Weather Review**, v. 126, p. 2599-2620, 1998.

HONG, S. Y.; DUDHIA, J.; CHEN, S. -H. A revised approach to ice microphysical processes for the bulk parameterization of cloud and precipitation. **Monthly Weather Review**, v. 132, p. 103-132, 2004.

HSIE, E. -Y.; ANTHES, R. A.; KEYSER, D. Numerical simulation of frontogenesis in a moist atmosphere. **Journal of the Atmospheric Sciences**, v. 41, n. 17, p. 2581-2594, 1984.

KALNAY, E.; KANAMITSU, M.; KISTLER, R.; COLLINS, W.; DEAVEN, D.; GANDIN, L.; IREDELL, M.; SAHA, S.; WHITE, G.; WOOLEN, J.; ZHU, Y.; CHELLIAH, M.; EBISUZAKI, W.; HIGGINS, W.; JANOWIAK, J.; MO, K. C.; ROPELEWSKI, C.; WANG, J.; LEETMA, A.; REYNOLDS, R.; JENNE, R.; JOSEPH, D. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project. **Bulletin of American Meteorology Society**, v. 77, p. 437-471, 1996.

KAIN, J.S. The Kain-Fritsch convective parameterization: an update. **J. Appl. Meteorol.**, v. 43, n.1, p. 170-181, 2004.

KAIN, J. S.; FRITSCH, J.M. A one-dimensional entraining/detraining plume model and its application in convective parameterization. **J. Atmos. Sci.**, v. 47, n. 23, p. 2748-2802, 1990.

Chapter 16 - Convective parameterization for mesoscale models: The Kain-Fritsch Scheme, in meteorological monographs. **Amer. Meteor. Soc.**, v. 24, n. 46, 1993.

KOUSKY, V. E. Diurnal rainfall variation in the Northeast Brazil. **Monthly Weather Review**, v. 108, p. 488-498, 1980.

LIN, Y. - L.; FARLEY, R. D.; ORVILLE, H. D. Bulk parameterization of the snow field in a cloud model. **Journal of Climate and Applied Meteorology**, v. 22, p. 1065-1092, 1983.

LIN, W. S.; SUI, C. H.; BUEH, C.; WANG, A.; FAN, S.; WU, C.; FONG, S.; LI, J.; MENG, J. Numerical comparison study of cloud microphysical parameterization schemes for a moderate snowfall event in North China. **Meteorol Atmos Phys**, v. 95, p. 195-204, 2007.

LIU, C.; MONCRIEFF, M. W. Sensitivity of cloud-resolving simulations of warm-season convection to cloud microphysical parameterizations. **Monthly Weather Review**, v. 135, p. 2854-2868, 1995.

LYNN, B. H.; DUDHIA, J.; KHAIN, A. P.; ROSENFELD, D.; PROKOVSKY, K.; SEIFERT, A. Spectral (Bin) microphysics coupled with a mesoscale model (MM5). Part I: model description and first results. **Monthly Weather Review**, v. 133, p. 44-57, 2005.

LYNN, B. H.; DUDHIA, J.; KHAIN, A. P.; ROSENFELD, D.; PROKOVSKY, K.; SEIFERT, A. Spectral (Bin) microphysics coupled with a mesoscale model (MM5). Part II: Simulation of a CaPE rain event with a squall line. **Monthly Weather Review**, v. 133, p. 59-71, 2005.

MARQUES, R.F.C.; FISCH, G.F. As atividades de meteorologia aeroespacial no Centro Técnico Aeroespacial (CTA). **Boletim da Sociedade Brasileira de Meteorologia**, v. 29, n. 3, p. 21-25, 2005.

MASS, C. F.; COLLE, B. A.; WESTRICK, K. J.; OVENS, D. Does increasing horizontal resolution produce more skillful forecasts? **American Meteorological Society**, p. 407- 430, 2002.

MCBRIDE, J. L.; EBERT, E. E. Verification of quantitative precipitation forecasts from operational numerical weather prediction models over Austrália. **Weather and Forecasting**, v. 15, n. 1, p. 103-121, 2000.

