



Ministério da
Ciência e Tecnologia



sid.inpe.br/mtc-m19/2011/02.03.12.46-TDI

**IMPACTO DA ASSIMILAÇÃO DE DADOS DE
AEROSSÓIS NO MODELO AMBIENTAL CCAT-BRAMS:
UM ESTUDO DE CASO DA CAMPANHA CLAIM**

Gabriel Bonow Münchow

Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Meteorologia, orientada pelos Drs. Dirceu Luis Herdies, e Karla Maria Longo de Freitas, aprovada em 18 de fevereiro de 2011.

URL do documento original:
<<http://urlib.net/8JMKD3MGP7W/39549E8>>

INPE
São José dos Campos
2011

PUBLICADO POR:

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE

Gabinete do Diretor (GB)

Serviço de Informação e Documentação (SID)

Caixa Postal 515 - CEP 12.245-970

São José dos Campos - SP - Brasil

Tel.:(012) 3208-6923/6921

Fax: (012) 3208-6919

E-mail: pubtc@sid.inpe.br

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

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

Membros:

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

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

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

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

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

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

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

BIBLIOTECA DIGITAL:

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

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

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

REVISÃO E NORMALIZAÇÃO DOCUMENTÁRIA:

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

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

EDITORAÇÃO ELETRÔNICA:

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



Ministério da
Ciência e Tecnologia



sid.inpe.br/mtc-m19/2011/02.03.12.46-TDI

**IMPACTO DA ASSIMILAÇÃO DE DADOS DE
AEROSSÓIS NO MODELO AMBIENTAL CCAT-BRAMS:
UM ESTUDO DE CASO DA CAMPANHA CLAIM**

Gabriel Bonow Münchow

Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Meteorologia, orientada pelos Drs. Dirceu Luis Herdies, e Karla Maria Longo de Freitas, aprovada em 18 de fevereiro de 2011.

URL do documento original:
<<http://urlib.net/8JMKD3MGP7W/39549E8>>

INPE
São José dos Campos
2011

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Münchow, Gabriel Bonow.

M921i Impacto da assimilação de dados de aerossóis no modelo ambiental CCAT-BRAMS: um estudo de caso da campanha CLAIM / Gabriel Bonow Münchow. – São José dos Campos : INPE, 2011. xxviii+97 p. ; (sid.inpe.br/mtc-m19/2011/02.03.12.46-TDI)

Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2011.

Orientadores : Drs. Dirceu Luis Herdies, e Karla Maria Longo de Freitas.

1. Química atmosférica. 2. Assimilação avançada de dados .
3. Aerossóis. 4. Campanha CLAIM. I.Título.

CDU 550.5: 614.715 (817.2)

Copyright © 2011 do MCT/INPE. Nenhuma parte desta publicação pode ser reproduzida, armazenada em um sistema de recuperação, ou transmitida sob qualquer forma ou por qualquer meio, eletrônico, mecânico, fotográfico, reprográfico, de microfilmagem ou outros, sem a permissão escrita do INPE, com exceção de qualquer material fornecido especificamente com o propósito de ser entrado e executado num sistema computacional, para o uso exclusivo do leitor da obra.

Copyright © 2011 by MCT/INPE. No part of this publication may be reproduced, stored in a retrieval system, or transmitted in any form or by any means, electronic, mechanical, photocopying, recording, microfilming, or otherwise, without written permission from INPE, with the exception of any material supplied specifically for the purpose of being entered and executed on a computer system, for exclusive use of the reader of the work.

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

Dr. Daniel Alejandro Vila



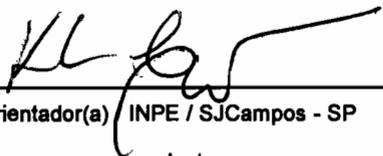
Presidente / INPE / Cachoeira Paulista - SP

Dr. Dirceu Luis Herdies



Orientador(a) / INPE / Cachoeira Paulista - SP

Dra. Karla Maria Longo de Freitas



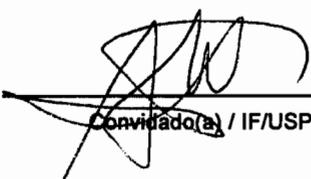
Orientador(a) / INPE / SJCampos - SP

Dra. Judith Johanna Hoelzemann



Membro da Banca / INPE / São José dos Campos - SP

Dr. Alexandre Lima Correia



Convidado(a) / IF/USP / São Paulo - SP

Aluno (a): Gabriel Bonow Münchow

São José dos Campos, 18 de fevereiro de 2011

“Tudo tem o seu tempo determinado, e há tempo para todo o propósito debaixo do céu.

*Há tempo de nascer, e tempo de morrer; tempo de plantar, e tempo de arrancar o que se
plantou;*

Tempo de matar, e tempo de curar; tempo de derrubar, e tempo de edificar;

Tempo de chorar, e tempo de rir; tempo de prantear, e tempo de dançar;

*Tempo de espalhar pedras, e tempo de ajuntar pedras; tempo de abraçar, e tempo de
afastar-se de abraçar;*

Tempo de buscar, e tempo de perder; tempo de guardar, e tempo de lançar fora;

Tempo de rasgar, e tempo de coser; tempo de estar calado, e tempo de falar;

Tempo de amar, e tempo de odiar; tempo de guerra, e tempo de paz.”

Rei Salomão - Ec 3:1-8

A DEUS
e a meus pais,
RUDI MÜNCHOW e
GIZELA B. MÜNCHOW

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por ter me dado a vida e ter permitido chegar até aqui, me dando força e sabedoria para alcançar e finalizar esta etapa da minha vida.

A meus pais, Rudi e Gizela, que sempre me incentivaram a buscar a excelência, e pela sólida base de fé que possuem e me foi passada. Por todo tempo e energia investidos.

A toda minha família que com palavras ou gestos me motivaram a ir em busca daquilo que eu desejava.

Aos meus grandes amigos Wagner e Duília, que mesmo à distância, me ajudaram com suas orações e palavras de sabedoria e motivação.

Aos meus orientadores Dr. Dirceu Herdies e Dra. Karla Longo que durante três anos me acompanharam, guiaram e auxiliaram com suas orientações no desenvolvimento e finalização da dissertação de mestrado.

À Dra. Judith Hoelzemann, que não poupou esforços para me auxiliar neste trabalho, me mostrando o caminho que deveria seguir durante o desenvolvimento do trabalho. Pelo tempo dedicado tirando minhas dúvidas. Por sua amizade, apoio e conselhos valiosos.

A todo pessoal da Igreja Congregacional de Cachoeira Paulista, especialmente o Pr. Luis, que me acolheram em sua igreja e famílias.

Aos meus colegas de mestrado, pela colaboração, pelo conhecimento compartilhado, pela amizade e pelos momentos de descontração vivenciados juntos.

Aos componentes dos grupos GMAI e GDAD, pelo apoio científico e computacional. Por esclarecer as minhas dúvidas e auxiliar em diversos momentos, especialmente na área computacional. Em especial Dr. Saulo Freitas, Me. João Gerd, Rafael Stockler, Rafael Mello e Me. Marcelo Alonso.

Aos meus amigos Priscila, Fábio, Ariane e Bruna pela amizade, momentos de diversão juntos e apoio oferecido.

Aos Drs. Rodrigo Souza, Paulo Artaxo, Alexandre Correia e demais participantes da campanha CLAIM, pela disponibilidade dos dados coletados durante a campanha.

Aos Drs. Hendrik Elbern e Achim Strunk pela disposição em esclarecer dúvidas e auxiliar em questões técnicas do código do sistema de assimilação.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela concessão da bolsa de estudos oferecida durante os dois anos de mestrado.

RESUMO

Todos os anos no Brasil central, grandes áreas de floresta, cerrado e pasto são queimadas, emitindo aerossóis de carbono primário para a atmosfera, especialmente no final da estação seca. Os aerossóis interferem no balanço de radiação, afetando diretamente a quantidade de radiação refletida e retroespalhada de volta ao espaço, a radiação absorvida pela atmosfera, e também a radiação de onda longa. Além dos efeitos diretos, os aerossóis afetam a microfísica de nuvens, agindo como núcleos de condensação, modificando o regime de precipitação e o albedo da nuvem. Durante a estação de queima na América do Sul, a qualidade do ar também é significativamente afetada pelos aerossóis, diminuindo a visibilidade e causando doenças respiratórias devido às partículas inaláveis. Modelos numéricos de transporte químico da atmosfera podem ser usados para estudar e prever o comportamento dos aerossóis e seus efeitos. As simulações feitas por estes modelos podem obter melhores resultados através de métodos de assimilação de dados, utilizando observações disponíveis para corrigir as simulações do modelo. Neste estudo, foi utilizado um sistema de assimilação baseado no método variacional em duas dimensões (2D-Var), acoplado ao modelo *Coupled Chemical-Aerosol-Tracer Transport – Brazilian developments on the Regional Modeling System* (CCATT-BRAMS). O sistema 2D-Var foi utilizado para assimilar observações de concentração de massa de material particulado menor que 2,5 μm ($\text{PM}_{2.5}$). Estas observações foram coletadas durante a campanha *Cloud-Aerosol Interaction Measurements* (CLAIM), realizada em outubro de 2007, na região norte do Estado do Mato Grosso, Brasil. As medidas foram realizadas utilizando o instrumento DataRAM a bordo de uma aeronave que coletou informações com uma frequência de 10 segundos e 30 segundos. Durante a campanha, foram realizados 17 vôos ao todo, dos quais 13 puderam ser utilizados neste estudo. Os resultados apresentam uma considerável melhora nos valores de $\text{PM}_{2.5}$ modelados, aproximando o modelo das observações, mesmo assimilando uma observação média por vôo. Os melhores resultados foram obtidos com a utilização do Erro Relativo de *Background* igual a 200%, com um fator de correção calculado pela assimilação adaptado ao tipo de observações assimiladas, com raios de influência inhomogêneos, calculados individualmente para cada vôo, e com um banco de dados observados suavizados, sem picos singulares de concentração. Com estas configurações o sistema de assimilação foi capaz de aproximar de maneira ótima as análises às observações.

IMPACT OF AEROSOL DATA ASSIMILATION IN THE CATT-BRAMS
ENVIRONMENTAL MODEL: A CASE STUDY WITH DATA FROM CLAIM
CAMPAIGN

ABSTRACT

In Central Brazil every year large areas of forest, cerrado and pasture land are burned emitting primary carbonaceous aerosols into the atmosphere, especially in the end of the dry season. The aerosols interfere with the radiative budget, affecting directly the amount of solar radiation that is reflected and scattered back to space, and partly absorbed by the atmosphere. The long wave terrestrial radiation is also affected. Aerosols also affect cloud microphysics acting as cloud condensation nuclei (CCN), modifying precipitation patterns and cloud albedo. During the South American burning season, aerosols have a significant impact on local and regional air quality affecting visibility and human health by particle inhalation causing pulmonary diseases. Atmospheric chemical numerical models can be used to study and forecast aerosol behavior and effects. Better simulations of aerosols by numerical models can be achieved through data assimilation methods including available aerosol observations to correct the model simulations. In this study an assimilation system was used based on a two dimensional variational data assimilation method (2D-VAR) coupled to the Coupled Chemical-Aerosol-Tracer Transport – Brazilian developments on the Regional Modeling System (CCATT-BRAMS). The assimilated observations are mass concentration (MC) of particular matter smaller than $2.5\ \mu\text{m}$ ($\text{PM}_{2.5}$). The observations were collected in October 2007, during the *Cloud-Aerosol Interaction Measurements* (CLAIM) campaign, which took place in the northern region of the state of Mato Grosso, Brazil. The measurements of $\text{PM}_{2.5}$ were collected by a DataRAM instrument aboard the aircraft that collected information with a frequency of 10s or 30s. During the campaign 17 flights were carried out, 13 of which could be used in this study. The assimilation system shows a considerable improvement of the modeled $\text{PM}_{2.5}$ field, approaching its values to the observations, as expected, even assimilating an average observation for each flight. The best guess was obtained using the Relative Background Error equal to 200%, the correction factor calculated by assimilation system adapted to the kind of assimilated observations, inhomogeneous radii of influence, and smoothed observational data without outliers. With these parameters the assimilation system was able to approach, in an optimal way, the analysis to the observations.

