



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA, INOVAÇÕES E COMUNICAÇÕES
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

sid.inpe.br/mtc-m21b/2017/07.24.17.54-TDI

IMPACTO DAS PARAMETRIZAÇÕES DE MICROFÍSICA NA PREVISÃO DE PRECIPITAÇÃO UTILIZANDO ASSIMILAÇÃO DE DADOS DE RADAR

Mario Paulo Alves Júnior

Dissertação de Mestrado do
Curso de Pós-Graduação em
Meteorologia, orientada pelos Drs.
Eder Paulo Vendrasco, e José
Antonio Aravéquia, aprovada em
15 de agosto de 2017.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34P/3PB9P3L>>

INPE
São José dos Campos
2017

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

E-mail: pubtc@inpe.br

**COMISSÃO DO CONSELHO DE EDITORAÇÃO E PRESERVAÇÃO
DA PRODUÇÃO INTELECTUAL DO INPE (DE/DIR-544):****Presidente:**

Maria do Carmo de Andrade Nono - Conselho de Pós-Graduação (CPG)

Membros:

Dr. Plínio Carlos Alvalá - Centro de Ciência do Sistema Terrestre (CST)

Dr. André de Castro Milone - Coordenação de Ciências Espaciais e Atmosféricas
(CEA)

Dra. Carina de Barros Melo - Coordenação de Laboratórios Associados (CTE)

Dr. Evandro Marconi Rocco - Coordenação de Engenharia e Tecnologia Espacial
(ETE)

Dr. Hermann Johann Heinrich Kux - Coordenação de Observação da Terra (OBT)

Dr. Marley Cavalcante de Lima Moscati - Centro de Previsão de Tempo e Estudos
Climáticos (CPT)

Silvia Castro Marcelino - Serviço de Informação e Documentação (SID)

BIBLIOTECA DIGITAL:

Dr. Gerald Jean Francis Banon

Clayton Martins Pereira - Serviço de Informação e Documentação (SID)

REVISÃO E NORMALIZAÇÃO DOCUMENTÁRIA:

Simone Angélica Del Duca Barbedo - Serviço de Informação e Documentação
(SID)

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

EDITORAÇÃO ELETRÔNICA:

Marcelo de Castro Pazos - Serviço de Informação e Documentação (SID)

André Luis Dias Fernandes - Serviço de Informação e Documentação (SID)



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA, INOVAÇÕES E COMUNICAÇÕES
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

sid.inpe.br/mtc-m21b/2017/07.24.17.54-TDI

IMPACTO DAS PARAMETRIZAÇÕES DE MICROFÍSICA NA PREVISÃO DE PRECIPITAÇÃO UTILIZANDO ASSIMILAÇÃO DE DADOS DE RADAR

Mario Paulo Alves Júnior

Dissertação de Mestrado do
Curso de Pós-Graduação em
Meteorologia, orientada pelos Drs.
Eder Paulo Vendrasco, e José
Antonio Aravéquia, aprovada em
15 de agosto de 2017.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34P/3PB9P3L>>

INPE
São José dos Campos
2017

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Alves Junior, Mario Paulo.

A87i Impacto das parametrizações de microfísica na previsão de precipitação utilizando assimilação de dados de radar / Mario Paulo Alves Júnior. – São José dos Campos : INPE, 2017.
xxii + 124 p. ; (sid.inpe.br/mtc-m21b/2017/07.24.17.54-TDI)

Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2017.

Orientadores : Drs. Eder Paulo Vendrasco, e José Antonio Aravéquia.

1. Parametrização de microfísica. 2. Assimilação de dados de radar. 3. WRF e WRFDA. I.Título.

CDU 551.509.313



Esta obra foi licenciada sob uma Licença [Creative Commons Atribuição-NãoComercial 3.0 Não Adaptada](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/).

This work is licensed under a [Creative Commons Attribution-NonCommercial 3.0 Unported License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/).

Aluno (a): **Mario Paulo Alves Junior**

Título: "IMPACTO DAS PARAMETRIZAÇÕES DE MICROFÍSICA NA PREVISÃO DE PRECIPITAÇÃO UTILIZANDO ASSIMILAÇÃO DE DADOS DE RADAR".

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

Dr. Dirceu Luis Herdies



Presidente | INPE | Cachoeira Paulista - SP

Dr. Eder Paulo Vendrasco



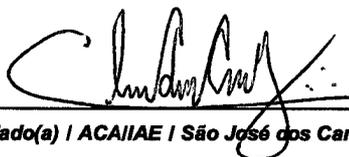
Orientador(a) | INPE | Cachoeira Paulista - SP

Dr. José Antonio Aravéquia



Orientador(a) | INPE | Cachoeira Paulista - SP

Dr. Cleber Souza Corrêa



Convidado(a) | ACA/IAE | São José dos Campos - SP

Este trabalho foi aprovado por:

maioria simples

unanimidade

São José dos Campos, 15 de agosto de 2017

“O que prevemos raramente ocorre; o que menos esperamos geralmente acontece.”
(Benjamin Disraeli)

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por me dar sabedoria e força para chegar até aqui e concluir mais esta etapa.

À minha esposa, Clarissa, que me incentivou neste período cheio de obstáculos, com muito afeto e paciência.

Ao Dr. Éder Vendrasco, pela ajuda e orientação imprescindíveis para a realização deste trabalho, com muito respeito e amizade.

Ao Dr. Aravéquia, por sua confiança e por acreditar na minha capacidade.

Às minhas amigas Rute Ferreira e Liviany Viana, pelo apoio e disponibilidade de tempo, que foram fundamentais para a conclusão deste trabalho.

Aos meus colegas da pós-graduação, pela ajuda com diversos comentários e discussões científicas que colaboraram de alguma maneira.

Ao convênio do DECEA/INPE, por viabilizar a realização deste trabalho.

Obrigado.

RESUMO

Na aviação, a previsão do tempo de curto prazo é muito importante para o planejamento da navegação aérea. Trabalhos recentes mostram que a assimilação de dados melhora a eficácia dos modelos numéricos de previsão de tempo, contudo é pouco quantificado o impacto da assimilação dos dados de radar com relação às parametrizações físicas do modelo, especialmente de microfísica. O objetivo deste trabalho foi testar 9 diferentes parametrizações de microfísica do modelo *Weather Research and Forecasting* (WRF) com seu sistema de assimilação de dados (WRFDA-3DVAR), em uma grade com resolução horizontal de 2 km. A área de estudo escolhida abrange o oeste da região sul do Brasil e sudeste do Paraguai. Os casos escolhidos de precipitação foram os dias 30 de outubro, 07 de novembro e 13 de dezembro de 2014, devido à intensidade da precipitação, além da qualidade e disponibilidade dos dados observacionais em superfície, das radiossondagens e dos dados de radar. A comparação foi realizada através das métricas estatísticas *Fractional Skill Score* (FSS) e *Local Root Mean Square Error* (LRMSE). Foram testadas diferentes parametrizações de microfísica com assimilação de dados convencionais e de radar nos três eventos, totalizando 81 rodadas do modelo. Desta forma, procurou-se determinar qual a parametrização de microfísica melhor representou os campos meteorológicos nas previsões de curto prazo para a região de estudo, assim como o impacto relativo entre as mudanças de microfísica e a assimilação de dados convencionais e de radar. O impacto positivo da assimilação de dados do radar foi na média de até 20% no FSS, enquanto o impacto positivo entre as opções de microfísica atingiu 70% no FSS.

Palavras – chave: parametrização de microfísica, assimilação de dados de radar, WRF e WRFDA.

THE IMPACT OF MICROPHYSICS PARAMETRIZATION ON PRECIPITATION FORECAST USING RADAR DATA ASSIMILATION

ABSTRACT

In aviation, short-term weather forecast is very important for the planning of air navigation. Recent studies show that data assimilation improves the efficiency of weather forecast models, however it is not properly quantified the impacts of radar data assimilation related to the physical model parameterizations, especially the microphysics. The goal of this study is to perform experiments using 9 different parameterization of microphysics using the Weather Research and Forecasting (WRF) model and its data assimilation system (WRFDA-3DVAR) in a grid with 2 km horizontal resolution. The study area covers the South-western Brazil and Southeastern Paraguay. The simulations were done for October 30th, November 7th and December 13th of 2014, due to the intensity of precipitation, as well as the quality and availability of observational data, i.e., surface, radiosonde and radar data. The comparison is performed through the statistical metrics Fractional Skill Score (FSS) and Local Root Mean Square Error (LRMSE). Different microphysics parameterizations were tested when assimilating conventional and radar data for three events, totalling 81 run of the model. Thus, it is expected to determine the best microphysical parameterization that provides the more realistic short-term forecasts of meteorological fields over the radars area, as well as the relative impact of different microphysical parameterization and the assimilation of conventional and radar data. The positive impact of the radar data assimilation was in the average up to 20% in the FSS, while the positive impact among the microphysics options reached 70% in FSS.

Keywords: microphysics parameterization, radar data assimilation, WRF and WRFDA.

LISTA DE FIGURAS

	<u>Pág.</u>
Figura 2.1 Posição aproximada dos radares de Assunção (ASU), Cascavel (CAS) e Teixeira Soares (TXS) e seu relevo em metros.	11
Figura 2.2 Ilustração da parametrização de microfísica Kessler.	16
Figura 2.3 Ilustração da parametrização de microfísica WSM3	18
Figura 2.4 Ilustração da parametrização de microfísica WSM5	19
Figura 2.5 Ilustração da parametrização de microfísica Ferrier	20
Figura 2.6 Ilustração da parametrização de microfísica WSM6	21
Figura 4.1 (a) Imagem de satélite no canal do infravermelho realçada, (b) análise de altitude e (c) análise de superfície do dia 30/10/2014.	28
Figura 4.2 (a) Imagem de satélite no canal do infravermelho realçada, (b) análise de altitude e (c) análise de superfície do dia 07/11/2014.	28
Figura 4.3 (a) Imagem de satélite no canal do infravermelho realçada, (b) análise de altitude e (c) análise de superfície do dia 13/12/2014.	29
Figura 4.4 Ciclo de assimilação de dados e <i>spinup</i>	34
Figura 5.1 Resultado da Análise Objetiva do número de ciclos do <i>spinup</i>	38
Figura 5.2 Quantidade de dados assimilados no <i>spinup</i> do dia 07/11/2014 usando a parametrização Thompson: (a) METAR, SYNOP, AIREP, BOIAS; (b) Sondagens.	39
Figura 5.3 Quantidade de dados assimilados no <i>spinup</i> do dia 13/12/2014 usando a parametrização Thompson: (a) METAR, SYNOP, AIREP, BOIAS; (b) Sondagens.	40
Figura 5.4 Quantidade de dados assimilados no <i>spinup</i> do dia 30/10/2014 usando a parametrização Thompson: (a) METAR, SYNOP, AIREP, BOIAS; (b) Sondagens.	41
Figura 5.5 Quantidade de dados na assimilação de dados de radar em cada evento usando Thompson.	42
Figura 5.6 Incrementos ocorridos com a parametrização Kessler no nível de 3 km: (a) evento dia 07/11/2014; (b) evento dia 13/12/2014 e (c) evento dia 30/10/2014.	44
Figura 5.7 Diferença entre a observação e o background (OMB) e da diferença entre a observação e a análise (OMA) para: (a) Razão de mistura de água de chuva e (b) velocidade radial; ambas usando a parametrização de Kessler no nível de 3 km.	46
Figura 5.8 (a) Perfil vertical médio da observação (Radar), do background e da análise para a razão de mistura de água de chuva e velocidade radial usando a parametrização Kessler; (b) Comparativo de valores dos dados de água de chuva de OMB e de OMA; (c) Comparat.	47
Figura 5.9 - Incrementos ocorridos com a parametrização Lin: (a) evento dia 07/11/2014; (b) evento dia 13/12/2014 e (c) evento dia 30/10/2014.	49

Figura 5.10 Diferença entre a observação e o background (OMB) e da diferença entre a observação e a análise (OMA) para: (a) Razão de mistura de água de chuva e (b) velocidade radial; ambas usando a parametrização de LIN no nível de 3 km.	51
Figura 5.11 (a) Perfil vertical médio da observação (Radar), do background e da análise para a razão de mistura de água de chuva e velocidade radial usando a parametrização LIN; (b) Comparativo de valores dos dados de água de chuva de OMB e de OMA; (c) Comparativo	52
Figura 5.12 Incrementos ocorridos com a parametrização WSM3: (a) evento dia 07/11/2014; (b) evento dia 13/12/2014 e (c) evento dia 30/10/2014.....	53
Figura 5.13 Diferença entre a observação e o background (OMB) e da diferença entre a observação e a análise (OMA) para: (a) Razão de mistura de água de chuva e (b) velocidade radial; ambas usando a parametrização de WSM3 no nível de 3 km.....	55
Figura 5.14 (a) Perfil vertical médio da observação (Radar), do background e da análise para a razão de mistura de água de chuva e velocidade radial usando a parametrização WSM3; (b) Comparativo de valores dos dados de água de chuva de OMB e de OMA; (c) Comparativ	56
Figura 5.15 Incrementos ocorridos com a parametrização WSM5: (a) evento dia 07/11/2014; (b) evento dia 13/12/2014 e (c) evento dia 30/10/2014.....	57
Figura 5.16 Diferença entre a observação e o background (OMB) e da diferença entre a observação e a análise (OMA) para: (a) Razão de mistura de água de chuva e (b) velocidade radial; ambas usando a parametrização de WSM5 no nível de 3 km.....	59
Figura 5.17 (a) Perfil vertical médio da observação (Radar), do background e da análise para a razão de mistura de água de chuva e velocidade radial usando a parametrização WSM5; (b) Comparativo de valores dos dados de água de chuva de OMB e de OMA; (c) Comparativo	60
Figura 5.18 Incrementos ocorridos com a parametrização ETA: (a) evento dia 07/11/2014; (b) evento dia 13/12/2014 e (c) evento dia 30/10/2014.....	62
Figura 5.19 Diferença entre a observação e o background (OMB) e da diferença entre a observação e a análise (OMA) para: (a) Razão de mistura de água de chuva e (b) velocidade radial; ambas usando a parametrização de ETA no nível de 3 km.	64
Figura 5.20 (a) Perfil vertical médio da observação (Radar), do background e da análise para a razão de mistura de água de chuva e velocidade radial usando a parametrização ETA; (b) Comparativo de valores dos dados de água de chuva de OMB e de OMA; (c) Comparativo	65
Figura 5.21 Incrementos ocorridos com a parametrização WSM6: (a) evento dia 07/11/2014; (b) evento dia 13/12/2014 e (c) evento dia 30/10/2014.....	66
Figura 5.22 Diferença entre a observação e o background (OMB) e da diferença entre a observação e a análise (OMA) para: (a) Razão de mistura de água de chuva e (b) velocidade radial; ambas usando a parametrização de WSM6 no nível de 3 km.....	68

Figura 5.23 (a) Perfil vertical médio da observação (Radar), do background e da análise para a razão de mistura de água de chuva e velocidade radial usando a parametrização WSM6; (b) Comparativo de valores dos dados de água de chuva de OMB e de OMA; (c) Comparativo	69
Figura 5.24 Incrementos ocorridos com a parametrização Thompson: (a) evento dia 07/11/2014; (b) evento dia 13/12/2014 e (c) evento dia 30/10/2014.....	71
Figura 5.25 Diferença entre a observação e o background (OMB) e da diferença entre a observação e a análise (OMA) para: (a) Razão de mistura de água de chuva e (b) velocidade radial; ambas usando a parametrização de THOMPSON no nível de 3 km.	73
Figura 5.26 Perfil vertical médio da observação (Radar), do background e da análise para a razão de mistura de água de chuva e velocidade radial usando a parametrização THOMPSON.....	74
Figura 5.27 Incrementos ocorridos com a parametrização Morrison: (a) evento dia 07/11/2014; (b) evento dia 13/12/2014 e (c) evento dia 30/10/2014.....	76
Figura 5.28 Diferença entre a observação e o background (OMB) e da diferença entre a observação e a análise (OMA) para: (a) Razão de mistura de água de chuva e (b) velocidade radial; ambas usando a parametrização de MORRISON no nível de 3 km.	78
Figura 5.29 (a) Perfil vertical médio da observação (Radar), do background e da análise para a razão de mistura de água de chuva e velocidade radial usando a parametrização MORRISON; (b) Comparativo de valores dos dados de água de chuva de OMB e de OMA; (c) Comparação.....	79
Figura 5.30 Incrementos ocorridos com a parametrização WDM6: (a) evento dia 07/11/2014; (b) evento dia 13/12/2014 e (c) evento dia 30/10/2014.....	80
Figura 5.31 Diferença entre a observação e o background (OMB) e da diferença entre a observação e a análise (OMA) para: (a) Razão de mistura de água de chuva e (b) velocidade radial; ambas usando a parametrização de WDM6 no nível de 3 km.	81
Figura 5.32 (a) Perfil vertical médio da observação (Radar), do background e da análise para a razão de mistura de água de chuva e velocidade radial usando a parametrização WDM6; (b) Comparativo de valores dos dados de água de chuva de OMB e de OMA; (c) Comparativo	83
Figura 5.33 Comparativa entre o observado (sondagem de Curitiba - PR) com: (a) background (12 UTC) e (b) análise (00 UTC); ambos com radar (verde) e sem radar (preta).....	84
Figura 5.34 Comparativa entre o observado (sondagem de Florianópolis - SC) com: (a) background (12 UTC) e (b) análise (00 UTC); ambos com radar (verde) e sem radar (preta).....	85
Figura 6.1 Custo de Tempo (minutos) gasto pelo modelo para gerar a análise.	87
Figura 6.2 - Comparativo das médias do FSS nos três eventos das 9 parametrizações, onde o sombreado indica a variação entre os máximos e mínimos entre as parametrizações, as barras verticais são as variações entre os máximos e mínimos das	

médias de 3 em 3 horas de previsão para os 3 eventos e as linhas correspondem ao comportamento das médias com e sem ADR.	89
Figura 6.3 - Comparativo das médias do FSS nos três eventos das 7 parametrizações, onde o sombreado indica a variação entre os máximos e mínimos entre as parametrizações, as barras verticais são as variações entre os máximos e mínimos das médias e as linhas correspondem ao comportamento das médias com e sem ADR.....	91
Figura 6.4 Comparativa dos índices médios de cada parametrização nos três eventos..	93
Figura 7.1 Comparativo de refletividade do radar e do modelo para o dia 07/11/2014 entre todas as parametrizações: (a) sem ADR e (b) com ADR.	98
Figura 8.1 Avaliação dos índices FSS e LRMSE da parametrização LIN.....	101
Figura 8.2 Imagens geradas com a parametrização LIN para o evento do dia 07/11/2014 com ADR e sem radar (GTS) comparadas com o observado (radares) e CosCh3.	104
Figura 8.3 Análise objetiva dos índices FSS e LRMSE para a parametrização THOMPSON.	105
Figura 8.4 Imagens geradas com a parametrização THOMPSON para o dia 07/11/2014 com ADR e sem radar (GTS) comparadas com o observado (radares) e CosCh3.	108
Figura 8.5 Análise objetiva dos índices FSS e LRMSE para a parametrização MORRISON.	110
Figura 8.6 Imagens geradas com a parametrização MORRISON para o dia 07/11/2014.	112

LISTA DE TABELAS

	<u>Pág.</u>
Tabela 4.1 . Datas dos eventos escolhidos para o estudo e os fenômenos meteorológicos atuantes.....	27

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

AD	Assimilação de Dados
ASU	Radar de Assunção – Paraguai
ARW	<i>Advanced Research WRF</i>
CAS	Radar de Cascavel – PR
CCN	Núcleo de Condensação de Nuvem
CF	Condição de Fronteira
CGNA	Centro de Gerenciamento de Navegação Aérea
CI	Condição Inicial
CoSch	<i>Combined Scheme</i>
DINAC	<i>Dirección Nacional de Aeronautica Civil</i>
FSS	<i>Fractional Skill Score</i>
GFS	<i>Global Forecast System</i>
GPS	<i>Global Position System</i>
GrADS	<i>Grid Analysand Display System</i>
GTS	<i>Global Telecommunication System</i>
INFRAERO	Empresa Brasileira de Infraestrutura Aeroportuária
LRMSE	<i>Local Root Mean Square Error</i>
NESDIS	<i>National Environmental Satellite Data and Information Service</i>
PPI	<i>Plan Position Indicator</i>
PNT	Previsão Numérica do Tempo
SIMEPAR	Sistema Meteorológico do Paraná
TXS	Radar de Teixeira Soares
TRMM	<i>Tropical Rainfall Measuring Mission</i>
WRF	<i>Weather Research and Forecasting model</i>
WRFDA	<i>Weather Research and Forecasting model Data Assimilation system</i>
3DVAR	Assimilação de dados variacional em 3 dimensões

SUMÁRIO

	<u>Pág.</u>
1 INTRODUÇÃO	1
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
2.1 Previsão numérica do tempo	5
2.2 Assimilação de Dados	7
2.3 Assimilação de Dados de Radar.....	10
2.4 Parametrizações de Microfísica	13
2.5 Parametrizações de microfísica do modelo WRF	15
2.5.1 Kessler.....	15
2.5.2 Lin.....	16
2.5.3 WSM3	17
2.5.4 WSM5	18
2.5.5 Ferrier.....	19
2.5.6 WSM6	20
2.5.7 Goddart.....	22
2.5.8 Thompson.....	22
2.5.9 WDM6	23
2.5.10 Milbrandt.....	24
2.5.11 Morrison.....	24
3 OBJETIVOS.....	25
4 DADOS E METODOLOGIA	27
4.1 Eventos	27
4.2 Dados.....	29
4.3 Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM)	31
4.4 Metodologia	32
5 RESULTADOS	37
5.1 Número de ciclos no <i>spinup</i>	37
5.2 Dados assimilados.....	38
5.3 Incrementos.....	42

5.3.1	Kessler.....	43
5.3.2	Lin.....	48
5.3.3	WSM3.....	52
5.3.4	WSM5.....	56
5.3.5	Ferrier.....	61
5.3.6	WSM6.....	65
5.3.7	Thompson.....	70
5.3.8	Morrison.....	74
5.3.9	WDM6.....	79
5.4	Comparativo do perfil vertical de temperatura.....	84
6	ANÁLISE DOS ÍNDICES PARA CADA PARAMETRIZAÇÃO.....	87
6.1	Custo de tempo computacional.....	87
6.2	Índices médios das parametrizações.....	88
7	ANÁLISE DA REFLETIVIDADE (dBz).....	97
8	RESULTADOS POR PARAMETRIZAÇÃO.....	101
8.1	Lin.....	101
8.2	Thompson.....	105
8.3	Morrison.....	109
9	CONCLUSÃO E SUGESTÕES.....	115
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	119

1 INTRODUÇÃO

A precipitação tem grande influência nas operações aéreas nos aeroportos, reduzindo a capacidade visual dos pilotos durante os procedimentos de pouso e decolagem. O Centro de Gerenciamento da Navegação Aérea (CGNA), que atua em conjunto com as companhias aéreas, necessita saber com antecedência as condições meteorológicas previstas para os aeroportos e rotas, com o objetivo de diminuir o impacto das condições adversas do tempo na segurança e na navegação aérea. Desta forma, são de suma importância para a navegação aérea pesquisas que visam o aprimoramento de modelos e métodos de previsão de tempo.

O desenvolvimento de supercomputadores, cada vez mais rápidos, tornou possível obter em tempo hábil a resolução das equações primitivas, que descrevem os processos fundamentais da atmosfera, com isso a Previsão Numérica do Tempo (PNT) tornou-se mais eficaz, aumentando sua importância para a prevenção de desastres naturais, como enchentes, deslizamentos de terra e outras catástrofes.

A PNT é um problema de condição inicial, no qual uma maior precisão das informações iniciais poderá levar a uma solução mais próxima da realidade. A assimilação de dados é uma ferramenta utilizada para aproximar de forma mais acurada a condição inicial utilizada nos modelos numéricos para o verdadeiro estado da atmosfera, sendo chamada de análise final a melhor representação possível alcançada na resolução do modelo. Porém, deve-se ressaltar que o verdadeiro estado da atmosfera não será representado, devido à imperfeição do modelo, aos próprios erros de observação, as imprecisões dos instrumentos e ao número insuficiente de observações.

Segundo Stensrud (2009), sem parametrizações as previsões do modelo não são muito interessantes ou úteis, já que os processos parametrizados são os fatores mais importantes nas previsões de tempo que preocupam as pessoas. Os esquemas de parametrização necessariamente representam apenas os aspectos essenciais do processo físico. Somente uma limitada quantidade de complexidade é possível dentro de uma parametrização, uma vez que é difícil reproduzir corretamente os comportamentos básicos do processo físico para uma variedade de condições ambientais. Assim, os

esquemas de parametrização são uma janela idealizada através da qual se pode obter uma compreensão de complexos processos atmosféricos quando são reduzidos à sua forma mais fundamental. Estudar esquemas de parametrização pode ajudar a entender o clima e como o tempo afetará o clima.

A formação da precipitação é considerada o processo físico da atmosfera mais complexo de ser representado pelos modelos numéricos, devido a sua variabilidade no tempo e no espaço. Há duas formas de parametrizar a precipitação: pelo esquema implícito ou subgrade (convecção profunda e rasa) e pelo esquema explícito (microfísica de nuvens). Sendo que os esquemas implícitos deveriam ser utilizados somente em média ou baixa resolução e os esquemas explícitos, em alta resolução (MOLINARI; DUDEK, 1992). Na prática, esquemas explícitos são usados juntamente com esquemas implícitos em baixa resolução, com o objetivo de evitar supersaturação no ponto de grade, ou seja, possuem uma importância secundária na produção de precipitação.

Em alta resolução, existem divergências quanto à necessidade do uso de esquemas implícitos. Cram et al. (1992) mostraram que o uso exclusivo de 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.

A parametrização de convecção profunda, segundo Grell e Freitas (2014), pode ser utilizada em modelos não hidrostáticos de alta resolução, bem como com resoluções de grades variáveis horizontalmente (alto custo computacional), apresentando bons resultados nas resoluções testadas (20 km a 5 km).

O uso das parametrizações nos modelos regionais trouxe um grande desenvolvimento para a Previsão Numérica do Tempo (PNT), porém permanece um déficit nas condições

iniciais que acarretam em erros na previsão. Para tratar esses erros e melhorar a eficácia da previsão utiliza-se atualmente a assimilação de dados.

Atualmente os grandes centros meteorológicos utilizam a assimilação de dados na inicialização de seus modelos numéricos de previsão do tempo, sendo o método 3D-VAR um dos mais utilizados operacionalmente pela boa relação custo-benefício. Alguns grandes centros já utilizam o 4D-VAR, o Kalman Filter e métodos híbridos com a combinação de variacional (3D e 4D) e Ensemble Kalman Filter. Neste trabalho será utilizado o 3D-VAR por sua disponibilidade no modelo empregado neste trabalho (WRF/WRFDA – será apresentado em detalhes nas próximas seções) já contemplando assimilação de dados de radar e pelo relativo baixo custo computacional.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

As condições atmosféricas são de vital importância para o planejamento do voo de uma aeronave. Segundo Rizzo (2013), no relatório do Núcleo de Acompanhamento e Gestão Operacional (NAGO) vinculado à Empresa Brasileira de Infraestrutura Aeroportuária (INFRAERO), os aeroportos brasileiros fecharam 1.804 vezes (podendo ocorrer diversas vezes no mesmo dia e aeroporto) em virtude de condições atmosféricas adversas no ano de 2012, uma média de praticamente cinco fechamentos por dia. De acordo com o relatório, a redução de visibilidade devido à precipitação constituiu um dos principais motivos para a suspensão das atividades de pouso e decolagem nos aeroportos brasileiros no ano de 2012. Portanto, fica evidente a importância de uma previsão meteorológica precisa no gerenciamento do fluxo aéreo brasileiro.

2.1 Previsão numérica do tempo

A previsão numérica do tempo (PNT) é baseada na integração de um sistema de equações que traduzem as leis físicas que regem o comportamento dinâmico da atmosfera. A PNT começou a ser desenvolvida antes do primeiro computador eletrônico e teve como pioneiro o norueguês Vilhelm Bjerknes. Segundo Bjerknes (1904), a previsão do tempo era composta de uma etapa diagnóstica, onde o estado inicial era determinado a partir de dados observados e uma etapa prognóstica que utilizava a equação do movimento para calcular como o estado atmosférico avançaria ao longo do tempo. Com isso, o autor propôs que o estado futuro da atmosfera poderia ser prognosticado, sabendo-se seu estado atual. O prognóstico seria determinado através da integração no tempo das equações governantes da atmosfera e que o estado da atmosfera poderia ser descrito a partir de 7 variáveis básicas: pressão, temperatura, densidade, umidade e as 3 componentes do vento.

Richardson (1922) discretizou as equações governantes da atmosfera proposta por Bjerknes, integrando-as no tempo a partir de um estado inicial com um número finito de pontos no espaço, desprezando termos de pequena magnitude como uma primeira aproximação. No entanto, seus cálculos não foram promissores na época, gerando uma grande variação na pressão. O fracasso de Richardson foi atribuído ao fato de ter

utilizado um campo inicial onde as diferentes variáveis não se apresentavam consistentes umas com as outras (falta de balanço).

Charney et al. (1950) chegaram à conclusão de que o problema da PNT poderia ser solucionado computacionalmente e tentaram equacionar numericamente o movimento dinâmico da atmosfera. Os autores utilizaram modelos mais simples e fizeram o máximo de aproximações possíveis, chegando a um modelo que se reduz a uma única variável a ser integrada no tempo, alcançando resultados satisfatórios.

Para inicializar um modelo é importante possuir uma grande quantidade de dados consistentes e precisos da condição atual da atmosfera, sendo assim o sensoriamento remoto da atmosfera merece um grande destaque por sua vasta cobertura espacial e alta frequência de amostragem temporal (satélites geoestacionários), o sensoriamento remoto possibilita também uma melhora na representação dos processos físicos e no uso de métodos matemáticos mais precisos, que resultaram em melhores condições iniciais para os modelos e no aumento da disponibilidade de dados, especialmente dados de satélite ao longo dos oceanos e do hemisfério sul (KALNAY, 2003).

Os modelos de circulação global ainda possuem espaçamento de grade relativamente grande, devido a restrições tecnológicas computacionais, dificultando assim a representação de pequenos comprimentos de onda. O problema relativo à resolução espacial pode ser resolvido utilizando os modelos regionais, que permitem o uso de uma grade menor, com alta resolução espacial, que simulam com maior destreza os fenômenos de mesoescala quando comparado a modelos globais. Os modelos globais fornecem as condições iniciais e de contorno para os modelos regionais, ressaltando conseqüentemente que os erros provenientes são fatores limitantes na utilização dos modelos regionais (BUSTAMANTE et al., 2005).

O uso de modelos regionais com distintas parametrizações trouxe grandes avanços para a PNT, porém ainda há um déficit nas condições iniciais que por vezes acarretam em erros. Esses erros atualmente estão sendo minimizados por técnicas de assimilação de dados.

Avanços nas técnicas de assimilação de dados e da computação estão desenvolvendo a previsão numérica de tempo, apesar de ainda ser um grande desafio o uso otimizado de observações em alta resolução espacial e temporal, correlacionadas com as variáveis do modelo de forma não linear como são as observações de radares e satélites, para inicialização de modelos numéricos (XIAO et al., 2005).

Zhang et al. (2013) testaram a assimilação de dados de radiância para melhorar os prognósticos do modelo. Os autores verificaram que a assimilação por conjunto de radiâncias afetadas pela precipitação, obtida a partir de sensores de microondas passivas, melhoraram a qualidade de precipitação analisada em termos de localização e da intensidade de chuva acumulada.

O tempo de ajuste do modelo às condições iniciais é conhecido como *spinup*. Inconsistências na representação da evolução da liberação de calor latente, devido às dificuldades na representação dos campos de divergência e do movimento vertical nos primeiros instantes da previsão geram problemas que não são corrigidos no *spinup*.

Quando os estágios iniciais do fenômeno de precipitação coincidem com a fase de *spinup* do modelo, há uma informação não acurada de localização, inicialização e intensidade dos eventos de precipitação convectiva (WANG; WARNER, 1988).

2.2 Assimilação de Dados

Com o avanço da informática, os cálculos das equações prognósticas passaram a ser feitos por computadores, assim como a geração da análise. Bergthórsson e Döös (1955) e Cressman (1959) fizeram algoritmos para criar uma condição inicial através de interpolação em duas dimensões. Desde então, vários métodos de assimilação de dados têm sido desenvolvidos. Eles consideram o máximo de informações disponíveis sobre o sistema dentro das limitações de cada método de assimilação, para fornecer uma “imagem” do estado do sistema, em um dado tempo, o mais preciso e consistente possível (STRUNK, 2006).

Talagrand (1997) definiu assimilação de dados como o uso de todas as informações disponíveis para melhor determinar o estado do escoamento atmosférico ou oceânico.

Os novos sistemas de assimilação também visam um aproveitamento maior e mais eficiente das diversas fontes de dados disponíveis atualmente.

A assimilação de dados também pode ser utilizada para estimar as variáveis que não são observadas diretamente, mas que são importantes para diversas aplicações e que os métodos de assimilação de dados podem ser usados para interpolar e extrapolar os dados de sensoriamento remoto conforme Reichle (2008).

O Método de Correções Sucessivas (MCS) foi o primeiro método de assimilação de dados em 4 dimensões (3 componentes espaciais mais o tempo), desenvolvido por Bergthorsson e Doos (1955) e Cressman (1959). Neste método, a análise é obtida por inúmeras interações onde a informação das observações é adicionada ao campo prévio com peso definido por um fator dependente somente da distância entre o ponto de grade e o local da observação.

Destacam-se ainda alguns tipos de assimilação de dados considerados estatísticos, como a Interpolação Ótima (IO), PSAS (Physical-space Statistical Analysis System), sistemas baseados em Filtro de Kalman e a assimilação variacional em três dimensões (3D-Var) e quatro dimensões (4D-Var), além de sistemas híbridos (variacional + conjuntos).

Estimativa ótima da atmosfera na IO é dada pela Equação 2.1

$$\mathbf{X}_a = \mathbf{X}_b + \mathbf{W}[\mathbf{y}_o - H(\mathbf{X}_b)] \quad (2.1)$$

Onde \mathbf{X}_a é a análise, \mathbf{X}_b é o *background*, \mathbf{y}_o é a observação, H é o operador observação não linear e \mathbf{W} é o operador linear conhecido como matriz de ganho ou matriz de peso da análise e é dada pela Equação 2.2:

$$\mathbf{W} = \mathbf{B}\mathbf{H}^T(\mathbf{H}\mathbf{B}\mathbf{H}^T + \mathbf{R})^{-1} \quad (2.2)$$

Sendo \mathbf{H} o operador observação linear, \mathbf{B} é a matriz de covariância dos erros do *background*, \mathbf{R} é a matriz de covariância dos erros da observação.

O campo *background* (*first guess*) foi definido como uma composição entre previsão e a climatologia, ou seja, é o chute inicial antes da assimilação. A análise, que é a melhor

estimativa do estado da atmosfera, foi obtida através da combinação do *background* com dados de observações, de modo a diminuir o erro associado ao ajuste. O termo incremento é definido na assimilação de dados como a diferença entre a análise gerada pela assimilação e o *background*.

Se \mathbf{W} é ótimo, então a matriz de covariância da análise é dada pela Equação 2.3:

$$\mathbf{A} = (\mathbf{I} - \mathbf{WH})\mathbf{B} \quad (2.3)$$

No método 3D-VAR, evita-se o cálculo da matriz de ganho \mathbf{W} através da minimização da função de custo J (Equação 2.4).

$$J(\mathbf{X}) = \frac{1}{2}[(\mathbf{X} - \mathbf{X}_b)^T \mathbf{B}^{-1}(\mathbf{X} - \mathbf{X}_b) + (\mathbf{y}_o - H(\mathbf{X}))^T \mathbf{R}^{-1}(\mathbf{y}_o - H(\mathbf{X}))] \quad (2.4)$$

A função custo pode ser derivada assumindo uma aproximação Bayesiana, onde o estado verdadeiro é resultado de um processo randômico definido pela função distribuição de probabilidade (fdp) dada pelo *background*.

O teorema de Bayes diz que dada uma nova observação (\mathbf{y}_o) a distribuição de probabilidade a posteriori do estado verdadeiro é dado pela Equação 2.5:

$$p(\mathbf{X}|\mathbf{y}_o) = \frac{p(\mathbf{y}_o|\mathbf{X})p\mathbf{B}(\mathbf{X})}{p(\mathbf{y}_o)} \quad (2.5)$$

A estimativa Bayesiana do estado verdadeiro é aquela que maximiza a probabilidade dada na Equação 2.5. Sendo o denominador na Equação 2.5 a distribuição climatológica das observações e que não depende de \mathbf{X} , logo o máximo da probabilidade é obtido quando o numerador for máximo e a função de custo (Equação 2.4) for mínima.