MENDES, L. L. **Simulação numérica de evento extremo de chuvas**: um estudo de caso sobre Angra dos Reis - RJ. 2006. 136 p. (INPE-14599-TDI/1181). Dissertação (Mestrado em Meteorologia) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos. 2006. Disponível em: <<http://urlib.net/sid.inpe.br/MTC-m13@80/2006/06.12.14.18>>. Acesso em: 09 abr. 2010.

MLAWER, E. J.; TAUBMAN, S. J.; BROWN, P. D. Clough, radiative transfer for inhomogeneous atmospheres: RRTM, a validated correlated-K model for the long wave. **Journal Geophys. Res.**, v. 102, p. 16663-16682, 1997.

MOLINARI, J.; DUDEK, M. Parameterization of convective precipitation in mesoscale numerical models: a critical review. **Monthly Weather Review**, v. 120, p. 326-344, 1992.

OVTCHINNIKOV, M.; KOGAN, Y. L. An investigation of ice production mechanisms in small cumuliform clouds using a 3D model with explicit microphysics. Part I: model description. **Journal of the Atmospheric Sciences**, v. 57, n. 18, p. 2989-3003, 2000.

OYAMA, M. D. **Instalação do modelo de mesoescala MM5 na ACA/IAE/CTA**. São José dos Campos: Centro Técnico Aeroespacial. Publicação Interna (PI-002). 2003.

PADILHA, C. K. **Estagnação de massa de ar quente e seco sobre a região central do Brasil**. 2005. 143 p. (INPE-14492-TDI/1173). Dissertação (Mestrado em Meteorologia) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos. 2008. Disponível em: <<http://urlib.net/sid.inpe.br/MTC-m13@80/2005/08.18.14.09>>. Acesso em: 09 abr. 2010.

PEREIRA, E.I.; MIRANDA, I.; FISCH, G.F.; MACHADO, L.A.T.; ALVES, M.A.S. **Atlas climatológico do Centro de Lançamento de Alcântara**. São José dos Campos: Centro Técnico Aeroespacial, 2002. Relatório de desenvolvimento, ACA/RT-01/01, GDO-000000/B0047.

PEREIRA NETO, A. V. **Avaliação e ajustes da parametrização de Kain-Fritsch sobre a região do Centro de Lançamento de Alcântara**. 2009. 117 p. (INPE-16650-TDI/1613). Dissertação (Mestrado em Meteorologia) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos. 2010. Disponível em: <<http://urlib.net/sid.inpe.br/mtc-m18@80/2009/11.18.13.31>>. Acesso em: 09 abr. 2010.

PETCH, J.C.; BROWN, A. R.; GRAY, M.E.B. The impact of horizontal resolution on the simulations of convective development over land. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v. 128, p. 2031-2044, 2002.

REISNER, J.; RASMUSSEN, R. J.; BRUINTJES, R. T. Explicit forecasting of supercooled liquid water in winter storms using the MM5 mesoscale model. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v. 124 B, p. 1071-1107, 1998.

SAAD, S. I. **Efeitos da extensão e posição do desmatamento em meso-escala sobre a circulação atmosférica e a chuva na Amazônia**. Dissertação (Mestrado em Meteorologia). Universidade de São Paulo - USP, São Paulo. 2008.

SCHULTZ, P. An explicit cloud physics parameterization for operational numerical weather prediction. **Monthly Weather Review**, v. 123, p. 3331-3343, 1995.

SCOFIELD, R. A. Comments on A quantitative assessment of the NESDIS Auto-Estimador. **Weather Forecasting**, v. 16, p. 277-278, 2001.

SERAFIN, S.; FERRETTI, R. Sensitivity of a mesoscale model to microphysical parameterizations in the MAP SOP events IOP2b and IOP8. **Journal of Climate and Applied Meteorology**, v. 46, p. 1438-1454, 2007.

SEIFERT, A.; WEISMAN, M. A comparison of bulk microphysical schemes for cloud resolving NWP. In: WRF/MM5 User's Workshop, Colorado. 2005.

SILVA, M. P. R.; SANTOS, I. A. Uso do módulo de microfísica do RAMS no estudo da precipitação no Rio de Janeiro. CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 12., 2002, Foz do Iguaçu, PR. **Anais...** Rio de Janeiro: SBMet, 2002.