LISTA DE FIGURAS

	<u>Pág.</u>
Figura 2.1 – Climatologia de focos de queimada detectados pelos satélites NOAA12/15 sobre a América do Sul para os trimestres agosto, setembro, outubro (esquerda) e fevereiro, março, abril (direita), entre 2000 e 2010.	16
Figura 2.2 – Concentração de aerossol PM ₁₀ (µm/m ³) em Alta Floresta/MT observada continuamente na estação de monitoramento atmosférico do LBA desde 1992.	17
Figura 3.1 – Trajetória dos vôos 4 ao 16 realizados durante a campanha CLAIM, MT, Brasil.	20
Figura 3.2 – Concentração de massa de aerossóis (µg/m ³), espalhamento em 1e-4/m (vermelho) e altitude (km) da aeronave (esquerda). Trajetórias dos vôos (direita).	23
Figura 3.3 – Precipitação total (mm) (à esquerda) e anomalia de precipitação (mm) (à direita) para outubro de 2007.	28
Figura 3.4 – Precipitação acumulada às 12UTC, temperatura do ar (°C) máxima e mínima, velocidade do vento (m/s) às 18 UTC medidos na estação sinótica e AOD médio diário e respectivo desvio padrão da estação da AERONET para o mês de outubro de 2007 em Alta Floresta/MT, Brasil.	28
Figura 3.5 – Vento (m/s) no nível σ_z de 2.000m, PM _{INT} (mg/m ²) na escala de cores e as trajetórias dos vôos (em roxo).	29
Figura 3.6 – Processos sub-grade envolvidos no transporte de gases/aerossóis simulados pelo modelo CATT-BRAMS.	33
Figura 3.7 – Localização das grades 1 e 2 utilizadas.	35
Figura 3.8 – Esquema da minimização da função custo, onde J _b (x) representa a função custo em relação ao <i>background</i> e J _o (x) em relação a observação.	37
Figura 3.9 – Fluxograma do ciclo de assimilação do 2D-Var no CCATT-BRAMS.	38

Figura 4.1 – (a) Distribuição na grade do modelo da concentração de massa de $PM_{2.5}$ ($\mu g/m^3$) da análise gerada com a assimilação da observação sintética no valor de $20 \pm 1(\mu g/m^3)$ e <i>corlh</i> de 30 km, 45 km, 60 km, 75km, 90 km, 105 km e 120 km. (b) Distribuição na grade do modelo da concentração de massa de $PM_{2.5}$ ($\mu g/m^3$) da análise.	46
Figura 4.2 – Concentração de massa de $PM_{2.5}$ ($\mu g/m^3$) da análise gerada pela assimilação de quatro observações sintéticas.....	47
Figura 4.3 – Perfis verticais de $PM_{2.5}$ e PM_{INT} dos vôos 4 ao 16 da campanha CLAIM.....	48
Figura 4.4 – Fator de correção <i>zfac</i> (esquerda) e perfil vertical de concentração de $PM_{2.5}$ ($\mu g/m^3$)(direita) do <i>background</i> (verde) e do EXP1 (vermelho).	50
Figura 4.5 – Campo de PM_{INT} (mg/m^2) da análise para os vôos 4 ao 16 da campanha CLAIM, dos experimentos CTRL (coluna esquerda), EXP1(coluna central) e diferença entre eles (EXP1-CTRL) (coluna direita).	52
Figura 4.6 – Concentração de massa de $PM_{2.5}$ observado (pontos azuis) e da análise dos experimentos CTRL (verde) e EXP1(vermelho) nos vôos 4 (esquerda) e 15 (direita).	55
Figura 4.7 – À esquerda: <i>zfac</i> médio e máximo. À direita: diferença de PM_{INT} (mg/m^2) entre observação e <i>background</i> (O-F) e observações de PM_{INT} (mg/m^2) durante os vôos 4 ao 16. Ambas para os experimentos EXP1, EXP2, EXP3 e EXP4.	56
Figura 4.8 – Diferença entre PM_{INT} da análise e CTRL para vôo 4 nos experimentos EXP2, EXP3 e EXP4.....	57
Figura 4.9 – Campos de Análises de PM_{INT} (mg/m^2) dos vôos 4 e 12 dos experimentos CTRL (coluna esquerda), EXP5(coluna central) e EXP6 (coluna direita).....	59
Figura 4.10 – Concentração de massa de $PM_{2.5}$ observado (pontos azuis) e das análises dos experimentos CTRL, EXP1-6, para os vôos 4 e 12 da campanha CLAIM.....	60

Figura 4.11 – $PM_{2.5}$ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) observado (vermelho) e $PM_{2.5}$ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) médio na camada (azul) para as observações originais (esquerda) e sem picos de concentração (direita), coletadas durante o voo 9.	61
Figura 4.12 – Z_{fac} médio e z_{fac} máximo nos experimentos EXP5, EXP6, EXP7 e EXP8 para todo os vãos utilizados.....	63
Figura 4.13 – Diferença observação menos estimativa inicial (O-F) e observação menos análise (O-A) dos experimento EXP5, EXP6, EXP7 e EXP8 para todos os vãos.	64
Figura 4.14 – PM_{INT} (mg/m^2) calculado com as observações com (orig) e sem (SP) picos de concentração, PM_{INT} do experimento CTRL e das análises de todos os experimentos.....	65
Figura 4.15 – Concentração de massa de $PM_{2.5}$ ($\mu\text{m}/\text{m}^3$) observado (pontos azuis) e da análise dos experimentos CTRL, EXP7 e EXP8 para os vãos 4 ao 16 da campanha CLAIM.	66
Figura 4.16 – Campo de PM_{INT} (mg/m^2) das análises dos experimentos CTRL (coluna esquerda), EXP8 (coluna central) e diferença entre eles (EXP8-CTRL) (coluna direita).....	69
Figura 4.17 – PM_{INT} (mg/m^2) dos experimentos CTRL (esquerda) e EXP8 (direita).	72
Figura 4.18 – Diferença entre PM_{INT} (mg/m^2) do EXP8 menos CTRL para os voo 15 (esquerda) e voo 16 (direita).	72
Figura 4.19 – Raiz do Erro Quadrático Médio (REQM) da concentração de massa de $PM_{2.5}$ do experimento CTRL e das análises de todos os experimentos.	73
Figura 4.20 – Erro Médio da concentração de massa de $PM_{2.5}$ do experimento CTRL e das análises de todos os experimentos.	74
Figura 4.21 – Erro Relativo da concentração de massa de $PM_{2.5}$ do experimento CTRL e das análises dos experimentos EXP1 a EXP8 geradas pelo sistema de assimilação de aerossóis durante os vãos 4 ao 16 da campanha CLAIM.....	75

LISTA DE TABELAS

	<u>Pág.</u>
Tabela 3.1 – Data, horário, área de abrangência e altitudes dos vôos selecionados da campanha CLAIM e média das observações de $PM_{2.5}$ de cada vôo, AOD médio e desvio padrão da AERONET (AOD_A) e do MODIS (AOD_M) em Alta Floresta, MT/Brasil.....	22
Tabela 3.2 – Configuração das simulações	34
Tabela 3.3 – Experimentos realizados para o período de estudo de 09 a 22 de outubro de 2007.....	42

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

3BEM	<i>Brazilian Biomass Burning Emission Model</i>
2D-Var	<i>Two Dimensional Variational Data Assimilation</i>
3D-Var	<i>Three Dimensional Variational Data Assimilation</i>
4D-Var	<i>Four Dimensional Variational Data Assimilation</i>
AB	Alta da Bolívia
AERONET	<i>Aerosol Robotic Network</i>
AM	Amazonas
AMC	<i>Aerosol Mass Concentration</i>
AO	Análise Objetiva
AOD	<i>Aerosol Optical Depth</i>
AS	América do Sul
AVHRR	<i>Advanced Very High Resolution Radiometer</i>
BC	<i>Black-carbon</i>
BS	<i>Bias Score</i>
CCATT-BRAMS	<i>Coupled Chemical-Aerosol-Tracer Transport – Brazilian development on the Regional Atmospheric Modelling System</i>
CC	Coeficiente de Correlação
CCN	<i>cloud condensation nuclei</i>
CDAS	<i>Climate Data Assimilation System</i>
CLAIM	<i>Cloud-Aerosol Interaction Measurements</i>
CLP	Camada Limite Planetária
CPTEC	Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos
ECMWF	<i>European Centre for Medium-Range Weather Forecasts</i>
EKF	<i>Ensemble Kalman Filter</i>
EOS	<i>Earth Observing System</i>
EM	Erro Médio
EURAD	<i>EUROpean Air pollution Dispersion model</i>
EUROS	<i>European Operational Smog</i>
GDAS	<i>Global Data Assimilation System</i>

GO	Goiás
GPS	<i>Global Positioning System</i>
GSI	<i>Gridpoint Statistical Interpolation</i>
INDOEX	<i>Indian Ocean Experiment</i>
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
IPCC	<i>Intergovernmental Panel on Climate Change</i>
JMA	<i>Japan Meteorological Agency</i>
KF	<i>Kalman Filter</i>
LETKF	<i>Local Ensemble Transformer Kalman Filter</i>
LI	Linha de Instabilidade
LOTOS	<i>Long Term Ozone Simulation</i>
MATCH	<i>Model of Atmospheric Transport and Chemistry</i>
MOCAGE	<i>Modélisation de la Chimie Atmosphérique Grande Echelle</i>
MODIS	<i>Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer</i>
MT	Mato Grosso
MTR	Modelo de Transferência Radiativa
NASA	<i>National Aeronautics and Space Administration</i>
NC	núcleos de condensação
NCEP	<i>National Centers for Environmental Prediction</i>
OI	<i>Optimal Interpolation</i>
OPC	<i>Optical Particle Counter</i>
PA	Pará
PM ₁₀	Material Particulado com diâmetro menor que 10 µm
PM _{2.5}	Material Particulado com diâmetro menor que 2.5 µm
PSAS	<i>Physical-space Statistical Analysis System</i>
RAMS	<i>Regional Atmospheric Modeling System</i>
REQM	Raiz do Erro Quadrático Médio
RIU	<i>Rhenish Institute for Environmental Research</i>
RRSQRT	<i>reduced rank square root</i>
SALLJEX	<i>South American Low-Level Jet Experiment</i>
SeaWiFS	<i>Sea-viewing Wide Field-of-view Sensor</i>

SMOCC	<i>Smoke, Aerosols, Clouds, Rainfall and Climate</i>
SSI	<i>Spectral Statistical-Interpolation</i>
TO	Tocantins
TOMS	<i>Total Ozone Mapping Spectrometer</i>
ZCIT	Zona de Convergência Intertropical