Para determinar o mínimo de $J(\mathbf{X})$, deve-se igualar a zero seu gradiente (Equação 2.6).

$$\nabla_x J(\mathbf{X}_a) = 0 \quad (2.6)$$

$$\nabla J(\mathbf{X}) = \mathbf{B}^{-1}(\mathbf{X} - \mathbf{X}_b) + \mathbf{H}^T \mathbf{R}^{-1} \mathbf{H}(\mathbf{X} - \mathbf{X}_b) - \mathbf{H}^T \mathbf{R}^{-1}(\mathbf{y}_o - H(\mathbf{X}_b)) \quad (2.7)$$

Igualando a Equação 2.7 a zero e resolvendo para \mathbf{X}_a , tem-se:

$$X_a = X_b + (B^{-1} + H^T R^{-1} H)^{-1} H^T R^{-1} (y_o - H(X_b)) \quad (2.8)$$

Kalnay (2003) mostra a equivalência entre OI e 3D-Var, demonstrando que W (Equação 2.2) é equivalente ao termo $(B^{-1} + H^T R^{-1} H)^{-1} H^T R^{-1}$ da (Equação 2.8).

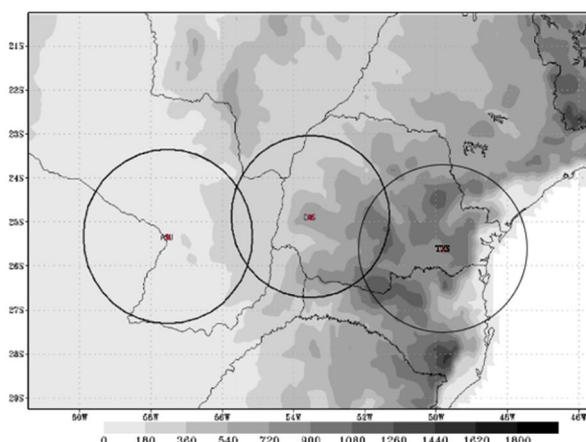
O método 3D-Var é utilizado em alguns centros operacionais, com a vantagem de ser considerado um método superior ao método Interpolação Ótima. Os maiores centros operacionais, como o ECMWF (*European Centre for Medium Range Weather Forecasts*) e UKMet Office (*United Kingdom's national Weather Service*), utilizam métodos híbridos com combinações entre 4D-Var e EnKF, os quais tem apresentado resultados superiores aos dois métodos individualmente.

O método 3D-Var, apesar do bom custo-benefício, também apresenta algumas deficiências. Uma vez que não existe integração no tempo, como ocorre no 4D-Var, o 3D-Var pode apresentar falta de balanço na análise final, além disso, também é comum apresentar ruídos não físicos. Muitos trabalhos são desenvolvidos para minimizar este problema, como por exemplo, o uso de filtro digital que, por outro lado, pode também remover características reais da atmosfera. Além disso, o filtro pode ser implementado somente após o processo de assimilação (REEN, 2007; VENDRASCO, 2015). Outra metodologia desenvolvida por Vendrasco et al. (2016) é a inclusão da assimilação de um campo de grande escala balanceado juntamente com a assimilação de dados de interesse. Os resultados mostraram que a assimilação do campo balanceado reduziu o impacto negativo do 3D-Var, fazendo-se sobressair o impacto positivo.

2.3 Assimilação de Dados de Radar

A área de estudo deste trabalho possui grande cobertura espacial de dados de radar, sendo possível realizar um monitoramento constante dos fenômenos meteorológicos com precipitação e auxiliar na navegação aérea de uma das regiões do Brasil com intenso fluxo de aeronaves e rotas importantes da navegação aérea, bem como realizar previsões de tempo de curto prazo para emitir alertas e reduzir ao máximo as perdas e danos principalmente nos estados do Paraná, Santa Catarina e no Paraguai (Figura 2.1).

Figura 2.1 Posição aproximada dos radares de Assunção (ASU), Cascavel (CAS) e Teixeira Soares (TXS) e seu relevo em metros.



Fonte – Produção do autor.

A inclusão de dados de radar nos modelos pode melhorar significativamente os resultados nas primeiras horas (GAO et al., 2007). A melhora dos resultados deve-se principalmente à redução do *spinup* do modelo. A assimilação de dados de radar implica em um ganho maior nas primeiras horas de previsão, sendo de extrema importância para a previsão de curto prazo.

Segundo Aksoy et al. (2009), observações com radar Doppler de refletividade e velocidade radial, têm sido utilizadas em sistemas complexos de assimilação de dados com o intuito de melhorar as condições iniciais de modelos de alta resolução. Porém a inclusão de grande quantidade de dados em altíssima resolução, fornecidos pelo radar, podem alterar o balanço da análise entre as variáveis dinâmicas e microfísicas, promovendo a geração de convecção espúria.

Xiao et al. (2007), através de experimentos com assimilação de dados de radar, relataram o baixo impacto da assimilação de refletividade em seus resultados. Em virtude deste trabalho, Wang et al. (2013) revisaram o método de assimilação de refletividade e apontaram problemas no uso da linearização da relação Z - q_r (refletividade - razão de mistura de água de chuva) no operador observação. Desta forma, desenvolveram uma nova metodologia para a assimilação de refletividade, na

qual a razão de mistura da água de chuva derivada da refletividade é assimilada ao invés da assimilação direta da refletividade. Os autores mostraram que a assimilação da refletividade de forma indireta melhora significativamente a previsão de precipitação de curto prazo (até 7hs). Os autores mostraram que, num determinado caso na China, a assimilação da refletividade aumentou a umidade, a água da chuva e a energia potencial convectiva disponível na região de convecção. Como resultado, a análise promoveu com sucesso os desenvolvimentos do sistema convectivo e assim melhorou a previsão da localização e intensidade da precipitação. Estes resultados foram confirmados por Vendrasco et al.(2013) e Vendrasco (2015) no Brasil.

A equação 2.9 (SUN; CROOK, 1997) é uma relação exponencial entre a refletividade Z e a razão de mistura de água de chuva q_r .

$$Z = 43,1 + 17,5 \cdot \log(\rho q_r) \quad (2.9)$$

Onde: Z é a refletividade em [dBz], ρ é a densidade do ar em [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$] e q_r é a razão de mistura de água de chuva em [$\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$].

A velocidade radial proveniente do modelo calculada no ponto de observação do radar é calculada usando a equação 2.10 (SUN; CROOK, 1997).

$$V_r = u \cdot \frac{x-x_{rad}}{r} + v \cdot \frac{y-y_{rad}}{r} + (w - V_T) \cdot \frac{z_{rad}}{r} \quad (2.10)$$

$$V_T = 5,4 \cdot \left(\frac{p_0}{p_1}\right)^{0,4} \cdot (\rho q_r)^{0,125} \quad (2.11)$$

Onde, na equação 2.11, V_T é a velocidade terminal da precipitação em [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$], p_1 é a pressão do estado básico e p_0 é a pressão à superfície, r é a distância entre o ponto de grade do modelo (x, y, z) e a localização do radar ($x_{rad}, y_{rad}, z_{rad}$), u , v e w são as componentes do vetor velocidade do vento do modelo, ρ é a densidade do ar e q_r é a razão de mistura de água de chuva.

Shimizu et al. (2011) desenvolveram um sistema de previsão de curto prazo no Japão assimilando vento radial observado com radar e água precipitável com GPS (Global Position System) em um esquema de assimilação 3D-Var e compararam aos resultados

sem o uso de assimilação, sendo observada uma melhora na localização de tempestades severas.

Vendrasco (2015) usou a assimilação de dados de radar para melhorar a previsão de curto prazo de precipitação no Vale do Paraíba e este resultado é importante para mitigar os problemas de fechamento de aeroportos devido à precipitação, provendo de forma mais precisa informações sobre a ocorrência de precipitação. Conforme o autor, a assimilação de dados de radar indireta reproduz melhor o posicionamento da precipitação e sua intensidade. Já a assimilação de dados de radar direta da refletividade, apesar do bom posicionamento, não produz a precipitação observada pelo radar.

Como visto, a assimilação de dados de radar é uma ferramenta muito promissora e muitos trabalhos apontam seu auxílio na melhoria das previsões de curto prazo, contudo deve-se avaliar em outros eventos de precipitação e em outras áreas de estudo, com o objetivo de avaliar o custo benefício de sua implementação no setor operacional.

2.4 Parametrizações de Microfísica

Muitos processos físicos, apesar de serem bem conhecidos, não se conseguem determinar em escala microscópica (molecular) na atmosfera. Sendo assim, o que se consegue representar são efeitos médios através de parametrizações (ex: turbulência na camada limite). Entretanto, o custo computacional envolvido na resolução das equações que governam a atmosfera é alto e utiliza-se a parametrização explicitamente utilizando a matemática, com o objetivo de representar computacionalmente as pequenas escalas envolvidas e a complexidade de um determinado processo físico.

O desempenho de algumas parametrizações depende dos processos meteorológicos que ocorrem numa determinada época do ano e da região geográfica. Por exemplo, algumas parametrizações convectivas são mais apropriadas para latitudes médias, enquanto outras têm melhor desempenho nos trópicos. Um problema relacionado é que os modelos globais devem usar as mesmas parametrizações para todas as áreas geográficas, eliminando a opção de escolher as que melhor se adequam numa determinada região (WARNER, 2010).

Parametrizações são geralmente desenvolvidas para escalas horizontais pré-estabelecidas. Ou seja, apenas aqueles aspectos do sistema físico que não são resolvidos pelo modelo precisam ser parametrizados. Assim, quando se decidir sobre parametrizações deve-se relacionar com a resolução do modelo, como a resolução da grade do modelo continua a diminuir à medida que aumenta o poder computacional, os modelos começam a parcialmente resolver alguns processos parametrizados (HOUZE, 2014).

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 (HOUZE, 2014).

A microfísica de nuvens engloba todos os processos físicos que ocorrem na escala de gotículas de nuvem e dos hidrometeoros (WARNER, 2010). A modelagem numérica correta determina o tipo de precipitação, a intensidade e a distribuição espacial que serão previstos. Os processos de microfísica podem determinar a causa dos fortes ventos encontrados nas fronteiras de uma nuvem convectiva, assim como o desbalanceamento de radiação e energia ocorrido devido às distribuições horizontais e verticais da nuvem. A microfísica também é importante na modelagem climática, pois pode determinar o aumento dos gases que acarretam o efeito estufa, o aumento dos aerossóis que acarreta precipitação intensa localizada e a alteração da temperatura inicial da superfície devido à mudança do albedo das superfícies.

Os esquemas de microfísica abordam diferentes interações entre os tipos de precipitações (granizo, chuva, chuvisco, neve, etc). Apesar de alguns autores considerarem os mesmos tipos de precipitação em seus esquemas de microfísica, as interações entre elas os diferem.

2.5 Parametrizações de microfísica do modelo WRF

O WRF oferece várias opções de microfísica das nuvens, que variam das mais simples e eficientes até as sofisticadas e de maior custo computacional. Têm-se ainda os esquemas já testados e usados operacionalmente, e outros em desenvolvimento nos centros meteorológicos. Dentre todas as parametrizações de microfísica disponibilizadas pelo modelo WRF (total de 15 parametrizações do WRF versão 3.4), destacam-se:

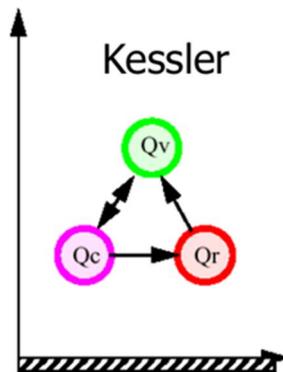
2.5.1 Kessler

O esquema de Kessler (1969) foi desenvolvido para nuvens quentes, com três variáveis: vapor d'água, água dentro da nuvem e chuva. Os processos físicos envolvidos nesta parametrização são: a produção, a queda e evaporação da chuva e a produção de água de nuvem a partir da condensação.

Tem como características:

- A super-estimativa de precipitação antes da ocorrência real da chuva;
- Ausência do granizo na simulação.
- Não considera a existência de um nível de congelamento (0°C), pois foi desenvolvido para nuvens quentes (abaixo do nível de 0°C)
- Na figura 2.2 são apresentadas as variáveis Q_v (vapor d'água), Q_c (água de nuvem) e Q_r (chuva), com suas respectivas interações.

Figura 2.2 Ilustração da parametrização de microfísica Kessler.



Fonte - Dudhia (2011)

2.5.2 Lin

O esquema de Lin (1983) possui seis classes de hidrometeoros: vapor d'água, água de nuvem, chuva, nuvem de gelo, neve e graupel (espécie de floco de neve com diâmetro médio um pouco superior ao de um floco de neve comum e em formato cilíndrico). Tem como características:

- A mudança de estado de nuvem de gelo para neve, sendo o granizo melhor simulado do que em Kessler. O processo de Bergeron (aplica-se a nuvens frias, onde as gotículas de nuvem não congelam a 0°C como o esperado, podendo a água pura suspensa no ar não congelar até a temperatura de -40°C) explica a transformação da nuvem de gelo em neve e a agregação das partículas de neve justifica a formação do granizo;
- A formação de virga (precipitação que não chega ao solo) na nuvem é agora modelada;
- A presença de campo de nuvem serve para reduzir a quantidade de chuva formada antes da nuvem madura e diminui a quantidade de nuvem de gelo significativamente;
- Causa maior formação de granizo, com pequena mudança na quantidade da precipitação, acarretando efeitos na evolução dinâmica dos estágios da água.

2.5.3 WSM3

Este esquema implementa o efeito de sedimentação de gelo e possui três categorias de hidrometeoros:

- vapor;
- água e gelo de nuvem;
- chuva e neve.

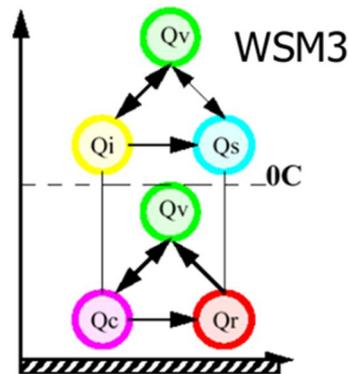
A água e o gelo de nuvem são analisados na mesma categoria e distinguem-se pela temperatura. O esquema é computacionalmente eficiente para a inclusão dos processos de gelo, mas não tem água superesfriada e as taxas de derretimento gradual.

Os processos de fusão e de congelamento ocorrem instantaneamente no nível de 0°C . A produção de chuva é ineficaz desde a queda da neve até atingir o nível de congelamento, quando será convertida em precipitação líquida. O acréscimo de nuvens e de gelo devido à neve também é ineficiente nesta parametrização, pois neste esquema as fases de água e de gelo não coexistem (figura 3).

Para ser consistente com o enfraquecimento da precipitação é produzido um número maior de hidrometeoros na atmosfera.

Na figura 2.3 são apresentadas as variáveis Q_v (vapor d'água), Q_i (gelo de nuvem), Q_s (neve), Q_c (água de nuvem) e Q_r (chuva). Além das interações das variáveis, temos representado o nível de congelamento (0°C) fixo.

Figura 2.3 Ilustração da parametrização de microfísica WSM3



Fonte - Dudhia (2011)

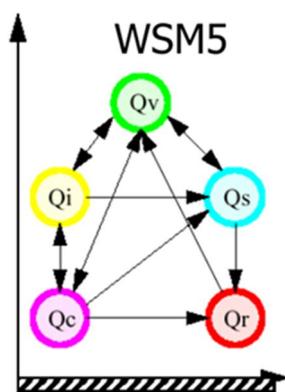
2.5.4 WSM5

O esquema é similar ao WSM3 no que se refere a ser um esquema simples de gelo. O vapor, a chuva, a neve, o gelo de nuvem e a água de nuvem foram divididos em cinco categorias diferentes. No entanto a chuva e a neve estão em diferentes categorias (figura 4). Deste modo, encontramos água super-resfriada e partículas de gelo separadamente, permitindo assim a inclusão da sedimentação do gelo. O esquema foi implementado por Lim e Hong (2010) e os autores mostraram que o impacto do gelo previsto na parametrização de microfísica foi significativo no desenvolvimento local de uma monção na Coreia, demonstrando a importância da sedimentação do gelo num evento de precipitação extrema. Os processos de fusão e de congelamento ocorrem dentro de uma camada mais profunda da nuvem. Devido à velocidade das partículas de água (20 m/s em média), as partículas podem atingir uma maior profundidade dentro da nuvem, mudando imediatamente para gelo, assim como ocorre no nível de 0°C no WSM3. Por conseguinte, a produção da chuva é mais eficiente do que no caso do WSM3. A intensidade da precipitação enfraquece com o tempo, com um maior aquecimento abaixo de 4 km de altitude, possivelmente devido ao maior derretimento neste esquema. Lim e Hong (2010) observaram que a neve pode derreter até mesmo abaixo da camada

de congelamento, isto é devido à subsidência que pode provocar o aquecimento do ar, estendendo a camada mais para baixo em relação ao WSM3.

Na figura 2.4 são apresentadas as variáveis Q_v (vapor d'agua), Q_i (gelo de nuvem), Q_s (neve), Q_c (água de nuvem) e Q_r (chuva), com suas respectivas interações:

Figura 2.4 Ilustração da parametrização de microfísica WSM5



Fonte - Dudhia (2011)

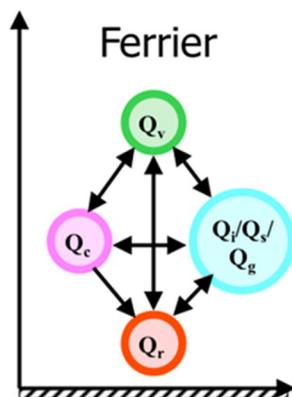
2.5.5 Ferrier

O esquema de Ferrier (1994) prevê explicitamente a água e gelo em proporção de mistura de nuvem, a precipitação líquida e congelada é derivada a partir do diagnóstico da proporção das variáveis na mistura de nuvem e são assumidos para cair no chão ao mesmo tempo. Assume valores fixos de frações de água e gelo dentro da nuvem e a advecção total do vapor d'água, visando uma melhor eficiência em representar a precipitação. Neste esquema, é simulado a água líquida super-resfriada e o derretimento do gelo.

Considera a densidade variável para a precipitação de gelo (neve ou graupel), que é uma grande vantagem em relação às parametrizações anteriores.

Na figura 2.5 são apresentadas as variáveis Q_v (vapor d'agua), Q_i (gelo de nuvem), Q_s (neve), Q_c (água de nuvem), Q_r (chuva) e Q_g (granizo), com suas interações:

Figura 2.5 Ilustração da parametrização de microfísica Ferrier



Fonte - Dudhia (2011)

2.5.6 WSM6

O esquema é um aprimoramento do esquema WSM5, onde inclui graupel e seus processos associados. Apresenta um novo método para representar a velocidade de queda das partículas de gelo na fase mista e partículas de graupel atribuindo um processo de agregação. Esta parametrização surgiu da combinação da WSM3 e WSM5 com a sedimentação do gelo da nuvem, revelando uma melhoria significativa na quantidade de nuvens altas, na quantidade de precipitação na superfície e na simulação em larga escala da temperatura através de uma melhor representação do gelo da nuvem e do albedo da superfície.

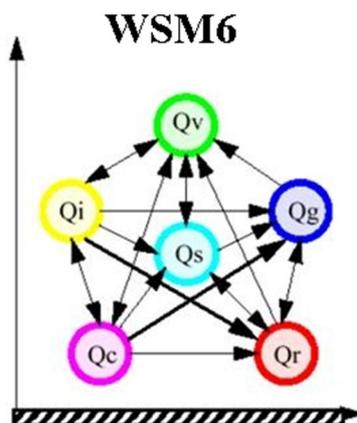
O atraso no desenvolvimento da precipitação em superfície e de tempestades no WSM6 em relação ao WSM5 não é tão simples para explicar, pois há muitos processos envolvidos (figura 2.6). A maior razão para este atraso pode ser atribuída ao fato de que para produzir precipitação é necessária a conversão de partículas de nuvem para graupel

e na sequência a fusão, enquanto que a conversão direta de nuvens para a chuva pode produzir precipitação rapidamente no WSM5.

É um esquema com processos de gelo, neve e graupel, adequado para simulações em alta resolução, onde os nomes WSM3, WSM5 e WSM6 denotam o número de categorias de tipos de água que o esquema prediz, incluindo vapor d'água.

As melhores características das parametrizações microfísicas *single moment* (onde a distribuição do tamanho dos hidrometeoros é proporcional à massa) são que representam os processos microfísicos do gelo como uma função da temperatura; para a concentração no número de núcleos de gelo e para o número da concentração de cristais de gelo como uma função da quantidade de gelo (HONG e LIM, 2006)

Figura 2.6 Ilustração da parametrização de microfísica WSM6



Fonte - Dudhia (2011)

Em termos de concentração numérica de gotas de chuva, o WSM6 produz uma distribuição bastante uniforme na direção vertical e as diferenças de número de concentração de gotas de chuva não são significativos, e conserva um parâmetro de interceptação constante para a chuva.

2.5.7 Goddart

O esquema traz melhorias nas técnicas de saturação. Os processos microfísicos que não envolvem o ponto de fusão, evaporação e sublimação são calculados com base em um estado termodinâmico. Todos os processos são tratados da mesma forma. Ele prevê também a escolha de graupel ou granizo.

Esta parametrização pode ser utilizada por um modelo de nuvem não hidrostático com os processos de microfísica bem realista. O esquema foi desenvolvido para ser mais preciso em simular eventos convectivos tropicais e de latitudes médias. Algumas modificações de parâmetros usados podem ser feitas, incluindo a relação entre o crescimento de hidrometeoros e a força de movimento vertical de uma parcela de ar. É um esquema com processos de gelo, neve e graupel, adequado para simulações em alta resolução.

2.5.8 Thompson

Nesta parametrização ocorrem melhorias nas implementações da deposição, da sublimação e da evaporação. A parametrização foi desenvolvida para ser utilizada pelo WRF ou por outros modelos de Mesoescala. Este esquema incorpora um grande número de melhorias para os processos físicos e sua codificação. Emprega outras técnicas encontradas em esquemas mais sofisticados utilizando tabelas de pesquisa (LUT - *lookup tables*). Ao contrário dos outros esquemas, a distribuição do tamanho da neve assumida, depende tanto da quantidade de água gelada quanto da temperatura, e é representada como uma soma de distribuições exponencial e gama. Além disso, a neve assume uma forma não esférica com uma densidade que varia inversamente com o diâmetro, diferente das outras parametrizações que assumem a neve esférica com densidade constante.

Este esquema prevê explicitamente as razões de mistura de 5 (cinco) espécies de líquido e gelo: nuvem de gelo de água, chuva, nuvem de água, neve e graupel. Além disso, é o único esquema *single moment* (1M) que varia a concentração de gelo e de chuva.

Esta parametrização foi desenvolvida visando:

- melhorar as previsões de intensidade da precipitação;

- melhorar as previsões de fases da água na superfície e no ar;
- incorporar as observações microfísicas recentes de vários projetos;
- cumprir os requisitos de tempo real de modelagem.

2.5.9 WDM6

Parametrização com *double moment* (onde a massa e a concentração total do número de hidrometeoros são previstos de forma independentes entre si) da chuva com 6 (seis) espécies de água (vapor de água, gotículas de nuvens, gelo nuvem, neve, chuva e graupel) e baseado no WSM6. As concentrações na nuvem e de água da chuva também estão previstas, juntamente com uma variável de prognóstico de núcleos de condensação (CCN).

Este esquema foi utilizado inicialmente na investigação dos efeitos dos aerossóis sobre as propriedades de nuvens e na formação da precipitação através do prognóstico das variáveis do núcleo de condensação convectiva (CCN). Em relação à parametrização WSM6, houve uma diminuição da precipitação espúria através da maior evaporação de pequenas gotas em alguns casos conforme LIM e HONG (2010). Os autores observaram que na previsão de precipitação o impacto do número de fases do gelo é menor do que o causado na fase quente. É assumida a evaporação completa da nuvem com o objetivo de devolver o mesmo número de partículas CCN correspondente à contagem inicial. A concentração de partículas CCN pode ser definida e usada num determinado ambiente de grande escala, mesmo para os casos de climas sazonais.

A área relativamente mais estreita de chuva estratiforme na WDM6 resulta em um número maior de núcleos convectivos de menor extensão. Isto acarreta numa velocidade menor na queda da chuva, em comparação com a WSM6.

O esquema WDM6 mostra uma grande variação na concentração do número de direções horizontais e verticais com uma distribuição de tamanho de chuva, que é modulada com processos microfísicos de acordo com o tipo de precipitação e as características da convecção.

2.5.10 Milbrandt

Esta é uma parametrização de duplo momento (2-M) e possui 7 variáveis de água com a separação de graupel e do granizo (MILBRANDT; YAU, 2005).

O espectro de água líquida foi dividido em nuvem (pequenas gotículas não sedimentadas) e chuva (gotas de sedimentação). Foi demonstrado por Mccumber et al. (1991) que, para modelar adequadamente a fase de gelo, pelo menos quatro categorias de hidrometeoros congelados deveriam ser incluídas. Em vista disso, o esquema inclui gelo, neve, graupel e granizo.

A categoria de gelo representa cristais de gelo. A categoria de neve inclui cristais grandes (com raios superiores a 100 μm) e agregados. A categoria de graupel inclui graupel de densidade moderada, formada a partir de gelo ou neve. A categoria de granizo inclui granizo de alta densidade e gotas de chuva congeladas.

2.5.11 Morrison

O esquema de Morrison (2009) inclui variáveis prognósticas para as razões de mistura de gotículas de nuvens e gelo, enquanto a precipitação é tratada de forma diagnóstica. Esta parametrização 2-M procura:

- um tratamento mais flexível e consistente, baseado na física das nuvens;
- um nível razoável de simplicidade e eficiência computacional;
- tratamento da razão de mistura de partículas de nuvem para dimensionar os efeitos indiretos dos aerossóis e da interação nuvem-aerossol;
- a obtenção de resultados equivalentes ou melhores em relação aos esquemas anteriores.

Os novos aspectos do esquema são uma representação explícita de distribuição de água de nuvem para o cálculo das diversas taxas de processos microfísicos, bem como o diagnóstico de tratamento de chuva e neve.

3 OBJETIVOS

Este trabalho visa avaliar o impacto entre as parametrizações de microfísica e a assimilação de dados de radar, como proposto por Ferreira (2016). Para responder a questão principal do trabalho sobre as parametrizações de microfísica e a assimilação de dados, alguns objetivos específicos foram traçados, como segue:

- Verificar o impacto do número de ciclos antes de iniciar a previsão de precipitação de 12 horas na tentativa de redução do *spinup*, para o evento do dia 07/11/14, com o propósito de melhorar as condições iniciais do modelo e determinar o tempo necessário para o ajuste do modelo;
- Avaliar a eficiência de 9 diferentes parametrizações de microfísica do WRF, com resolução horizontal de 2 km, assimilando dados convencionais (GTS) e de radar;
- Avaliar o impacto relativo entre as parametrizações de microfísica e a assimilação de dados de radar.

4 DADOS E METODOLOGIA

4.1 Eventos

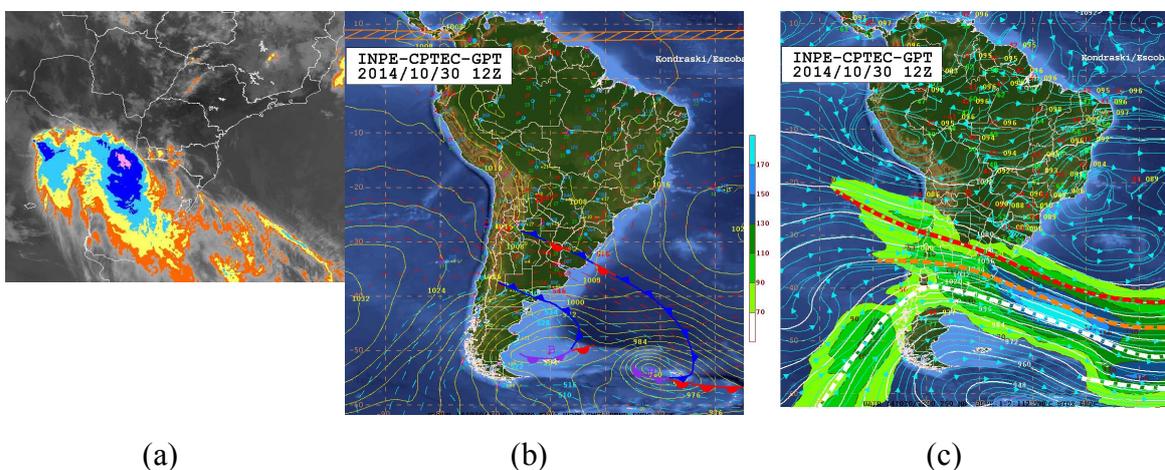
Os eventos foram selecionados visando uma diferença na intensidade da precipitação e nos fenômenos meteorológicos atuantes nas datas selecionadas, ver tabela 4.1. A disponibilidade dos dados de radar e convencionais sobre a região de estudo também foram fatores relevantes nas escolhas dos eventos.

Tabela 4.1 . Datas dos eventos escolhidos para o estudo e os fenômenos meteorológicos atuantes

Evento	Data	Fenômeno Meteorológico
1	30/10/2014	Convecção local e isolada
2	07/11/2014	Convecção intensa associada a sistema frontal
3	13/12/2014	Convecção local e isolada

No dia 30/10/2014, a região sul sofria com chuvas isoladas e intensas, principalmente na região oeste do Paraná e Santa Catarina (figura 4.1(a)). Há ação de uma frente estacionária no Rio Grande do Sul (figura 4.1.(b)), com vários pontos de precipitação na região Sul. Pouca precipitação no raio dos radares de Assunção, Cascavel e Teixeira Soares, acarretando uma quantidade menor de dados volumétricos de refletividade na assimilação do WRF. Houve precipitação mais intensa na grade em estudo após 6 horas de previsão. Corrente de jato posicionada abaixo do Rio Grande do Sul, alimentando de umidade o sistema convectivo (figura 4.1(c)).

Figura 4.1 (a) Imagem de satélite no canal do infravermelho realçada, (b) análise de altitude e (c) análise de superfície do dia 30/10/2014.



(a)

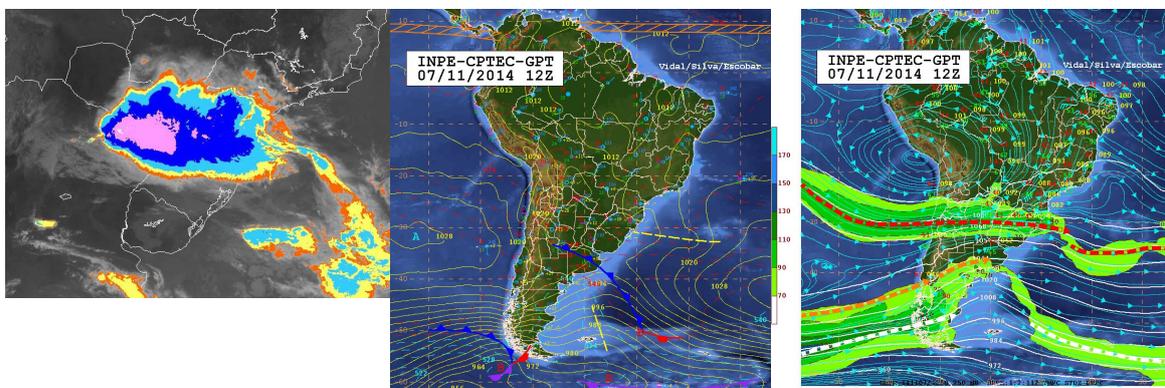
(b)

(c)

Fonte - CPTEC/INPE (2017)

No dia 07/11/2014 a região sul do Brasil sofria ação de áreas de instabilidade e de uma frente fria (Figura 4.2(b)) deslocando-se para o oceano, observando-se um cavado entre Minas Gerais e o Rio de Janeiro. Ocorreram rajadas de vento e granizo em algumas localidades da região. A corrente de jato subtropical (Figura 4.2(c)) trazia umidade para a região, acarretando formações isoladas de nuvens convectivas do tipo *cumulus congestus* (TCU) e *cumulus nimbus* (CB), principalmente nas regiões dos radares de Assunção e de Cascavel no Paraná (Figura 4.2(a)). Houve maior intensidade de precipitação nas 6 horas iniciais de previsão na área dos radares.

Figura 4.2 (a) Imagem de satélite no canal do infravermelho realçada, (b) análise de altitude e (c) análise de superfície do dia 07/11/2014



(a)

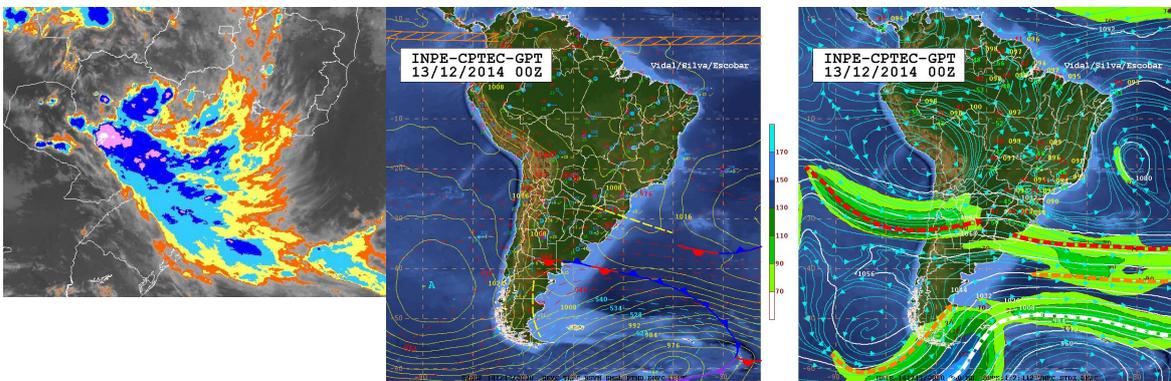
(b)

(c)

Fonte - CPTEC/INPE (2017)

No dia 13/12/2014, precipitou principalmente no Paraguai, devido ao aquecimento e a umidade local, alimentada de umidade pela corrente de jato subtropical (Figura 4.3(c)). Há a influência de um cavado (Figura 4.3(b)) no Paraná e Santa Catarina. Houve precipitação em áreas isoladas, com pouca duração e intensidade baixa, principalmente após as 3 horas de previsão e fora do raio dos radares meteorológicos.

Figura 4.3 (a) Imagem de satélite no canal do infravermelho realçada, (b) análise de altitude e (c) análise de superfície do dia 13/12/2014.



(a)

(b)

(c)

Fonte - CPTEC/INPE (2017)

4.2 Dados

Os dados de análise meteorológica, que foram utilizados como condição inicial do primeiro ciclo de assimilação (*background*) e as condições de contorno, foram provenientes do modelo *Global Forecast System* (GFS) do *National Centers for Environmental Prediction* (NCEP), com resolução espacial de 0.5° de longitude e latitude e estão disponíveis para download na plataforma *Nomads do National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA), em http://nomads.ncdc.noaa.gov/data.php#hires_weather_datasets.

Os dados observacionais que foram assimilados compreendem medições de superfície e de altos níveis, sendo os dados de superfície (SYNOP, METAR, boias oceânicas e outros) e os dados de altitude (radiossondas e aeronaves) provenientes do *Global Telecommunications System* (GTS).

Os dados de refletividade e velocidade radial do vento foram provenientes dos radares do Sistema Meteorológico do Paraná (SIMEPAR) e da *Dirección Nacional de Aeronautica Civil* (DINAC) de Assunção/Paraguai. Do SIMEPAR, foram utilizados os radares de Cascavel (CAS), banda S, com abertura de feixe 1,0° e 15 elevações, com alcance de 240 km e 480 km, operando com resolução máxima de 125 m e o radar de Teixeira Soares (TXS), banda S, com abertura de feixe de 1,0° e 13 elevações, com alcance de 240 km, resolução de 250 m. O radar de Assunção (ASU) da (DINAC), banda C, com abertura de feixe de 1,0° e 11 elevações, com alcance de 250 km com resolução de 250 m.

Foram gerados PPIs com resolução de 500 m para os 3 radares e a conversão para o formato 'Little-R', formato utilizado na ingestão destes dados pelo WRFDA. Os dados foram preparados apenas para varreduras em horas exatas ou nos minutos próximos a hora redonda, quando não houver informação na hora exata.

A atmosfera foi representada no modelo de previsão de tempo utilizando 45 níveis na vertical e a área de estudo compreendeu 800 pontos de longitude e 500 pontos de latitude, com resolução horizontal de 2 x 2 km, centralizada nas coordenadas do radar CAS (Figura 2.1).

O modelo utilizado foi o *Weather Research and Forecast* (WRF), que é um modelo regional, com coordenada vertical sigma (coordenada de pressão hidrostática que acompanha o terreno) e atualmente está em uso operacional no NCEP. Tem como características principais os núcleos dinâmicos (ARW e NMM), o sistema variacional de assimilação de dados em 3 e 4 dimensões (3D-Var e 4D-Var) e uma estrutura de software que permite o paralelismo computacional, bem como a extensibilidade do sistema. Neste trabalho foi utilizado o núcleo dinâmico ARW e o sistema de assimilação 3D-Var. O WRF pode ser instalado em diversas plataformas

computacionais (p. ex. Linux), é portátil, flexível, de domínio público e disponibilizado gratuitamente pela internet. O modelo pode ser executado tanto para situações atmosféricas idealizadas como situações reais, em um espectro amplo de aplicações em escalas horizontais que variam de milhares de quilômetros a poucos metros. O modelo WRF possui vários esquemas de parametrização para cada processo físico, diferentes opções na formulação dinâmica e inúmeras alternativas nos próprios métodos numéricos na resolução.