- SILVA, R. R.; AVISSAR, R. The hydrometeorology of a deforested region of the Amazon Basin. **Journal of Hydrometeorology**, v. 7, p.1028-1042, 2006.
- SONG-YOU, H.; DUDHIA, J.; CHEN, S. H. A revised approach to ice-microphysical process for the bulk parameterization of cloud and precipitation. **Monthly Weather Review**, v. 132, p. 103-120, 2004.
- SOUZA, A. M. L.; CAMPOS, C. R. J.; ROCHA, E. J. P. Estudo observacional da ocorrência de jatos de Baixos Níveis no Litoral Norte do Estado do Pará durante os períodos chuvoso (2002) e seco (2003). **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 21, n. 167, p. 170-179, 2006.
- STEIN, J.; RICHARD, E.; LAFORE, J. P.; PINTY, J. P.; ASECIO, N.; COSMA, S. High-resolution non-hydrostatic simulations of flash-flood episodes with grid-nesting and ice-phase parameterization. **Meteorol. Atmos. Phys.**, v. 72, p. 203-221, 2000.
- STENSRUD, D. 2007. **Parameterization schemes: keys to understanding numerical weather prediction models**. Cambridge: University Press, pp.459 .
- STIVARI, S. M. S. **Estudo da brisa lacustre do Lago de Itaipu**. Tese (Doutorado em Meteorologia). Instituto Astronômico e Geofísico, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1999.
- STRAKA, J. M.; GILMORE, M. S. A multi-moment, multi-hidrometeor, bulk microphysics parameterization scheme. EUROPEAN CONFERENCE ON SEVERE STORMS,4., 2007, Trieste. **Proceedings...** Trieste, Itália: International Centre for Theoretical Physics, 2007.
- TAO, W. -K.; SIMPSON, J. Goddard cumulus ensemble model. Part I: model description. **Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences**, v. 4, p. 35-72, 1993.
- TOMÉ, R. **Previsão do tempo com modelos de mesoscala: casos de estudo com o modelo MM5 nos Açores**. Dissertação (Graduação em Meteorologia). Faculdade de Ciências, Universidade de Lisboa, Lisboa. 2004
- VIZY, E. K.; COOK, K.H. Evaluation of LGM SST reconstructions through their Influence on South American Climate. **J. Geophys. Res.**, v.110, doi:10.1029/2004JD005415, 2005.
- WARNER, T. T.; SU, H. M. Nested-model simulation of moist convection: the impact of coarse-grid parameterized convection on fine-grid resolved convection. **Monthly Weather Review**, v. 128, p. 2211-2230, 2000.
- WEISMAN, M. L.; SCAMAROK, W. C.; KLEMP, J. B. The resolution dependence of explicitly modeled convective systems. **Monthly Weather Review**, v. 125, p. 527-548, 1997.
- WENSHI, L.; SOIKUN, F.; CHISHENG, W.; CHIMENG, K.; ANYU, W.; YAN, Y. A simulating study on resolvable-scale microphysical parameterization in a mesoscale model. **Advances in Atmospheric Sciences**, v. 17, n. 3, p. 487-502, 2000.

WHITEMAN, C. D.; XINDI, B.; ZHONG, S. Low level jet climatology from enhance rawinsonde observations atmosfera a site in the southern great plains. **Journal of Applied Meteorology**, v. 6, n. 10, p. 1363-1376, 1997.

XU, M.; BAO, J. W.; WARNER, T. T.; STENSRUD, D. J. Effect of time step size in MM5 simulations of a mesoscale convective system. **Monthly Weather Review**, v. 129, p. 502-516, 2001.

APÊNDICE A: TESTES DE SENSIBILIDADE DE SIMULAÇÕES DE PRECIPITAÇÃO À RESOLUÇÃO VERTICAL

1 Objetivo

Com o objetivo de verificar a sensibilidade dos resultados das simulações de chuva às mudanças na resolução vertical, simulações adicionais dos eventos de precipitação ocorridos no decorrer do dia 18/07/08 (descritos na Seção 4.1.1) sobre a região do CLA foram realizadas com o modelo MM5 instalado na ACA/IAE. Em cada nova simulação o número de níveis sigma foi alterado com relação ao número de níveis utilizado nas simulações anteriores (38). Espera-se que os processos convectivos relacionados à precipitação possam ser mais bem resolvidos com o aumento do número de níveis, como por exemplo, na baixa atmosfera, onde os efeitos turbulentos associados à camada limite são relevantes e na termodinâmica da coluna atmosférica, ao detalhar os processos de transferência radiativa.