LISTA DE SÍMBOLOS

CO	Monóxido de Carbono
CO ₂	Dióxido de Carbono
NO _x	Óxidos de Nitrogênio
CH ₄	Metano
S	Enxofre
SO ₂	Dióxido de enxofre
K	Potássio
Br	Bromo
Rb	Rubídio
$X_{t(j)}^{DR}$	Latitude, longitude e altitude para observação do DataRAM
$t(j)$	Horário da observação j
t_i^{GPS}	Horário da informação de GPS i
$X_{t(i)}^{GPS}$	Latitude, longitude e altitude do GPS em t_i
σ_z	Coordenada vertical sigma-z
\bar{s}	Razão de mistura média de um traço
$W_{PM2.5}$	Termo de deposição úmida para PM _{2.5}
R	Termo genérico de sumidouro
Q	Termo fonte de emissão
h	Altura do topo da atmosfera simulada pelo modelo
z_s	Altura da superfície em relação ao nível médio do mar
z	Altura do nível do modelo em relação ao nível médio do mar
ΔZ	Espessura da camada
k	Índice do nível vertical do modelo
$maxh$	Máxima altitude do voo
$minh$	Mínima altitude do voo
$rtgt$	Parâmetro de rugosidade
S_{obs}	Média da concentração de PM _{2.5} por camada do modelo

$n_{AMC(k)}$	Número de observações por camada do modelo
$\sigma_{S_{obs}}(k)$	Desvio padrão da S_{obs} .
\mathbf{x}^a	Análise ótima
\mathbf{x}^b	Campo de <i>background</i>
\mathbf{W}	Matriz peso
\mathbf{y}^o	Observação
H	Operador Observação
\mathbf{J}	Função custo
\mathbf{x}	Estado atual da atmosfera
\mathbf{B}	Matriz de covariância dos erros do <i>background</i>
\mathbf{R}	Matriz de covariância dos erros das observações
\mathbf{H}	Operador observação linearizado
\mathbf{J}_b	Função custo do <i>background</i>
\mathbf{J}_o	Função custo da observação
E_{RB}	Erro Relativo do <i>background</i>
E_{AM}	Erro absoluto mínimo
$corlh$	Raio de influência
O-F	Diferença Observação menos estimativa inicial
O-A	Diferença Observação menos Análise

SUMÁRIO

	<u>Pág.</u>
1 INTRODUÇÃO.....	1
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	5
2.1 Aerossóis Atmosféricos.....	5
2.2 Assimilação de Dados.....	9
2.3 Caracterização da Região Amazônica.....	14
3 DADOS E METODOLOGIA.....	19
3.1 Campanha de medições CLAIM.....	19
3.2 Dados de Emissões.....	31
3.3 Modelo Numérico Ambiental.....	31
3.4 Sistema de Assimilação de Dados.....	35
3.4.1 Cálculo do PM2.5 Integrado na Coluna Atmosférica.....	39
3.5 Descrição dos Experimentos.....	40
3.6 Avaliação dos Resultados.....	42
4 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....	45
4.1 Versão do código 2D-Var de teste independente.....	45
4.2 Perfis verticais e superobservações.....	47
4.3 Sensibilidade da análise ao erro do modelo: EXP1, EXP2, EXP3 e EXP4.....	49
4.4 Sensibilidade do Sistema de Assimilação à Modificação do Fator de Correção <i>zfac</i> : EXP5 e EXP6.....	57
4.5 Teste de Assimilação com Dados Suavizados.....	60
4.6 Impacto de Raios de Influência Inomogêneos e Observações Suavizadas: EXP7 e EXP8.....	62
4.7 Avaliação dos Erros da Análise.....	73
5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	77
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	83

APÊNDICE A– Resultados dos Experimentos CTRL, EXP1, EXP2, EXP3, eXP4, EXP5 e EXP6.....	91
APÊNDICE B– Fator de correção Zfac do EXP8.....	97

1 INTRODUÇÃO

Partículas em suspensão na atmosfera, chamadas aerossóis atmosféricos, e os gases do efeito estufa, dióxido de carbono e metano, entre outros, têm sido principalmente responsabilizados pela influência antrópica sobre as mudanças climáticas. Os aerossóis em particular, estão no foco de diversos estudos recentes sobre mudanças climáticas. Eles afetam o balanço radiativo terrestre, pois aumentam a quantidade de radiação solar refletida, diminuindo a quantidade de radiação de onda curta incidente na superfície. E alguns aerossóis são opacos à radiação de onda curta e onda longa (COAKLEY et al., 1983; CHARLSON et al., 1992). Há também o efeito devido à modificação na distribuição no tamanho das gotículas em nuvens, aumentando seu albedo (TWOMEY, 1977). Segundo o último relatório do *Intergovernmental Panel on Climate Change* (FORSTER et al., 2007) alguns tipos de partículas causam uma forçante positiva e outras negativa no balanço radiativo, mas estima-se que o efeito líquido total é negativo. Porém esta estimativa possui a maior incerteza entre os termos considerados como responsáveis pelas mudanças climáticas, evidenciando a necessidade de aprimorar os estudos de aerossóis tanto observacional quanto da modelagem, bem como a utilização adequada de base de dados observacionais disponível.

No Brasil, especialmente na região da Floresta Amazônica, a quantidade de poluentes emitidos para a atmosfera devido à queima em biomas de florestas, cerrado e pastagem, é alta durante a estação de queimadas. As queimadas ocorrem principalmente entre os meses de agosto e outubro (ARTAXO et al., 2006), devido à ocupação humana, em que há a queima da vegetação para a produção pecuária e agrícola (NEPSTAD et al., 2001). Em 2010 ocorreram eventos de alta concentração de poluentes observados em diversas regiões do Brasil. Segundo o Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC), do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), (www.cptec.inpe.br/queimadas/) houve um aumento da ordem de 140% no número de focos de queimadas em relação ao ano anterior. Cidades na região central do Brasil, localizadas próximas aos focos de queimadas foram afetadas pela fumaça, o que acarretou a diminuição da visibilidade na região. Este fenômeno foi divulgado pelos jornais locais como “névoa”. Porém, os impactos não foram restritos às áreas onde ocorreram as

queimadas. No dia 12 de agosto de 2010, foi observado e noticiado “uma chuva com tom alaranjado” em Porto Alegre, Estado do Rio Grande do Sul (<http://www.correiodopovo.com.br>), devido ao transporte de fumaça proveniente da região central do Brasil.

Com o empenho de quantificar os aerossóis presentes na atmosfera e seus efeitos, diversos sistemas de medição têm sido desenvolvidos. A rede da *Aerosol Robotic Network* (AERONET) é um projeto global com o objetivo de criar uma rede unificada de medição de profundidade ótica do aerossol (AOD, do inglês *Aerosol Optical Depth*), água precipitável, fluxo de radiação solar, entre outros. São utilizados fotômetros solares, os quais medem a radiação solar direta e indireta, e estimam o quanto de radiação é extinta na atmosfera (HOLBEN et al., 1998). As observações obtidas por satélites também têm mostrado bons resultados nas medições globais de aerossóis, por meio de sensores como o *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer* (MODIS) (KAUFMAN et al., 1997), *Advanced Very High Resolution Radiometer* (AVHRR) (STOWE et al., 1997), *Total Ozone Mapping Spectrometer* (TOMS) (TORRES et al., 2002), e mais recentemente, o satélite *Cloud-Aerosol Lidar and Infrared Pathfinder Satellite Observations* (CALIPSO) (WINKER et al., 2007), o qual é capaz de obter perfis verticais de aerossóis. Há também campanhas específicas, que, apesar de ocorrerem por um curto período de tempo, realizam medições intensivas em uma determinada região. Como exemplos, pode-se citar o *Smoke Aerosols, Clouds, Rainfall and Climate* (SMOCC), realizado em 2002 na região da Floresta Amazônica (DECESARI et al., 2006) e o *Indian Ocean Experiment* (INDOEX), realizado em 1999 na região do Oceano Índico (COLLINS et al., 2001).

Para melhor compreender o papel e quantificar os impactos dos aerossóis atmosféricos, são utilizados modelos de transporte químico, os quais simulam o ciclo de vida, a formação, o transporte e a deposição das partículas, cujo nível de descrição depende do grau de complexidade do modelo. Quando acoplado (*on-line*) à componente meteorológica, este modelo químico-atmosférico pode ser chamado de modelo ambiental. Modelos meteorológicos necessitam de informações do estado real da atmosfera como condição inicial para realizar seus cálculos. Para isso, tem sido utilizada

a assimilação de dados, gerando um campo balanceado, que integra de forma ótima e estatisticamente rigorosa as diversas fontes de informação, observadas e modeladas, para ser utilizado como condição inicial em modelos meteorológicos. Isso auxilia principalmente na diminuição de ondas espúrias durante as previsões de tempo (TALAGRAND, 1997). Na modelagem de química troposférica, observações obtidas através de sensoriamento remoto, medidas *in-situ* e outras, também são utilizadas pela assimilação de dados na geração de um estado químico da troposfera mais próximo do estado real. Porém, a assimilação também tem sido utilizada na otimização de outros fatores importantes para modelos químicos, devido a forte dependência destes modelos à parâmetros de superfície, como estimativas de fontes e sumidouros (ELBERN et al., 2007). O processo de assimilação ocorre com o auxílio de um campo de *background*, ou uma estimativa inicial (do inglês *first guess*) que consiste em uma simulação anteriormente feita utilizando um modelo numérico, para o horário das observações. Minimizando a diferença entre o campo de *background* e as observações, e considerando suas respectivas matrizes de erros e suas correlações, cria-se uma representação ótima do estado da atmosfera (KALNAY, 2003).

Observando a importância da modelagem numérica de aerossóis, viu-se a necessidade de integrar os modelos ambientais com as observações disponíveis de aerossol. Em vista disso, o objetivo deste trabalho é verificar o impacto da assimilação de dados de aerossóis na química atmosférica, incluindo medições de aerossóis coletadas por uma aeronave em uma campanha realizada no Brasil central, utilizando um método variacional em duas dimensões (2D-Var) derivado do desenvolvimento de Elbern e Schmidt (2001) e Elbern e Strunk (comunicação pessoal) e implementado por Hoelzemann et al (2007a; 2010) no modelo ambiental *Coupled Chemical-Aerosol-Tracer Transport – Brazilian development on the Regional Modelling System (CCATT-BRAMS)* (FREITAS et al., 2009; LONGO et al., em fase de elaboração).

Neste contexto, os objetivos específicos estabelecidos para este trabalho são:

- Caracterizar a distribuição espacial dos aerossóis na região norte do Estado do Mato Grosso (MT) e arredores (região pertencente à Amazônia Legal),

utilizando os dados medidos durante a campanha *Cloud-Aerosol Interaction Measurements* (CLAIM), realizada em outubro de 2007;

- Adaptar o sistema de assimilação de dados padrão para utilizar os dados coletados por aeronave durante a campanha, produzindo uma análise do estado atual dos aerossóis na atmosfera que mais se aproxime do estado real;
- Realizar testes de sensibilidade a diferentes parâmetros do sistema de assimilação;
- Avaliar a capacidade do sistema de assimilação em melhorar as estimativas de concentração de massa de $PM_{2.5}$ no modelo CCATT-BRAMS para a região de estudo.