A versão utilizada do WRFDA foi a 3.7.1, sendo possível realizar a assimilação indireta dos dados radar. A rodada do modelo com assimilação é composta por 4 processos, que tem de ser executados na seguinte ordem:

- Atualização da fronteira inferior – atualização dos dados de análise (GFS) durante os ciclos do *spinup*, exceto no primeiro ciclo;
- Execução do WRFDA – assimila os dados convencionais (GTS) e de radar com o objetivo de melhorar a condição inicial;
- Atualização da fronteira lateral – interpola as condições previstas no modelo com os dados recebidos do modelo global (GFS); e
- Execução do WRF – gera a saída do modelo (previsão).

4.3 Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM)

O satélite TRMM foi lançado em 27 de novembro de 1997, tendo como missão principal fornecer informações sobre a estrutura e a distribuição espacial da precipitação, sua influência no clima das regiões tropical e subtropical e sua importância no ciclo hidrológico (SIMPSON et al., 1988); (SIMPSON et al, 1996).

O TRMM possuía uma órbita polar com 35° de inclinação a 450 km de altura, com alta resolução temporal (período de translação de aproximadamente 90 minutos e 16 órbitas por dia) varrendo as faixas de latitudes tropicais (50°N e 50°S). Era equipado com sensores específicos (Imageador de micro-ondas – TMI; Radar de precipitação – PR; Radiômetro no visível e no infravermelho – VIRS; Sensor de energia radiante da superfície terrestre e das nuvens – CERES; e o Sensor para imageamento de relâmpagos

– LIS), que possibilitavam a aquisição de informações sobre a precipitação tropical, relâmpagos e sobre a energia radiante das nuvens e da superfície terrestre. As estimativas de precipitação foram validadas em superfície pelo *Ground Validation (GV)*, que possuía uma série de radares meteorológicos em superfície ao longo da faixa intertropical (HUFFMAN et al., 2007). Os dados estimados de precipitação possuíam resolução horizontal de 0.25° de latitude/longitude e frequência temporal de 3 horas.

As estimativas de precipitação calculadas pelo TRMM foram obtidas a partir do algoritmo 3B42 (HUFFMAN et al., 2007), utilizando informações sobre a estrutura vertical das nuvens. Estes dados encontravam-se disponíveis em <ftp://trmmopen.gsfc.nasa.gov/pub/merged/combinedMicro>.

O algoritmo 3B42 é uma combinação de estimativas de precipitação por microondas e infravermelho corrigido através das informações sobre a estrutura vertical das nuvens, obtidas pelo radar de precipitação a bordo do satélite. Atualmente o GPM (*Global Precipitation Measurement*) ocupa o lugar do TRMM (STANLEY, 2017).

A missão *Global Precipitation Measurement (GPM)* é uma parceria entre a *National Aeronautics and Space Administration (NASA)* e a *Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA)* para promover a compreensão científica e a aplicação prática de estimativas de precipitação global por satélite.

4.4 Metodologia

O WRF versão 3.7.1 possui 15 parametrizações disponíveis e um estudo com todas as parametrizações inviabilizaria o trabalho pela grande quantidade de simulações que seriam necessárias. Desta forma foram escolhidas 9 parametrizações para serem estudadas: Kessler e Lin por serem as mais simples; Ferrier por ser usada no modelo ETA (15km) do CPTEC; as parametrizações WSM3, WSM5 e WSM6 foram escolhidas de forma a testar a eficácia do número de variáveis com parametrização de 1-M (*single moment*); as parametrizações Morrison e WDM6, que são uma evolução no número de variáveis e são 2-M (*double moment*); e uma parametrização 1-M mais recente, Thompson.

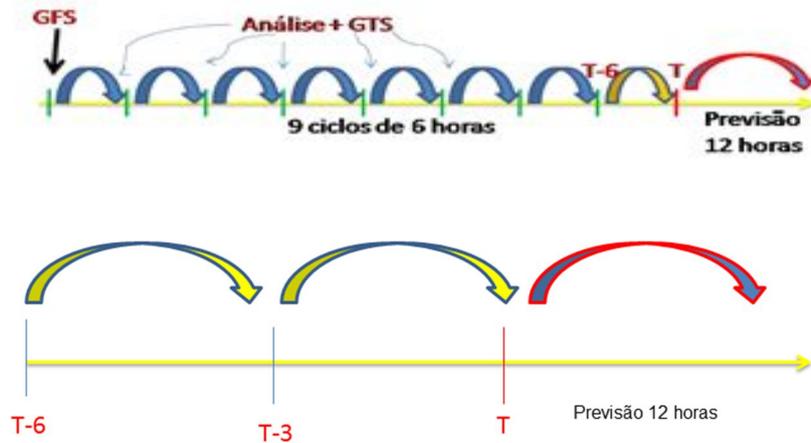
A configuração das rodadas iniciais para cada evento incluiu ciclos de 6 horas no tempo de ajuste do modelo. Sendo as 9 primeiras rodadas (diferentes parametrizações) de cada evento com tempo de 48 horas (9 ciclos) de *spinup*.

A seguir foram feitas rodadas intermediárias com ciclos de 3 horas com a finalidade de gerar o *background* para as rodadas com e sem radar. As rodadas com e sem radar foram realizadas com 4 ciclos de 1 hora cada e a integração no tempo (previsão) de todas as rodadas foi de 12 horas.

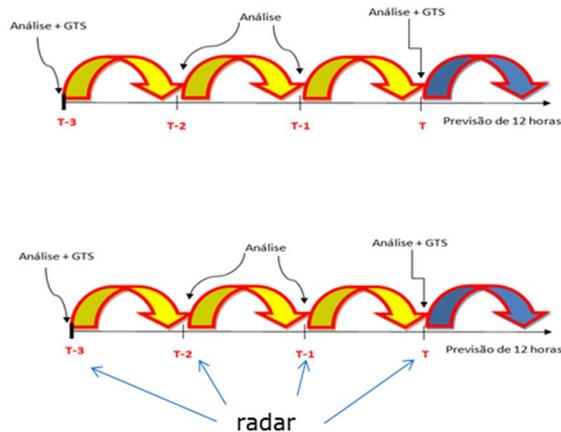
Os dados do GFS foram utilizados como condição de fronteira (CF) para a grade do modelo em todos os horários e atuou como condição inicial (CI) apenas no começo do primeiro ciclo de 6 horas de assimilação de dados do GTS (Figura 4.4(a)).

A configuração do ciclo de assimilação foi o mesmo utilizado por Ferreira (2016). A assimilação de dados volumétricos do radar foi inicializada três horas antes de T (T-3) para gerar a nova CI para o modelo, e assim integrou no tempo a previsão de 12 horas (Figura 4.4(b)). T (vermelho) é o horário de início da previsão do modelo com a nova análise proveniente da assimilação.

Figura 4.4 Ciclo de assimilação de dados e *spinup*.



(a) Ciclos de 6 horas com o GFS como condição inicial e o ciclos intermediários de 3 horas



(b) ciclo horário de assimilação de dados com e sem radar

Fonte – Produção do autor

A avaliação objetiva dos resultados do modelo foi realizada utilizando o índice FSS (*Fractional Skill Score*), que fornece a fração de acerto do modelo dentro de um limiar de precipitação e um raio de cobertura especificado (ROBERTS; LEAN, 2008). O FSS possui limitações ao detectar erros na intensidade da precipitação, servindo melhor para

mostrar a acurácia do posicionamento dos núcleos convectivos na previsão de precipitação para um dado limiar.

Foi aplicado também o LRMSE (Local Root Mean Square Error), utilizado por Vendrasco et al. (2016), que indica a magnitude do erro nos valores de precipitação previstos dentro do mesmo raio de influência utilizado para calcular o FSS.

Na análise foi verificado o impacto de cada parametrização utilizando-se o índice de maior acerto (FSS) na localização da precipitação e com índice menor de erro (LRMSE) na intensidade dos núcleos convectivos.

Os dois índices foram aplicados em conjunto para estimar qual configuração de assimilação obteve melhor desempenho em prever a localização e a intensidade de precipitação acumulada para cada rodada do modelo. Na validação de precipitação do modelo, foi utilizado o produto CoSch3 (Combined Scheme – 3 hours), calculado por Ferreira (2016), que utilizou a metodologia de Vila et al. (2009) para a inclusão dos dados de superfície (pluviômetro).

O CoSch3 é um produto de estimativa de precipitação onde combina-se a estimativa por satélite fornecida pelo TRMM e dados medidos por pluviômetros. Este método proporciona estimativa mais realistas, principalmente em situações onde a estimativa por satélite tem deficiência, como é o caso de precipitação por nuvens quentes.

5 RESULTADOS

A primeira avaliação feita foi o número ideal de ciclos para ajustar o modelo e determinar a condição inicial mais próxima do real, esta avaliação foi uma sugestão de Ferreira (2016).

5.1 Número de ciclos no *spinup*

Foram realizadas integrações sucessivas para o evento do dia 07/11/2014 fazendo modificações no tempo de ajuste do modelo com o objetivo de verificar se a perda computacional com o aumento do número de ciclos seria justificável e se haveria um ganho na representação da condição inicial do modelo. Os testes ocorreram na escala de tempo de 24 horas (5 ciclos), 48 horas (9 ciclos) e 72 horas (13 ciclos) conforme ilustrado na figura 5.1.

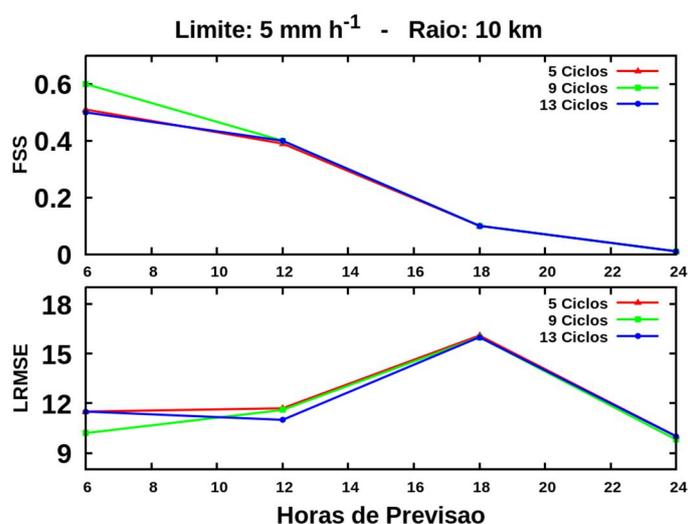
A parametrização de microfísica utilizada foi a WDM6, pois não sabia neste ponto do trabalho qual a melhor microfísica a ser utilizada. Portanto optou-se por utilizar uma opção recentemente empregada em um trabalho na mesma área de estudo por Ferreira (2016). Com isso foi testado o número de ciclos realizando assimilação de dados convencionais (GTS) a cada 6 horas. O GFS foi usado como condição inicial apenas no 1º ciclo de ajuste do modelo. No último ciclo foi gerada uma previsão de 12 horas de precipitação acumulada a cada 3 horas. A análise gerada pelo modelo foi comparada com a precipitação estimada do CoSch3.

Na análise objetiva dos índices FSS e LRMSE (figura 11), onde o tempo de ajuste do modelo com 9 ciclos (48 horas) apresentou uma margem de acerto maior no que se refere a localização (FSS) e uma menor margem de erro na intensidade (LRMSE) da precipitação com limites de 5 mm em 10 km.

Tendo em vista que a assimilação de dados perturba o modelo, principalmente utilizando o 3D-Var que não tem integração no tempo como o 4D-Var, justifica-se o resultado encontrado pois o 3D-Var por natureza prejudica o balanço do modelo. Com isso, a opção com maior número de ciclos (13 ciclos) pode ter proporcionado menor balanço no modelo acarretando erro na previsão de curto prazo de formações convectivas. Entretanto, 5 ciclos mostraram-se insuficientes para reduzir

satisfatoriamente o tempo de *spinup* do modelo e, sendo assim, para este estudo ficou definida a utilização de 9 ciclos em todas as rodadas iniciais de cada evento. Para futuros trabalhos, devem-se fazer mais testes, pois foi testado em apenas uma data devido a restrições de processamento e de espaço para armazenamento dos resultados no supercomputador (tupã), além do tempo reduzido para o mestrado.

Figura 5.1 Resultado da Análise Objetiva do número de ciclos do *spinup*



Fonte – Produção do autor

A partir desta avaliação, foi adotado o tempo de 48 horas de ajuste do modelo para todas as rodadas iniciais das parametrizações.

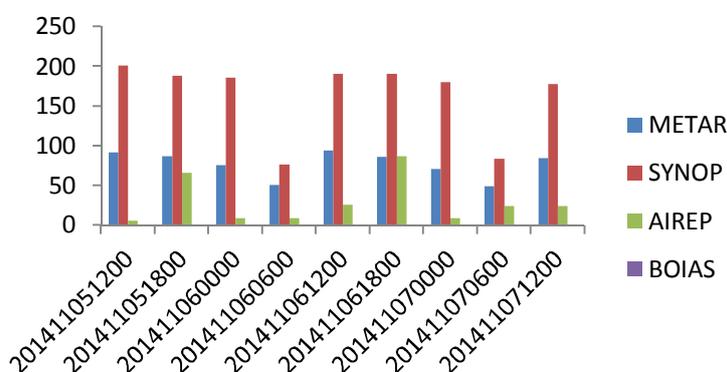
5.2 Dados assimilados

Na área de estudo, uma grande variedade de dados de superfície e de altitude estavam disponíveis através de mensagens do tipo METAR, SYNOP e AIREP, e oriundas das SONDAGENS e BOIAS.

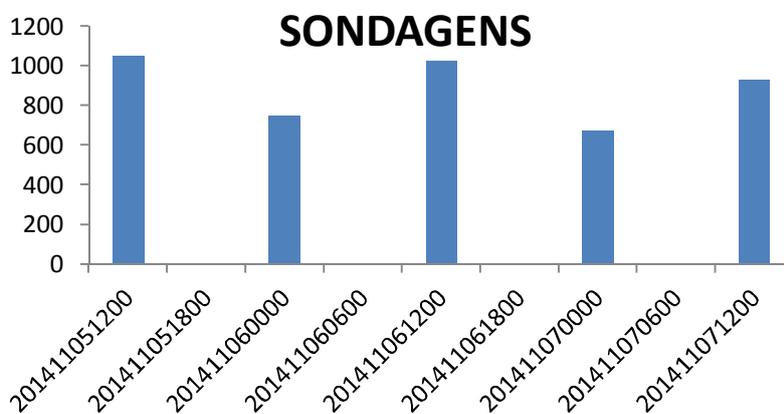
Dentre os dados assimilados em cada uma das parametrizações não houve mudança significativa na quantidade e tipo dos dados (direção e intensidade do vento, temperatura, pressão e razão de mistura), sendo assim não será apresentado o gráfico de todas as parametrizações e sim os valores da parametrização Thompson, escolhida de forma aleatória. Houve apenas um dado (pressão de superfície) de boia e por isso não aparece nos gráficos.

As figuras 5.2(a) e 5.2(b) mostram a quantidade de dados assimilados por ciclo GTS no dia 07/11/2014, utilizando a quantidade dos dados assimilados na parametrização Thompson. Consta-se a importância das sondagens das 00z (menor número de estações) e 12z (maior número de estações) para a assimilação, que fornecem o maior número de dados assimilados sem considerar os dados do radar, pois cada nível e variável de uma sondagem são considerados um dado diferente.

Figura 5.2 Quantidade de dados assimilados no *spinup* do dia 07/11/2014 usando a parametrização Thompson: (a) METAR, SYNOP, AIREP, BOIAS; (b) Sondagens.



(a)

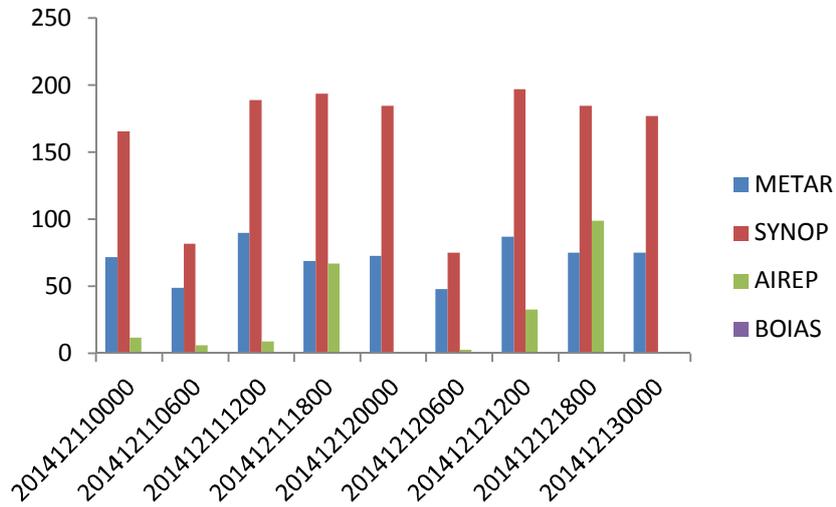


(b)

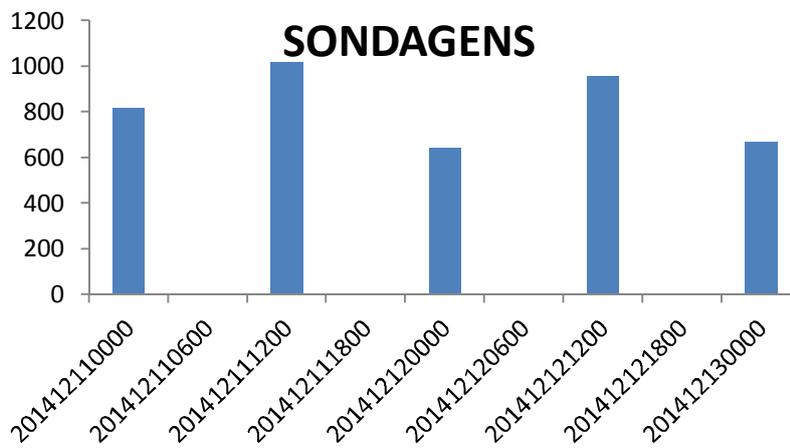
Fonte – Produção do autor.

As Figuras 5.3(a) e 5.3(b) mostram a quantidade de dados assimilados por ciclo GTS no dia 13/12/2014, observa-se o mesmo padrão de assimilação dos dados em todos os eventos.

Figura 5.3 Quantidade de dados assimilados no spinup do dia 13/12/2014 usando a parametrização Thompson: (a) METAR, SYNOP, AIREP, BOIAS; (b) Sondagens.



(a)

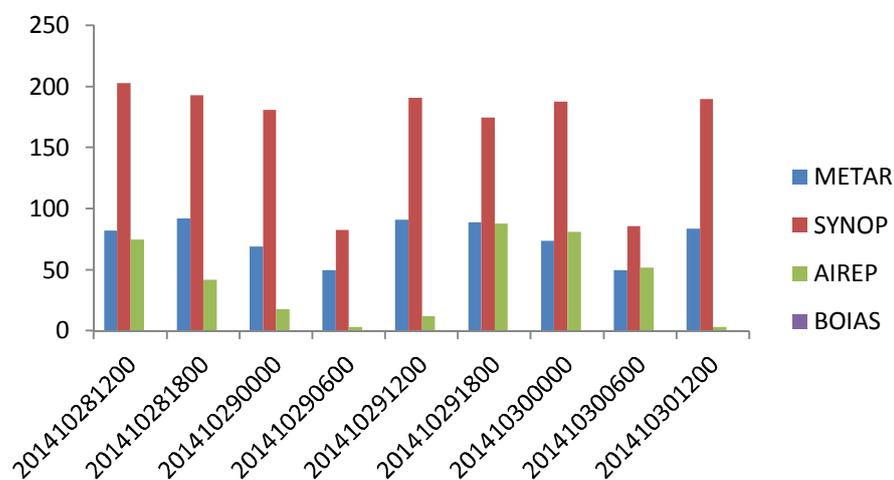


(b)

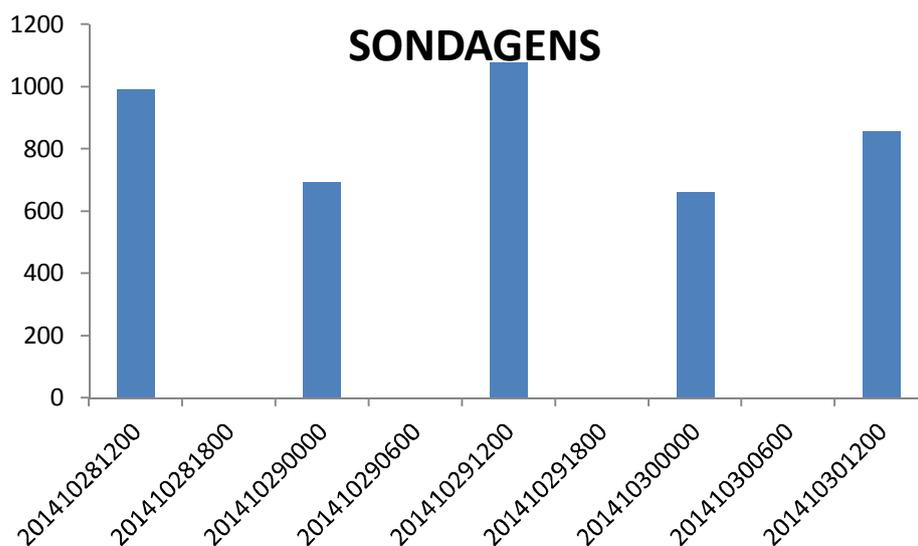
Fonte – Produção do autor.

Observa-se, nas figuras 5.2(a), 5.3(a) e 5.4(a), que os ciclos das 12z foram aqueles com maior número de dados disponibilizados e assimilados, e os ciclos das 6z foram os de menor número de dados disponibilizados e assimilados.

Figura 5.4 Quantidade de dados assimilados no *spinup* do dia 30/10/2014 usando a parametrização Thompson: (a) METAR, SYNOP, AIREP, BOIAS; (b) Sondagens.



(a)



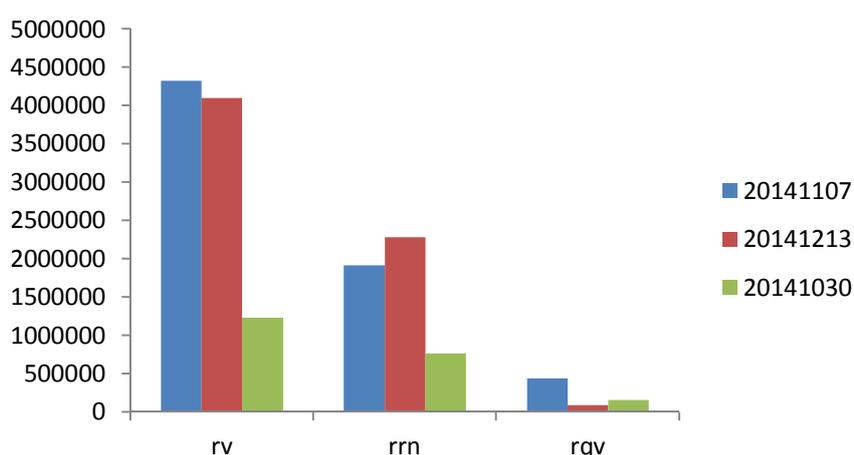
(b)

Fonte – Produção do autor.

Observa-se que para o evento do dia 07/11/14 (Figura 5.2), houve um número maior de dados assimilados pelo modelo em relação aos outros eventos, destacando-se os dados de sondagens. Esta variação na quantidade de dados é justificada pelo número de sondagens válidas para o período e pela altitude alcançada pelo balão meteorológico, onde a maior altitude implicou em um número maior de dados.

Na figura 5.5, as variáveis do radar assimiladas foram vento (rv), razão de mistura da água de chuva (rrn) e razão de mistura do vapor d'água (rqv). A quantidade de dados assimilados de radar foi muito superior aos dados GTS, sendo a variável do vento a de maior quantidade. Este fato é justificável, pois mesmo não havendo um valor significativo de refletividade (dbz) para água de chuva, este mesmo ponto pode conter um valor significativo de vento. Além disso, a variável razão de mistura de vapor d'água estimada, conforme Wang (2013), é limitada para apenas uma parcela da nuvem considerada saturada com um valor limite de refletividade acima da base da nuvem, sendo assim, justifica-se o baixo número de dados de vapor d'água.

Figura 5.5 Quantidade de dados na assimilação de dados de radar em cada evento usando Thompson.



Fonte – Produção do autor.

5.3 Incrementos

As diferentes parametrizações têm impacto apenas durante a integração do modelo. Desta forma, as diferenças nos incrementos não vêm diretamente da assimilação de dados, mas sim dos diferentes *backgrounds* fornecidos em cada ciclo por serem provenientes de integrações do modelo com diferentes parametrizações de microfísica. Por esta razão, observa-se o padrão similar nos incrementos das variáveis em relação a todas as parametrizações, apresentando impacto positivo da assimilação de dados do

radar, modificando a circulação de ar atmosférico na região do radar e alterando a razão de mistura de vapor d'água pontualmente.

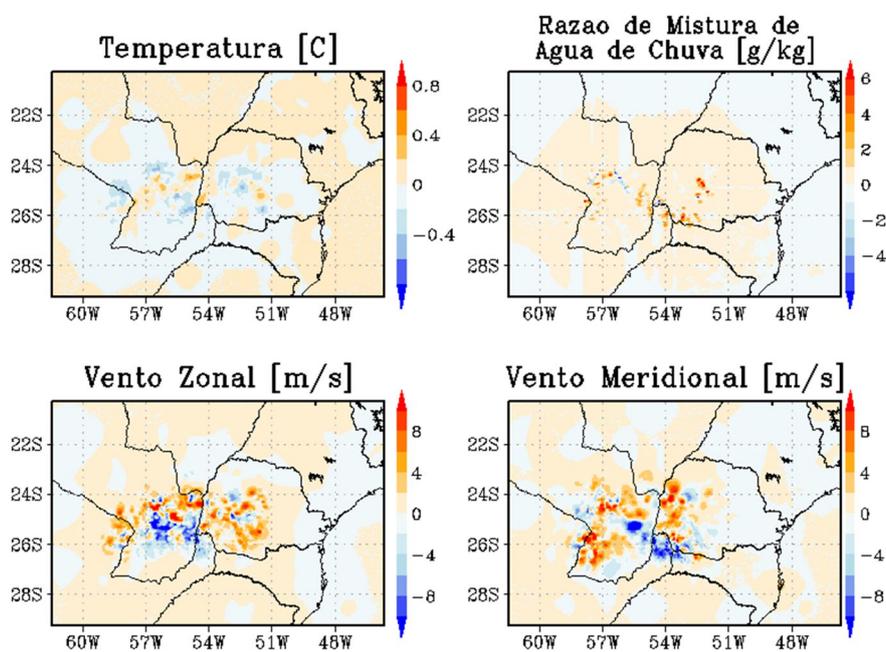
A pouca alteração na razão de mistura de água de chuva no dia 30/10/2014 é justificada pelo menor índice pluviométrico para o dia na região de cobertura do radar, implicando em menor quantidade de dados de refletividade a serem assimilados. Ressalta-se que a baixa quantidade de dados de refletividade não implica diretamente em pouca quantidade de dados de vento, uma vez que valores baixos de refletividade podem provocar baixo ou nenhum incremento, enquanto que os dados de vento podem ser extraídos normalmente (figura 5.5). No caso do dia 13/12/2014, nota-se o maior ajuste das variáveis na área de Santa Catarina devido ao número de dados assimilados do radar de Teixeira Soares, pois foi o único caso com dados dos três radares para a assimilação.

Seguem as análises dos incrementos de cada parametrização em cada um dos eventos:

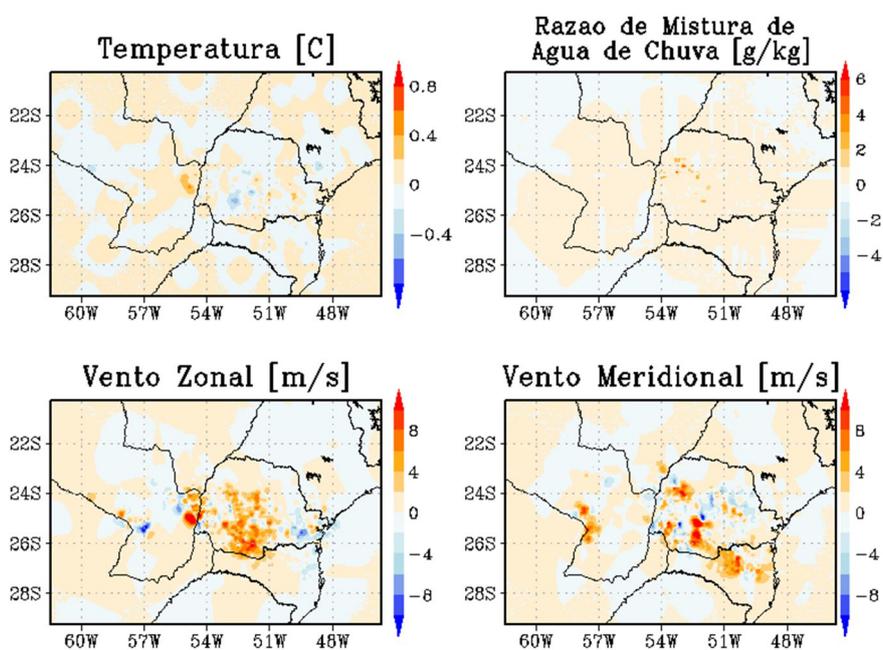
5.3.1 Kessler

A figura 5.6 mostra o incremento gerado utilizando a parametrização de Kessler no nível de 3 km, onde a alteração foi significativa na área da variável do vento, acarretando uma significativa mudança na dinâmica da atmosfera. O incremento na razão de mistura de água de chuva foi maior (6g/kg) no dia 07/11/2014, porém a maior área de influência foi na variável vento no dia 13/12/2014, pois foi a única data com dados dos 3 radares (ASU, CAS e TXS).

Figura 5.6 Incrementos ocorridos com a parametrização Kessler no nível de 3 km: (a) evento dia 07/11/2014; (b) evento dia 13/12/2014 e (c) evento dia 30/10/2014.

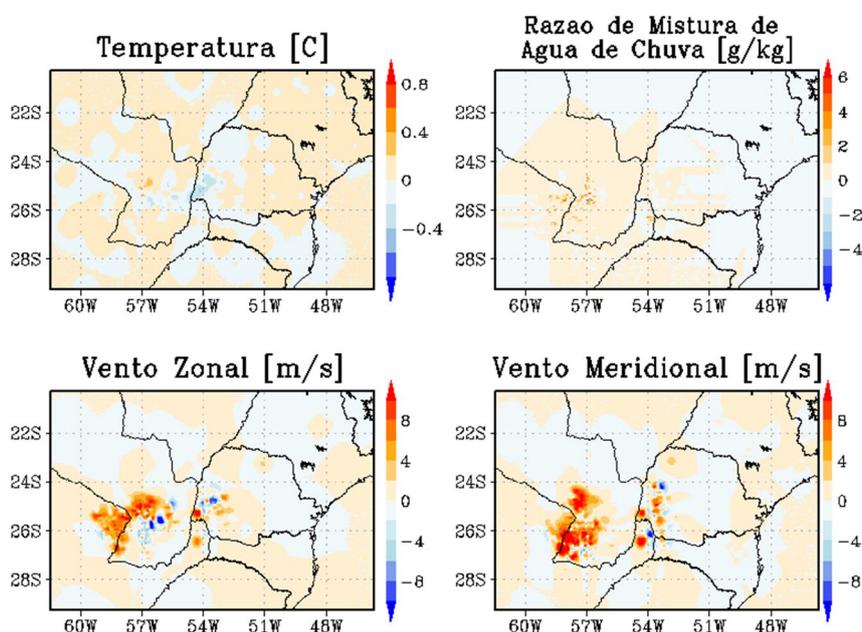


(a)07/11/2014



J

(b)13/12/2014



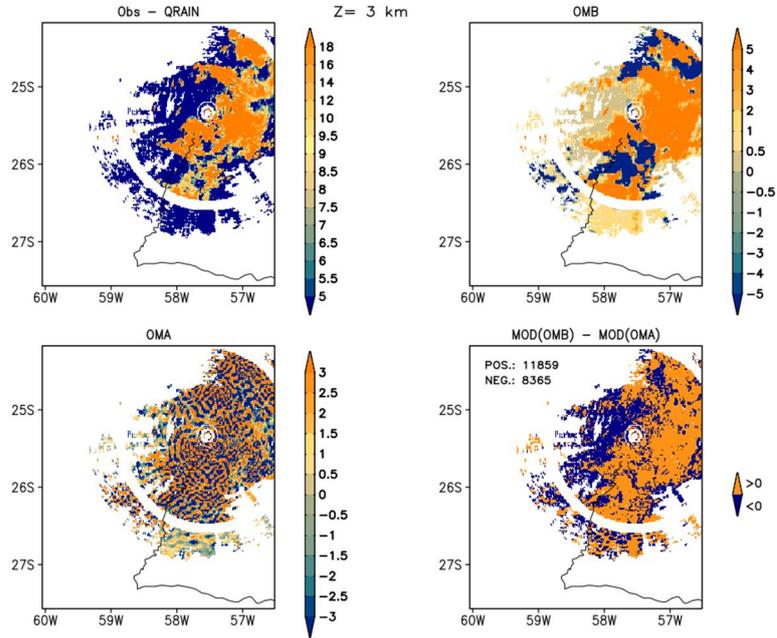
(c)30/10/2014

Fonte – Produção do autor.

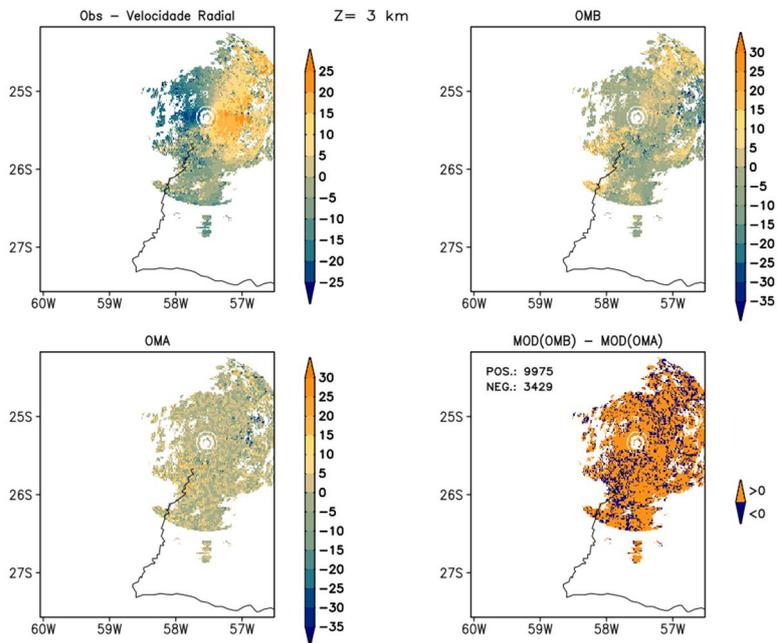
No evento do dia 07/11/2014 e em todas as parametrizações de microfísica testadas, todos os perfis verticais médios do módulo da diferença entre a observação e o background (OMB), do módulo da diferença entre a observação e a análise (OMA) (figuras 5.7(a) e 5.7(b), canto inferior direito) e da observação para a refletividade e velocidade radial (figura 5.8(a)) foi observado algum ganho após a assimilação dos dados do radar, pois o perfil OMA é predominantemente menor do que OMB, isto significa que, após o processo de ADR, a análise gerada a partir do *background* quase sempre está mais próxima da observação do que a análise produzida do *background* sem ADR.

Analisando a figura 5.7, observa-se que OMB apresenta um padrão de cores que indica valores mais altos que se afastam do observado e OMA apresenta-se num formato de cores com valores mais próximos de zero, indicando maior proximidade do valor observado. Este padrão de cores ocorreu em todas as parametrizações.

Figura 5.7 Diferença entre a observação e o background (OMB) e da diferença entre a observação e a análise (OMA) para: (a) Razão de mistura de água de chuva e (b) velocidade radial; ambas usando a parametrização de Kessler no nível de 3 km.



(a)

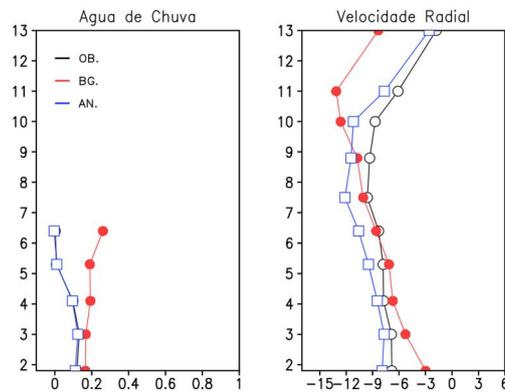


(b)

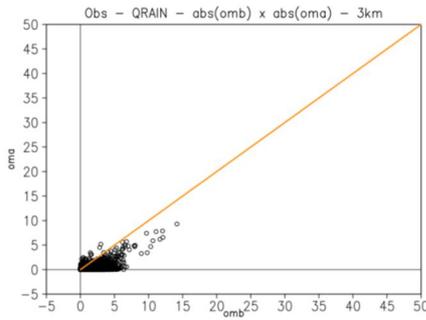
Fonte – Produção do autor.

Na figura 5.8, os valores médios de cada nível do background ficaram diferentes do observado, enquanto que a análise, gerada do background com ADR, coincidiu com o observado no perfil vertical da razão de água de chuva. Houve um ajuste do perfil vertical da velocidade radial com a assimilação de dados fazendo o *background* se aproximar do observado, gerando uma análise mais acurada.