Alguns trabalhos mostram que mudanças na resolução vertical do domínio podem alterar os resultados das simulações de precipitação e de outras variáveis. Utilizando o modelo MM5, Colle e Mass (2000) fizeram simulações de 24 h de um evento de forte chuva ocorrido entre os dias 6 e 7 de fevereiro de 1996 sobre as montanhas Cascades, nos Estados Unidos. Para tal usaram grades aninhadas de 36, 12 e 4 km de resolução horizontal. Uma parte dos testes realizados se propunha a explorar os efeitos das mudanças na resolução vertical para o domínio de 4 km. Resultados mostraram diferenças na quantidade de chuva prevista a barlavento e sotavento das montanhas. Observou-se que ao aumentar de 29 para 38 este número, a quantidade de precipitação a barlavento aumenta de 10 a 30%; quando a resolução vertical é elevada para 57 níveis, a quantidade de chuva diminui para um valor próximo do obtido com 29 níveis. A sotavento, a quantidade de precipitação varia de 20 a 80% de acordo com a resolução vertical empregada. Os autores atribuíram estas diferenças a variações na formação e advecção de hidrometeoros nos lados da montanha em função do número de níveis na vertical. Por fim concluíram que a simulação que utilizou 38 níveis (número de níveis intermediário) foi a que mais se aproximou do observado.

2 Metodologia

Executaram-se simulações empregando as mesmas configurações descritas na seção 5.1 (domínio, passo de tempo, parametrizações, etc) utilizadas nas simulações do Grupo 1 com o uso do esquema de microfísica Simple Ice e KF2 em todos os domínios. A única diferença, desta vez, restringe-se a alterar a resolução vertical, com a inclusão ou exclusão de níveis sigma. Dessa maneira, 3 rodadas foram executadas, com 23, 57 e 76 níveis na vertical, respectivamente denominadas TN23, TN57 e TN76. Para a análise dos resultados, a mesma metodologia descrita na seção 6 foi usada para comparação entre a precipitação prevista por estas simulações, a simulação que empregou 38 níveis (TN38, considerada a simulação de controle) e a precipitação observada. A Tabela 2.1 mostra os níveis sigma usados em cada uma das simulações.

Tabela 2.1 - Níveis sigma utilizados nas simulações TN23, TN38, TN 57 e TN76

TN23	1.00, 0.98, 0.95, 0.92, 0.89, 0.85, 0.80, 0.75, 0.70, 0.65, 0.60, 0.55, 0.50, 0.45, 0.40, 0.35, 0.30, 0.25, 0.20, 0.15, 0.10, 0.05, 0.0
TN38	1.00, 0.99, 0.98, 0.97, 0.95, 0.93, 0.91, 0.89, 0.87, 0.85, 0.83, 0.81, 0.79, 0.77, 0.75, 0.73, 0.71, 0.69, 0.67, 0.65, 0.62, 0.59, 0.56, 0.53, 0.50, 0.47, 0.44, 0.41, 0.37, 0.33, 0.29, 0.25, 0.21, 0.17, 0.13, 0.09, 0.05, 0.0
TN57	1.000, 0.998, 0.996, 0.994, 0.992, 0.990, 0.987, 0.984, 0.981, 0.978, 0.975, 0.970, 0.965, 0.960, 0.950, 0.940, 0.930, 0.920, 0.910, 0.900, 0.880, 0.860, 0.840, 0.820, 0.800, 0.775, 0.750, 0.725, 0.700, 0.675, 0.650, 0.625, 0.600, 0.575, 0.550, 0.525, 0.500, 0.475, 0.450, 0.425, 0.400, 0.375, 0.350, 0.325, 0.300, 0.275, 0.250, 0.225, 0.200, 0.175, 0.150, 0.125, 0.100, 0.075, 0.050, 0.025, 0.0
TN76	1.000, 0.998, 0.996, 0.994, 0.992, 0.990, 0.987, 0.984, 0.981, 0.978, 0.975, 0.970, 0.965, 0.960, 0.955, 0.950, 0.945, 0.940, 0.935, 0.930, 0.925, 0.920, 0.915, 0.910, 0.905, 0.900, 0.890, 0.880, 0.870, 0.860, 0.850, 0.840, 0.830, 0.820, 0.810, 0.800, 0.780, 0.760, 0.740, 0.720, 0.700, 0.680, 0.660, 0.640, 0.620, 0.600, 0.580, 0.560, 0.540, 0.520, 0.500, 0.480, 0.460, 0.440, 0.420, 0.400, 0.380, 0.360, 0.340, 0.320, 0.300, 0.280, 0.260, 0.240, 0.220, 0.200, 0.180, 0.160, 0.140, 0.120, 0.100, 0.080, 0.060, 0.040, 0.020, 0.0