No Capítulo 2 é apresentada uma revisão bibliográfica a respeito de aerossóis, sua definição, fontes e efeitos na atmosfera, além de uma revisão sobre assimilação de dados, incluindo uma introdução à assimilação de dados de aerossóis. No Capítulo 3, serão apresentados os dados que foram utilizados, assim como a metodologia aplicada, o sistema de assimilação e o modelo ambiental utilizado, bem como os experimentos e análise estatística aplicados. No Capítulo 4, são mostrados os resultados dos experimentos, bem como sua discussão. E por fim, as conclusões do trabalho e sugestões para trabalhos futuros são apresentados no Capítulo 1.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Aerossóis Atmosféricos

Os aerossóis atmosféricos são definidos como aglomerados de moléculas (partículas) no estado líquido ou sólido suspenso no ar, excluindo água (JACOBSON, 1999; WALLACE; HOBBS, 2006). Os limites exatos do tamanho mínimo e máximo das partículas de aerossóis não são bem definidos na literatura. Jacobson (1999) comenta sobre aerossóis com diâmetro menor que 0,2 μm até 100 μm . Já no relatório do IPCC (2007), aerossóis são definidos, de maneira geral, com diâmetro entre 0,01 μm e 10 μm com um tempo mínimo de residência na atmosfera de várias horas. De acordo com o tipo de aerossol considerado, essas propriedades podem diferir dos valores citados. O tempo de permanência de uma partícula em suspensão na atmosfera depende do tamanho da partícula e de sua composição, pois partículas grandes ou mais densas tendem a permanecer menos tempo no ar. Partículas finas (com diâmetro menor que 2,5 μm) ($\text{PM}_{2,5}$) possuem um tempo de vida de dias até semanas, enquanto partículas grossas (com diâmetro entre 2,5 μm e 10 μm) permanecem em suspensão durante minutos até dias (SEINFELD; PANDIS, 2006). Processos como deposição seca e úmida, controlados pelas condições atmosféricas, também influenciam no tempo de vida dos aerossóis.

As fontes dos aerossóis podem ser tanto de origem natural quanto antrópica. Dentre as fontes naturais, destacam-se o oceano, as erupções vulcânicas e as tempestades de areia. O oceano é o principal responsável pelo sal marinho em suspensão no ar (BLANCHARD; WOODCOCK, 1980; PIAZZOLA; DESPIAU, 1997). As erupções vulcânicas lançam partículas de cinzas (compostas por sílica) e de sulfatos, resultante da oxidação dos gases sulfurosos emitidos durante a erupção, que chegam a altos níveis acima da troposfera (IPCC, 2007). Já as tempestades de areia, levantam uma grande quantidade de partículas de areia e poeira, principalmente sobre regiões desérticas (PROSPERO et al., 2002). Outra importante fonte não só de aerossóis, mas de vários poluentes, é a queima de biomassa. Ela abrange a queima de combustíveis fósseis, processo esse utilizado por motores de explosão, e fogos de vegetação conhecidos como

queimadas, quando de origem antrópica. Mas os fogos de vegetação podem ser também de origem natural, dependendo da sua ignição. Um exemplo de incêndios naturais são os causados por descargas elétricas, como citado por Pyne (1991), cujo estudo mostra que a ignição por descargas representa 38% das causas de fogos de vegetação no Alaska. Na América do sul as queimadas são a principal fonte antrópica de aerossóis (FREITAS et al., 2005; HOELZEMANN, 2006).

Existem diversos tipos de aerossóis que podem ser classificados de acordo com sua composição, tais como partículas de poeira e areia, de carbono orgânico e grafítico (BC, do inglês *Black Carbon*), sal marinho, sulfatos, biogênicos e nitratos, entre outros. Zhang et al. (2003) e Yang et al. (2008) estudaram as tempestades de areia ocorridas na Ásia, especialmente na região leste/nordeste. Essas tempestades lançam na atmosfera uma grande quantidade de partículas minerais (areia e poeira) e afetam o tráfego terrestre e aéreo devido à diminuição da visibilidade, levando a interrupções de vôos e decolagens. A poeira e areia lançadas na atmosfera pelas tempestades podem ser transportadas para regiões distantes de sua origem. Engelstaedter et al. (2006) estudaram o transporte das partículas do deserto do Saara. Os autores mostraram que elas podem ser transportadas por três trajetórias: para os Estados Unidos, Caribe e América do Sul (AS), atravessando o Oceano Atlântico; em direção ao Mediterrâneo e Europa; e em direção ao Oriente Médio e leste do Mediterrâneo. Os aerossóis compostos de sal marinho têm seu principal efeito observado na microfísica das nuvens, pois são partículas higroscópicas o que os torna núcleos de condensação (NC) muito eficazes, auxiliando na formação das gotículas de nuvens.

Aerossóis de carbono orgânico e BC possuem como principal fonte a queima de biomassa, e especificamente na América do Sul, as queimadas. Segundo Freitas et al. (2005) as queimadas produzem CO₂, CO, vapor d'água, material particulado e NO_x, sendo que este em altas concentrações interage com a radiação solar, formando O₃. O tipo e quantidade de material particulado emitido dependerão, dentre outros fatores, do tipo de vegetação queimada. Ward et al. (1992) realizaram medições em regiões com vegetação distinta, entre elas cerrado e floresta primária. Os autores verificaram que do PM_{2.5} coletado em queimadas no cerrado, o carbono orgânico representava cerca de 58

$\pm 38\%$, enquanto que em queimadas de floresta primária representava cerca de 42%. O BC representou cerca de $5 \pm 3\%$ e 4% da massa total de $PM_{2.5}$, para queimadas no cerrado e floresta primária, respectivamente. Maenhaut et al. (2002) também realizaram uma análise de medições contínuas de aerossóis coletadas entre agosto de 1996 e setembro de 1998, em Alta Floresta, e verificaram que, durante a estação seca, cerca de 60% a 100% do material coletado eram partículas provenientes de queimadas (PM, BC, S, K, Zn, Br e Rb).

A forte motivação para o estudo dos aerossóis, aperfeiçoando os métodos de medição e modelagem, é o impacto dos aerossóis na atmosfera e seu papel no balanço radiativo da Terra, pois este está longe de ser completamente entendido e quantificado. Estudos têm se direcionado para dois grandes efeitos dos aerossóis: diretos e indiretos. Os efeitos diretos são aqueles associados à interação direta das partículas em suspensão no ar com a radiação. Quando a radiação solar incide em uma partícula de aerossol, parte da radiação é absorvida total ou parcialmente e/ou espalhada, atenuando a radiação que chega à superfície e causando um efeito de resfriamento em superfície. Além disso, dependendo de sua composição, o material particulado em suspensão na troposfera pode absorver a radiação terrestre, promovendo um efeito de aquecimento da atmosfera (JACOBSON, 1999; PENNER et al., 2001; ARTAXO et al., 2006)

O efeito indireto é aquele em que há a modificação no balanço radiativo devido às alterações na micro e microfísica de nuvens. Grande parte dos aerossóis serve como NC. A maior concentração de NC leva ao aumento do número de gotas, porém com menor diâmetro. A maior quantidade de gotas na nuvem aumenta seu albedo (TWOMEY, 1974; 1977; WANG et al., 2008), refletindo mais radiação de volta ao espaço. Também há modificação no ciclo de vida da nuvem, pois as gotas levarão mais tempo para crescerem, a ponto de precipitarem, o que pode aumentar o tempo de vida da nuvem, sua área de cobertura e seu desenvolvimento vertical (ALBRECHT, 1989; KHAIN et al., 2005; ROSENFELD et al., 2008). Porém como menos radiação chega à superfície, tanto pelo efeito das nuvens como pelo efeito direto supracitado dos aerossóis, há uma estabilização termodinâmica pela diminuição do aquecimento em

superfície (LONGO et al., 2006), afetando o desenvolvimento das nuvens. Esse efeito é conhecido como semi-direto.

Além dos efeitos diretos e indiretos, diversos autores têm associado altas concentrações de aerossóis ao aumento de problemas respiratórios na população, com sintomas variáveis de acordo com o tamanho da partícula e de sua composição (DOCKERY et al., 1993; BRANIŠ et al., 2009; DÍAZ; DOMINGUEZ, 2009). As partículas finas penetram mais profundamente no sistema respiratório, podendo chegar aos pulmões e se alojarem nos alvéolos pulmonares. Já as partículas grossas ficam retidas nas vias aéreas superiores. Partículas menores que 0,1 μm podem chegar à corrente sanguínea, causando maiores danos à saúde. Millman et. al. (2008) associaram o menor crescimento e desenvolvimento de fetos, cujas mães viviam em ambientes urbanos poluídos devido à queima de carvão nas usinas elétricas na China. Ignotti et. al. (2007; 2010) analisaram informações de internação hospitalar em 18 municípios do Estado do MT e mostram que Alta Floresta possui o maior índice de morbidade e mortalidade em crianças com menos de cinco anos devido a problemas respiratórios. Esses altos índices foram associados à poluição do ar, especialmente $\text{PM}_{2,5}$. Segundo a Organização Mundial da Saúde (OMS), estima-se que cerca de dois milhões de pessoas morrem prematuramente devido à poluição do ar originária da queima de combustíveis sólidos. A OMS estabelece níveis saudáveis de concentração de $\text{PM}_{2,5}$ e PM_{10} para exposições a curto e longo prazo. A longo prazo a concentração anual média máxima recomendada é de 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para $\text{PM}_{2,5}$ e 20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para PM_{10} , enquanto que a curto prazo o valor não deve ultrapassar 25 e 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, respectivamente, em uma média diária (WHO, 2005). No Brasil, a resolução 03/90 do Conselho Nacional de Meio Ambiente (CONAMA), estabelecida pelo Instituto Brasileiro de Meio Ambiente (IBAMA) regulamenta os padrões de qualidade do ar no país. Nela está estabelecida que a concentração média em 24 horas de partículas totais em suspensão não deve exceder o valor de 240 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ mais que uma vez ao ano, assim como a concentração de partículas inaláveis não deve exceder o valor de 150 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. A longo prazo, os valores não devem exceder a média anual de 80 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ e 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para partículas totais em suspensão e para partículas inaláveis, respectivamente.

2.2 Assimilação de Dados

Em 1922 Lewis Fry Richardson realizou a primeira tentativa de prever o tempo utilizando a teoria de Bjerknes a qual dizia que os estados futuros da atmosfera poderiam ser prognosticados, integrando no tempo as equações governantes do fluxo atmosférico (KALNAY, 2003). Richardson decompôs estas equações em diferenças finitas e integrou avançadas no tempo. Mas esse experimento não obteve os resultados esperados, pois em seus cálculos a pressão atmosférica na região apresentou uma variação de 146 hPa em 6h, enquanto que na verdade nenhuma variação significativa foi observada, desacreditando a previsão numérica do tempo na época. Hoje se sabe que um dos principais problemas na resolução de Richardson foi a inicialização, pois não havia nenhum tipo de análise ou filtro feito nos campos iniciais, criando assim ruídos (ondas espúrias) na integração (KALNAY, 2003).

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. A essência desses algoritmos ainda é utilizada hoje em dia, a qual consiste em um campo de *background* criado a partir de uma previsão anterior definido em ponto de grade, que então é interpolado para o ponto de observação. As diferenças entre as observações e o *background* interpolado são interpoladas de volta ao ponto de grade criando assim as correções ou incrementos. Esses incrementos são analisados e produzem o incremento de análise, que é somado aos campos de *background* para produzir a análise final.