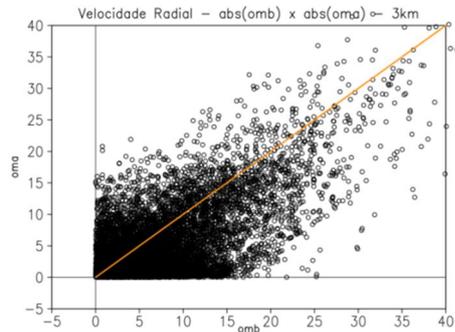
Figura 5.8 (a) Perfil vertical médio da observação (Radar), do background e da análise para a razão de mistura de água de chuva e velocidade radial usando a parametrização Kessler; (b) Comparativo de valores dos dados de água de chuva de OMB e de OMA; (c) Comparat



(a)



(b)



(c)

Fonte – produção do autor.

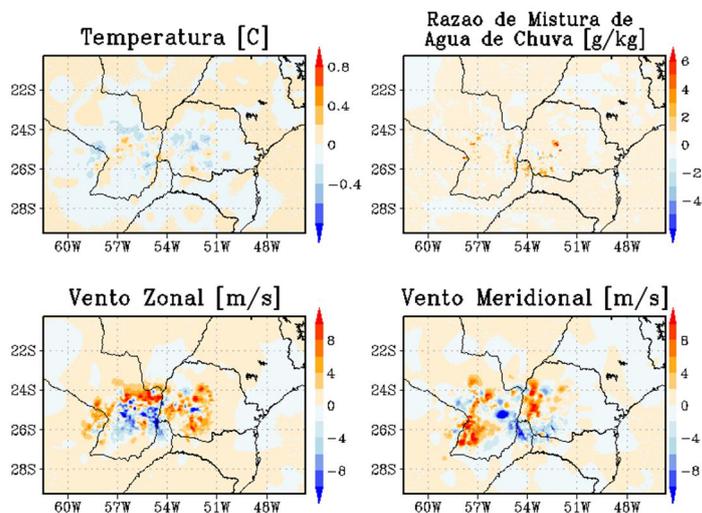
Nas figuras 5.8(b) e 5.8(c), observa-se um maior número de dados abaixo da reta 1:1, que indica um maior valor do OMB em relação ao OMA. Este resultado indica uma maior eficiência da assimilação, gerando uma análise melhor que o background.

Destacam-se em todas as parametrizações os valores inferiores da OMA em relação ao OMB, demonstrando que a assimilação de dados melhorou o *background*.

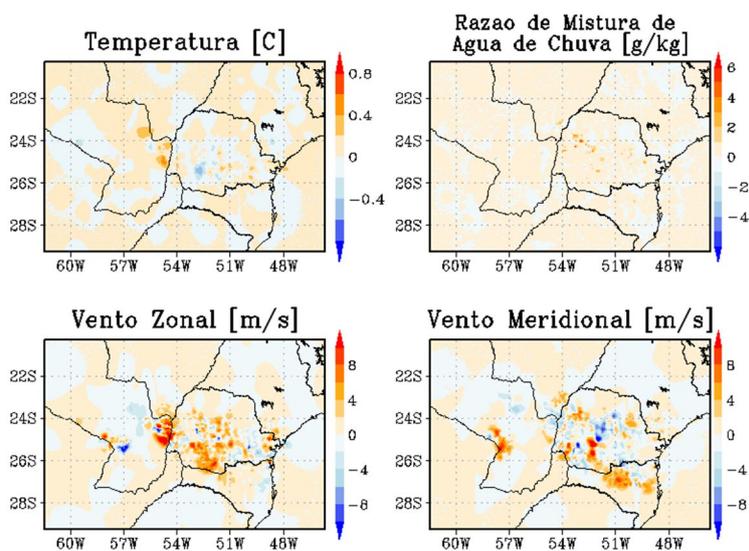
5.3.2 Lin

Valores pontuais de alteração na razão de mistura de água de chuva indicam a formação de núcleos convectivos, principalmente no evento do dia 07/11/2014. Observa-se, na figura 5.9, que houve mais inclusão de razão de mistura de água de chuva do que a retirada, indicando o ganho com a assimilação de dados de radar. A alteração acarretada pelo incremento da variável do vento zonal e meridional acarretou a mudança na dinâmica da atmosfera, com maior intensidade no dia 30/10/14 e maior área no dia 13/12/14, fato que ocorreu em todas as parametrizações.

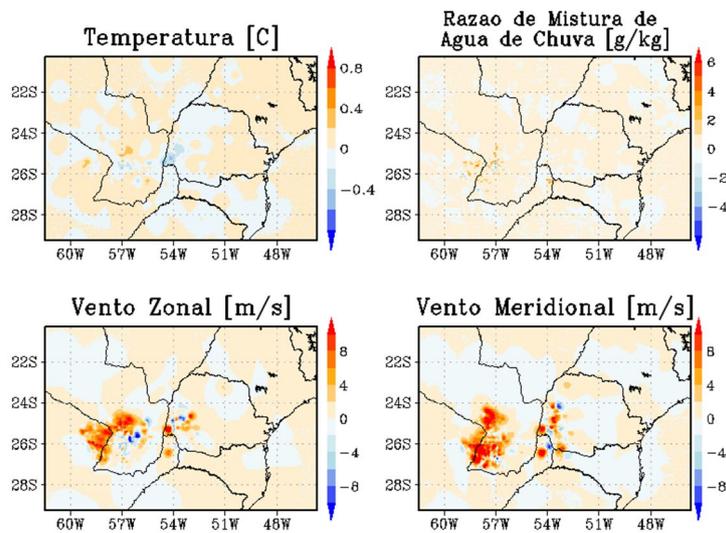
Figura 5.9 - Incrementos ocorridos com a parametrização Lin: (a) evento dia 07/11/2014; (b) evento dia 13/12/2014 e (c) evento dia 30/10/2014.



(a)07/11/2014



(b)13/12/2014

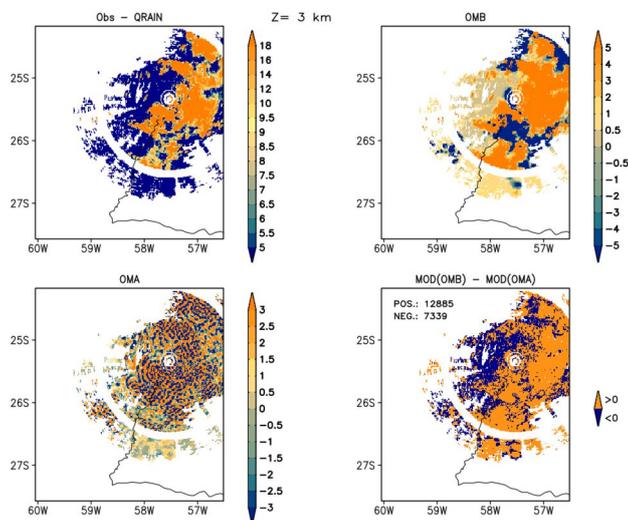


(c)30/10/2014

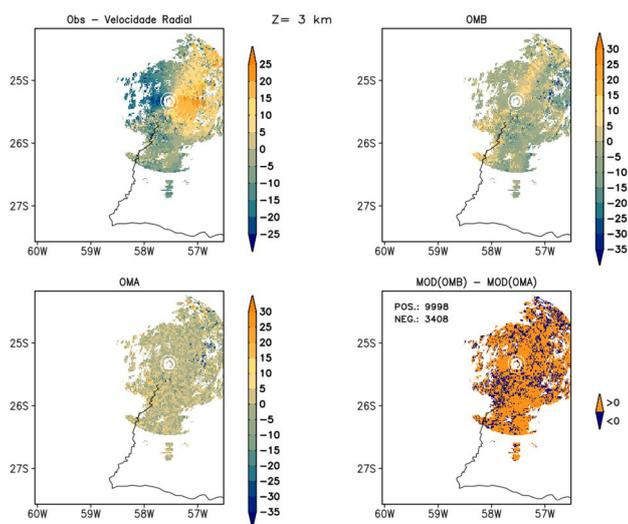
Fonte – Produção do autor

O padrão de cores, observado nas figuras 5.10(a) e 5.10(b) no canto inferior esquerdo, indica valores menores e mais próximos da média observada nas variáveis de água de chuva (figura 5.10(a)) e vento radial (figura 5.10(b)) na área de cobertura do radar de ASU. Destaca-se o predomínio da área positiva na figura 5.10 (canto inferior direito), indicando que os valores OMB são superiores aos valores OMA, resultado que comprova a eficácia da assimilação de dados de radar, que gerou uma análise mais próxima do real.

Figura 5.10 Diferença entre a observação e o background (OMB) e da diferença entre a observação e a análise (OMA) para: (a) Razão de mistura de água de chuva e (b) velocidade radial; ambas usando a parametrização de LIN no nível de 3 km.



(a)

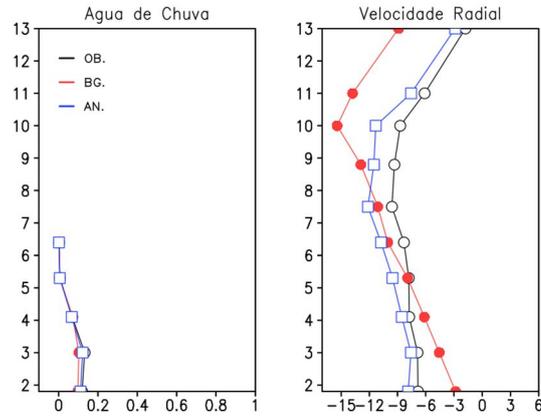


(b)

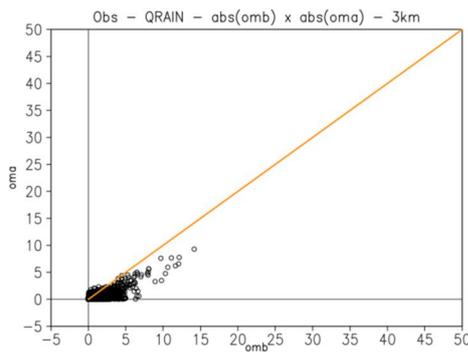
Fonte – Produção do autor.

O perfil vertical da razão de mistura de água de chuva (figura 5.11) não apresentou diferença significativa entre a observação e o background, contudo o processo de assimilação ajustou o perfil da velocidade radial (figura 5.11(a)), aproximando os valores da análise com o perfil observado.

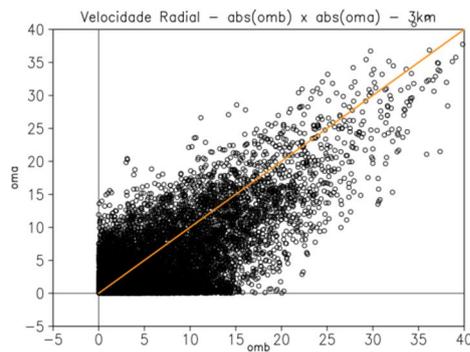
Figura 5.11 (a) Perfil vertical médio da observação (Radar), do background e da análise para a razão de mistura de água de chuva e velocidade radial usando a parametrização LIN; (b) Comparativo de valores dos dados de água de chuva de OMB e de OMA; (c) Comparativo



(a)



(b)



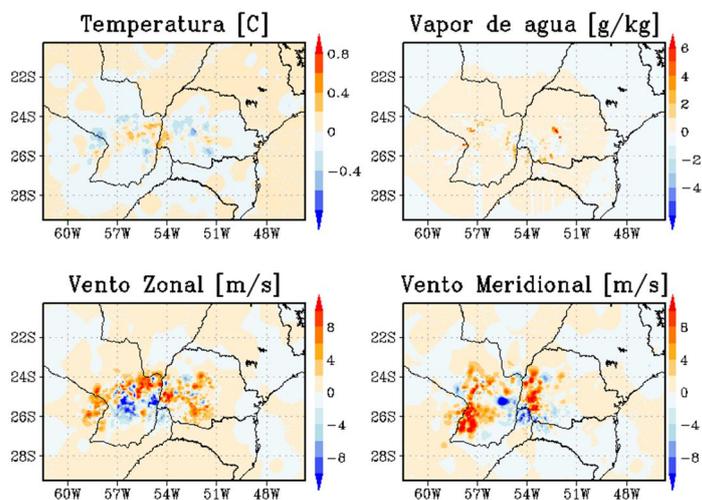
(c)

Fonte – Produção do autor.

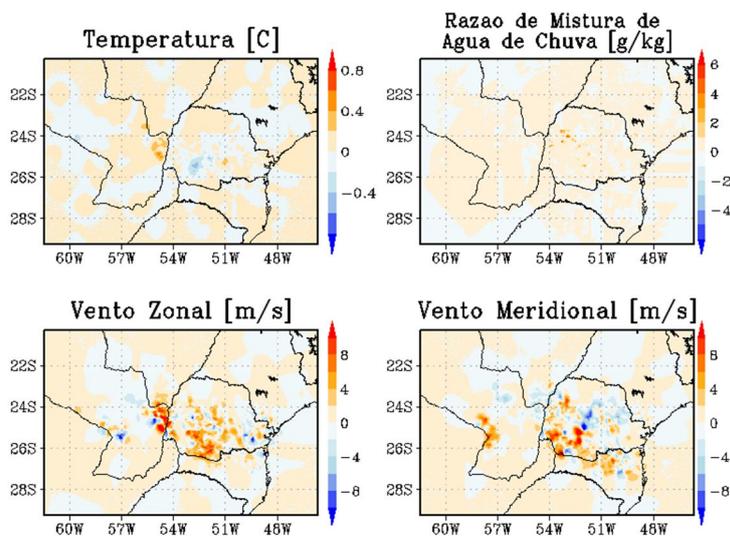
5.3.3 WSM3

O impacto no dia 07/11/2014 na variável vento foi com maior intensidade no vento meridional do que no vento zonal, mas a área foi maior na variável do vento zonal (figura 5.12(a)), indicando uma mudança na dinâmica da atmosfera com vento predominante de norte no dia 07/11/2014 e de leste nos dia 13/12/2014 e 30/10/2014.

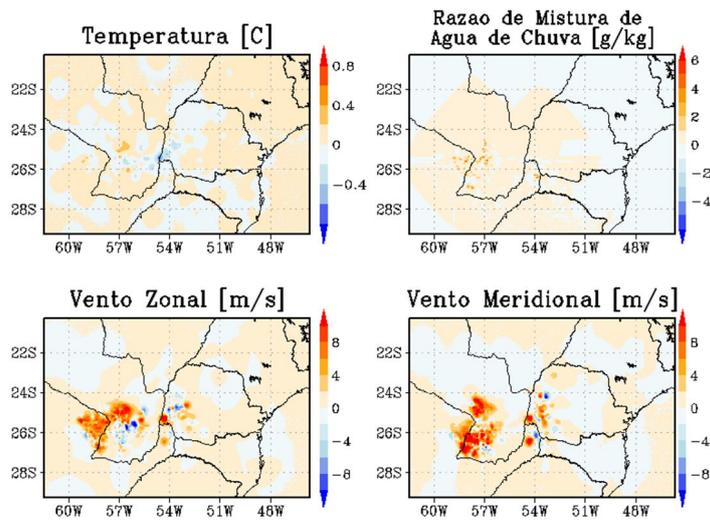
Figura 5.12 Incrementos ocorridos com a parametrização WSM3: (a) evento dia 07/11/2014; (b) evento dia 13/12/2014 e (c) evento dia 30/10/2014.



(a)07/11/2014



(b)13/12/2014

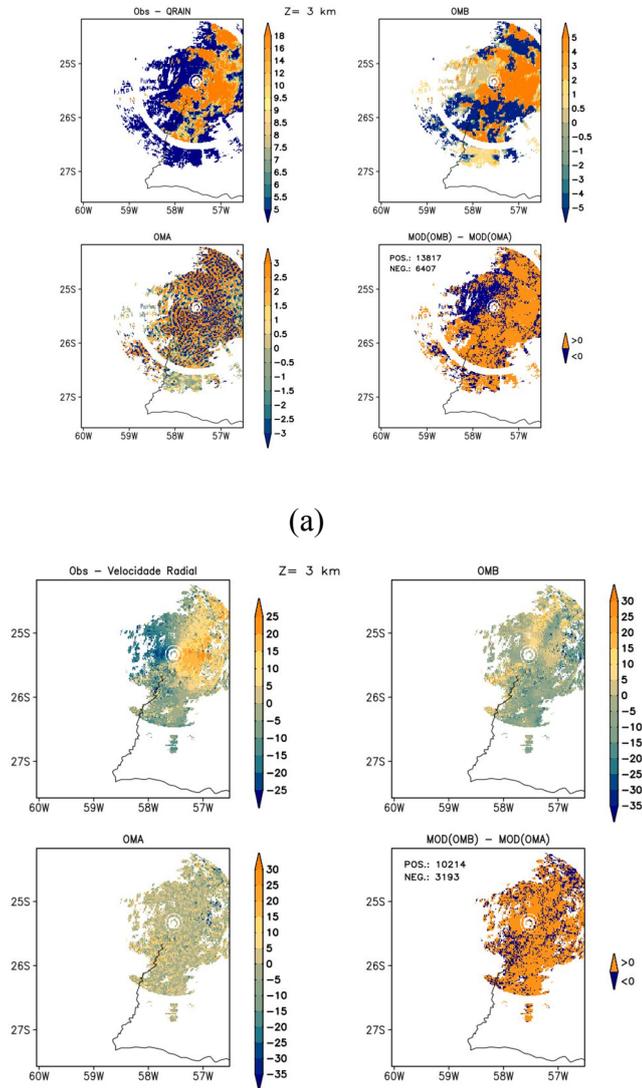


(c)30/10/2014

Fonte – Produção do autor.

Há um predomínio da área positiva na figura 5.13 que indica a diferença do módulos entre o observado, background e análise, o valor positivo indica que a distância do background ao observado é maior do que a distância da análise ao observado, comprovando a eficácia da assimilação de dados no ajuste da condição inicial, fato que ocorreu em todas as parametrizações.

Figura 5.13 Diferença entre a observação e o background (OMB) e da diferença entre a observação e a análise (OMA) para: (a) Razão de mistura de água de chuva e (b) velocidade radial; ambas usando a parametrização de WSM3 no nível de 3 km.



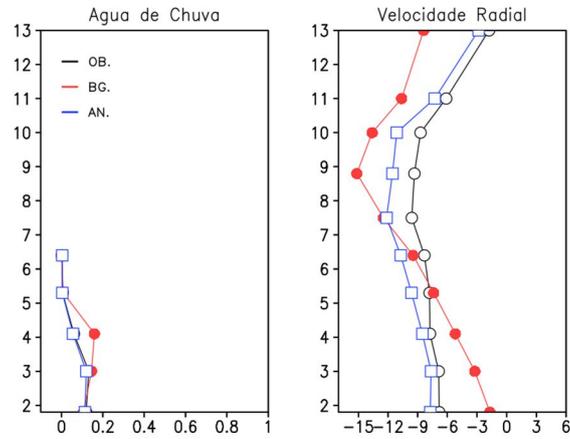
(a)

(b)

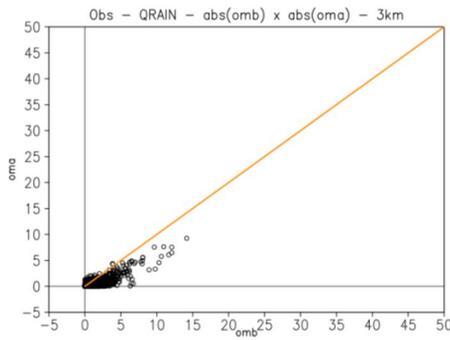
Fonte – Produção do autor.

No perfil vertical de água de chuva (figura 5.14(a)) foi observado que a média de um nível do *background* encontrava-se afastado do observado e houve um ajuste com a assimilação de dados gerando uma análise coincidente com o observado.

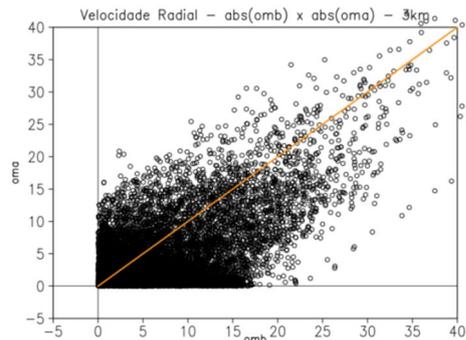
Figura 5.14 (a) Perfil vertical médio da observação (Radar), do background e da análise para a razão de mistura de água de chuva e velocidade radial usando a parametrização WSM3; (b) Comparativo de valores dos dados de água de chuva de OMB e de OMA; (c) Comparativ



(a)



(b)



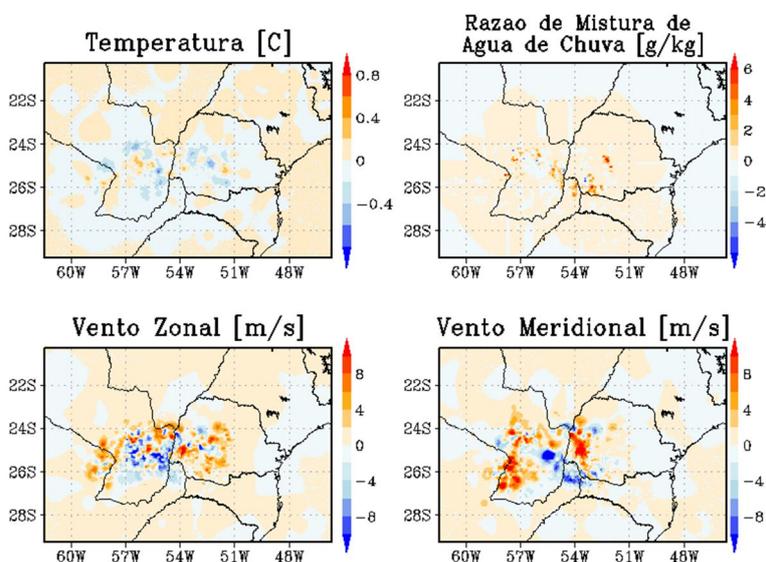
(c)

Fonte – Produção do autor.

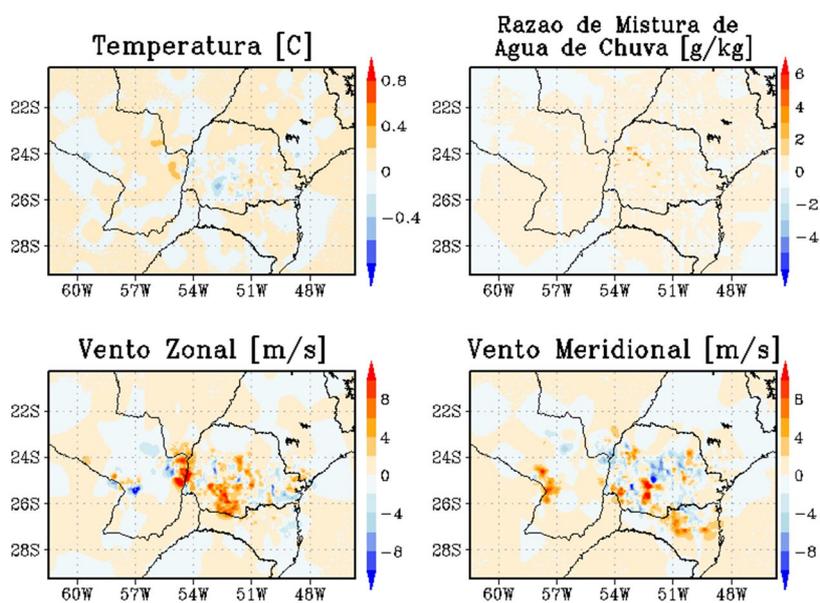
5.3.4 WSM5

Os incrementos na razão de mistura foram mais intensos no dia 07/11/2014 (figura 5.15(a)), indicando o ajuste na localização das nuvens convectivas e no dia 30/10/2014 (figura 5.15(b)) ocorreram incrementos nas variáveis (vento, temperatura e razão de mistura de água de chuva) principalmente na área de cobertura do radar de ASU, devido à localização das nuvens convectivas.

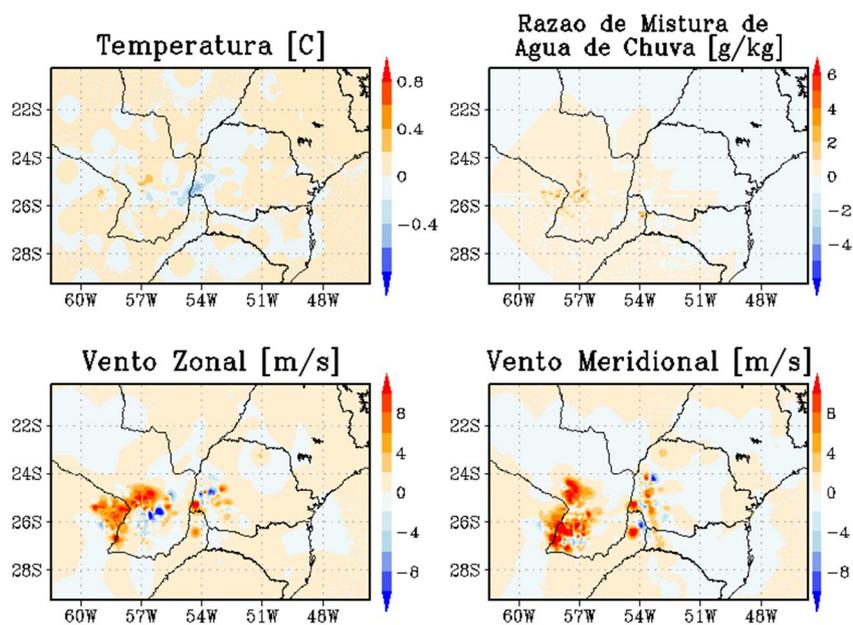
Figura 5.15 Incrementos ocorridos com a parametrização WSM5: (a) evento dia 07/11/2014; (b) evento dia 13/12/2014 e (c) evento dia 30/10/2014.



(a) 07/11/2014



(b) 13/12/2014

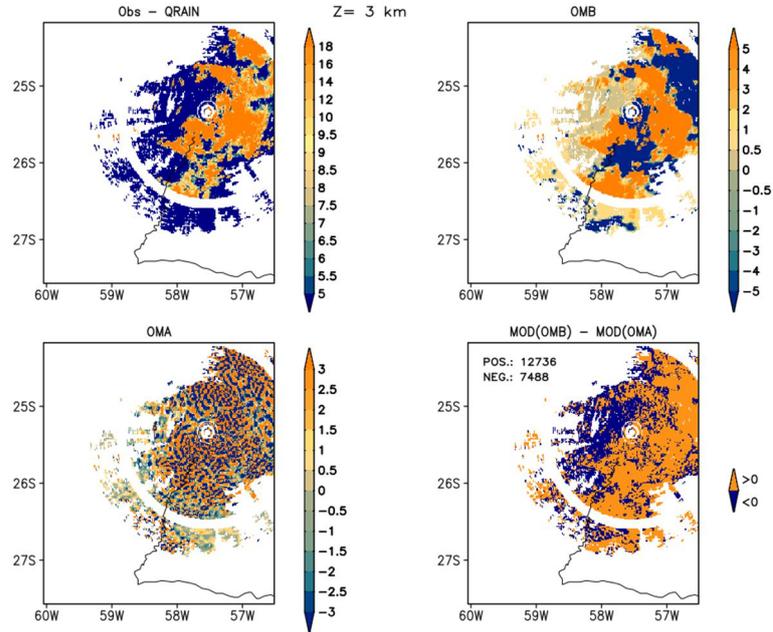


(c) 30/10/2014

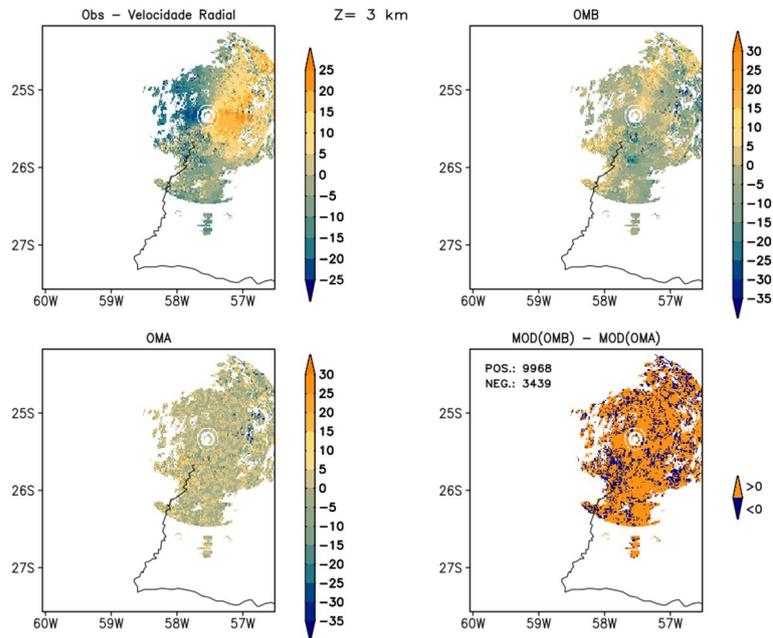
Fonte – Produção do autor.

Na figura 5.16 (canto inferior esquerdo), observa-se o mesmo padrão dos resultados das outras parametrizações, onde o padrão de cores indica uma flutuação de valores pequenos em torno de um ponto médio observado (zero) e o predomínio da área positiva no módulo das diferenças entre o observado, *background* e análise mostra a maior distância do *background* ao observado em relação à distância da análise ao observado (canto inferior direito).

Figura 5.16 Diferença entre a observação e o background (OMB) e da diferença entre a observação e a análise (OMA) para: (a) Razão de mistura de água de chuva e (b) velocidade radial; ambas usando a parametrização de WSM5 no nível de 3 km.



(a)



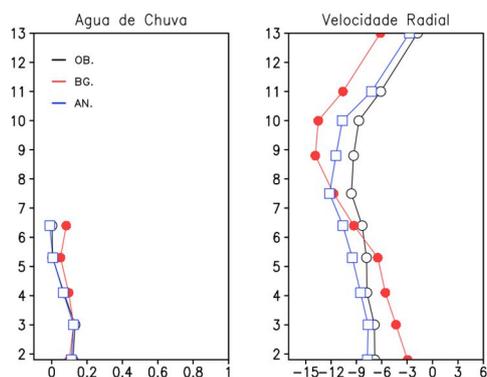
(b)

Fonte – Produção do autor.

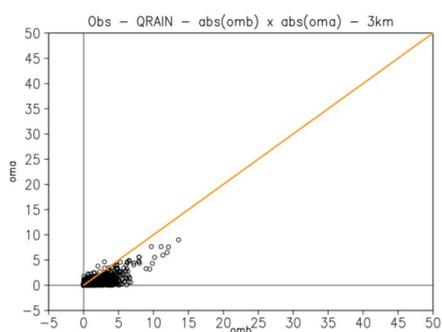
O ajuste no perfil de água de chuva, nesta parametrização, ocorreu principalmente nos níveis mais altos, onde o background apresentou valores distintos da média dos níveis conforme figura 5.17(a) e o perfil do vento apresentou a análise em praticamente todos os níveis mais ajustado do que o *background*.

Nas figuras 5.17(b) e 5.17(c), a maior quantidade de pontos abaixo da reta 1:1 indica que os valores OMB são maiores que OMA, ou seja, a análise está mais próxima do observado do que o *background*. Observa-se o maior número de pontos na figura 5.17(c) da variável do vento do que na figura 5.17(b) na variável da água de chuva.

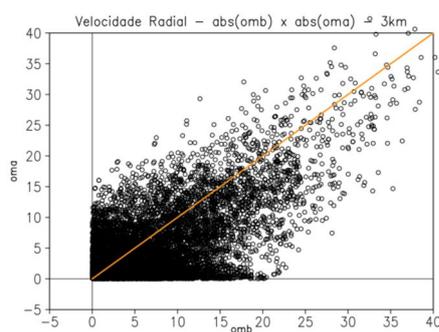
Figura 5.17 (a) Perfil vertical médio da observação (Radar), do background e da análise para a razão de mistura de água de chuva e velocidade radial usando a parametrização WSM5; (b) Comparativo de valores dos dados de água de chuva de OMB e de OMA; (c) Comparativo



(a)



(b)



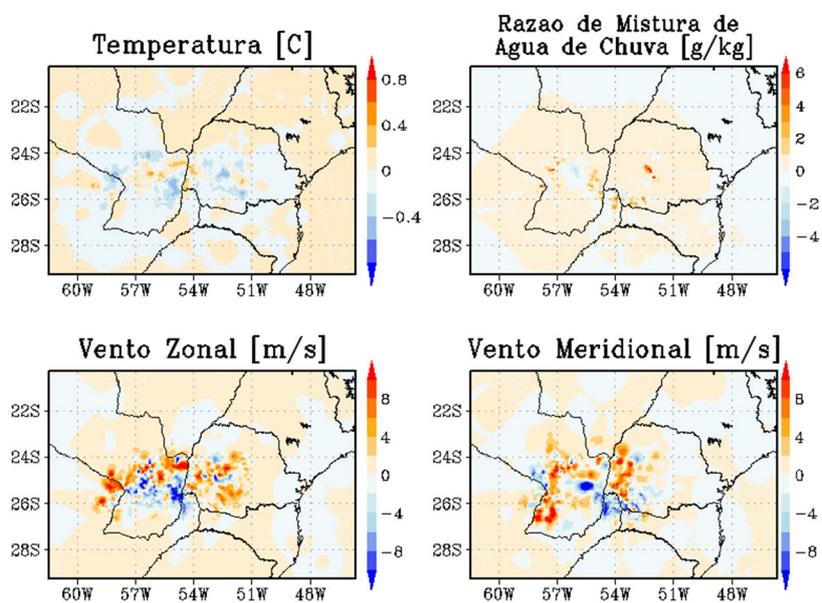
(c)

Fonte – Produção do autor.

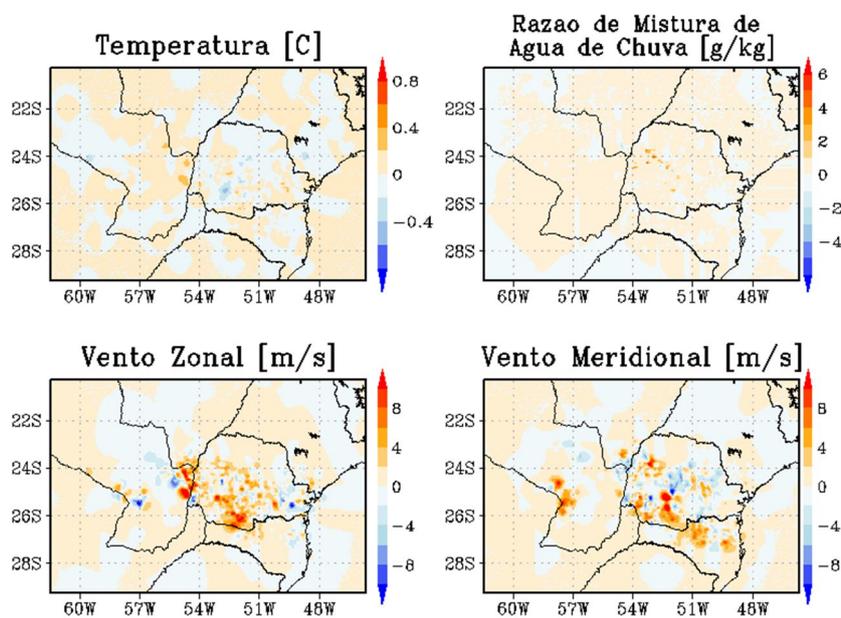
5.3.5 Ferrier

No dia 30/10/2014, as condições meteorológicas não favoreceram o incremento da razão de mistura de água de chuva na região de estudo, porém a área de incremento do vento foi maior (figura 5.18(b)). O padrão dos incrementos foi o mesmo observado nas demais parametrizações.

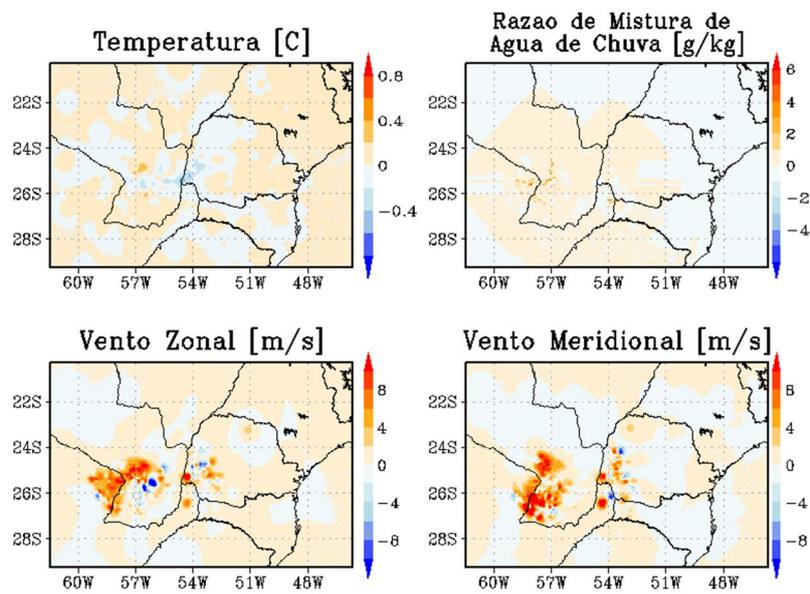
Figura 5.18 Incrementos ocorridos com a parametrização ETA: (a) evento dia 07/11/2014; (b) evento dia 13/12/2014 e (c) evento dia 30/10/2014.