3 Resultados das simulações

Para este dia, o total de precipitação registrada (estimada) foi de 63,2 mm para o CLA e de 2,8 mm em SLZ (48,1 mm para o HIDRO e 49,4 mm para o TRMM), relacionada à passagem de eventos de convecção noturna (entre 2 e 12 UTC) e diurna (a partir das 15 UTC) (Figura 3.1). A precipitação simulada representada nos gráficos representa a média de uma área que envolve o CLA e São Luís (seção 4.1). Verifica-se uma

similaridade entre as séries de precipitação obtidas pelas 4 simulações (Figura 3.1), especialmente para os domínios de 27 e 9 km de resolução horizontal. Para o domínio de 3 km, a série simulada que mais se aproximou das séries de chuva observada foi a produzida pela simulação TN23, embora a magnitude de chuva simulada em cada hora não tenha sido adequada em todas as rodadas.

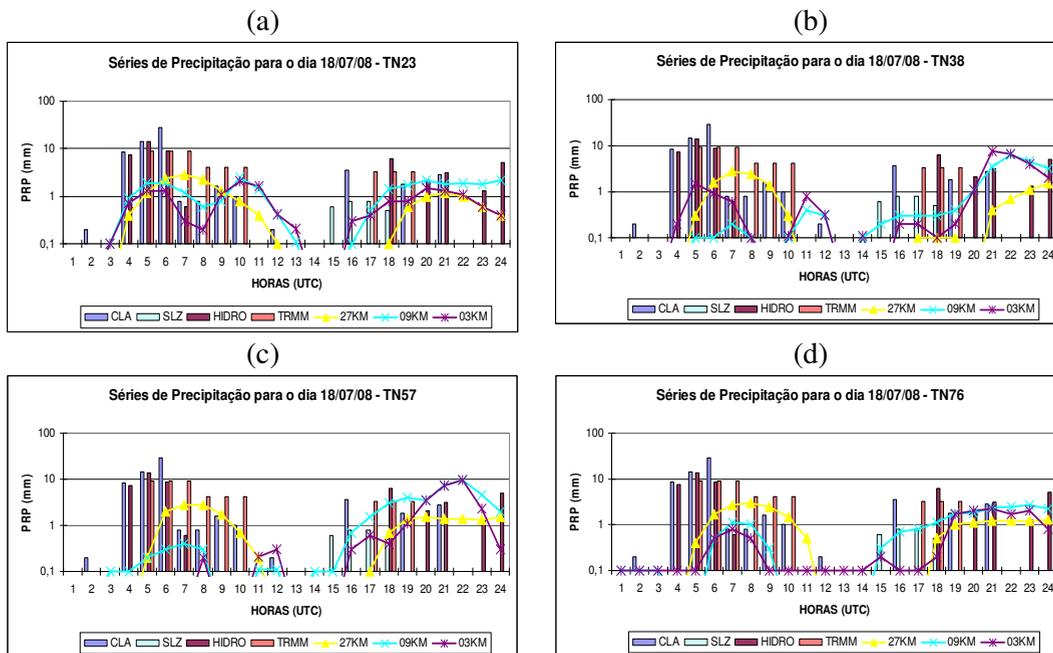


Figura 3.1 - Comparação entre os valores horários (UTC) de precipitação para o dia 18/07/08. As barras referem-se aos valores de precipitação registrada no CLA e em SLZ e de precipitação média estimada pelo Hidroestimador (HIDRO) e pelo satélite TRMM (TRMM). As linhas referem-se aos valores médios simulados nos domínios de 27, 9 e 3 km de resolução. Os gráficos “a”, “b”, “c” e “d” referem-se às simulações TN23, TN38, TN57 e TN76, nesta ordem. Precipitação (mm/h) em escala logarítmica.