Desde então, vários métodos de assimilação de dados têm sido criados. 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). No caso da meteorologia, o sistema seria a própria atmosfera. Isto ocorre aprimorando a maneira em que o *background* e as observações são combinados, resultando em uma condição inicial balanceada para os modelos numéricos. Dentre os métodos pode-se citar o

Optimal Interpolation (OI) (GANDIN, 1963), um dos primeiros métodos a aplicar uma base estatística na análise através das funções de covariância das variáveis meteorológicas (TALAGRAND, 1997). Atualmente os grandes centros meteorológicos no mundo utilizam diferentes sistemas de assimilação. No *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts* (ECMWF) (www.ecmwf.int) e no *Japan Meteorological Agency* (JMA) (<http://www.jma.go.jp>) é utilizado operacionalmente o *Four Dimensional Variational Data Assimilation* (4D-Var), método que assimila nas três dimensões espaciais e no tempo através de um modelo adjunto (KALNAY, 2003). O *National Centers for Environmental Prediction* (NCEP) utilizava o sistema *Spectral Statistical-Interpolation* (SSI) cuja análise é formulada como um problema variacional, porém a minimização é basicamente como da OI (PARRISH; DERBER, 1992), e desde 2006 utiliza o *Gridpoint Statistical Interpolation* (GSI). No Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos / Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (CPTEC/INPE) está em operação o *Physical-space Statistical Analysis System* (PSAS) que relaciona as metodologias 3D-Var e OI (DA SILVA et al., 1995; COHN et al., 1998). Entretanto, encontra-se em fase implementação o *Local Ensemble Transformer Kalman Filter* (LETKF) (HUNT et al., 2007) que está previsto para substituir o PSAS nos próximos anos.

Basicamente todos os métodos de assimilação são fundamentados na Equação 2.1.

$$\mathbf{x}^a = \mathbf{x}^b + \mathbf{W}[\mathbf{y}^o - H(\mathbf{x}^b)] \quad (2.1)$$

sendo \mathbf{x}^a a análise, \mathbf{x}^b o campo de *background*, \mathbf{W} a matriz peso, \mathbf{y}^o o vetor de observações e $H(\mathbf{x}^b)$ o operador observação que realiza a interpolação necessária e a transformação das variáveis do modelo para o espaço das observações. A diferença $\mathbf{y}^o - H(\mathbf{x}^b)$ (observação menos o *background*) é o incremento observacional (KALNAY, 2003). A matriz peso é definida de acordo com o método de assimilação. No caso de um sistema 3D-Var, por exemplo, é definida pela equação 2.2.

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

Sendo \mathbf{B} a matriz de covariância dos erros de *background*, \mathbf{H} o operador observação linearizado e \mathbf{R} a matriz de covariância dos erros das observações. Para os sistemas de assimilação baseados no filtro de Kalman, a matriz \mathbf{W} , também chamada de “matriz de ganho de Kalman”, é definida pela equação 2.3 (HUNT et al., 2007).

$$\mathbf{W} = \mathbf{P}_n^a \mathbf{H}_n^T \mathbf{R}_n^{-1} \quad (2.3)$$

Sendo \mathbf{P} a matriz da covariância dos erros estimados da análise, que por sua vez depende da matriz \mathbf{R} e da matriz \mathbf{B} estimada para o horário da análise.

A principal motivação para o desenvolvimento de sistemas de assimilação é o fato da previsão numérica de tempo ser um problema matemático de condição inicial e de contorno, causando uma grande dependência da solução aos dados observados e com a forma como são analisados e filtrados para inicializar o modelo. Dados observados podem apresentar erros de instrumento, de representatividade, de instrumentos não calibrados entre outros (MATTOS, 2006), causando o aumento do erro final da análise e das previsões numéricas de tempo. Os novos sistemas de assimilação também visam um aproveitamento maior e mais eficiente das diversas fontes de dados disponíveis atualmente. Além das estações convencionais de superfície e altitude, os satélites têm fornecido uma imensa quantidade de dados, pois sua área de cobertura é maior e diversas variáveis meteorológicas são obtidas, inclusive com perfis verticais. Outras informações, tais como provenientes de radares e de campanhas intensivas de medições também têm sido assimiladas. Herdies et al. (2007) incluíram os dados de alta resolução de radiossondagens e balão piloto obtidos durante o projeto *South American Low-Level Jet Experiment* (SALLJEX) no ciclo de assimilação do *Climate Data Assimilation System* (CDAS)-1 e -2 e do *Global Data Assimilation System* (GDAS), ambos sistemas do NCEP baseados no SSI. Com isso eles observaram que com a inclusão destes dados, a análise representou melhor o jato de baixos níveis, que se estabelece com frequência na região leste da Cordilheira dos Andes.

Na área de química da atmosfera também estão sendo desenvolvidos sistemas de assimilação para que forneçam condições iniciais de qualidade aos modelos químicos e aproximem as variáveis modeladas às observações. Lahoz et al. (2007) apresentam uma revisão sobre a assimilação química de dados de constituintes estratosféricos e comentam sobre várias diferenças entre assimilar dados meteorológicos e dados químicos, dentre elas pode-se citar o fato de estudos em assimilação química serem bem mais recentes que em assimilação meteorológica. Eles ressaltam também que modelos de previsão numérica de tempo são basicamente problemas de condição inicial enquanto que modelos e assimilação química além de se considerar as condições iniciais, as fontes e sumidouros são muito importantes. Outra grande diferença são as dimensões dos modelos, pois para cada ponto de grade, o modelo químico contém entre 20 e 100 espécies diferentes (variáveis), enquanto que o modelo meteorológico apresenta em torno de 12 variáveis, dificultando assim a assimilação de observações de química atmosférica. A assimilação de dados químicos, além de gerar a condição inicial aos modelos numéricos, é também utilizada para substituir métodos de interpolação aplicados às observações de compostos químicos, resultando no estado da arte em representação do estado químico da atmosfera. O sistema de assimilação 4D-Var, devido à necessidade em sua formulação de um modelo adjunto, também possibilita a utilização da assimilação de dados para corrigir os fatores de emissão de poluentes. Elbern et al. (2007) utilizaram esta metodologia no modelo EURAD assimilando observações de dióxido de enxofre (SO₂), O₃, monóxido de nitrogênio (NO), dióxido de nitrogênio (NO₂) e monóxido de carbono (CO), e verificaram que, em modelos químicos, a otimização dos fatores de emissão reduz mais o viés e o REQM do que com a otimização da condição inicial química.

Strunk (2006) utilizou a metodologia 4D-Var para estimar o estado químico da troposfera assimilando dados medidos por instrumentos a bordo de avião, dentre outras fontes de medições, sobre a Europa, resultando em melhores estimativas de poluentes atmosféricos. Elbern e Schmidt (2001) também utilizaram o método 4D-Var, juntamente com o modelo *EUropean Air pollution Dispersion model* (EURAD) assimilando observações em superfície de O₃ e NO_x e radiossondagens de O₃ sobre a

Europa, e com isso alcançando uma melhora significativa para a previsão de 6 horas a 12 horas, incluindo a previsão do pico de concentração à tarde. O método *Physical-Statistical Analysis System* (PSAS) foi utilizado por Hoelzemann et al. (2001) para assimilar dados de ozônio medidos em superfície no continente europeu. Ménard et al. (2000) utilizaram o *Kalman Filter* (KF) com uma aproximação isentrópica bidimensional em escala global para assimilar gases traços na estratosfera. Outros autores também utilizaram o KF para a assimilação de O₃, mas na versão *ensemble*, o *Ensemble Kalman Filter* (EKF). Loon et al. (2000) utilizaram este método de assimilação com o modelo *Long Term Ozone Simulation* (LOTOS) considerando fontes de emissão da Europa e países vizinhos e concluíram que é possível melhorar a simulação de modelos químicos utilizando o EKF. Hanea et al. (2004) utilizaram os sistemas de assimilação EKF e *reduced rank square root* (RRSQRT), também baseado no KF mas com outro método de resolução. Ambos foram utilizados com o modelo químico *European Operational Smog* (EUROS) e concluíram que 10 a 20 membros são suficientes para simulação química.

A assimilação de aerossóis também está sendo desenvolvida com diversos métodos de assimilação, para diferentes regiões e para diversos tipos de aerossóis. Um dos primeiros trabalhos assimilando AOD foi de Collins et al. (2001) que assimilaram com o método de OI os dados de AOD derivados das observações do sensor AVHRR. Eles utilizam o *Model of Atmospheric Transport and Chemistry* (MATCH), que prognosticava aerossóis de sulfato, carbono e de poeira mineral, e diagnosticava a distribuição de sal marinho sobre a região do Oceano Índico. Outros sistemas assimilam um único tipo específico de aerossol, como o utilizado por Niu et al. (2008) e Gong e Zhang (2008). Os autores utilizaram o método de 3D-Var assimilando dados de poeira na coluna atmosférica derivados das observações do satélite geoestacionário chinês FY-2C e dados de superfície de visibilidade com o objetivo de prever tempestades de areia e poeira sobre a China e arredores. Para a mesma região, porém com uma área de estudo maior, Adhikary et al. (2008) assimilaram os dados de AOD da AERONET e do MODIS com o sistema de assimilação OI criando uma reanálise de quatro anos de AOD sobre a Ásia. Há também esforços para criar análises globais de aerossóis incluindo a

quantidade máxima de dados possível mantendo uma boa qualidade, que poderão ser utilizadas para estudos do balanço radiativo terrestre, poluição e outros. Um desses esforços foi de Benedetti et al. (2009) os quais criaram uma reanálise global para todo o ano de 2003, assimilando o produto de AOD do MODIS com o sistema 4D-Var, utilizado operacionalmente no ECMWF. Segundo eles, essa reanálise representou bem a distribuição de AOD comparando com os dados da AERONET.

2.3 Caracterização da Região Amazônica

A região amazônica possui uma precipitação média de 2300 mm/ano distribuídos desigualmente ao longo do ano. O período entre os meses de novembro e março é caracterizado como estação chuvosa, quando ocorre forte atividade convectiva na região, e o período entre maio e setembro é considerado a estação seca. Os meses de abril e outubro são considerados meses de transição entre as estações (FISH et al., 1996).

A atividade convectiva é o principal mecanismo que ocasiona a precipitação sobre a região amazônica. Molion (1987) caracterizou em três grupos os mecanismos que promovem a precipitação na região observando as circulações de macro e meso-escala: (a) convecção diurna resultante do aquecimento da superfície e condições de grande escala favoráveis; (b) linhas de instabilidade (LI) originadas na costa norte-nordeste do litoral do Atlântico; (c) aglomerados convectivos de grande e meso-escala, associados com a penetração de sistemas frontais da região sul-sudeste do Brasil que interagem com a região Amazônica. Um dos principais mecanismos que proporcionam a formação das LI é a Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) (COHEN, 1989).

Fisch et al. (1996) citam a Alta da Bolívia (AB), o *El Niño*, as friagens e brisas marítimas como principais sistemas atmosféricos atuantes na região amazônica. A AB é um sistema anticiclônico encontrado em altos níveis (200 hPa) sobre a região do altiplano boliviano, cuja posição varia sazonalmente, e atua como forçante da convecção sobre a região. As friagens ocorrem quando sistemas frontais com uma massa de ar polar intensa avançam sobre a AS e conseguem chegar à região amazônica causando a diminuição da temperatura do ar na região. As brisas marítimas auxiliam no

transporte de umidade e calor dependendo do horário, pois atuam no ciclo diurno, sendo no sentido do continente durante o dia e vice-versa no final da tarde e noite, levando a uma maior formação de nuvens sobre o continente durante o dia.