(a)07/11/2014



(b)13/12/2014

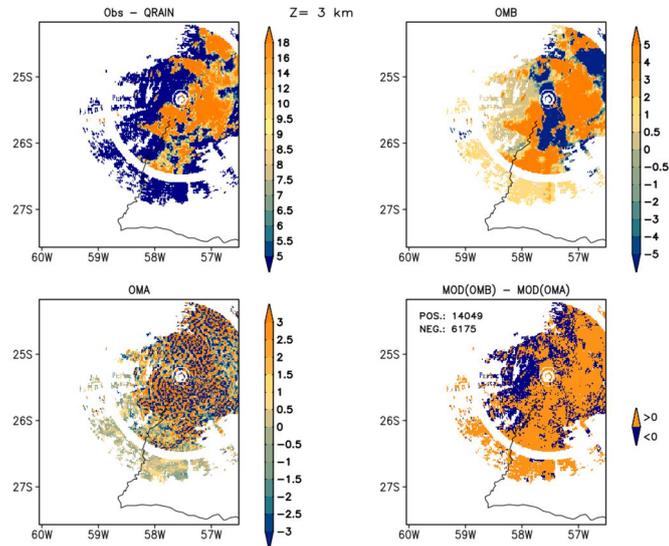


(c)30/10/2014

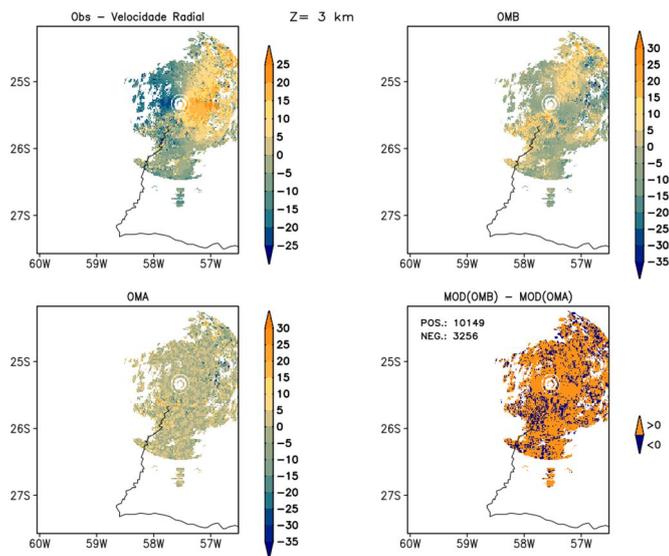
Fonte – Produção do autor.

Devem ser observados na figura 5.19(a) e 5.19(b) os resultados no canto inferior direito, os quais indicam os valores de OMB superiores aos valores de OMA, este padrão de resultado ocorreu em todas as parametrizações estudadas.

Figura 5.19 Diferença entre a observação e o background (OMB) e da diferença entre a observação e a análise (OMA) para: (a) Razão de mistura de água de chuva e (b) velocidade radial; ambas usando a parametrização de ETA no nível de 3 km.



(a)



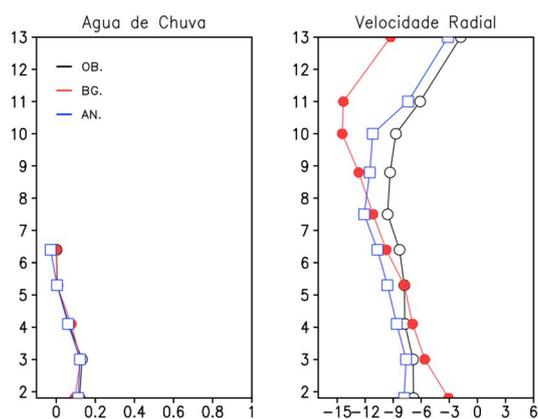
(b)

Fonte – Produção do autor.

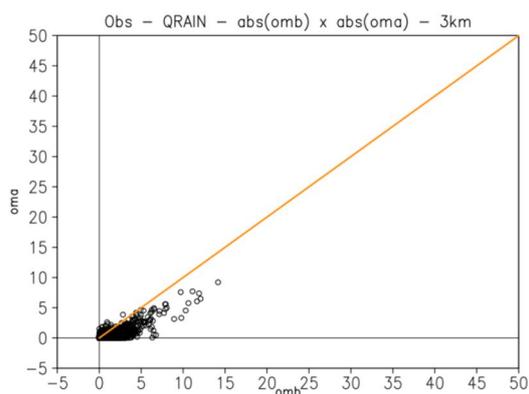
As figuras 5.20(a) e 5.20(b) mostram um número maior de pontos abaixo da reta 1:1, que determinam os valores de background maiores do que os valores da análise em relação ao observado. Apesar do perfil de água de chuva apresentar valores médios dos

níveis do *background* próximos ao observado, o ajuste ocorrido no perfil do vento fez a análise apresentar valores mais próximos do observado (figura 5.20(a)).

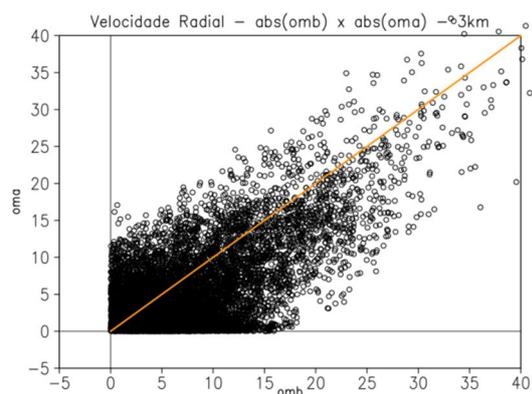
Figura 5.20 (a) Perfil vertical médio da observação (Radar), do background e da análise para a razão de mistura de água de chuva e velocidade radial usando a parametrização ETA; (b) Comparativo de valores dos dados de água de chuva de OMB e de OMA; (c) Comparativo



(a)



(b)



(c)

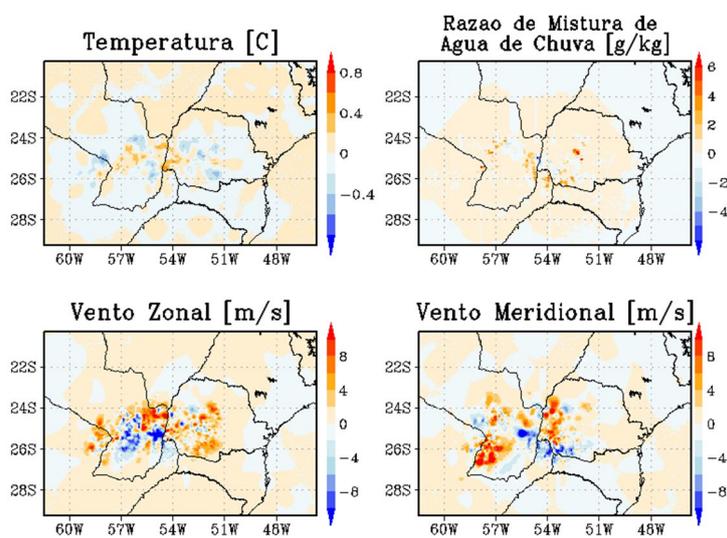
Fonte – Produção do autor.

5.3.6 WSM6

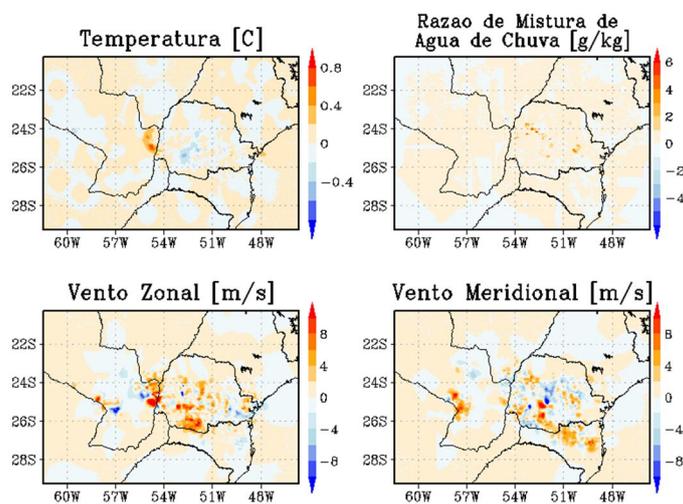
Os incrementos ocorridos na temperatura e na razão de mistura ocorreram numa maior área de cobertura no dia 07/11/2014 devido às condições do tempo e os incrementos do

vento ocorreram numa área maior no dia 13/12/2014, em razão do número de dados de radar assimilados em TXS (figura 5.21).

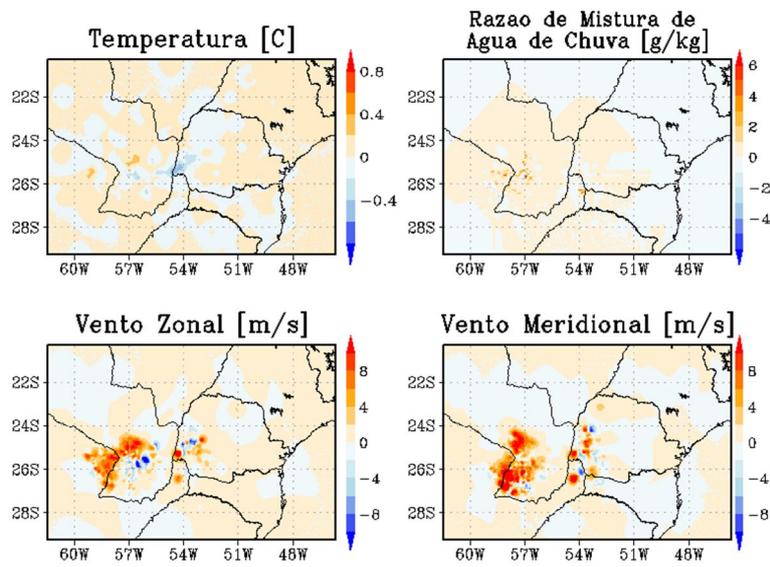
Figura 5.21 Incrementos ocorridos com a parametrização WSM6: (a) evento dia 07/11/2014; (b) evento dia 13/12/2014 e (c) evento dia 30/10/2014.



(a)07/11/2014



(b)13/12/2014

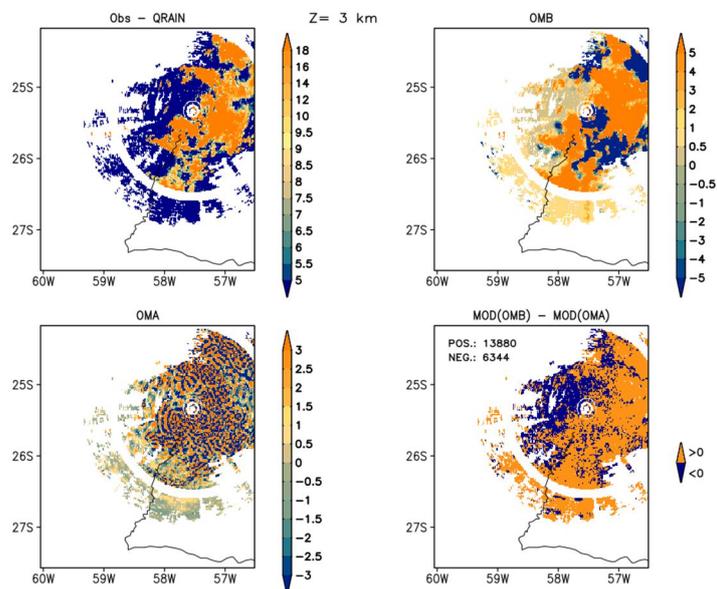


(c)30/10/2014

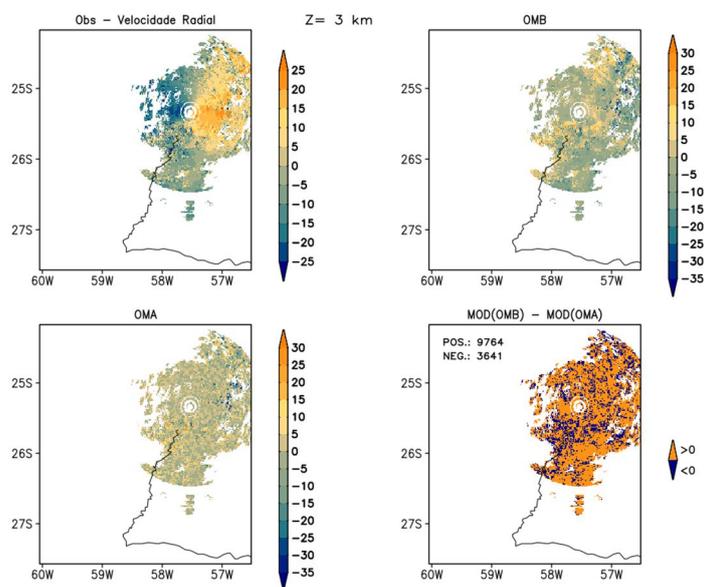
Fonte – Produção do autor.

Na figura 5.22 (canto inferior direito), o valor positivo da diferença dos módulos OMB-OMA, indica que a distância da análise ao observado é menor do que a distância do *background* ao observado, este padrão de cores ocorreu em todas as parametrizações nas variáveis de água de chuva (QRAIN) e vento (velocidade radial).

Figura 5.22 Diferença entre a observação e o background (OMB) e da diferença entre a observação e a análise (OMA) para: (a) Razão de mistura de água de chuva e (b) velocidade radial; ambas usando a parametrização de WSM6 no nível de 3 km.



(a)



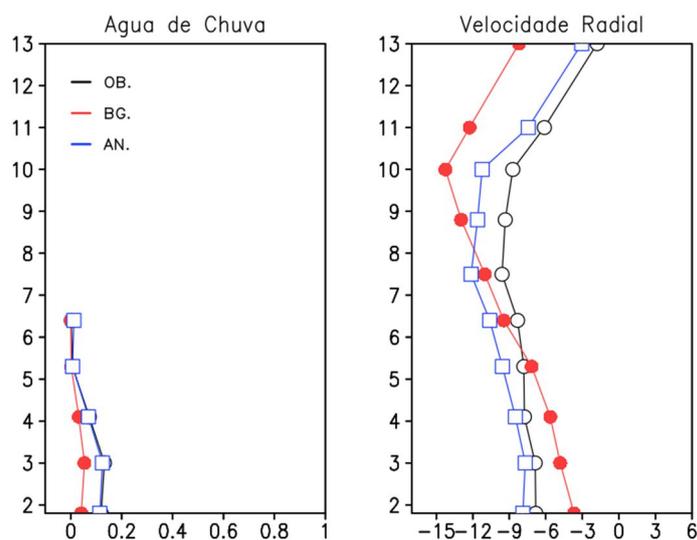
(b)

Fonte – Produção do autor.

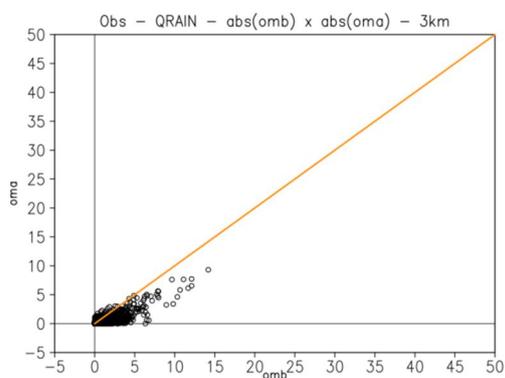
Este esquema apresentou a média dos níveis baixos diferentes do observado no perfil vertical de água de chuva, porém a assimilação de dados fez o ajuste da análise. No

perfil do vento, o ajuste foi maior praticamente em todos os níveis, exceto em 3 níveis médios.

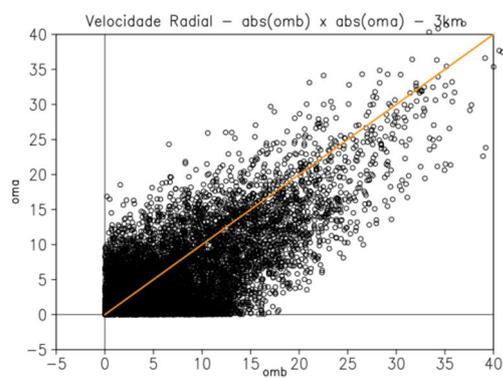
Figura 5.23 (a) Perfil vertical médio da observação (Radar), do background e da análise para a razão de mistura de água de chuva e velocidade radial usando a parametrização WSM6; (b) Comparativo de valores dos dados de água de chuva de OMB e de OMA; (c) Comparativo



(a)



(b)



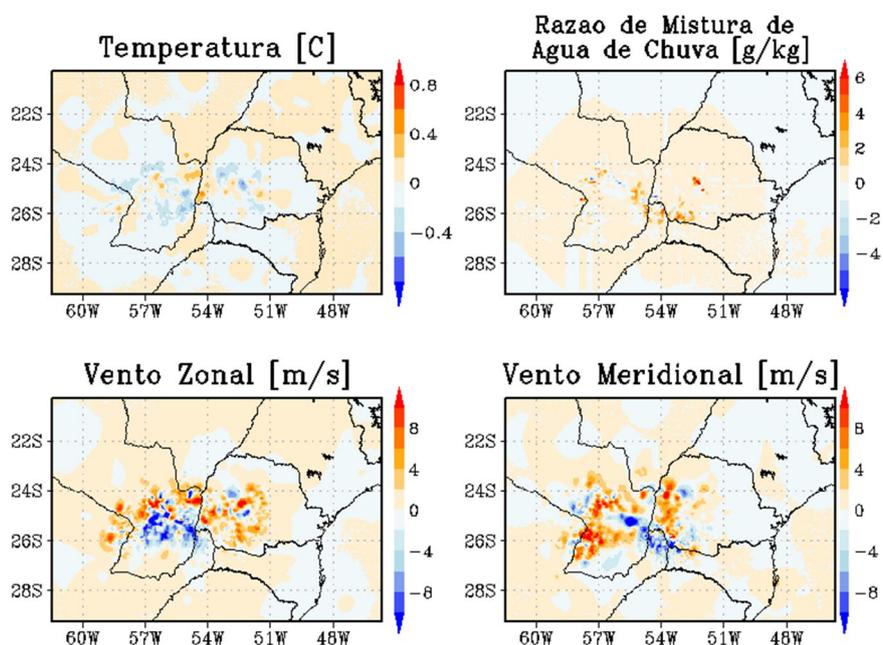
(c)

Fonte – Produção do autor.

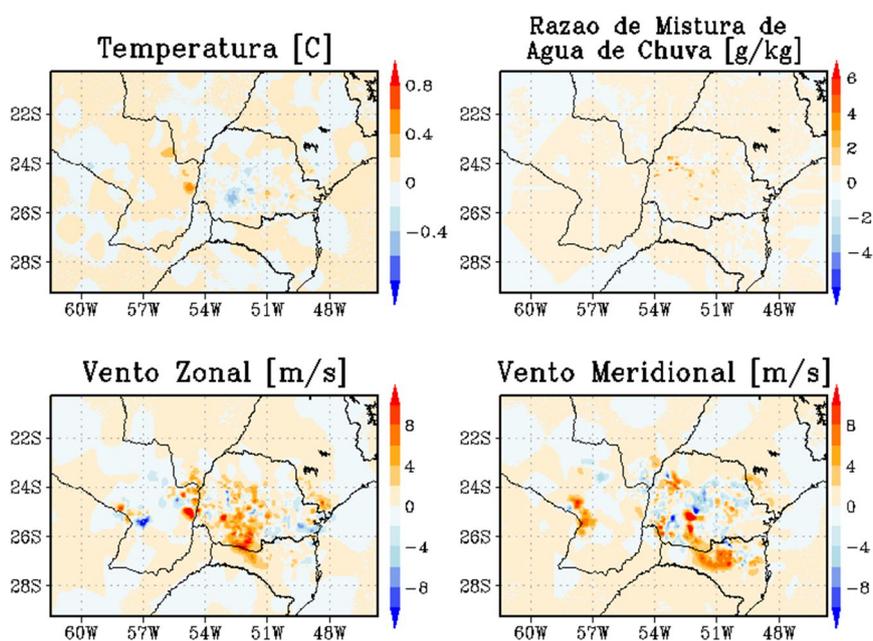
5.3.7 Thompson

Na figura 5.24, observam-se altos valores de incrementos de razão de mistura de água de chuva no dia 07/11/2014, pois havia formações convectivas na região dos radares de CAS e ASU. Em contrapartida, nos dias 30/10/2014 e 13/12/2014 os valores foram inferiores e localizados no Paraguai e no Paraná, respectivamente.

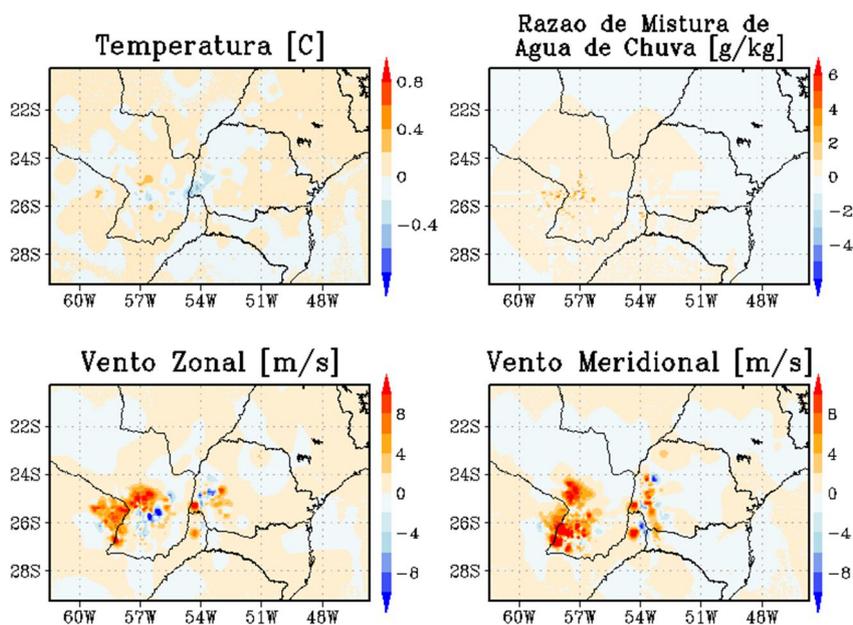
Figura 5.24 Incrementos ocorridos com a parametrização Thompson: (a) evento dia 07/11/2014; (b) evento dia 13/12/2014 e (c) evento dia 30/10/2014.



(a)07/11/2014



(b)13/12/2014

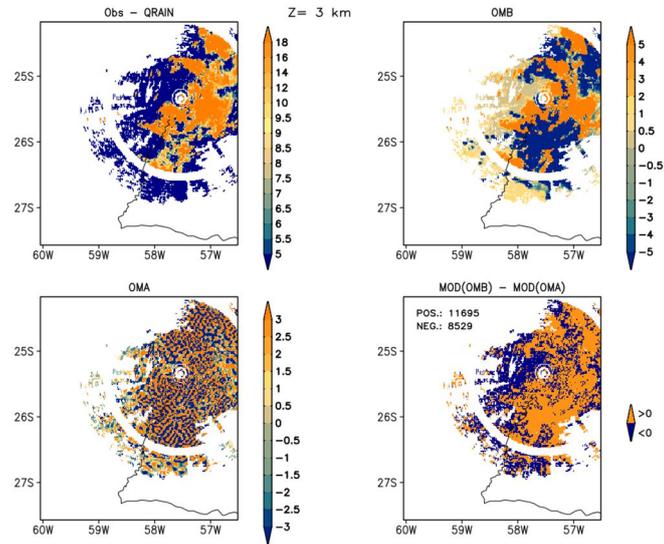


(c)30/10/2014

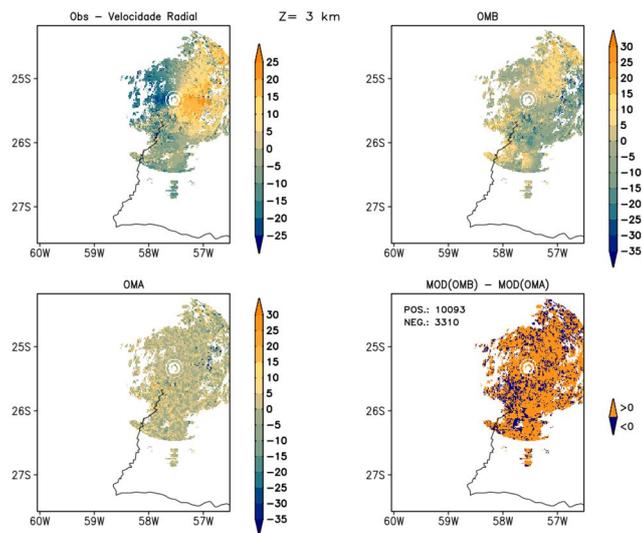
Fonte – Produção do autor

O padrão de cores nas figuras 5.25(a) e 5.25(b) no canto inferior esquerdo indica uma variação de valores em torno da média observada (zero), quanto maior a área de mesma cor (canto superior direito), mais distante do valor observado.

Figura 5.25 Diferença entre a observação e o background (OMB) e da diferença entre a observação e a análise (OMA) para: (a) Razão de mistura de água de chuva e (b) velocidade radial; ambas usando a parametrização de THOMPSON no nível de 3 km.



(a)



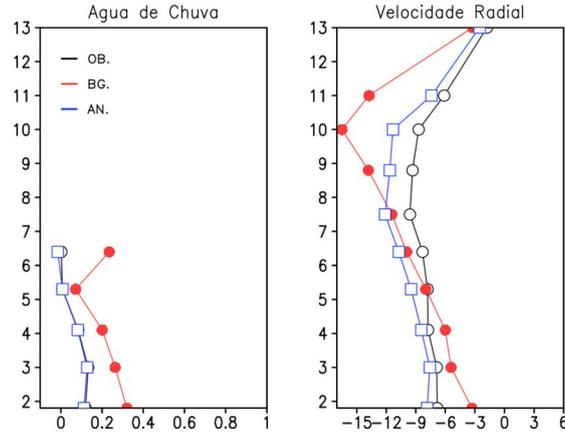
(b)

Fonte – Produção do autor.

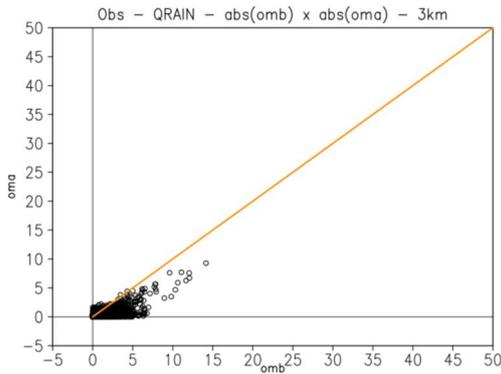
Esta parametrização apresentou a média de todos os níveis da variável da água de chuva afastados dos níveis observados e a análise apresentou-se ajustada ao observado após a

assimilação de dados. Destaca-se a maior quantidade de dados da variável do vento radial do que na variável da água de chuva (figuras 5.26(b) e (c)).

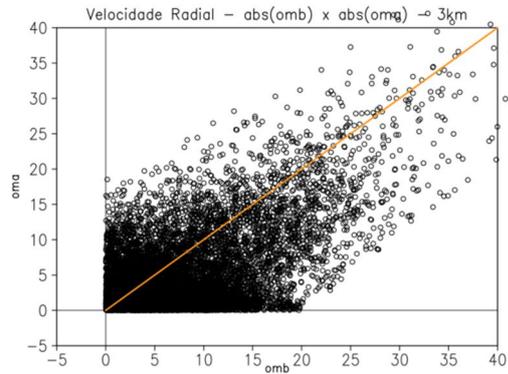
Figura 5.26 Perfil vertical médio da observação (Radar), do background e da análise para a razão de mistura de água de chuva e velocidade radial usando a parametrização THOMPSON.



(a)



(b)



(c)

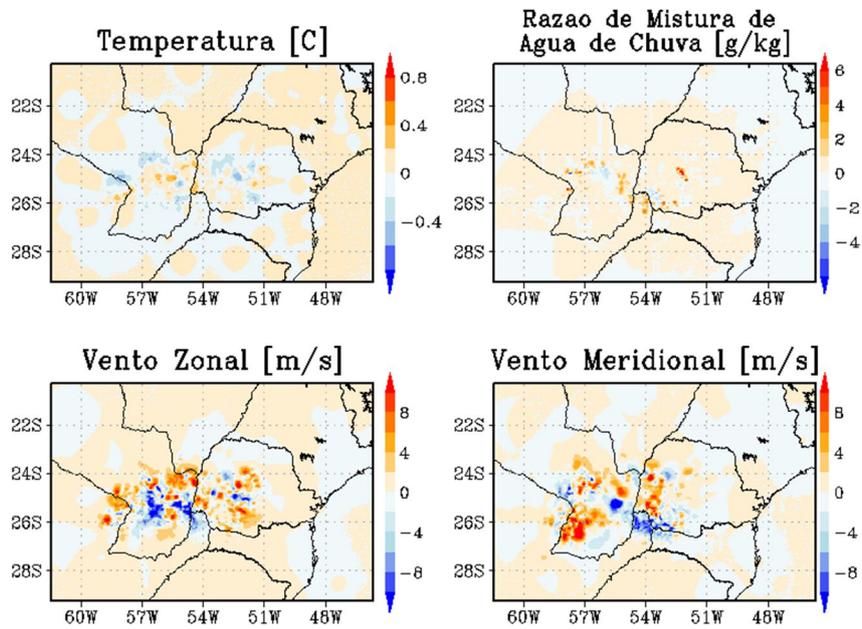
Fonte – Produção do autor.

5.3.8 Morrison

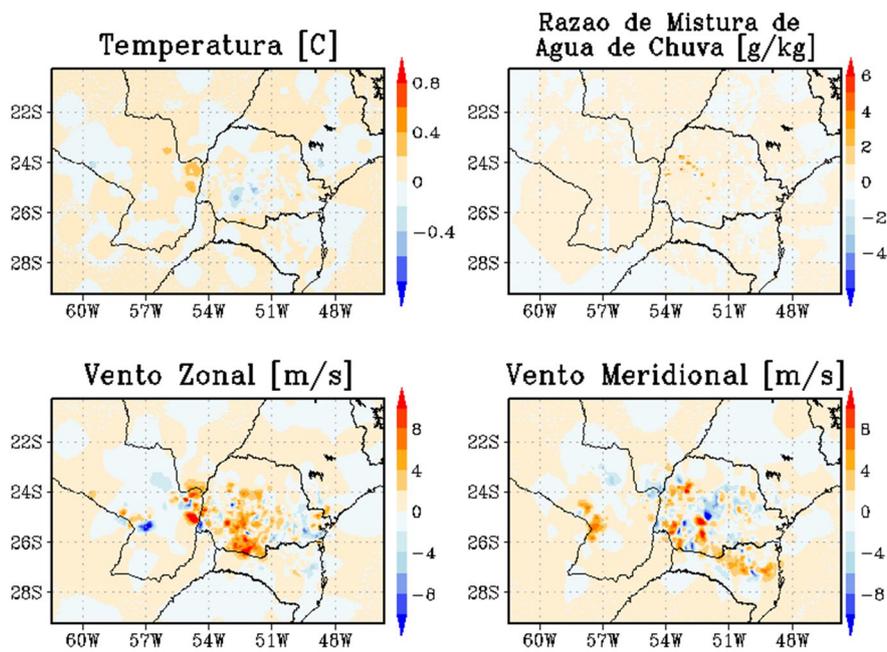
Os valores pontuais de incrementos de razão de mistura de água de chuva acarretam um ajuste na localização dos núcleos convectivos conforme figura 5.27 no canto superior

direito. A dinâmica da atmosfera sofreu alterações com os incrementos de vento, acarretando ajuste no *background* mesmo com baixos valores de refletividade nos dias 13/12/2014 e 30/10/2014 (figuras 5.27(b) e 5.27(c)).

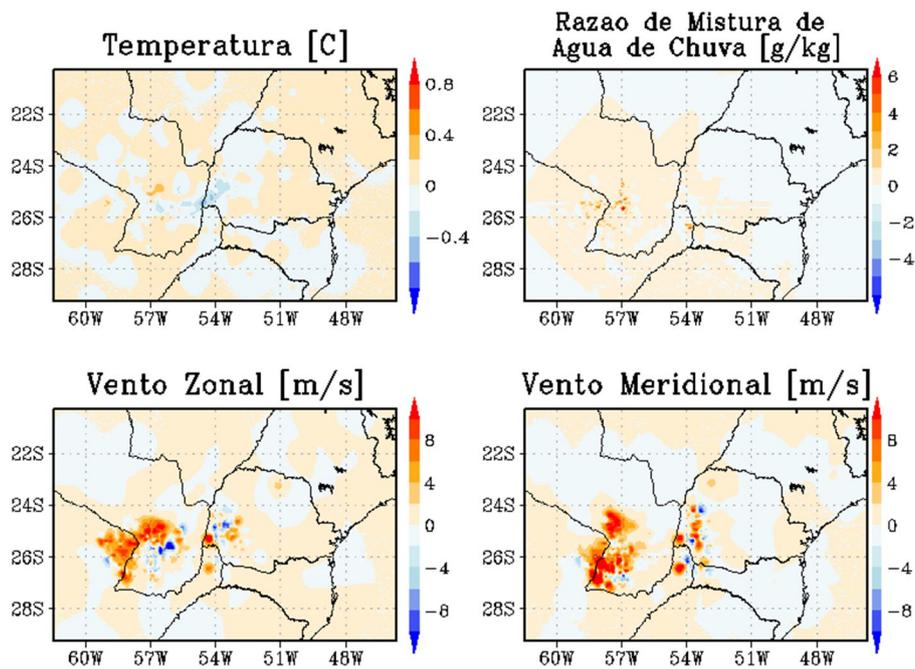
Figura 5.27 Incrementos ocorridos com a parametrização Morrison: (a) evento dia 07/11/2014; (b) evento dia 13/12/2014 e (c) evento dia 30/10/2014.



(a)07/11/2014



(b)13/12/2014

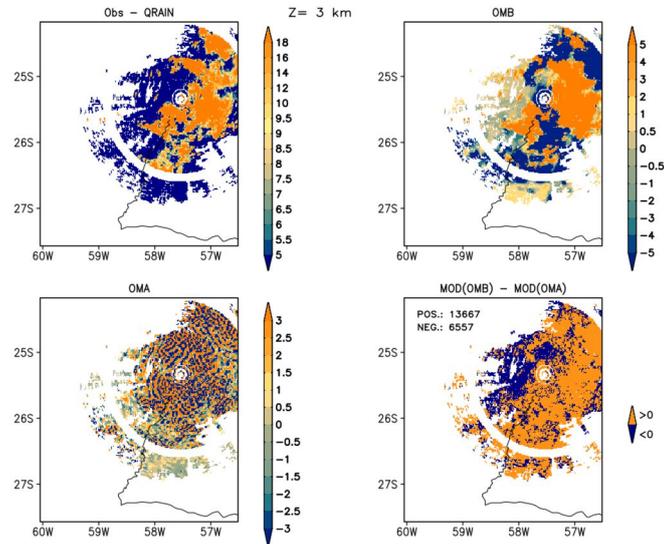


(c)30/10/2014

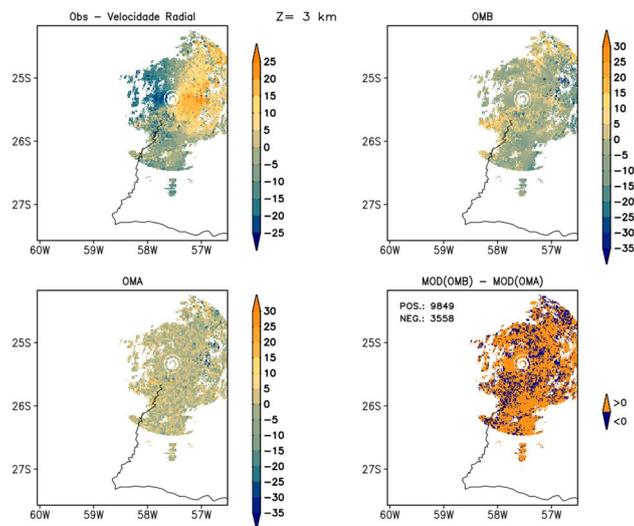
Fonte – Produção do autor.

O padrão de cores (figura 5.28) no canto inferior direito permanece neste esquema, que indica a menor distância dos valores da análise em relação ao *background*. Observa-se que os valores OMA são mais próximos de zero do que os valores de OMB, demonstrando a importância da ADR no ajuste do *background*.

Figura 5.28 Diferença entre a observação e o background (OMB) e da diferença entre a observação e a análise (OMA) para: (a) Razão de mistura de água de chuva e (b) velocidade radial; ambas usando a parametrização de MORRISON no nível de 3 km.