Com relação à magnitude dos valores acumulados de chuva, verificaram-se diferenças entre os valores obtidos pelas simulações para todos os domínios (Tabela 3.1). Isso está relacionado às variações de posicionamento e evolução temporal das áreas de precipitação produzidas pelas simulações, mais acentuadas nos domínios de maior resolução horizontal. Isso ilustra como as mudanças na resolução vertical dos domínios alteram os aspectos da precipitação simulada. Novamente, verifica-se que a quantidade de precipitação não-convectiva aumenta com o aumento da resolução horizontal das grades (esperado). Nas simulações TN38 e TN57 a quantidade de precipitação não-convectiva no domínio 3 foi até mesmo superior à precipitação convectiva. Isso sugere a existência de uma relação entre a resolução vertical e a horizontal do domínio usado

nas simulações que seja mais favorável a formulação dos esquemas explícitos. Em síntese, as simulações que produziram a precipitação diária mais próxima da observada, nos 3 domínios, foram as seguintes: domínio 1: TN57 ou TN76; domínio 2: TN57; domínio 3: TN38 ou TN57.

Tabela 3.1 - Precipitação Convectiva (PC), Não Convectiva (PNC) e Total (TT) Simulada obtida para o dia 18/07/08, para a região do CLA, com as simulações TN23, TN38, TN57 e TN76. Unidade de precipitação: mm/dia.

Precipitação Convectiva, Não Convectiva e Total Simulada (mm/dia)												
Simulações	TN23			TN38			TN57			TN76		
Resolução	PC	PNC	TT	PC	PNC	TT	PC	PNC	TT	PC	PNC	TT
27 km	16.4	0	16.4	12.9	0	12.9	19.6	0	19.6	19.8	0	19.8
09 km	20.3	4.9	25.2	16.5	5.1	21.7	27.1	10.6	37.7	19.1	0.4	19.5
03 km	11.3	5.1	16.4	11.9	14.7	26.6	10.5	15.2	25.7	10.7	3.2	13.9

Não se observaram diferenças quanto à evolução temporal das áreas de chuva entre as quatro simulações. Alguns campos de precipitação simulada foram selecionados para ilustrar diferenças verificadas quanto à disposição espacial e intensidade das áreas de precipitação nos 3 domínios (Figura 3.2). No geral, verificou-se que tais diferenças não são expressivas, especialmente nos domínios de maior espaçamento de grade (27 e 9 km) (Figura 1.2). O padrão espacial das regiões de chuva é praticamente o mesmo em todas as simulações (Figuras 3.2d, 3.2g, 3.2j e 3.2n), ressaltando-se pequenos detalhes que as diferenciam. Uma pequena região de precipitação mais intensa que se observa a noroeste do CLA é (erroneamente) simulada por todas as simulações, destacando apenas uma diferença de magnitude. Esta situação é novamente retratada no domínio de 9 km (Figuras 3.2e, 3.2h, 3.2l e 3.2o), onde são claras as variações no posicionamento dos núcleos de máxima precipitação sobre a região do CLA. Contudo estas variações não devem ser consideradas expressivas, pois novamente, o padrão espacial da precipitação é bastante similar entre as simulações.

Devido à maior resolução do domínio 3 (3 km), a área de chuva sobre o CLA apresenta aspectos mais detalhados e diferenciados entre as quatro simulações. Nota-se em todas as rodadas, uma área de chuva se estendendo (erroneamente) ao norte do CLA, desde o oceano até o continente, que não aparece no campo de chuva observado (TRMM) para o horário das 21 UTC. O incremento no número de níveis na vertical testado nestas simulações parece não ter acarretado diferenças nos resultados das previsões.

Para este caso, pode-se dizer que a resposta do modelo é pouco sensível para mudanças na resolução vertical, pois, no geral, verificou-se que as diferenças observadas entre as simulações são pouco expressivas, mesmo para menores espaçamentos de grade.