O regime de precipitação é afetado por partículas em suspensão devido aos diversos efeitos já citados na seção 2.1. Estudos específicos para a Amazônia estão sendo feitos para verificar o impacto dos aerossóis emitidos na região, pois na Floresta Amazônica além da emissão natural de aerossóis biogênicos, como partículas de pólen e matéria orgânica ocorrem emissões de grande quantidade de partículas devido às queimadas. Em 2002 foi realizada a campanha SMOCC, quando foram realizadas medições das propriedades físico-químicas dos aerossóis sobre a região do Estado de Rondônia (RO), Brasil, no período de transição da estação seca para chuvosa. Nesta campanha Andreae et al. (2004) observaram para um caso de linha de instabilidade que durante a estação seca, os efeitos na microfísica sobrepuseram o efeito de supressão das nuvens na camada limite devido aos efeitos radiativos diretos da fumaça, produzindo nuvens mais intensas que as encontradas em ambientes com características microfísicas marinhas.

No final da estação seca, entre os meses de agosto e outubro, ocorre intensa atividade de queima, especialmente na região chamada “arco de desmatamento”. Esta compreende os Estados do Acre, Amazonas (AM), RO, MT, Tocantins (TO), Pará (PA) e Maranhão (MA). As queimadas ocorrem principalmente devido à ocupação humana (NOBRE et al., 1991). No avanço da área ocupada, áreas de vegetação, sejam elas cerrado ou floresta, são convertidas em áreas destinadas a agricultura ou pecuária. O desmatamento de uma área inicia com a retirada de madeiras nobres e outras com menor valor comercial, mas que possam ser utilizadas para outros fins, como construção civil. Após, as árvores de menor porte e vegetação rasteira são cortas. Comumente é introduzido capim em meio à área degradada para o uso da pecuária, restando pouca vegetação nativa. Após o período de secagem da biomassa remanescente na área, ela é queimada juntamente com o capim, fazendo assim uma “segunda limpeza” (PRODES, 2008). A Figura 2.1 apresenta uma climatologia de 2000 a 2010 dos focos de queimadas detectados pelo satélite NOAA-12 e NOAA-15 para os trimestres agosto, setembro, outubro (ago-set-out) e fevereiro, março, abril (fev-mar-abr). Estas figuras foram

obtidas no site <http://www.cptec.inpe.br/queimadas>, pertencente ao CPTEC/INPE. Nesta figura percebe-se no trimestre ago-set-out o elevado número de focos de queimadas com 36.746 focos de queimadas no Brasil, sendo o trimestre com a maior quantidade de focos dentre os trimestres. O trimestre anterior e posterior (jul-ago-set e set-out-nov) apresentam valor médio de 28.883 e 32.368 focos (Figura não mostrada). A menor média de número de focos ocorre no trimestre fev-mar-abr, com 1.212 focos. A relação entre o número de focos de queimadas e quantidade de poluentes emitidos não é direta, pois o tamanho da área bem como o tipo de vegetação que está sendo queimada são fatores importantes, mas para uma análise qualitativa é válido.

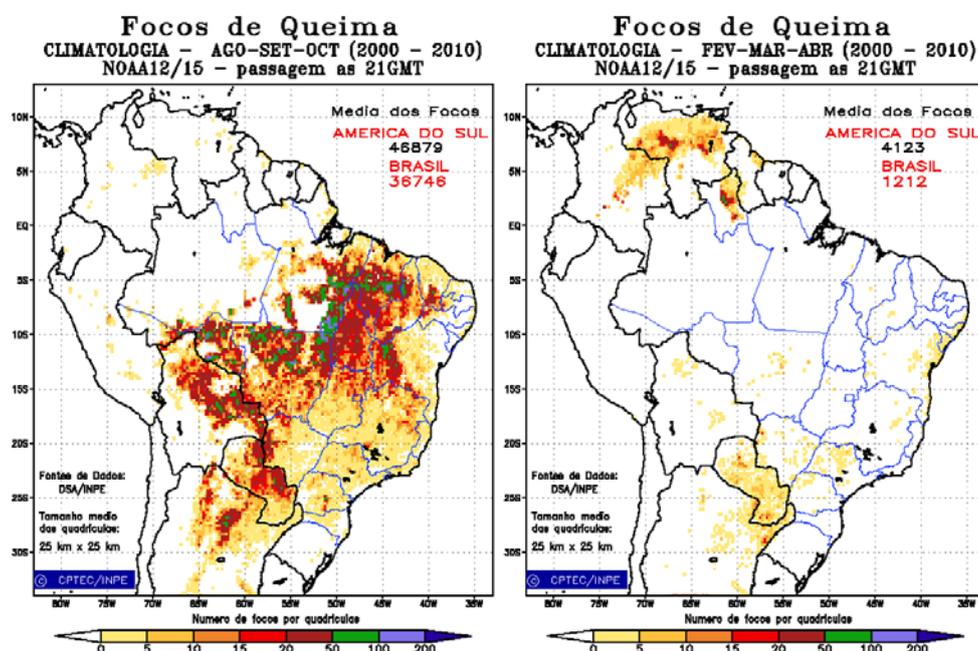


Figura 2.1 – Climatologia de focos de queimada detectados pelos satélites NOAA12/15 sobre a América do Sul para os trimestres agosto, setembro, outubro (à esquerda) e fevereiro, março, abril (à direita), entre 2000 e 2010.

FONTE: <http://www.cptec.inpe.br/queimadas/>

Estima-se que a queima de biomassa na América do Sul emita na média por ano 30 Tg de material particulado na atmosfera (ANDREAE, 1991). No período de maior quantidade de queimadas, a concentração de poluentes na atmosfera chega a valores muito elevados. Isso pode ser visto na Figura 2.2 que contém o histórico das concentrações de PM₁₀ observadas em Alta Floresta, mostrando a sazonalidade do poluente, com altos valores de concentração no período de queimadas, chegando a

valores maiores que $300 \mu\text{g}/\text{m}^3$, enquanto que durante a estação úmida a concentração fica entre 10 e $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Semelhante comportamento é observado para a concentração de partículas na moda fina que, durante o período de queimadas, fica entre 200 e $300 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (ARTAXO et al., 2002).

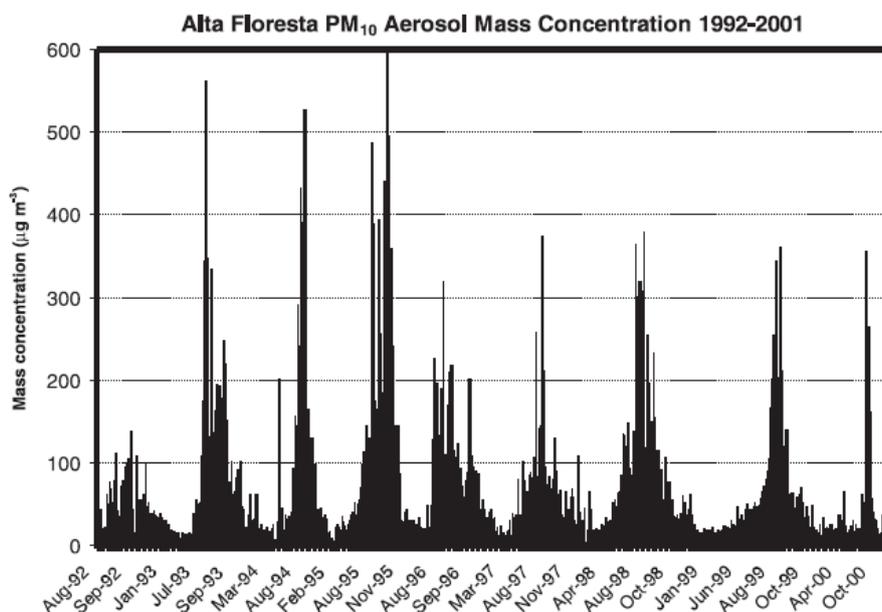


Figura 2.2 – Concentração de aerossol PM_{10} ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) em Alta Floresta/MT observada continuamente na estação de monitoramento atmosférico do LBA desde 1992.

Fonte: Artaxo et al. (2002)

3 DADOS E METODOLOGIA

Atualmente o sistema de assimilação está em desenvolvimento no CCST/INPE e CPTEC/INPE para a assimilação dos dados da rede AERONET e do sensor MODIS no modelo CCATT-BRAMS. Neste trabalho o sistema foi adaptado para assimilar dados de concentração de massa de $PM_{2.5}$ medidos durante a campanha CLAIM. O modelo CCATT-BRAMS utiliza dados do modelo de emissão de queimadas *Brazilian Biomass Burning Emission Model* (3BEM) (LONGO et al., 2010)

A seguir será apresentada a descrição dos dados utilizados neste trabalho, caracterizando o período e a região onde foi realizado o experimento CLAIM. Na Seção 3.2, serão descritos os dados de emissão utilizados. Em seguida, faz-se a descrição da metodologia aplicada neste trabalho, onde são apresentados o modelo químico-atmosférico CCATT-BRAMS, o sistema de assimilação, os experimentos realizados e a metodologia aplicada para a avaliação dos resultados.

3.1 Campanha de medições CLAIM

A *Cloud-Aerosol Interaction Measurements* (CLAIM) foi uma campanha de medições de poluentes atmosféricos, realizada na área norte do Estado do MT, Brasil. A Figura 3.1, indica a área de realização dos vôos, tendo a cidade de Alta Floresta, representada por um ponto azul, como ponto inicial e final da maioria dos vôos. As medições ocorreram entre os dias 06 e 22 de outubro de 2007, totalizando 17 vôos, incluindo os vôos de traslado de São José dos Campo/SP a Alta Floresta. Em função das condições meteorológicas, houve dias em que não ocorreram vôos, enquanto que em outros ocorreram dois vôos. As medições foram realizadas com o auxílio do avião bi-motor Bandeirante, pertencente ao INPE, prefixo PP-FFV, modelo BEM 110. A Figura 3.1 ilustra a trajetória dos vôos 4 ao 16, cujos dados foram utilizados neste trabalho. No avião foram instalados instrumentos para a medição de ozônio, CO_2 , aerossol, entre outros constituintes atmosféricos. O enfoque deste trabalho foram os dados de aerossol, cujas medições foram realizadas utilizando os sensores Aetalômetro (AE-30, Magee Scientific), Nefelômetro, Optical Particle Counter (OPC) (LasairII-310, Particle Measuring Systems) e DataRAM (DataRAM 4, Thermo Scientific).