(a)

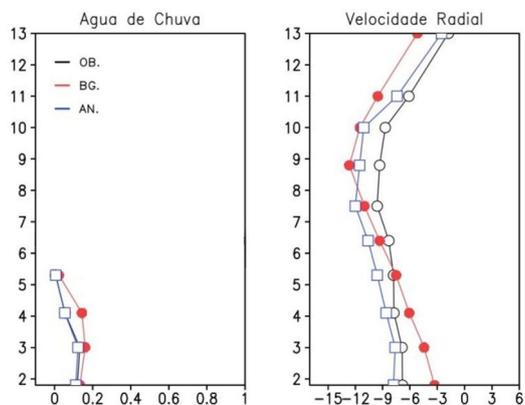


(b)

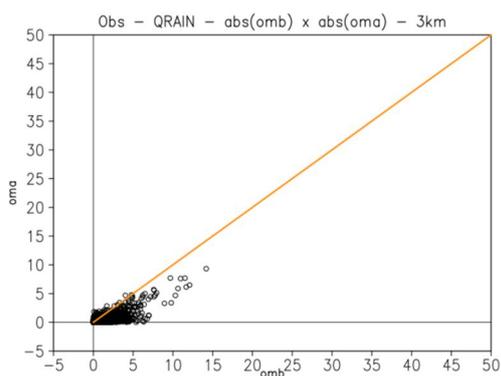
Fonte – Produção do autor.

Na figura 5.29, observa-se o perfil vertical do vento do *background* mais próximo do perfil observado, assim a análise ficou mais aproximada do real. Nas figuras 5.29(b) e 5.29(c), observam-se mais pontos abaixo da reta 1:1, indicando que os valores OMB são em sua maioria superiores aos valores OMA.

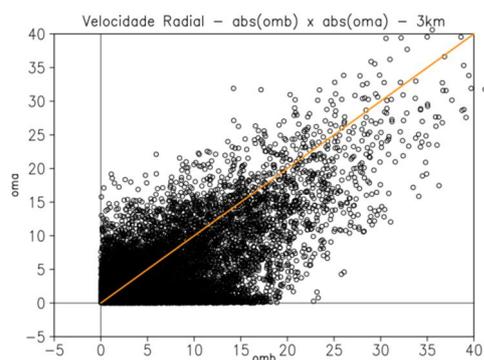
Figura 5.29 (a) Perfil vertical médio da observação (Radar), do background e da análise para a razão de mistura de água de chuva e velocidade radial usando a parametrização MORRISON; (b) Comparativo de valores dos dados de água de chuva de OMB e de OMA; (c) Comparação



(a)



(b)



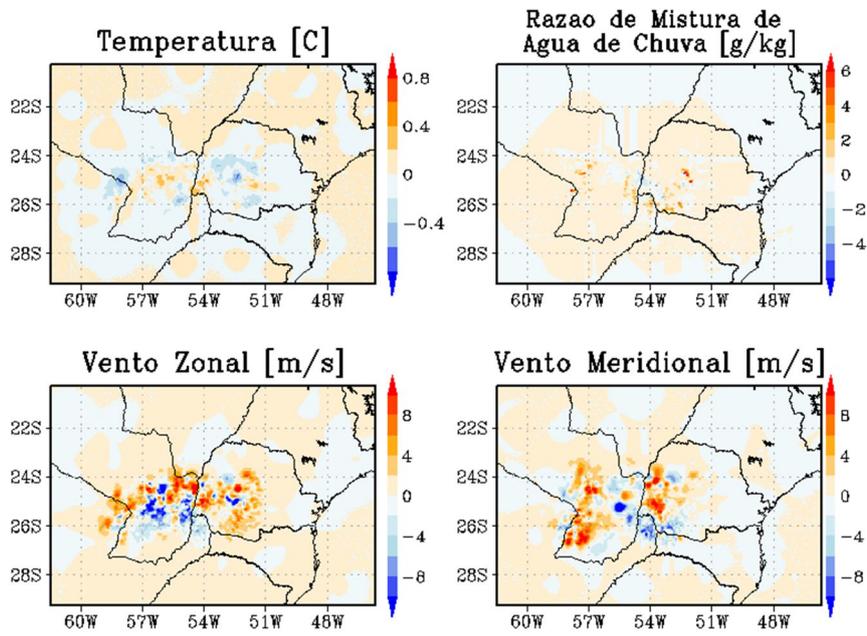
(c)

Fonte – Produção do autor.

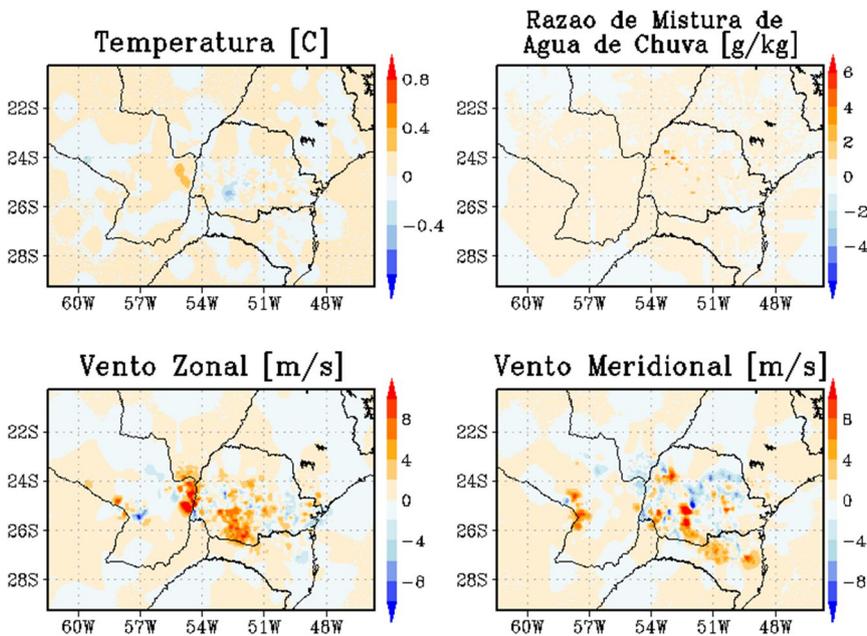
5.3.9 WDM6

Neste esquema não houve alteração no padrão de incrementos verificado nas demais parametrizações, observa-se (figura 5.30) valores pontuais e significativos no ajuste da razão de mistura e uma área de incrementos maior na variável do vento. Os valores de temperatura foram mais alterados no dia 07/11/2014 conforme figura 40 no canto superior esquerdo.

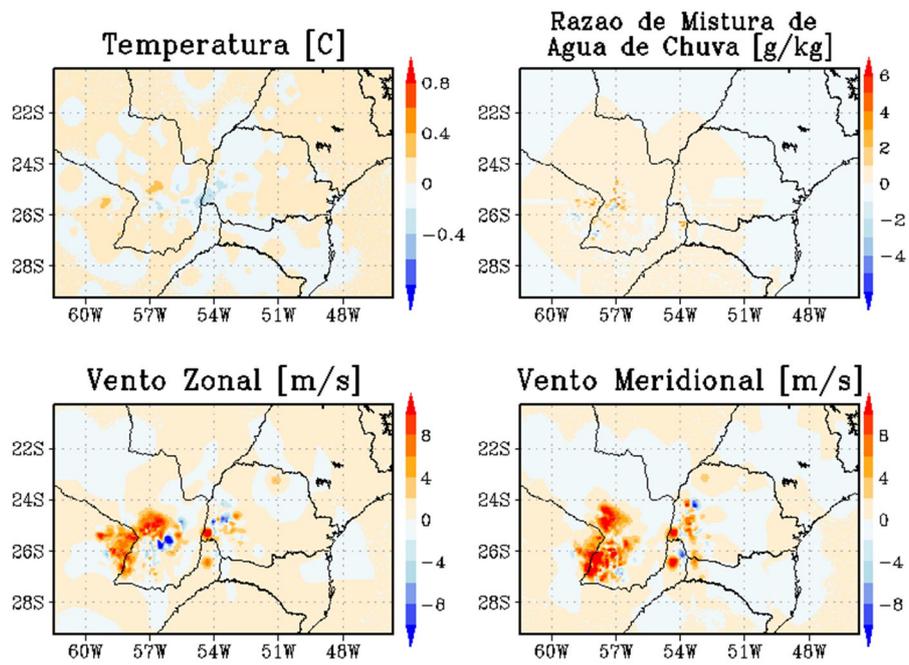
Figura 5.30 Incrementos ocorridos com a parametrização WDM6: (a) evento dia 07/11/2014; (b) evento dia 13/12/2014 e (c) evento dia 30/10/2014.



(a)07/11/2014



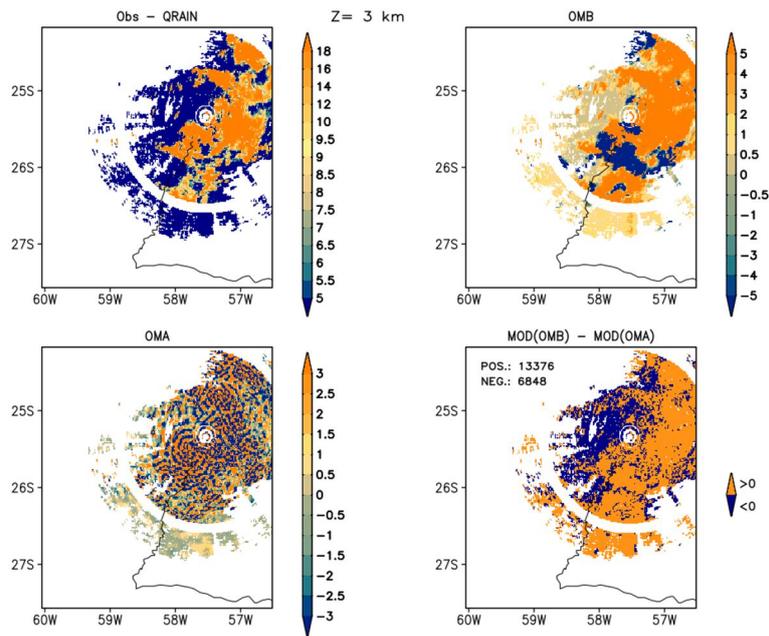
(b)13/12/2014



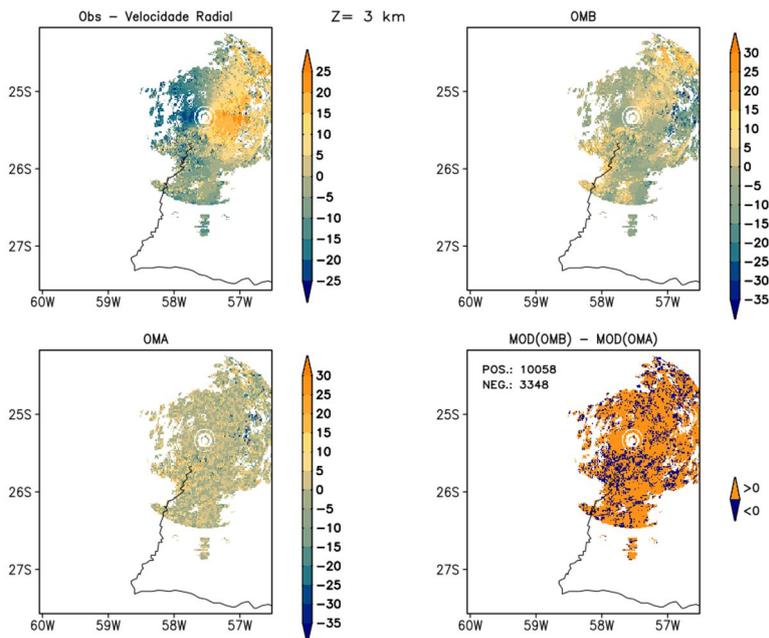
(c)30/10/2014

Fonte – Produção do autor.

Figura 5.31 Diferença entre a observação e o background (OMB) e da diferença entre a observação e a análise (OMA) para: (a) Razão de mistura de água de chuva e (b) velocidade radial; ambas usando a parametrização de WDM6 no nível de 3 km.



(a)



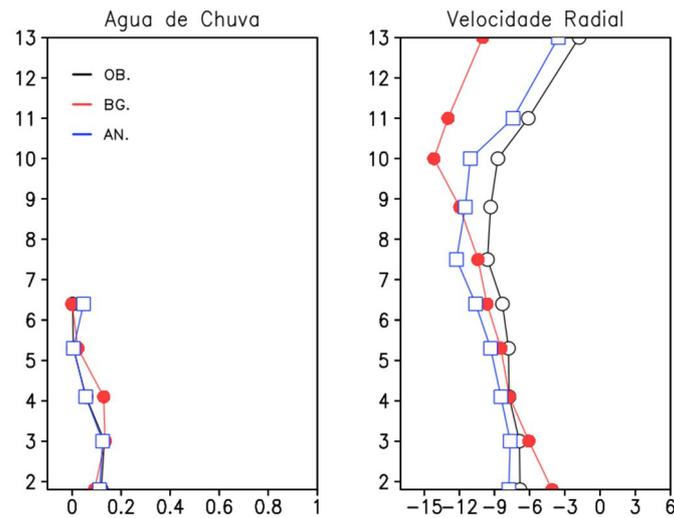
(b)

Fonte – Produção do autor.

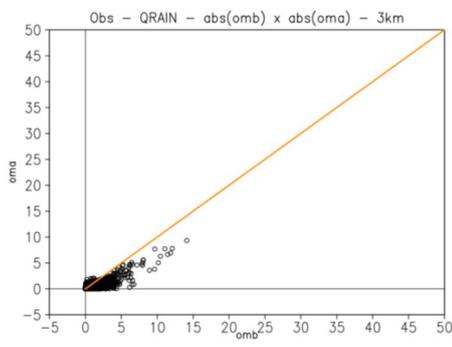
Na figura 5.32(a), os perfis verticais mostram que a análise, gerada com o *background* após a ADR, estava mais próxima do observado. As figuras 5.32(b) e 5.32(c) mostram

o predomínio da quantidade de dados OMA com valores inferiores aos dados OMB.

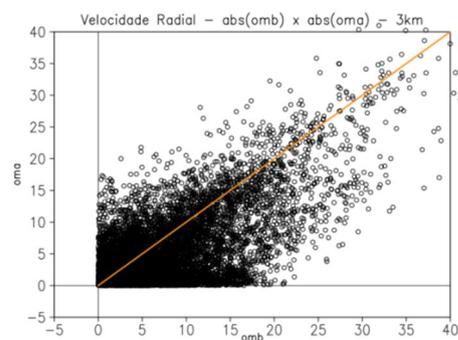
Figura 5.32 (a) Perfil vertical médio da observação (Radar), do background e da análise para a razão de mistura de água de chuva e velocidade radial usando a parametrização WDM6; (b) Comparativo de valores dos dados de água de chuva de OMB e de OMA; (c) Comparativo



(a)



(a)



(b)

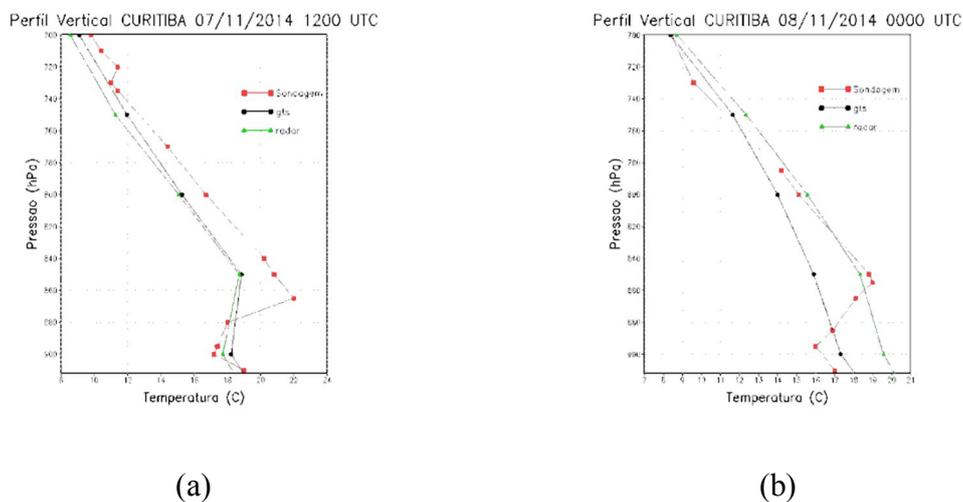
Fonte – Produção do autor.

5.4 Comparativo do perfil vertical de temperatura

Uma forma de verificar o ganho proporcionado pela assimilação de dados é comparar o perfil vertical de temperatura observado (sondagens) com o perfil gerado pelo *background* e pela análise do modelo conforme figuras 5.33 e 5.34. Foram analisados os perfis de temperatura das sondagens de Curitiba e Florianópolis das 12z e 00z.

Nota-se que o ajuste no perfil de temperatura em Curitiba (figura 5.33) foi mais significativo, pois em Florianópolis (figura 5.34) o *background* do GTS (linha preta) estava mais próximo do observado e após a assimilação de dados de radar, a análise gerada (linha verde) em níveis mais altos apresentou-se mais próximo do observado. A inversão de temperatura observada nas sondagens não foi simulada nos perfis gerados pelo modelo, tanto com assimilação GTS ou ADR. Na figura 5.33, o perfil de temperatura gerado com ADR apresentou pequena variação em relação ao perfil produzido sem radar, porém a variação da análise após a integração no tempo foi insuficiente para simular a inversão de temperatura observada às 00z em Curitiba.

Figura 5.33 Comparativa entre o observado (sondagem de Curitiba - PR) com: (a) *background* (12 UTC) e (b) análise (00 UTC); ambos com radar (verde) e sem radar (preta).



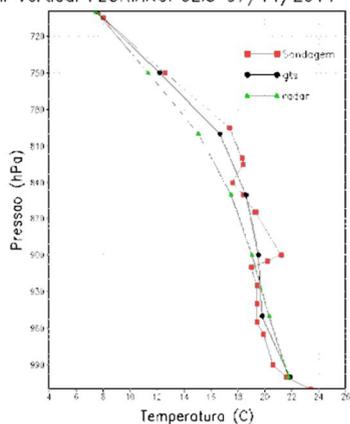
Fonte – Produção do autor.

Na figura 5.34, observa-se que o *background* sem os dados de radar estava mais próximo do perfil de temperatura observado do que o perfil com dados de radar,

contudo a análise gerada apresentou resultados coincidentes nos níveis baixos e mais próximo do observado em altos níveis, apesar de Florianópolis se localizar fora da área de cobertura dos radares de ASU e CAS que forneceram os dados de radar assimilados.

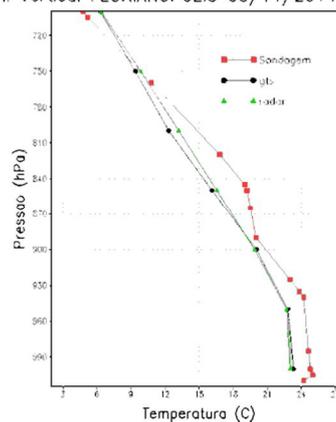
Figura 5.34 Comparativa entre o observado (sondagem de Florianópolis - SC) com: (a) background (12 UTC) e (b) análise (00 UTC); ambos com radar (verde) e sem radar (preta).

Perfil Vertical FLORIANOPOLIS 07/11/2014 1200 UTC



(a)

Perfil Vertical FLORIANOPOLIS 08/11/2014 0000 UTC



(b)

Fonte – Produção do autor.

6 ANÁLISE DOS ÍNDICES PARA CADA PARAMETRIZAÇÃO.

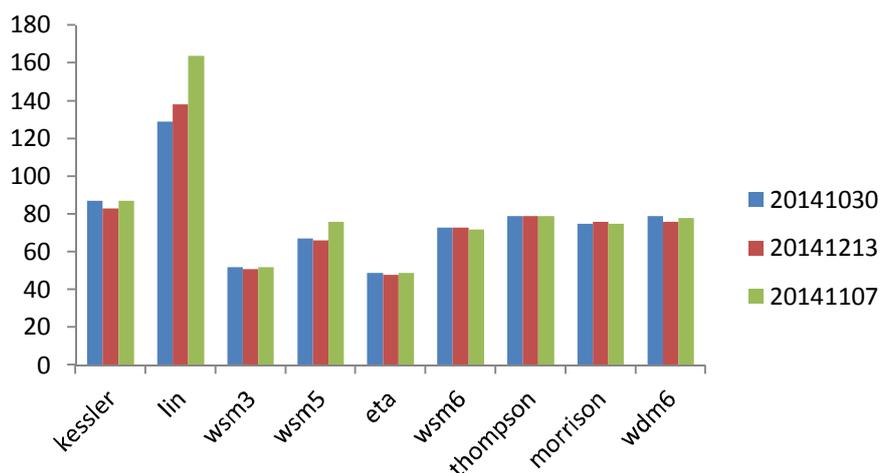
A análise foi realizada de forma isolada em cada uma das parametrizações, com o objetivo de avaliar o impacto da assimilação de dados com e sem radar isoladamente nas parametrizações de microfísica.

6.1 Custo de tempo computacional

O tempo de processamento teve pouca variação na assimilação de dados de radar em relação à assimilação de dados GTS, pois o cálculo que envolve a mudança de parametrização teve um impacto maior na integração no tempo do modelo (previsão), porém houve uma variação no custo computacional com as mudanças de diferentes parametrizações (figura 6.1).

As parametrizações geram campos diferentes de água de chuva e o tempo de minimização da função custo mudou por esta razão, acarretando valores diferentes no tempo de processamento. O Esquema de Lin apresentou valor residual de água de chuva em toda a grade (figura 8.1) e isso poderia explicar o aumento do tempo de minimização da função custo em comparação ao tempo gasto pelas demais parametrizações. Nas parametrizações de Kessler e Lin, os *backgrounds* estão sempre mais afastados da observação, portanto o tempo de minimização deve ser maior.

Figura 6.1 Custo de Tempo (minutos) gasto pelo modelo para gerar a análise.



Fonte – Produção do autor.

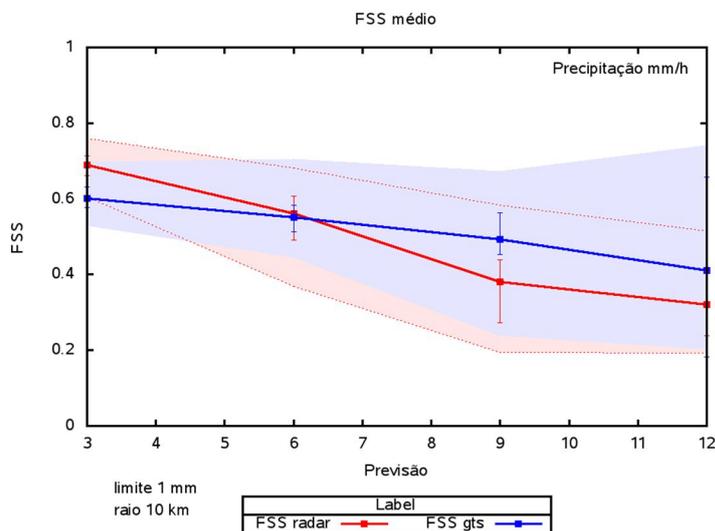
6.2 Índices médios das parametrizações.

Os resultados obtidos (figura 6.2) mostraram que a condição inicial melhorada com assimilação de dados de radar apresentou uma melhor representação da atmosfera nas seis primeiras horas de previsão e que quanto maior foi a intensidade da precipitação, num raio de 10 km, mais preciso foi o modelo. A parte sombreada da figura indica a flutuação dos valores máximos e mínimos dos índices FSS das parametrizações, observa-se que os valores com ADR apresentaram valores superiores principalmente com previsão de precipitação forte com limites de 10 mm em 10 km.

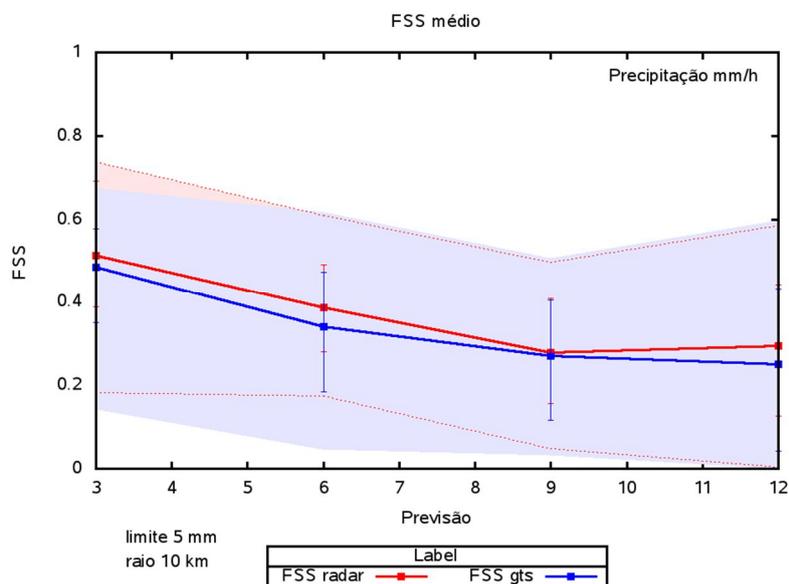
O ganho com radar chegou a apresentar na média até 20% de ganho no FSS, indicada pela distância entre as linhas vermelhas (radar) e azuis (sem radar). A variação média do ganho entre as parametrizações de microfísica chegou a 70% no FSS com a assimilação de dados radar, como mostra a amplitude do sombreado em vermelho.

Os valores máximos e mínimos das médias da figura 6.2 são indicados pelas barras verticais e indicam a amplitude média entre os índices FSS com e sem radar.

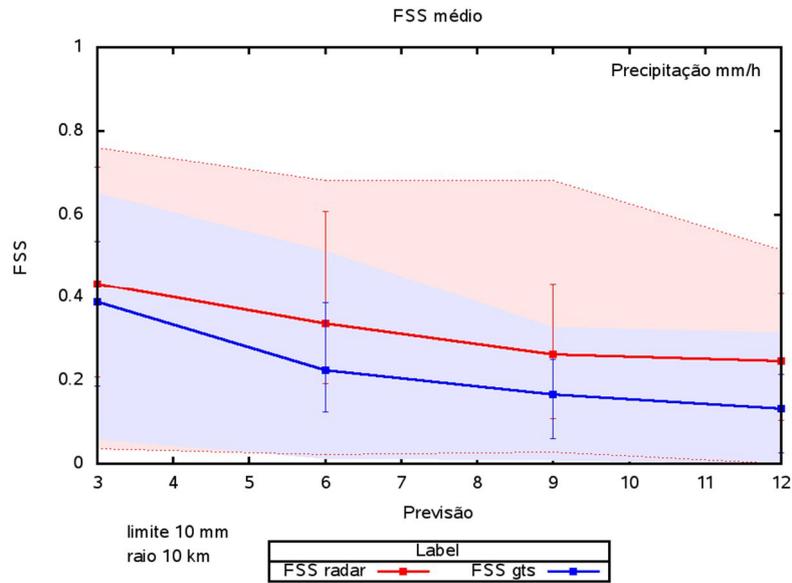
Figura 6.2 - Comparativo das médias do FSS nos três eventos das 9 parametrizações, onde o sombreado indica a variação entre os máximos e mínimos entre as parametrizações, as barras verticais são as variações entre os máximos e mínimos das médias de 3 em 3 horas de previsão para os 3 eventos e as linhas correspondem ao comportamento das médias com e sem ADR.



(a) FSS médio com limite de 1 mm em 10 km de raio.



(b) FSS médio com limite de 5 mm em 10 km de raio.

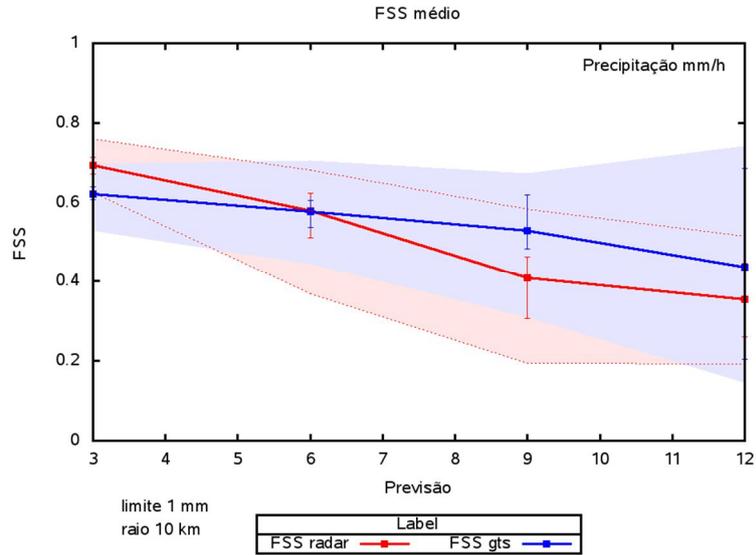


(c) FSS médio com limite de 10 mm em 10 km de raio.

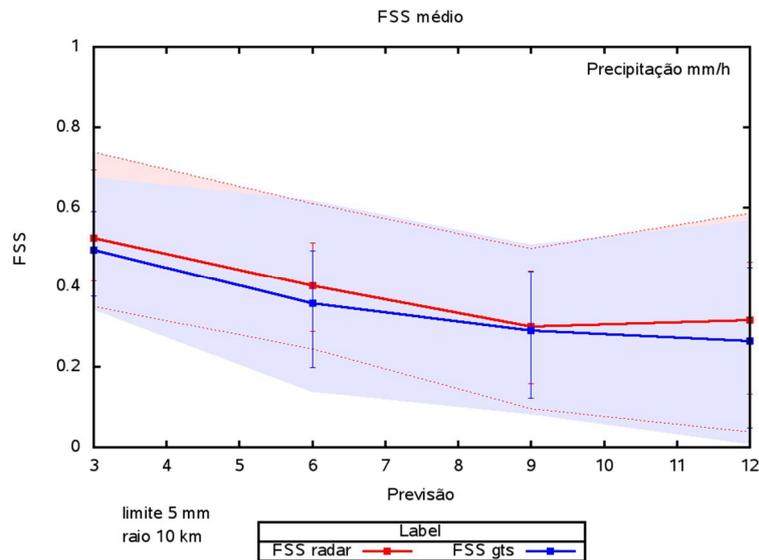
Fonte – Produção do autor.

Com a finalidade de avaliar a variação das parametrizações mais recentes e aplicadas operacionalmente, foram omitidos os valores das parametrizações mais simples (Kessler e Lin) e que apresentaram os piores resultados, com o objetivo de saber se estas parametrizações estavam influenciando muito a média. As barras verticais indicam a variação das médias máximas e mínimas de 3 em 3 horas de previsão para os eventos estudados, possibilitando a visualização do comportamento médio do índice FSS (Figura 6.3).

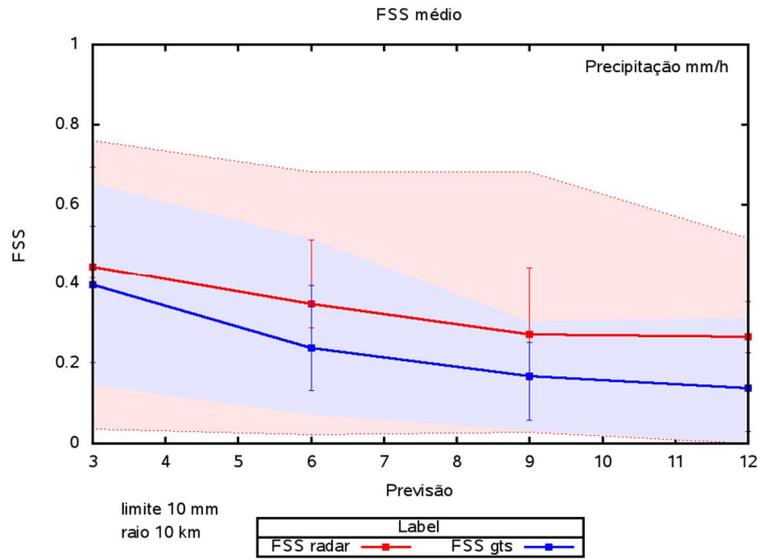
Figura 6.3 - Comparativo das médias do FSS nos três eventos das 7 parametrizações, onde o sombreado indica a variação entre os máximos e mínimos entre as parametrizações, as barras verticais são as variações entre os máximos e mínimos das médias e as linhas correspondem ao comportamento das médias com e sem ADR.



(a) FSS médio com limite de 1 mm em 10 km de raio.



(b) FSS médio com limite de 5 mm em 10 km de raio.

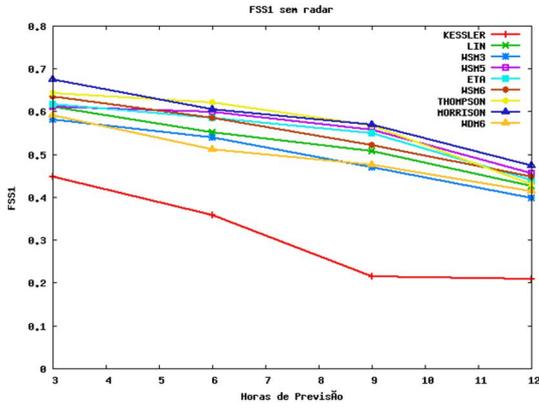


(c) FSS médio com limite de 10 mm em 10 km de raio.

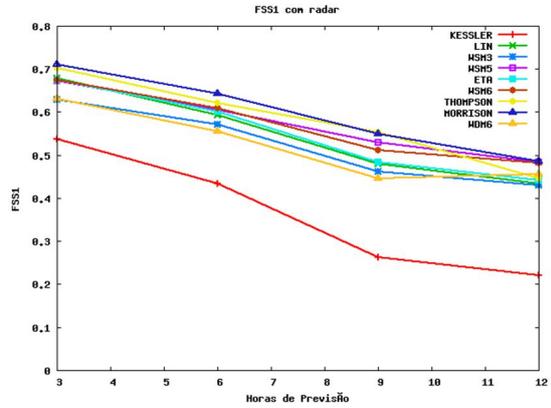
Fonte – Produção do autor.

A figura 6.4 mostra o desempenho de cada parametrização na média dos eventos. A microfísica de Thompson destaca-se principalmente na localização dos núcleos convectivos com limites acima de 5 mm de precipitação em 10 km de raio. Este desempenho da parametrização Thompson é ratificado no índice LRMSE que indica o menor erro na intensidade dos núcleos convectivos e o pior desempenho foi da parametrização WDM6.

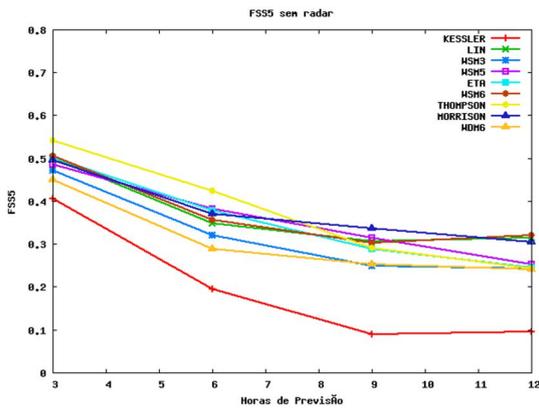
Figura 6.4 Comparativa dos índices médios de cada parametrização nos três eventos



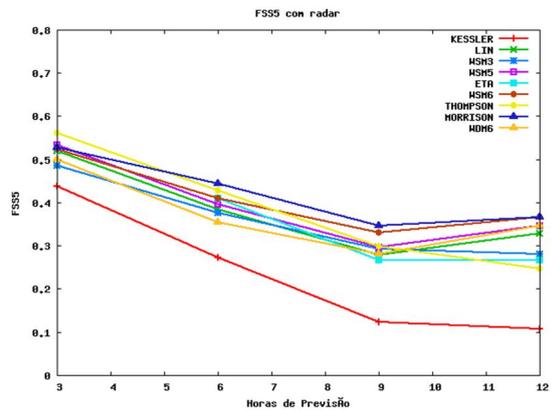
(a) FSS com limites de 1 mm em 10 km sem assimilação de dados radar



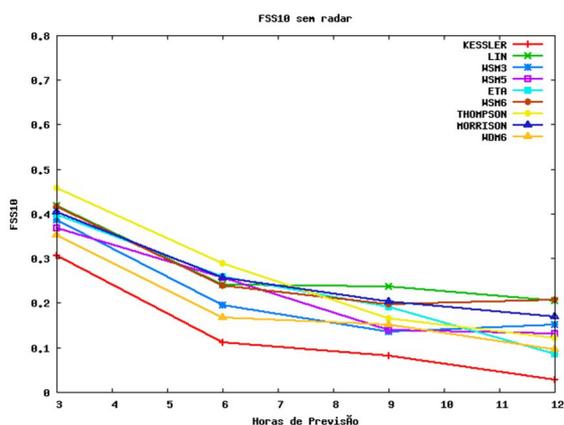
(b) FSS com limites de 1 mm em 10 km com assimilação de dados radar



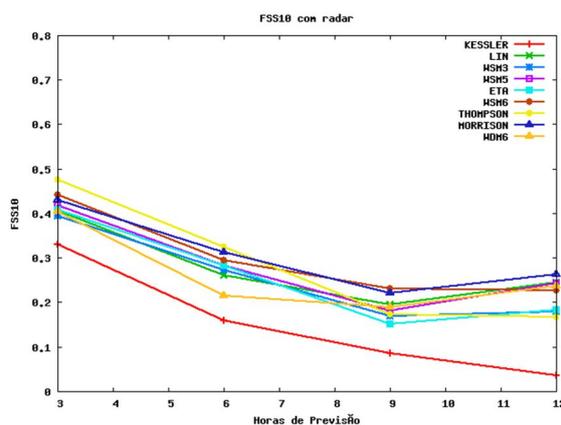
(c) FSS com limites de 5 mm em 10 km sem assimilação de dados radar



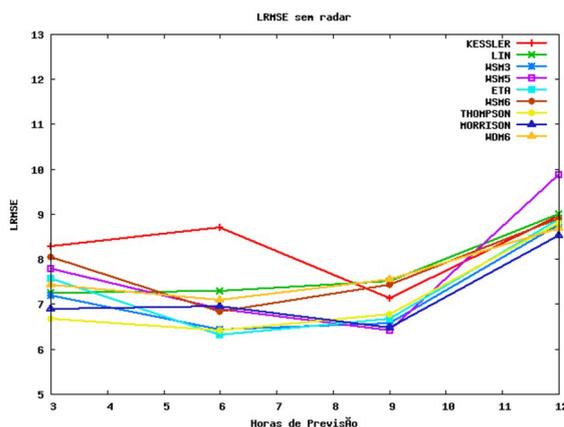
(d) FSS com limites de 5 mm em 10 km com assimilação de dados radar



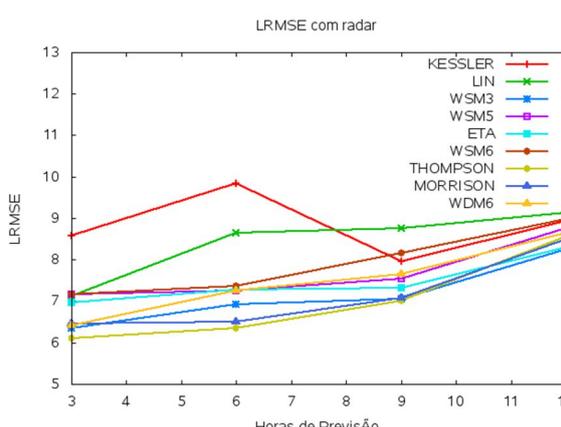
(e) FSS com limites de 10 mm em 10 km sem assimilação de dados radar



(f) FSS com limites de 10 mm em 10 km com assimilação de dados radar



(g) LRMSE em 10 km sem assimilação de dados radar



(h) LRMSE em 10 km com assimilação de dados radar

Fonte – Produção do autor.