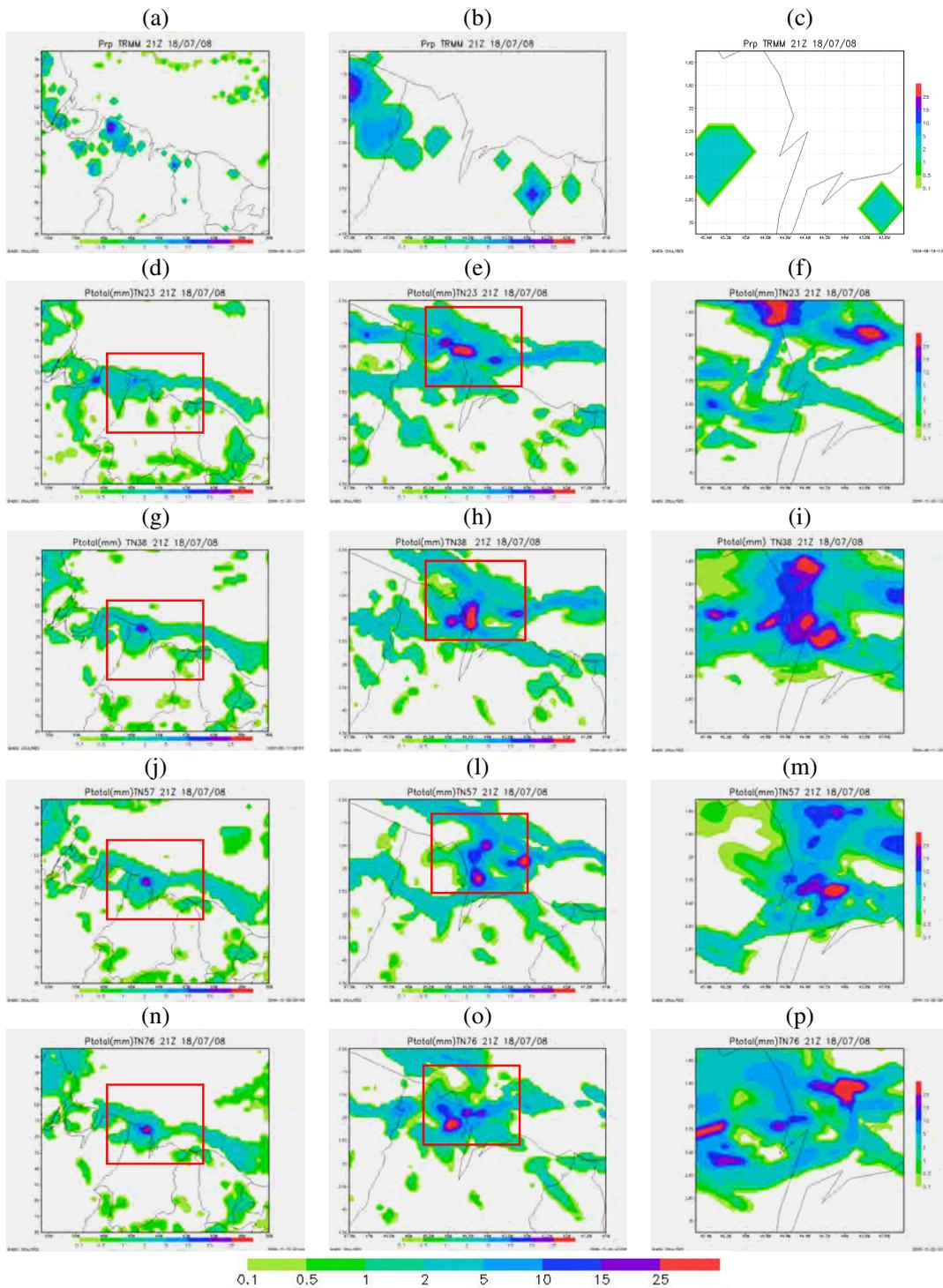


Figura 3.2 - Campos de precipitação simulada (de “d” a “p”, mm) e de precipitação estimada pelo TRMM (“a”, “b” e “c”) para as 21UTC de 18/07/08. Cada uma das colunas, a contar da esquerda, refere-se a campos (exceto campos “a”, “b” e “c”) cujos domínios são de 27, 9 e 3 km de espaçamento de grade, respectivamente. Cada uma das linhas, a contar da segunda na descendente, refere-se às simulações TN23, TN38, TN57 e TN76, nesta ordem. Os retângulos delimitam as áreas utilizadas para análise.