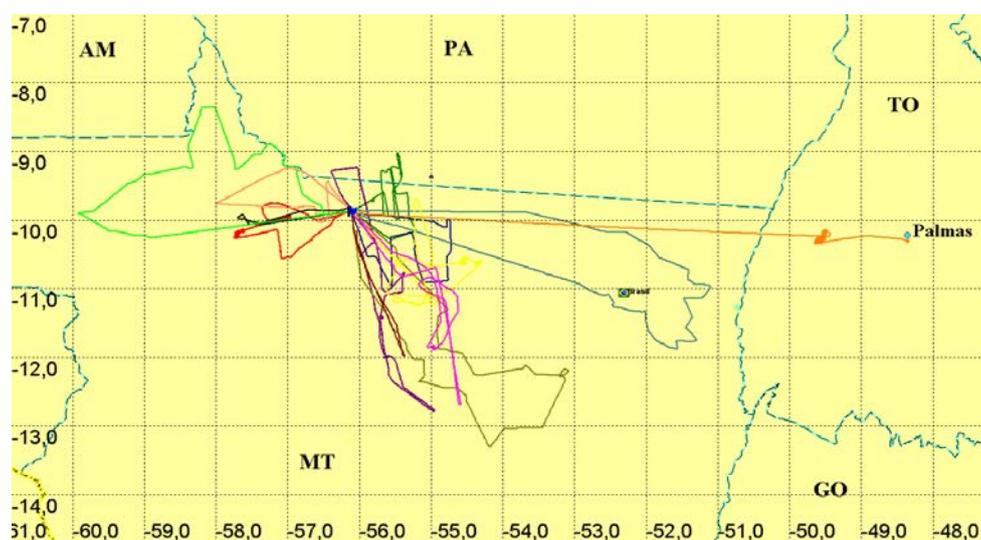


Figura 3.1 – Trajetória dos vôos 4 ao 16 realizados durante a campanha CLAIM, MT, Brasil.

Foram adquiridos os dados brutos medidos durante a campanha (comunicação pessoal, Dr. Alexandre Correia, Dr. Rodrigo Souza, Dr. Paulo Artaxo). Em vista disso foi necessário primeiramente selecionar e organizar o banco de dados a ser utilizado. Um dos fatores considerados na escolha desses dados foi o fato de terem sido realizadas medições com o DataRAM durante todos os 17 vôos da campanha. Porém, só há informações do GPS para os vôos 4 ao 17, eliminando assim a possibilidade de utilizar os vôos 1, 2 e 3. Além disso, o último vôo foi desconsiderado por ser o vôo de traslado de volta ao Estado de São Paulo, ficando fora da área de interesse, resultando em 13 vôos a serem utilizados. O DataRAM mediu concentração de massa de partículas de aerossóis, variável possível de ser assimilada diretamente, outro fator decisivo em sua utilização. Este instrumento possui limites de detecção inferior e superior de $0,0001 \text{ mg/m}^3$ e 400 mg/m^3 , respectivamente (manual do instrumento - <http://www.thermoscientific.com/>) e as medidas foram realizadas com uma resolução temporal de 30 segundos para os vôos 4, 5 e 6, e 10 segundos para os restantes. Foram filtrados valores menores que $0,3 \mu\text{g/m}^3$ do banco de dados, inclusive valores negativos. As medições do Nefelômetro foram utilizadas para comparar qualitativamente as informações do DataRAM. Os dados do Nefelômetro consistiam em espalhamento e retroespalhamento nos canais espectrais azul, verde e vermelho, bem como informação

de temperatura do ar, umidade relativa e pressão atmosférica. Porém, foi utilizado apenas o retroespalhamento no vermelho, faixa espectral mais próxima à faixa dos dados da AERONET e MODIS e mais sensível ao espalhamento por $PM_{2.5}$.

Na Tabela 3.1 são apresentadas as características de cada voo selecionado, bem como as observações médias de $PM_{2.5}$ realizadas a bordo da aeronave e AOD derivado das medidas da AERONET em Alta Floresta e do MODIS na área do experimento. A área do voo foi obtida através de um retângulo com lados iguais às diferenças entre latitude mínima e máxima e longitude mínima e máxima do voo. O AOD_A foi calculado fazendo a média temporal das medições ocorridas durante o voo. Estes dados foram obtidos no site <http://aeronet.gsfc.nasa.gov>. O AOD_M é a média espacial na área de abrangência de todos os voos. Para estas informações do MODIS foram escolhidos os produtos dos satélites TERRA e AQUA nos horários de passagem sobre a AS mais próximo do horário do voo. O TERRA passa sobre a AS entre 12 UTC e 15 UTC enquanto que o AQUA passa entre 16 UTC e 19 UTC. Esses dados foram obtidos no site <http://disc.sci.gsfc.nasa.gov/giovanni/>. Como pode ser verificado na tabela, a maioria dos voos foi realizada à tarde, período durante o qual ocorre a maior atividade de emissão das queimadas, com o máximo às 15 horas (PRINS et al., 1998). Nos valores das concentrações de $PM_{2.5}$, percebe-se a variabilidade das observações, tendo em vista o desvio padrão da mesma ordem de grandeza do valor médio.

Tabela 3.1 – Data, horário, área de abrangência e altitudes dos vôos selecionados da campanha CLAIM e média das observações de PM_{2.5} de cada vôo, AOD médio e desvio padrão da AERONET (AOD_A) e do MODIS (AOD_M) em Alta Floresta, MT/Brasil.

Vôo	Data	Horário (UTC)	Área (km ²)	Alt _{min}	PM _{2.5} médio (µg/m ³)	AOD _A	AOD _M
		Início - Término		Alt _{max} (m)			
04	09/10/2007	19:18 - 20:47	15.537	749 3.284	33 ± 45	-----	1,0 ± 0,8
05	10/10/2007	18:00 - 20:40	10.451	822 3.537	88 ± 70	1,0 ± 0,07	0,9 ± 0,4
06	11/10/2007	16:20 - 18:50	13.248	444 3.720	12 ± 32	1,0± 0,01*	1,2 ± 0,5
07	13/10/2007	15:38 - 17:43	15.548	301 3.781	41 ± 72	0,9 ± 0,03	0,9 ± 0,3
08	16/10/2007	18:00 - 20:20	16.076	309 3.755	43 ± 59	0,4 ± 0,04	0,4 ± 0,1
09	17/10/2007	16:35 - 20:30	51.167	293 4.078	44 ± 34	-----	0,5 ± 0,2
10	18/10/2007	10:55 - 15:18	106.178	268 1.891	27 ± 19	-----	1,1 ± 0,6
11	18/10/2007	17:23 - 18:43	3.238	531 1.249	10 ± 16	0,6± 0,01*	0,5 ± 0,1
12	19/10/2007	11:00 - 15:12	94.445	1.318 2.026	39 ± 24	1,0 ± 0,06	0,9 ± 0,4
13	19/10/2007	16:35 - 20:46	27.628	613 3.747	13 ± 20	0,6 ± 0,07	0,7 ± 0,2
14	20/10/2007	11:00 - 14:55	73.140	270 1.702	77 ± 18	1,0 ± 0,06	1,1 ± 0,6
15	20/10/2007	16:36 - 20:27	38.488	617 3.756	36 ± 34	0,7 ± 0,02	0,8 ± 0,2
16	21/10/2007	13:54 - 17:37	31.220	613 3.870	17 ± 42	1,5 ± 0,20	0,7 ± 0,3

*erro instrumental

Os dados do GPS possuíam uma frequência temporal irregular e não sincronizados com os horários das medições do DataRAM. Para que cada medição de concentração de massa possuísse georeferenciamento, as informações de latitude, longitude e altitude foram interpoladas para o horário das observações do DataRAM. Para isso, utilizou-se uma média ponderada com os dois horários mais próximos, conforme mostrado na Equação 3.1. Nesta, $X_{t(j)}^{DR}$ é a informação de georeferenciamento (latitude, longitude e altitude) que se deseja encontrar para a medição do DataRAM (DR) no tempo $t(j)$, sendo este contido no intervalo entre t_i^{GPS} e t_{i+1}^{GPS} , que por sua vez são os horários das informações de georeferenciamento $X_{t(i)}^{GPS}$ e $X_{t(i+1)}^{GPS}$, respectivamente, obtidos pelo GPS.

$$X_{t(j)}^{DR} = X_{t(i)}^{GPS} \cdot \left| \frac{t_{i+1}^{GPS} - t_j^{DR}}{t_{i+1}^{GPS} - t_i^{GPS}} \right| + X_{t(i+1)}^{GPS} \cdot \left| \frac{t_i^{GPS} - t_j^{DR}}{t_{i+1}^{GPS} - t_i^{GPS}} \right| ; t_j^{DR} \in [t_i^{GPS}; t_{i+1}^{GPS}] \quad (3.1)$$

Na Figura 3.2, são mostrados na coluna à esquerda, os gráficos com os dados de concentração de massa de aerossóis ($\mu\text{g}/\text{m}^3$), e espalhamento no canal vermelho ($1\text{e}-4/\text{m}$), quando disponível, e a altitude (km) da aeronave. Na coluna da direita estão os trajetos de cada voo. Os movimentos circulares nos trajetos dos vãos 6, 9, 13, 15 e 16, correspondem aos perfis verticais espirais ascendentes e descendentes.

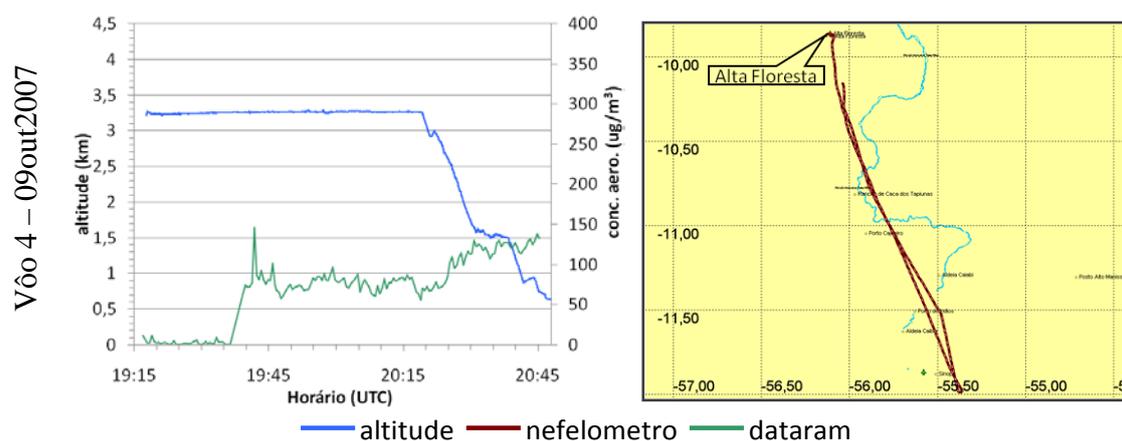


Figura 3.2 – Concentração de massa de aerossóis ($\mu\text{g}/\text{m}^3$), espalhamento em $1\text{e}-4/\text{m}$ (vermelho) e altitude (km) da aeronave (esquerda). Trajetórias dos vãos (direita).