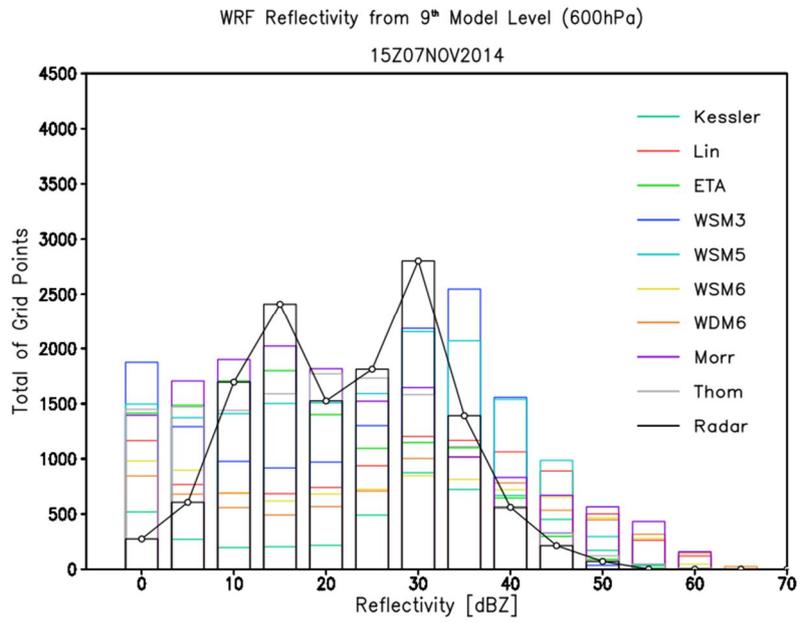
A microfísica de Morrison apresentou-se mais eficaz no final das 12 horas de previsão nos casos de menor intensidade da precipitação, conforme figura 48 indica. Já para os casos de maior intensidade de precipitação, foi Thompson que apresentou maior eficácia, mas diferente de Morrison, é uma parametrização de um momento e que prevê dois momentos apenas para a nuvem de gelo e chuva.

Estes resultados comprovam que os desempenhos de esquemas complexos de dois momentos nem sempre foram superiores aos esquemas mais simples de um momento, uma vez que a previsão explícita de concentração numérica não necessariamente melhora processos como a nucleação de gelo ou a agregação de cristais de gelo em flocos de neve e/ou suas características de sedimentação (WEVERBERG, 2013).

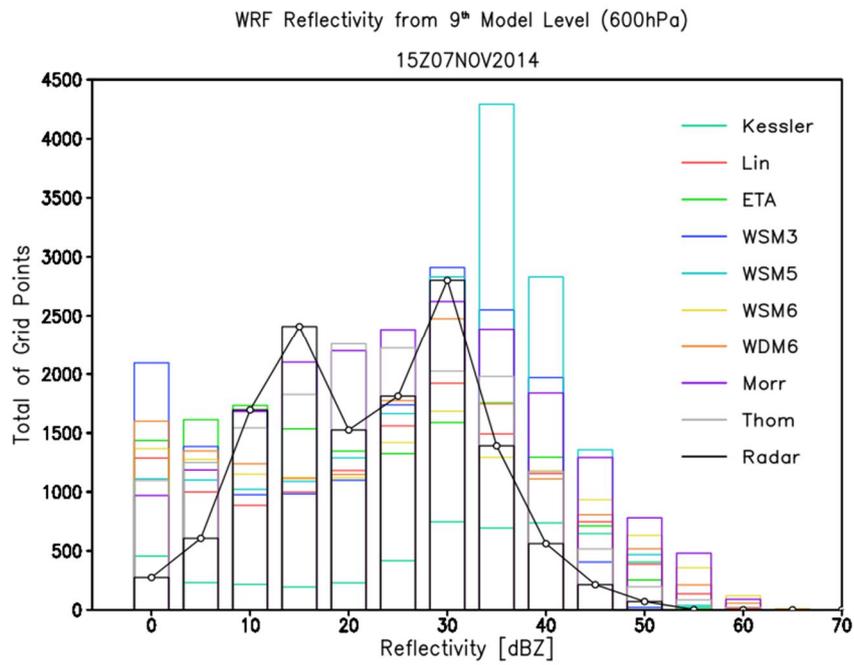
7 ANÁLISE DA REFLETIVIDADE (dBz)

Na figura 7.1, observa-se que a assimilação de dados de radar fez aumentar o número de parametrizações que superestimaram os núcleos convectivos. Na média das faixas de refletividade a parametrização Morrison manteve-se mais próximo do observado pelo radar de Assunção - Paraguai.

Figura 7.1 Comparativo de refletividade do radar e do modelo para o dia 07/11/2014 entre todas as parametrizações: (a) sem ADR e (b) com ADR.



(a) Sem radar



(b) Com radar

Fonte – Produção do autor

O resultado da parametrização de Kessler não sofreu alteração no número de núcleos convectivos com refletividade entre 25 e 35 dBz (precipitação moderada) após a assimilação de dados de radar, porém o número de formações convectivas, com valor de refletividade entre 35 e 45 dBz (precipitação forte), teve um aumento conforme figura 49. Esta parametrização, na média dos valores de refletividade, apresentou os resultados mais afastados do observado no radar de ASU, subestimando os valores de refletividade e o número de células de chuva.

O Esquema de Lin, após a ADR, apresentou um aumento no número de núcleos entre 20 e 40 dBz, aproximando-se do observado. Contudo superestimou o número de células convectivas com valores de refletividade acima 35 dBz.

Observa-se que na coluna correspondente a refletividade de 30 dBz, após ADR e exceto o esquema de Kessler, as demais parametrizações aproximaram-se do valor observado, destacando-se as parametrizações WSM5, WSM3, Morrison e WDM6.

A parametrização de Morrison apresentou o melhor desempenho com ADR, mesmo superestimando o número de células convectivas com valores de refletividade acima de 35 dBz. Já o desempenho da parametrização WSM5 destaca-se com o aumento do número de células com refletividade entre 35 e 45 dBz, muito acima do observado após a ADR.

8 RESULTADOS POR PARAMETRIZAÇÃO

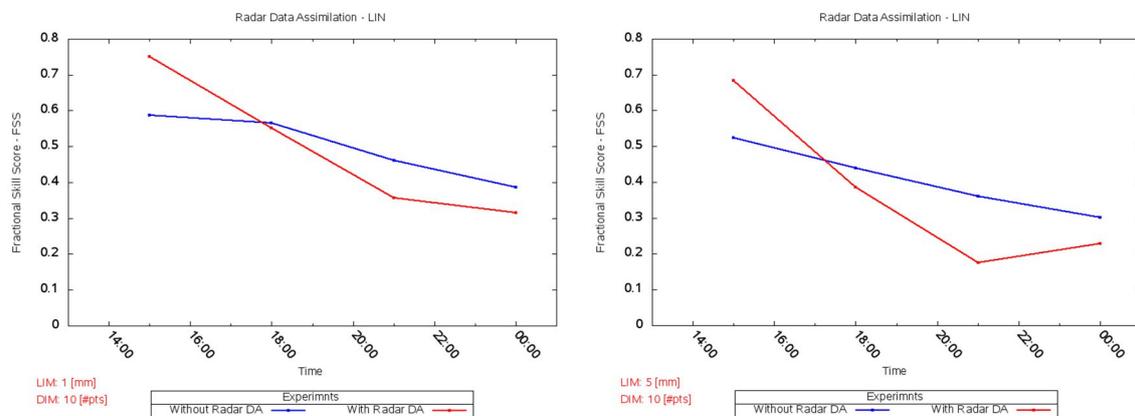
Foram selecionados os resultados de 3 parametrizações que apresentaram os resultados mais significativos (Thompson e Morrison) e a parametrização de Lin, que apresentou valor residual de água de chuva em toda a grade.

8.1 Lin

O índice FSS (figura 8.1) para esta parametrização indicou que a assimilação de dados de radar aumentou a acurácia nos eventos dos dias 07/11 e 13/12 nas primeiras horas de previsão. No evento do dia 30/10, só foi melhorar o índice de acerto a partir de 6 horas de previsão, inclusive diminuindo o erro de intensidade das nuvens.

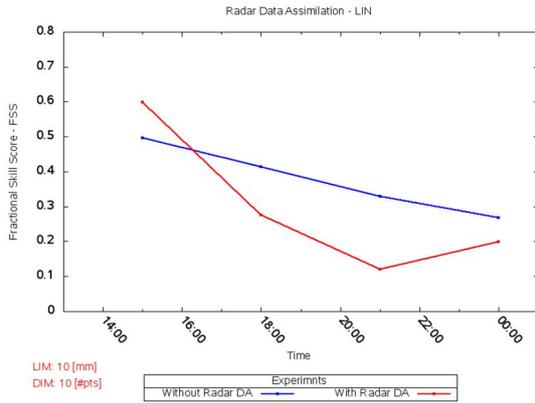
Observa-se na figura 8.1, que o índice de acerto FSS da análise gerada com assimilação de dados de radar durante um período fica abaixo da linha de acerto da assimilação dos dados GTS e no final volta a apresentar melhor acurácia. Esta flutuação do índice pode ser devido à condição inicial gerada com dados de radar não ser a ideal para todo o período de análise, necessitando o modelo de um tempo para balancear as variáveis.

Figura 8.1 Avaliação dos índices FSS e LRMSE da parametrização LIN

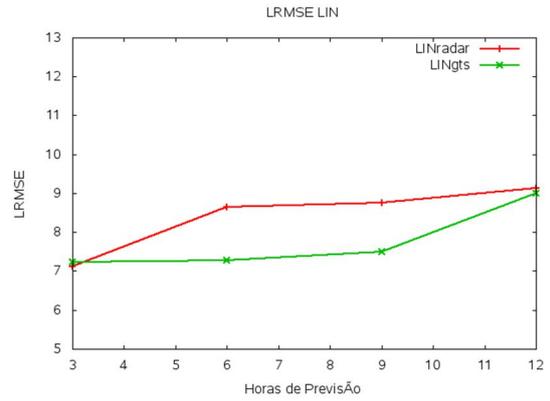


(a) Limites de 1 mm e raio 10 km

(b) Limites de 5 mm e raio 10 km

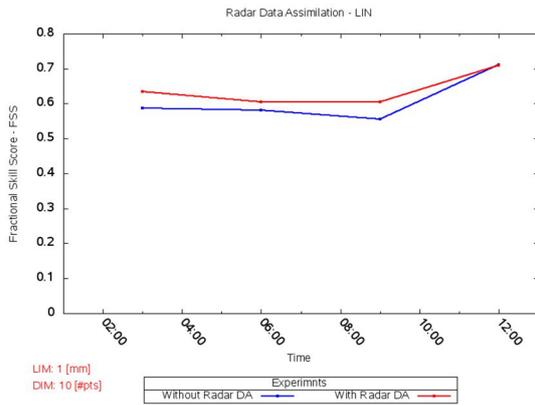


(c) Limites de 10 mm e raio 10 km

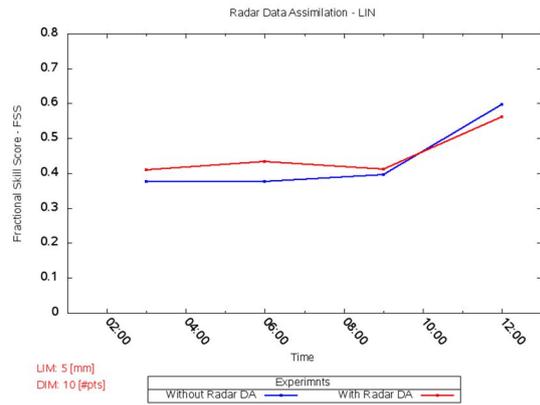


(d) Raio de 10 km

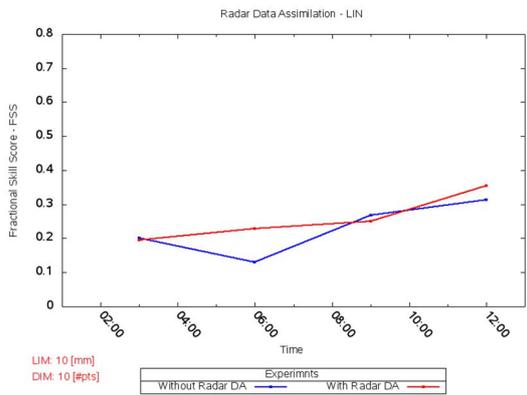
Evento 13/12/2014



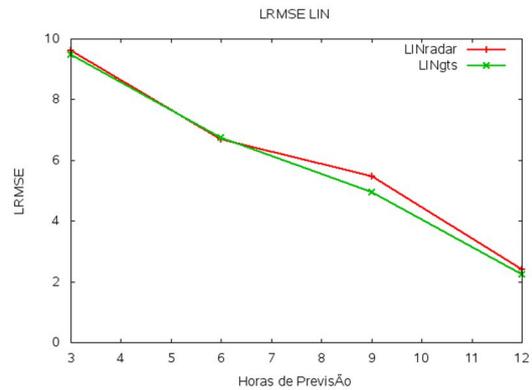
(e) Limites de 1 mm e raio 10 km



(f) Limites de 5 mm e raio 10 km

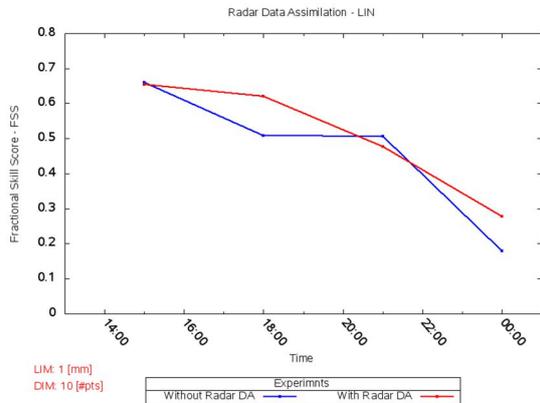


(g) Limites de 10 mm e raio 10 km

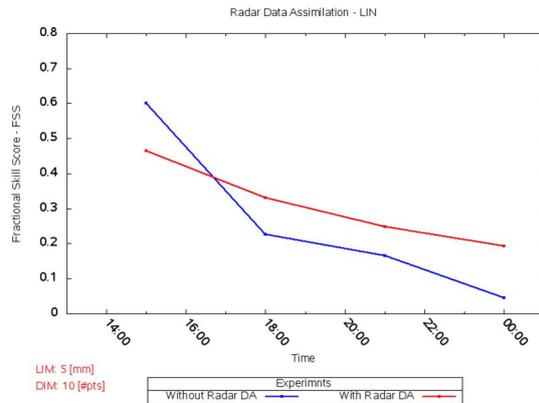


(h) Raio de 10 km

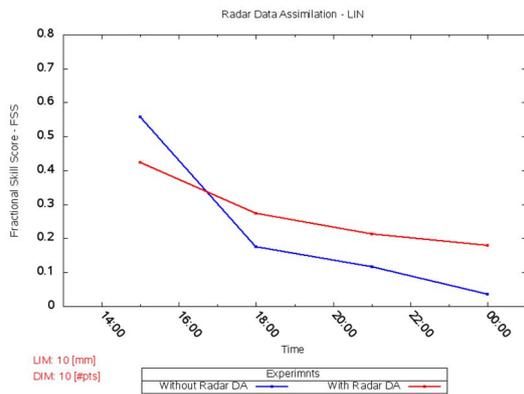
Evento 30/10/2014



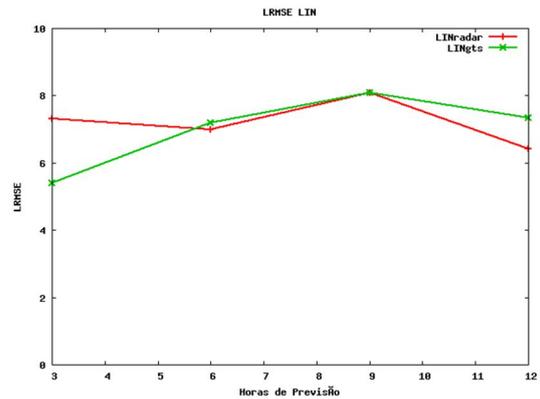
(i) Limites de 1 mm e raio 10 km



(j) Limites de 5 mm e raio 10 km



(k) Limites de 10 mm e raio 10 km

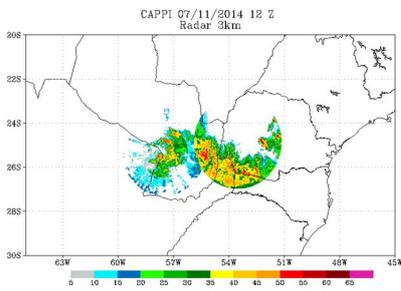


(l) Raio de 10 km

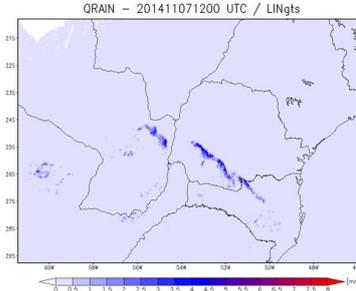
Fonte – Produção do autor.

Usando a análise subjetiva para o dia 07/11/2014, nota-se o ajuste na localização dos núcleos convectivos nas primeiras horas de previsão, porém a partir das 18z (figura 8.2) as formações convectivas são subestimadas pelo modelo. Observam-se formações predominantes fora da área de cobertura dos radares, porém a assimilação melhorou a previsão de precipitação nas primeiras horas, valorizando a assimilação de dados de vento, porém a intensidade da precipitação não sofreu uma melhora significativa. As formações convectivas previstas foram intensificadas com a assimilação de dados conforme figura 8.2, confirmando uma das desvantagens da assimilação de dados de radar que geralmente superestima na previsão da intensidade dos núcleos convectivos.

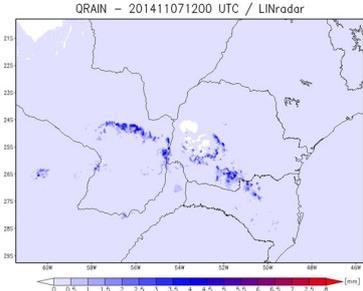
Figura 8.2 Imagens geradas com a parametrização LIN para o evento do dia 07/11/2014 com ADR e sem radar (GTS) comparadas com o observado (radares) e CosCh3.



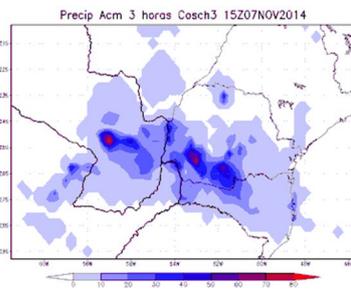
(a) Cappi 3 km (ASU e CAS)



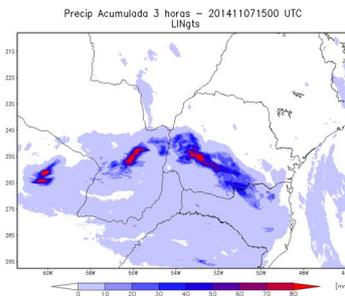
(b) Qrain sem radar



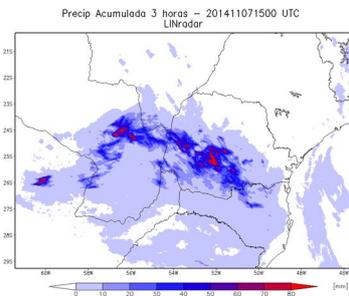
(c) Qrain com radar



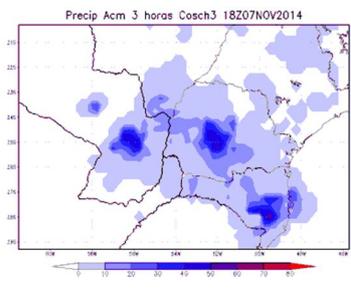
(d) Cosh3 das 15z



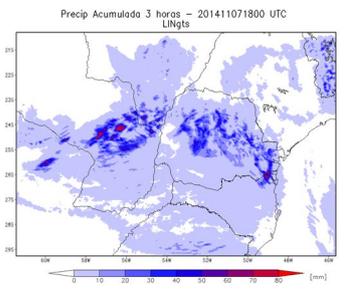
(e) Precip. Acum sem radar das 15z



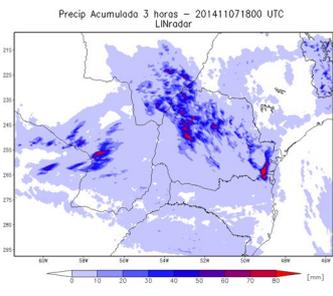
(f) Precip. Acum com radar das 15z



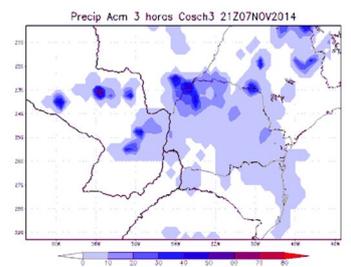
(g) Cosh3 das 18z



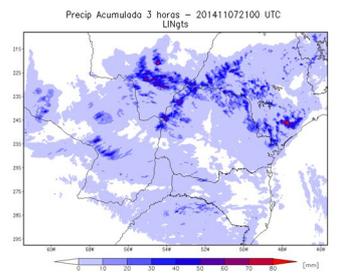
(g) Precip. Acum sem radar das 18z



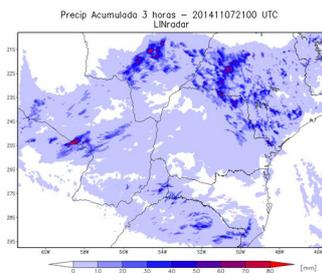
(h) Precip. Acum com radar das 18z



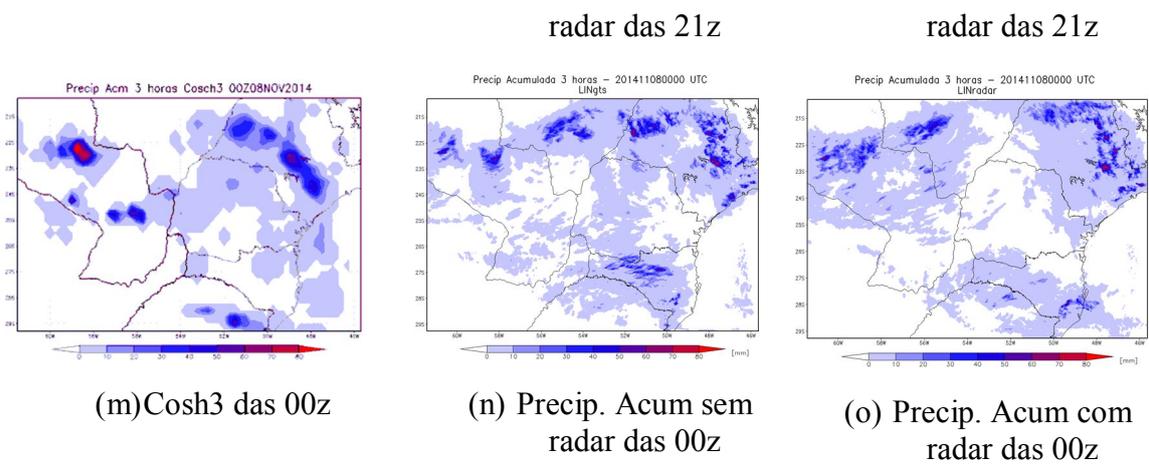
(i) Cosh3 das 21z



(j) Precip. Acum sem



(k) Precip. Acum com

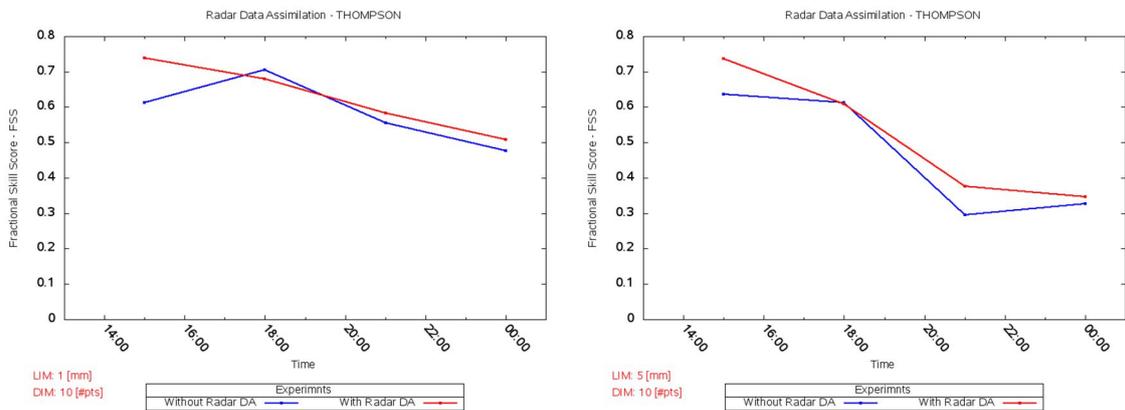


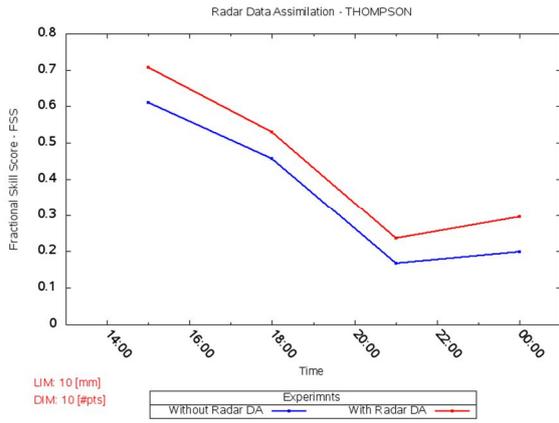
Fonte – Produção do autor.

8.2 Thompson

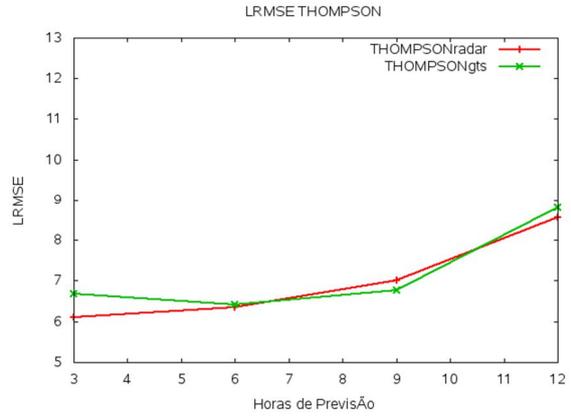
Esta parametrização apresentou maior acerto (figura 8.3) na previsão de curto prazo (3 horas) em relação aos outros esquemas, mesmo assim ocorreu uma superestimação da precipitação assim como todos os outros esquemas.

Figura 8.3 Análise objetiva dos índices FSS e LRMSE para a parametrização THOMPSON.



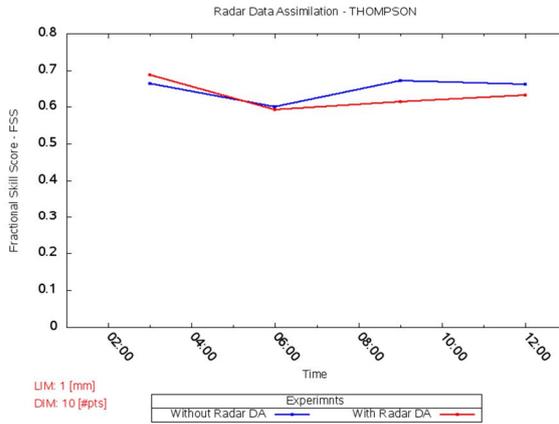


(c) Limites de 10 mm e raio 10 km

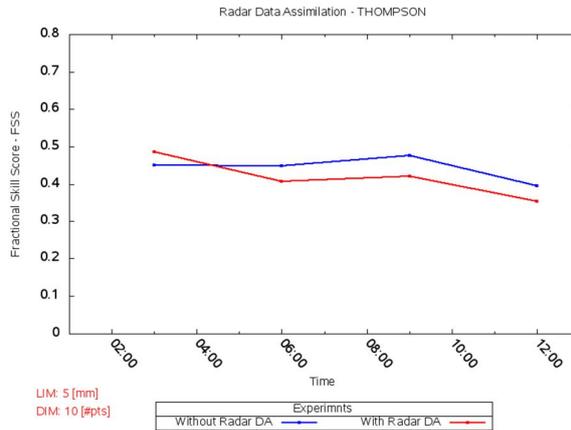


(d) Raio de 10 km

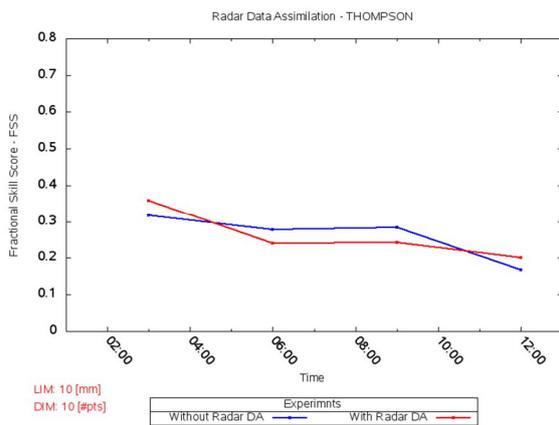
Evento 13/12/2014



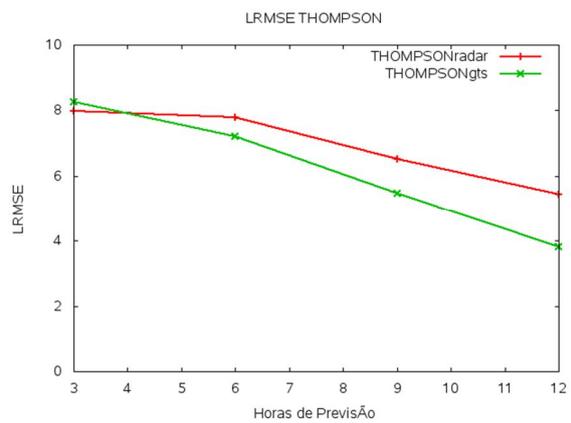
(e) Limites de 1 mm e raio 10 km



(f) Limites de 5 mm e raio 10 km

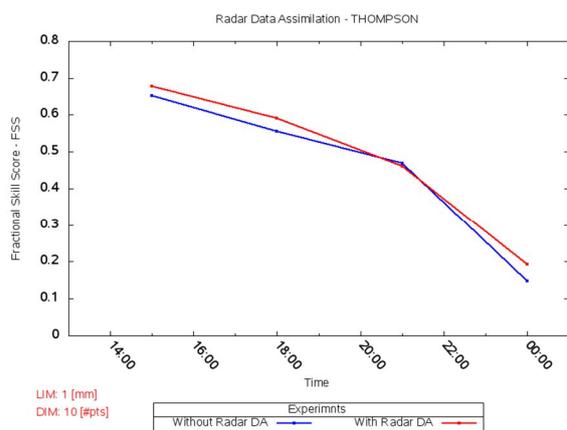


(g) Limites de 10 mm e raio 10 km

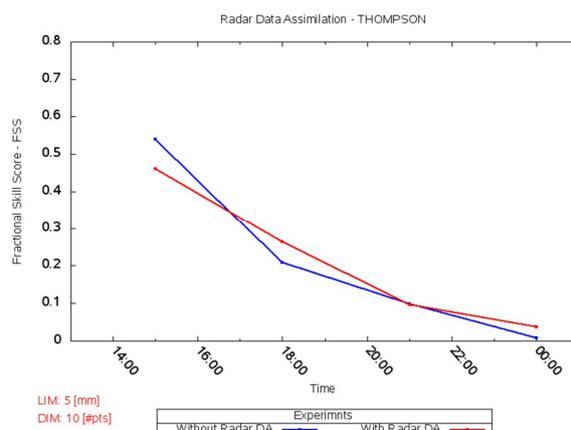


(i) Raio de 10 km

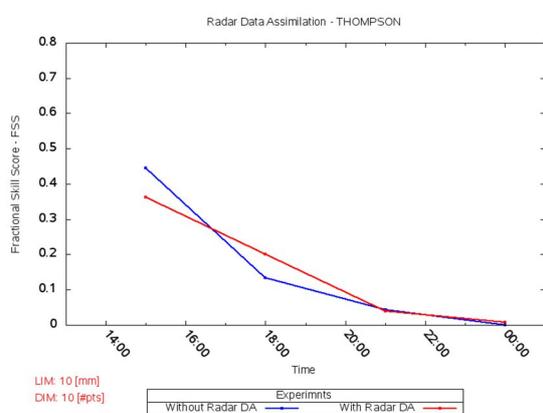
Evento 30/10/2014



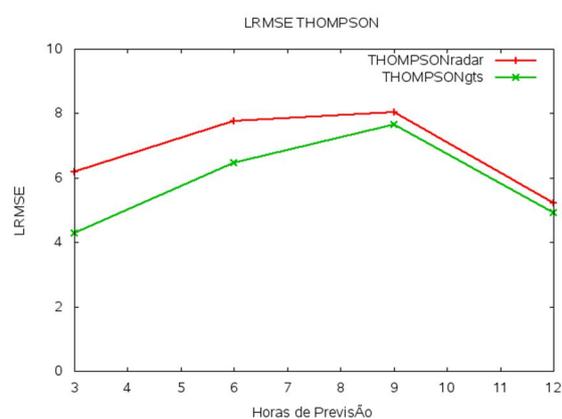
(j) Limites de 1 mm e raio 10 km



(k) Limites de 5 mm e raio 10 km



(l) Limites de 10 mm e raio 10 km

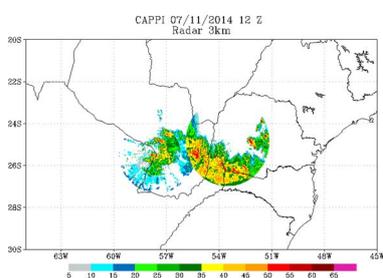


(m) Raio de 10 km

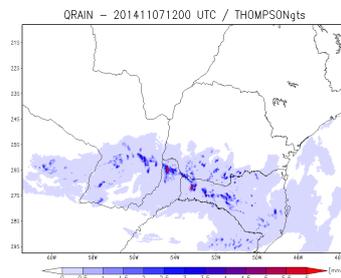
Fonte – Produção do autor.

Conforme HONG e SHIN (2015), a parametrização de Thompson subestimou a precipitação em Seul – Coréia do Sul, já na figura 8.4 observa-se que o esquema superestimava a precipitação, mostrando que os resultados obtidos são extremamente dependentes da região de estudo.

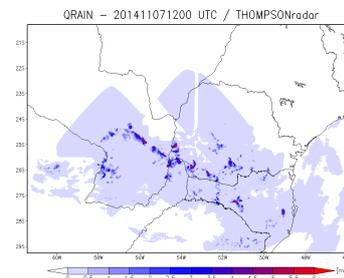
Figura 8.4 Imagens geradas com a parametrização THOMPSON para o dia 07/11/2014 com ADR e sem radar (GTS) comparadas com o observado (radares) e CosCh3.



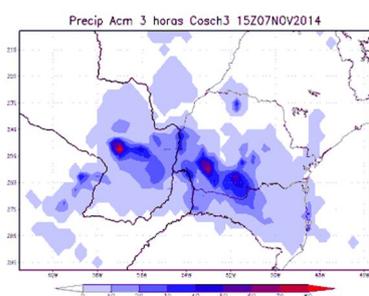
(a) Cappi 3 km (ASU e CAS)



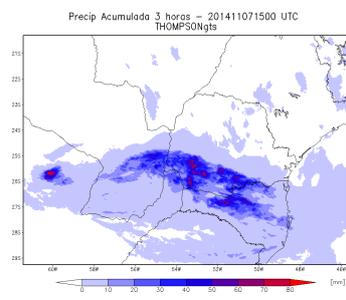
(b) Qrain sem radar



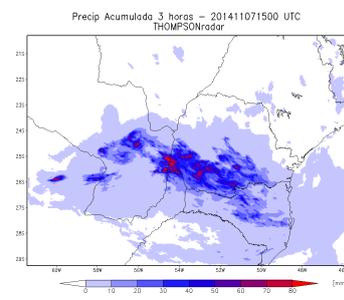
(c) Qrain com radar



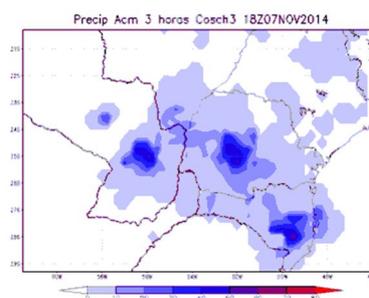
(d) Cosh3 das 15z



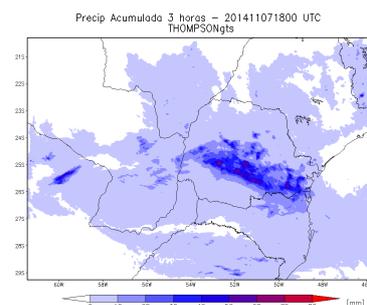
(e) Precip. Acum sem radar das 15z



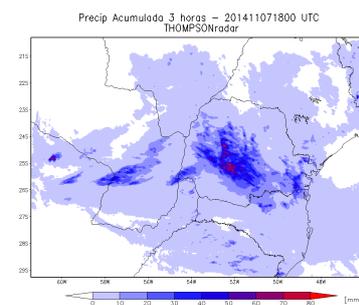
(f) Precip. Acum com radar das 15z



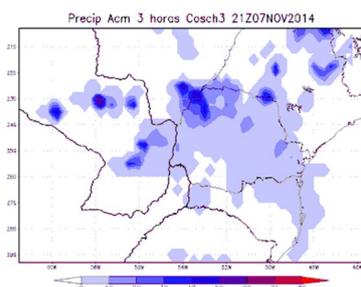
(g) Cosh3 das 18z



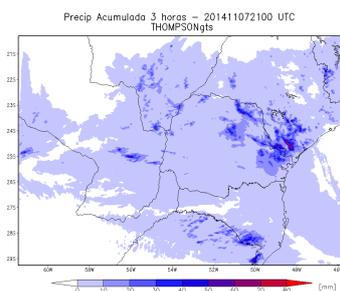
(h) Precip. Acum sem radar das 18z



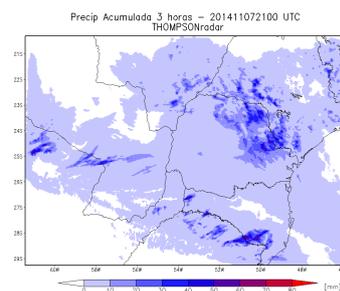
(i) Precip. Acum com radar das 18z



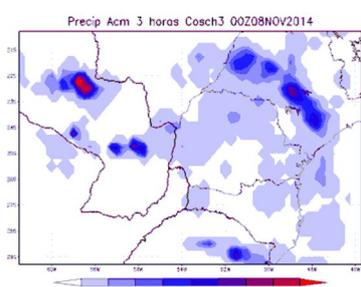
(j) Cosh3 das 21z



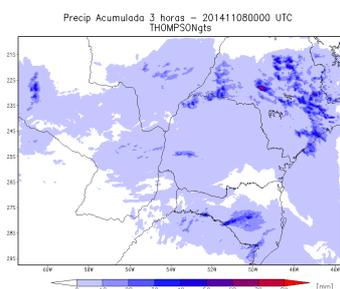
(k) Precip. Acum sem radar
das 21z



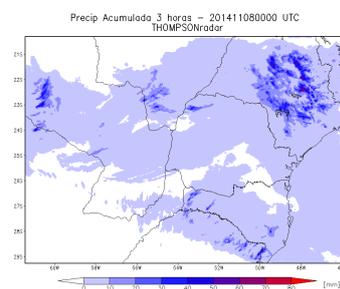
(l) Precip. Acum com
radar das 21z



(m) Cosh3 das 00z



(n) Precip. Acum sem radar
das 00z



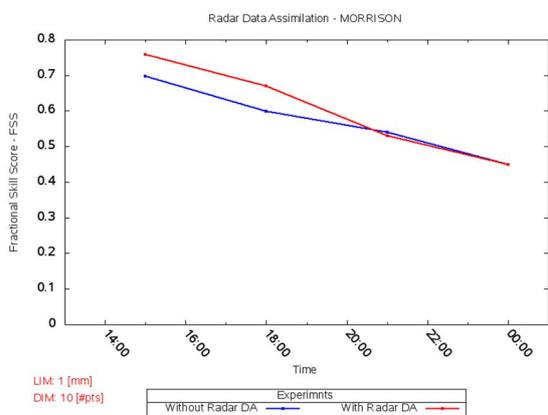
(o) Precip. Acum com
radar das 00z

Fonte – Produção do autor.

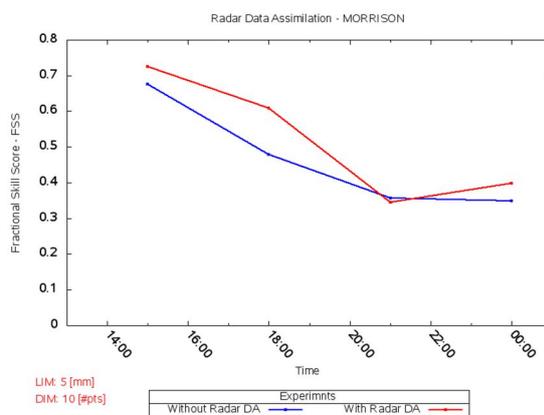
8.3 Morrison

A parametrização de Morrison apresentou os melhores índices na média dos eventos na integração total do tempo, conforme os índices FSS e LRMSE da figura 8.5.

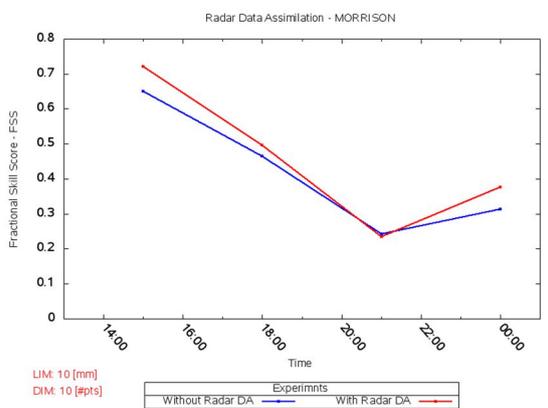
Figura 8.5 Análise objetiva dos índices FSS e LRMSE para a parametrização MORRISON.



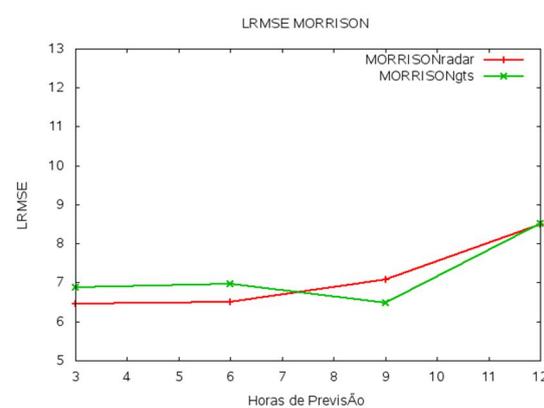
(a) Limites de 1 mm e raio 10 km



(b) Limites de 5 mm e raio 10 km

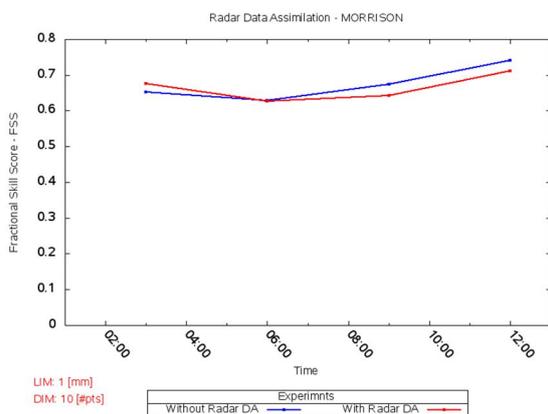


(c) Limites de 10 mm e raio 10 km

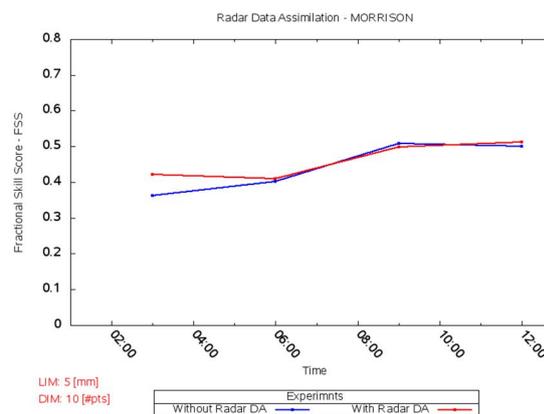


(d) Raio de 10 km

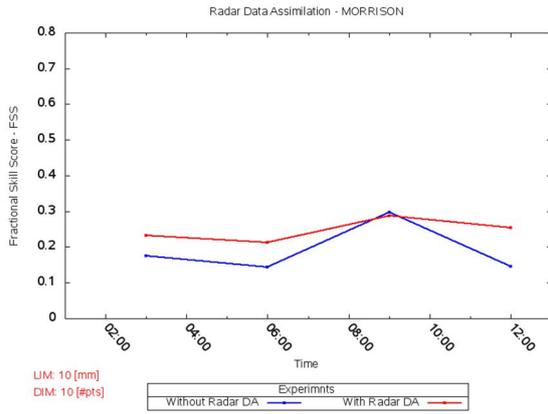
Evento 13/12/2014



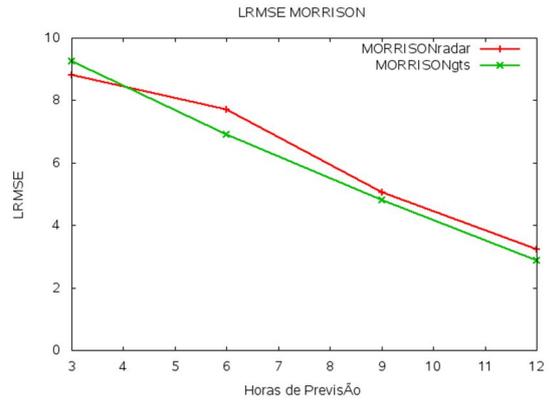
(d) Limites de 1 mm e raio 10 km



(e) Limites de 5 mm e raio 10 km

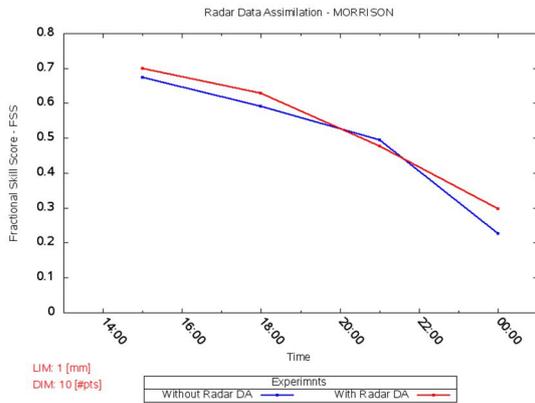


(g) Limites de 10 mm e raio 10 km

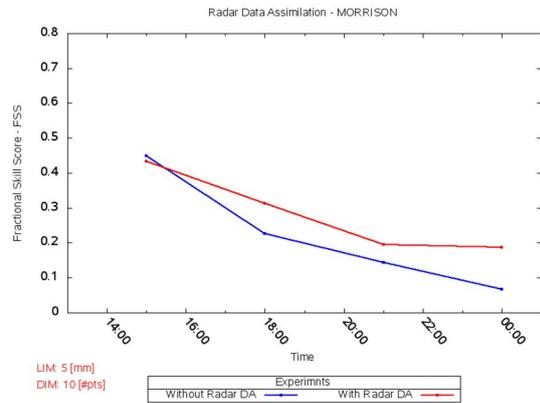


(h) Raio de 10 km

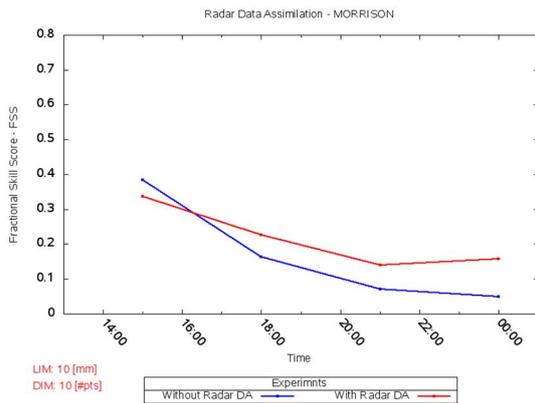
Evento 30/10/2014



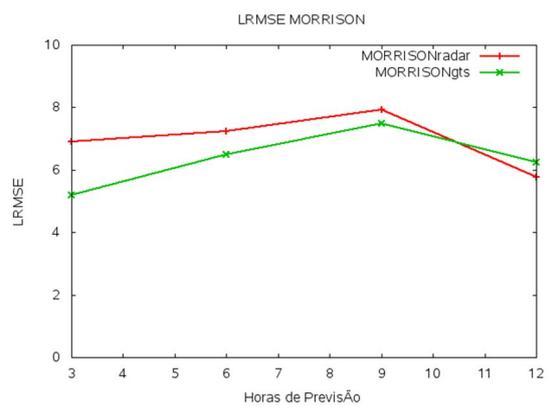
(i) Limites de 1 mm e raio 10 km



(j) Limites de 5 mm e raio 10 km



(n) Limites de 10 mm e raio 10 km

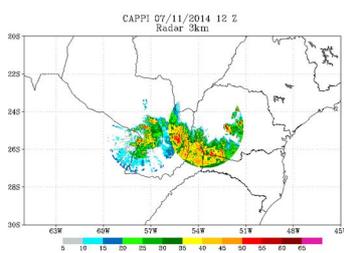


(m) Raio de 10 km

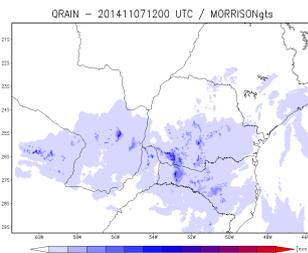
Fonte – Produção do autor.

Neste esquema, alguns núcleos convectivos perderam intensidade com a ADR conforme figura 8.6 até às 6 horas iniciais de previsão, podendo justificar a maior eficácia desta parametrização.

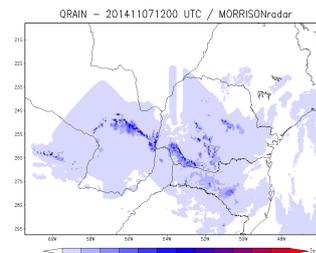
Figura 8.6 Imagens geradas com a parametrização MORRISON para o dia 07/11/2014.



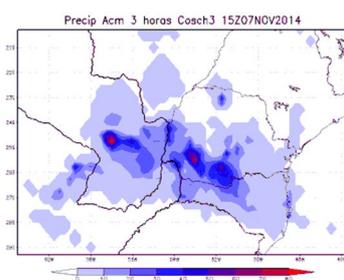
(a) Capii 3 km (ASU e CAS)



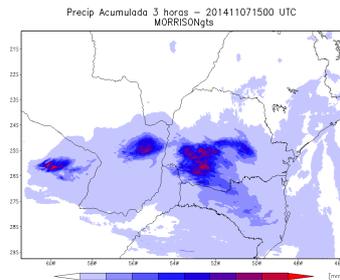
(b) Qrain sem radar



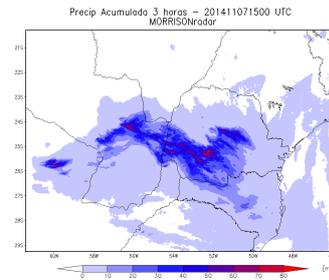
(c) Qrain com radar



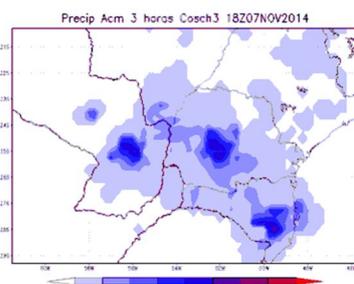
(d) Cosh3 das 15z



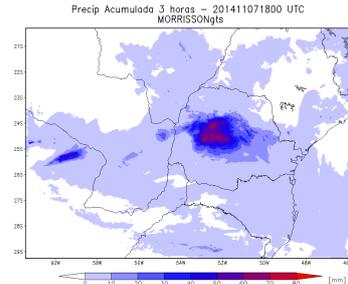
(e) Precip. Acum sem radar das 15z



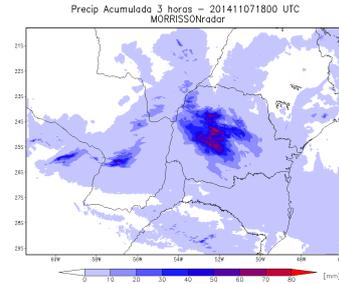
(f) Precip. Acum com radar das 15z



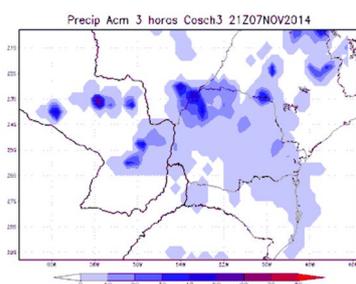
(g) Cosh3 das 18z



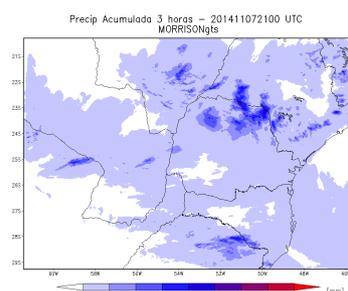
(h) Precip. Acum sem radar das 18z



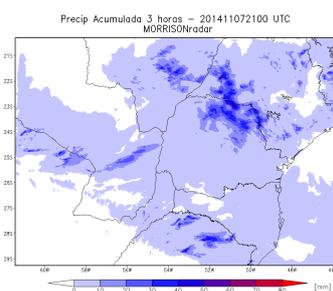
(i) Precip. Acum com radar das 18z



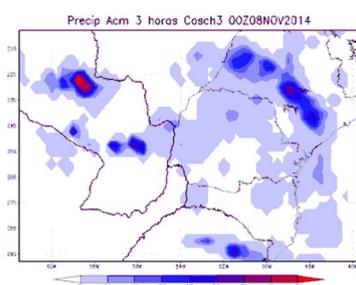
(j) Cosh3 das 21z



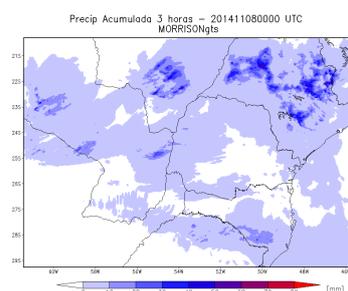
(k) Precip. Acum sem radar das 21z



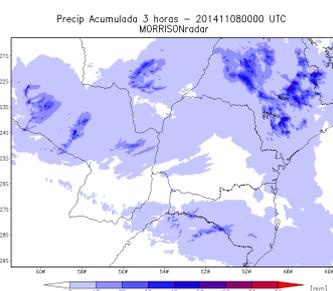
(l) Precip. Acum com radar das 21z



(m) Cosh3 das 00z



(n) Precip. Acum sem radar das 00z



(o) Precip. Acum com radar das 00z

Fonte – Produção do autor.

Nas experiências de assimilação de dados feitas por HONG e SHIN (2015) na Coreia ocorreu uma subestimação na intensidade da precipitação em todos os esquemas testados (Thompson, Morrison, WSM6 e WDM6). Sendo assim, os resultados encontrados na cidade de Seul foram diferentes dos observados neste trabalho, que apresentou uma superestimava de precipitação em todas as parametrizações testadas e a parametrização de Morrison foi a mais eficaz.

9 CONCLUSÃO E SUGESTÕES

Para avaliar o impacto entre as parametrizações de microfísica e a assimilação de dados radar foi definido o tempo de 48 horas para o ajuste do modelo WRF que disponibilizou a condição inicial mais adequada para iniciar a integração no tempo.

Constatou-se a importância das sondagens das 00z (menor número de estações) e 12z (maior número de estações) para a assimilação, que forneceram o maior número de dados assimilados sem considerar os dados do radar, pois cada nível e variável de uma sondagem são considerados dados diferentes. Observou-se que a altitude alcançada pelo balão meteorológico implicou em um número maior de dados. A quantidade de dados assimilados de radar foi muito superior aos dados GTS, sendo a variável do vento a de maior quantidade.

Observou-se o padrão similar nos incrementos das variáveis em relação a todas as parametrizações, apresentando impacto positivo da assimilação de dados do radar, modificando a circulação de ar atmosférico na região do radar e alterando a razão de mistura de vapor d'água pontualmente. Ressalta-se que a baixa quantidade de dados de refletividade não implicou diretamente em pouca quantidade de dados de vento, uma vez que valores baixos de refletividade provocaram baixo ou nenhum incremento, enquanto que os dados de vento foram extraídos normalmente.

Na avaliação do perfil de temperatura gerado com ADR, notou-se pequena variação em relação ao perfil produzido sem radar, porém foi insuficiente para simular a inversão de temperatura observada após a integração do tempo em Curitiba.

O tempo de processamento teve pouca variação na assimilação de dados de radar em relação à assimilação de dados GTS, pois o cálculo que envolve a mudança de parametrização só influenciou na integração no tempo de 12 horas do modelo, porém houve uma variação no custo computacional com as mudanças de parametrização.

Os resultados obtidos mostraram que a condição inicial melhorada com assimilação de dados de radar apresentou uma melhor representação da atmosfera nas seis primeiras horas de previsão e que quanto maior foi a intensidade da precipitação, num raio de 10 km, mais preciso foi a simulação do modelo durante as 12 horas de integração. Notou-

se que os valores com os dados de radar apresentaram valores superiores principalmente no evento com precipitação forte.

O ganho com radar chegou a apresentar na média até 20% de ganho no índice FSS em relação ao experimento sem radar. A variação média do ganho entre as parametrizações de microfísica chegou a 70% no índice FSS com a assimilação de dados radar, ou seja, o pior resultado de uma parametrização (Kessler) variou em até 70% em relação ao resultado da melhor parametrização (Thompson e Morrison).

A microfísica de Thompson destacou-se principalmente na localização dos núcleos convectivos com limites acima de 5 mm de precipitação em 10 km de raio. Este desempenho da parametrização Thompson é ratificado no índice LRMSE que indica o menor erro na intensidade dos núcleos convectivos. A microfísica de Morrison apresentou-se mais eficaz no final das 12 horas de previsão nos casos de menor intensidade da precipitação. Os resultados comprovaram que os desempenhos de esquemas complexos de dois momentos nem sempre foram superiores aos esquemas mais simples de um momento.

Observou-se que a assimilação de dados de radar fez as parametrizações superestimarem os núcleos convectivos. Na média das faixas de refletividade a parametrização Morrison manteve-se mais próximo do observado pelo radar de Assunção - Paraguai.

A parametrização de Morrison apresentou o melhor desempenho com ADR, mesmo superestimando o número de células convectivas com valores de refletividade acima de 35 dBz e o desempenho da parametrização WSM5 destacou-se por superestimar o número de células com refletividade entre 35 e 45 dBz, ficando muito acima do observado após a ADR.

O avanço proporcionado por este trabalho foi:

- Determinar a parametrização de microfísica de Morrison como a mais eficaz com e sem a assimilação de dados de radar numa determinada região de estudo;

- Verificar o custo computacional envolvido na mudança de parametrizações com ADR, onde as parametrizações mais simples (Kessler e Lin) apresentaram um maior custo computacional;
- Definir o tempo de 48 horas (9 ciclos) para o ajuste do modelo WRF para determinar a condição inicial mais acurada com o observado;
- Mostrar o impacto das mudanças de parametrizações na assimilação de dados, onde não apresentaram diferenças relevantes;
- Comparar os resultados de algumas variáveis da análise do modelo com perfis verticais da atmosfera, verificando o ajuste da análise aos dados observados.

Como sugestão de futuros trabalhos, têm-se:

- Verificar o impacto da assimilação de dados de radar com 2 parametrizações (Morrison e Thompson) sobre os tipos de hidrometeoros em outros eventos;
- Analisar o impacto da mudança de parametrizações de microfísica com a assimilação de outras variáveis do radar Doppler de dupla polarização;
- Realizar assimilações com filtragem das informações de radar, comparando os resultados com e sem filtragem.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AKSOY, A.; DOWELL, D. C.; SNYDER, C. A multi-case comparative assessment of the ensemble kalman filter for assimilation of radar observations. part i: Storm-scale analyses. **Monthly weather review**, v. 137, p. 1805–1824, 2009.
- ALANA, R. **Aeroportos fecharam 1804 vezes em 2012**. Disponível em: <<http://www.estadao.com.br/noticias/geral,aeroportos-fecharam-1804-vezes-em-2012,1014947>>. Acesso em: 23 nov. 2016.
- BERGTHÓRSSON, PÁLL; DÖÖS, B. R. Numerical Weather Map Analysis1. **Tellus**, v. 7, n. 3, p. 329–340, 1955.
- BJERKNES, V. Das Problem der Wettervorhersage: betrachtet vom Standpunkte der Mechanik und der Physik. 1904.
- CHARNEY, JULES G.; FJÖRTOFT, RAGNAR; NEUMANN, J. VON. Numerical integration of the barotropic vorticity equation. **Tellus**, v. 2, n. 4, p. 237–254, 1950.
- CHOU, S. C.; BUSTAMANTE, J. F.; GOMES, J. L. Evaluation of Eta model seasonal precipitation forecasts over South America. **Nonlinear Processes in Geophysics**, v. 12, n. 4, p. 537–555, 2005.
- COLLISCHONN, B., ALLASIA, D., COLLISCHONN, W., & TUCCI, C. E. M. Desempenho do satélite TRMM na estimativa de precipitação sobre a bacia do Paraguai superior. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 59, n. 1, p. 93–99, 2007.
- COSSETIN, C., GONCALVES, L., SILVEIRA, B., VENDRASCO, E., KHAMIS, E., SAPUCCI, L. An operational high resolution ensemble kalman filter data assimilation cycle over South America. **EGU General Assembly Conference Abstracts.**, v. 18, p. 17949, 2016.
- CRAM, JENNIFER M.; PIELKE, ROGER A.; COTTON, W. R. Numerical simulation and analysis of a prefrontal squall line. Part I: Observations and basic simulation results. **Journal of the atmospheric sciences**, v. 49, n. 3, p. 189–208, 1992.

- CRESSMAN, G. P. An operational objective analysis system. **Monthly weather review**, v. 87, n. 10, p. 367–374, 1959.
- DUDHIA. **WRF physics options**. Disponível em:
<http://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/tutorial/201107/WRF_Physics_Dudhia.ppt.pdf>.
Acesso em: 23 nov. 2016.
- FERREIRA, R. **Estudo de sistemas convectivos de mesoescala com uso de assimilação de dados de radar**. [s.l.] Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, SP, Brasil., 2016.
- GAO, J.; XUE, M.; BREWSTER, K.; DROEGEMEIER, K. K. A three-dimensional variational data analysis method with recursive filter for doppler radars. **J. Atmos. Oceanic Technol.**, v.21, p. 457-469, 2007.
- GRELL, Georg A.; FREITAS, Saulo R. A scale and aerosol aware stochastic convective parameterization for weather and air quality modeling. **Atmos. Chem. Phys**, v. 14, n. 10, p. 5233-5250, 2014.
- HONG, Song-You; LIM, Jeong-Ock Jade. The WRF single-moment 6-class microphysics scheme (WSM6). **J. Korean Meteor. Soc**, v. 42, n. 2, p. 129-151, 2006.
- HOUZE JR, Robert A. **Cloud dynamics**. Academic press, 2014.
- HUFFMAN, G. J. et al. The TRMM Multisatellite Precipitation Analysis (TMPA): Quasi-Global, Multiyear, Combined-Sensor Precipitation Estimates at Fine Scales. **Journal of Hydrometeorology**, v. 8, n. 1, p. 38–55, 2007.
- KALNAY, E. **Atmospheric modeling, data assimilation and predictability**. [s.l.] Cambridge University Press, 2003.
- KESSLER, E. Models of microphysical parameters and processes. **Meteorological Monographs**, v. 10, p. 26–31, 1969.
- KI-HONG MIN, YU-SHIN KIM, G. L. WRF Microphysics Schemes. Daegu, Republic of Korea: Kyungpook National University - Department of Astronomy and

Atmospheric Sciences - School of Earth System Sciences, 2015.

LIM KSS.; HONG SY. Development of an effective double-moment cloud microphysics scheme with prognostic cloud condensation nuclei (CCN) for weather and climate models. **Monthly weather review**, v. 138, n. 5, p. 1587–1612, 2010.

LIN, YING; MITCHELL, K. E. The NCEP stage II/IV hourly precipitation analyses: development and applications. In: Conf. Hydrology, American Meteorological Society, 19., 2005, San Diego, CA, USA. Proceedings AMS, 2005. Paper 1.2.

LIN, YUH-LANG; FARLEY, RICHARD D.; ORVILLE, H. D. Bulk parameterization of the snow field in a cloud model. **Journal of Climate and Applied Meteorology**, v. 22, n. 6, p. 1065–1092, 1983.

MCCUMBER, M. ET AL. Comparison of ice-phase microphysical parameterization schemes using numerical simulations of tropical convection. **Journal of Applied Meteorology**, v. 30, n. 7, p. 985–1004, 1991.

MILBRANDT, J. A.; YAU, M. K. A multimoment bulk microphysics parameterization. Part I: Analysis of the role of the spectral shape parameter. **Journal of the atmospheric science**, v. 62, n. 9, p. 3051–3064, 2005.

MOLINARI, J.; DUDEK, M. Parameterization of convective precipitation in mesoscale numerical models: A critical review. **Monthly Weather Review**, v. 120, n. 2, p. 326–344, 1992.

MORRISON, H.; THOMPSON, G.; TATARSKII, V. Impact of cloud microphysics on the development of trailing stratiform precipitation in a simulated squall line: Comparison of one-and two-moment schemes. **Monthly Weather Review**, v. 137, n. 3, p. 991–1007, 2009.

Q XIAO, YH KUO, J SUN, WC LEE, E. L. Assimilation of Doppler radar observations with a regional 3DVAR system: Impact of Doppler velocities on forecasts of a heavy rainfall case. **Journal of applied meteorology**, v. 44, n. 6, p. 768–788, 2005.

REEN, B. P. Data assimilation strategies and land-surface heterogeneity effects in the

planetary boundary layer. **ProQuest**, 2007.

REICHLER, R. H. Data assimilation methods in the Earth sciences. **Advances in Water Resources**, v. 31, n. 11, p. 1411–1418, 2008.

RICHARDSON, L. F. **forms whereon to write the numerical calculations described in weather prediction by numerical process**. [s.l.] Nabu Public Domain Reprints, 1922.

ROBERTS, NIGEL M.; LEAN, H. W. Scale-selective verification of rainfall accumulations from high-resolution forecasts of convective events. **Monthly Weather Review**, v. 136, n. 1, p. 78–97, 2008.

SAPUCCI, L. F., ARAVÉQUIA, J. A., SOUZA, R. A. F., FERREIRA, S., HERDIES, D. L., ANDREOLI, R. V., & MATTOS, J. G. F. The inclusion of integrated water vapor estimates from AIRS/AMSU and SSM/I sensors into PSAS data assimilation system in the CPTEC. In: INTERNATIONAL TOVS STUDY CONFERENCE, 15., Maratea, Italy. Proceedings... 2006. Papel. (INPE-14531-PRE/9562).

SHIMIZU, S.; MAKI, M.; MAESAKA, T.; IWANAMI, K.; SHIMADA, S. Short-range forecast using mpradar network and 3dvar assimilation for the heavy rainfall in north tokyo on july 5th 2010. In: JAPAN GEOSCIENCE UNION MEETING, 2011. Makuari Chiba Japan. Proceedings Geoscience Union, 2011.

SIMPSON, JOANNE; ADLER, ROBERT F.; NORTH, G. R. A proposed tropical rainfall measuring mission (TRMM) satellite. **Bulletin of the American meteorological Society**, v. 69, n. 3, p. 278–295, 1988.

SCHOENBERG FERRIER, Brad. A double-moment multiple-phase four-class bulk ice scheme. Part I: Description. **Journal of the Atmospheric Sciences**, v. 51, n. 2, p. 249–280, 1994.

SIMPSON, J. ET AL. On the tropical rainfall measuring mission (TRMM).

Meteorology and Atmospheric physics, v. 60, n. 1–3, p. 19–36, 1996.

STANLEY, Thomas et al. Approximating long-term statistics early in the global

precipitation measurement era. **Earth Interactions**, v. 21, n. 3, p. 1-10, 2017.

STENSRUD, D. J. **Parameterization schemes: keys to understanding numerical weather prediction models**. [s.l.] Cambridge University Press, 2009.

STRUNK, A. **Tropospheric chemical state estimation by four-dimensional variational data assimilation on nested grids**. [s.l.] Universität zu Köln., 2006.

SUN, J.; WANG, H. Radar data assimilation with wrf 4d-var: Part ii. comparison with 3d-var for a squall line case. **Monthly weather review**, v. 141, p. 2245–2264, 2013.

TALAGRAND, O. Assimilation of observations, an introduction. **Meteorological Society of Japan**, v. 75, n. 2, p. 81–99, 1997.

VAN WEVERBERG, K., ET AL. The role of cloud microphysics parameterization in the simulation of mesoscale convective system clouds and precipitation in the tropical western Pacific. **Journal of the Atmospheric Sciences**, n. 70.4, p. 1104–1128, 2013.

VENDRASCO, E. P.; SUN, J.; WANG, H.; HERDIES, D. L.; ANGELIS, C. F.; ALBRECHT, R. I. **Assimilation of the chuva project's dual polarization radar data with wrf 3d-var and its impact on the short-range precipitation forecast**. In: CONFERENCE ON RADAR METEOROLOGY, 36., 2013, Breckenridge, Colorado. Proceedings... 2013. DVD.

VENDRASCO, E. P. **O impacto da assimilação de dados de radar na previsão de curto prazo**. 2015. 208 p. IBI: <8JMKD3MGP8W/3JDJQU2>. (sid.inpe.br/mtc-m18/2015/04.30.17.42-TDI). Tese (Doutorado em meteorologia) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, SP, Brasil., 2015. Disponível em: <<http://urlib.net/8JMKD3MGP8W/3JDJQU2>>.

Vendrasco, E. P.; Sun, J.; Herdies, D. L.; Angelis, F. C.. Constraining a 3DVAR radar data assimilation system with large-scale analysis to improve short-range precipitation forecasts. **Journal of Applied Meteorology and Climatology**, v. 55, n. 3, p. 673-690, 2016.

VILA, D. A.; GONÇALVES, L. G. G.; TOLL, D. L.; ROZANTE, J. R. Statistical evaluation of combined daily gauge observations and rainfall satellite estimates over continental South America. **Journal of Hydrometeorology**, v. 10, n. 2, p. 533–543, 2009.

WANG, H.; SUN, J.; FAN, S.; HUANG, X.-Y. Indirect assimilation of radar reflectivity with WRF 3d-var and its impact on prediction of four summertime convective events. **Appl. Meteor. Climat.**, v. 52, p. 889–902, 2013.

WANG, W.; WARNER, T. T. Use of four-dimensional data assimilation by Newtonian relaxation and latent-heat forcing to improve a mesoscale-model precipitation forecast: A case study. **Monthly weather review**, v. 116, n. 12, p. 2593–2613, 1988.

WARNER, Thomas Tomkins. **Numerical weather and climate prediction**. Cambridge University Press, 2010.

WEISMAN, MORRIS L.; SKAMAROCK, WILLIAM C.; KLEMP, J. B. No Title. **Monthly weather review**, v. 125, n. 4, p. 527–548, 1997.

XIAO, Q.; SUN, J. Multiple-radar data assimilation and short-range quantitative precipitation forecasting of a squall line observed during IHOP 2002. **Monthly weather review**, v. 135, n. 10, p. 3381–3404, 2007.

ZHANG, SARA Q., MILIJA ZUPANSKI, ARTHUR Y. HOU, XIN LIN, SAMSON H. CHEUNG, 2013: Assimilation of precipitation affected radiances in a cloud resolving wrf ensemble data assimilation system. **Monthly Weather review**, 141, 754-772.