(continua)

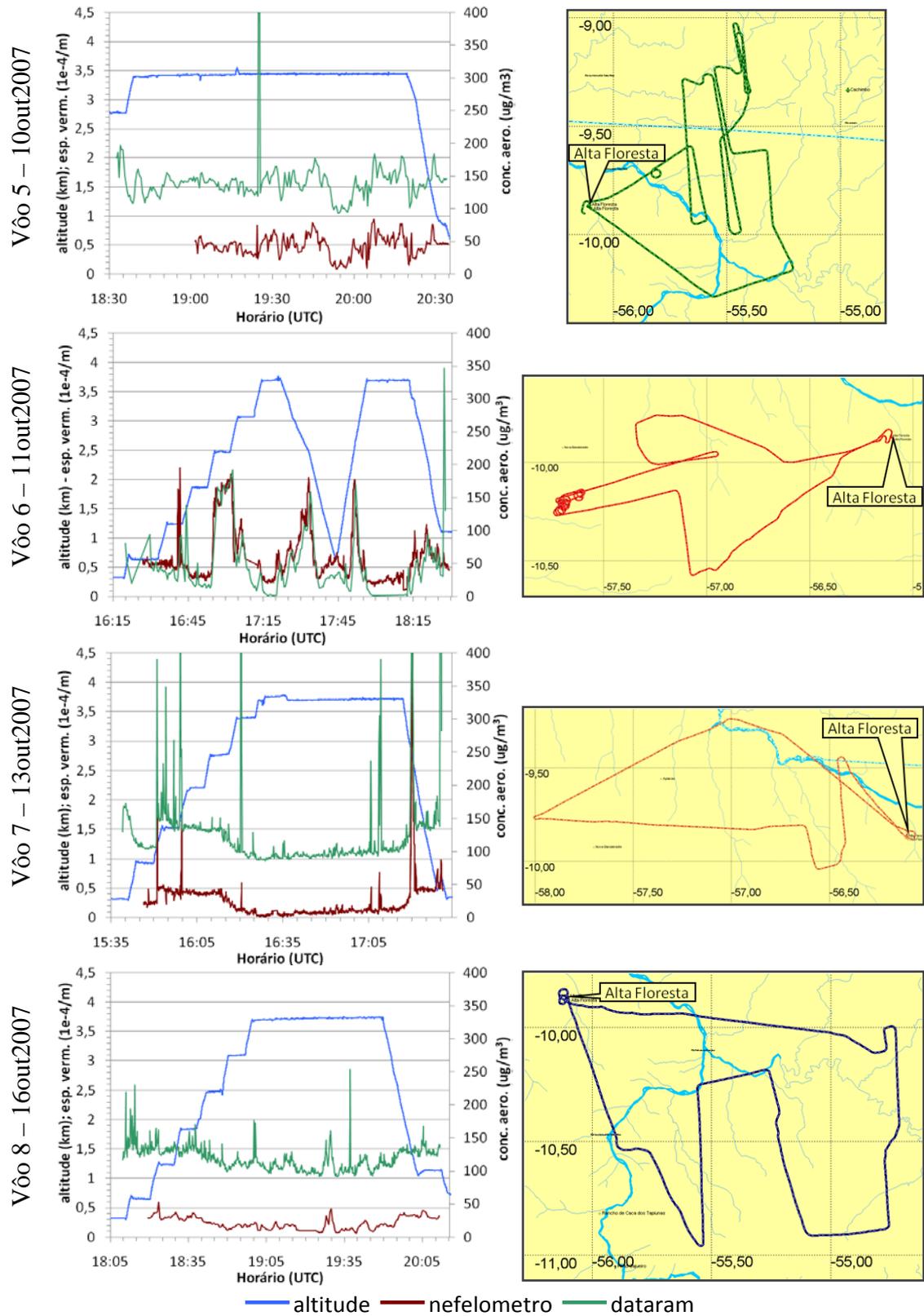
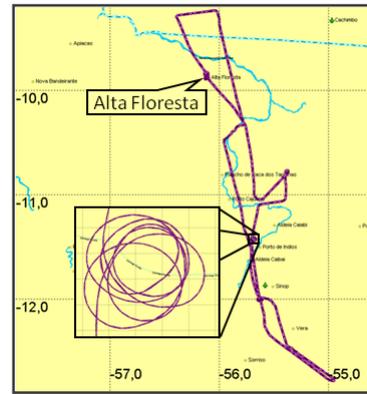
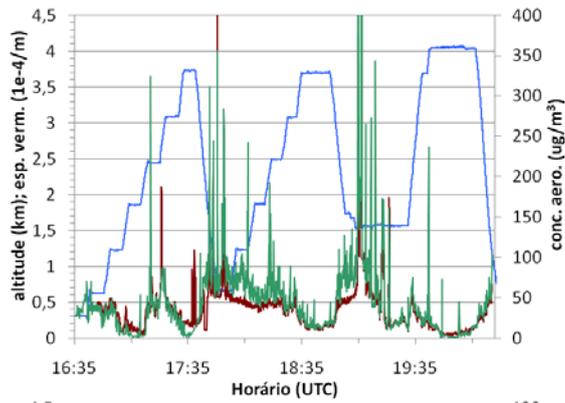
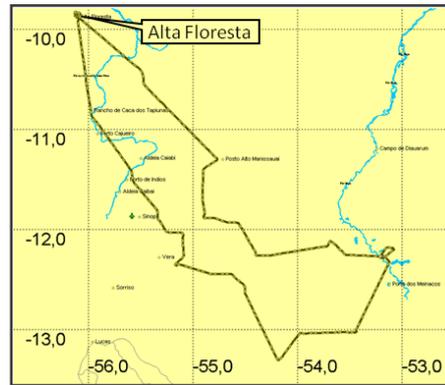
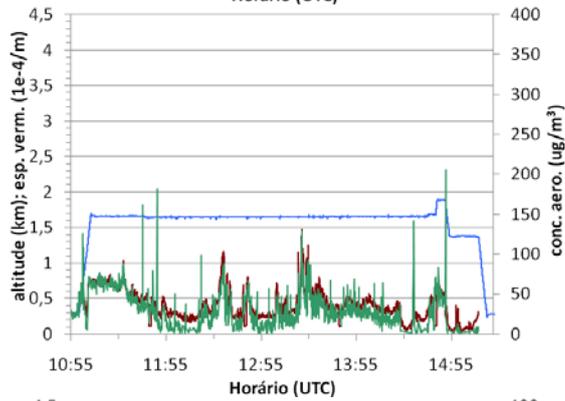


Figura 3.2 – Continuação
(continua)

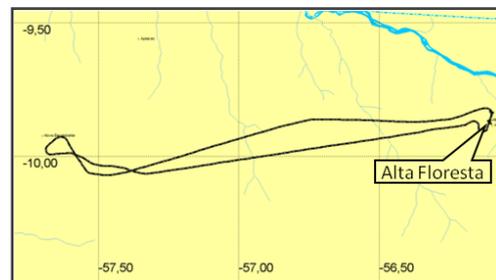
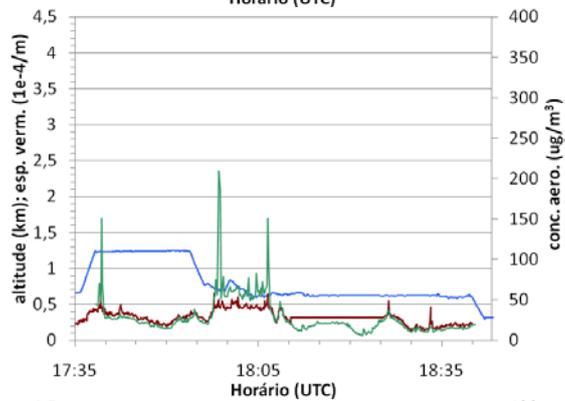
Vôo 9 – 17out2007



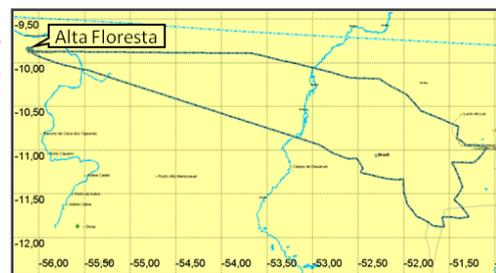
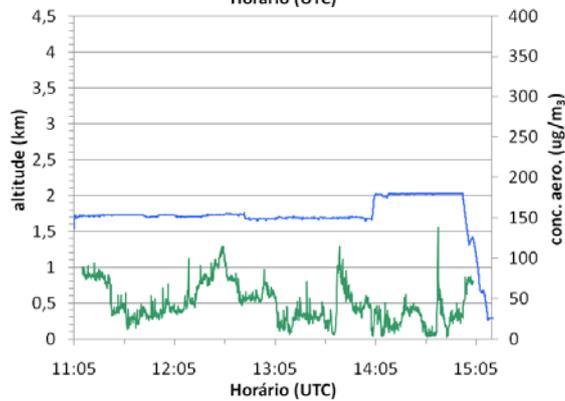
Vôo 10 – 18out2007



Vôo 11 – 18out2007



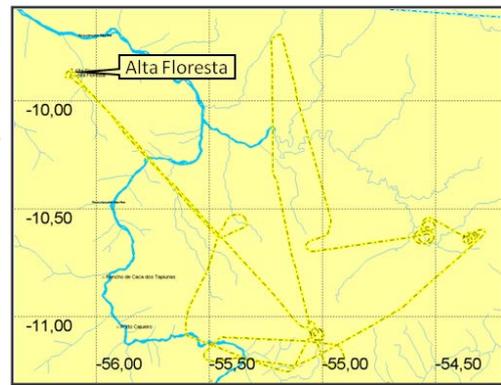
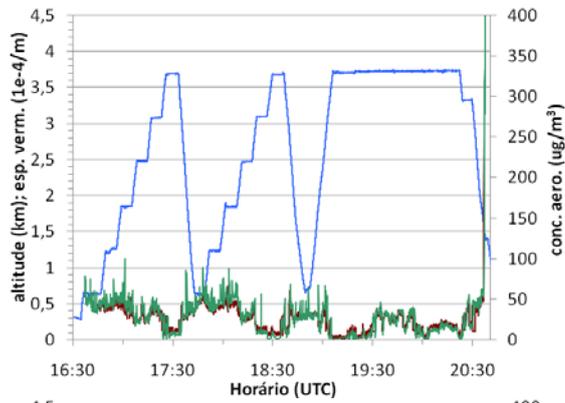
Vôo 12 – 19out2007



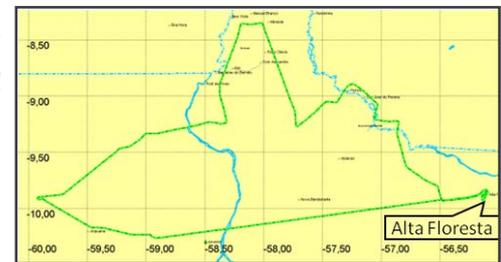
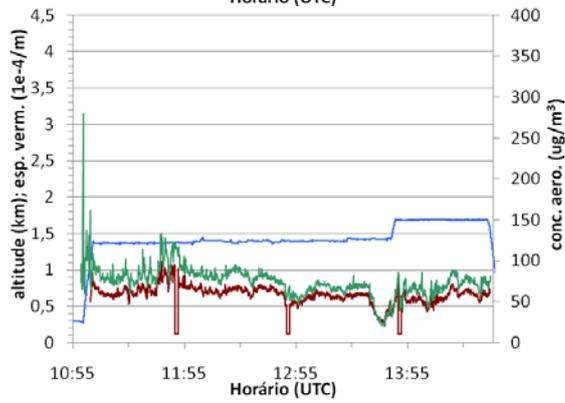
— altitude — nefelometro — dataram

Figura 3.2 – Continuação
(continua)

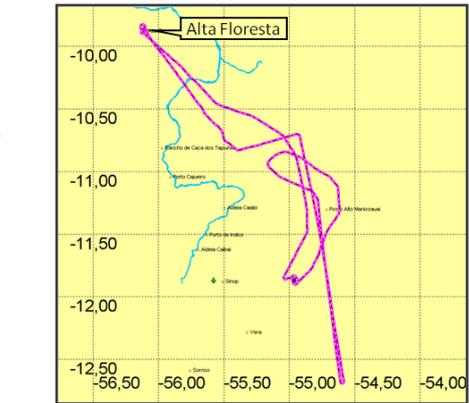
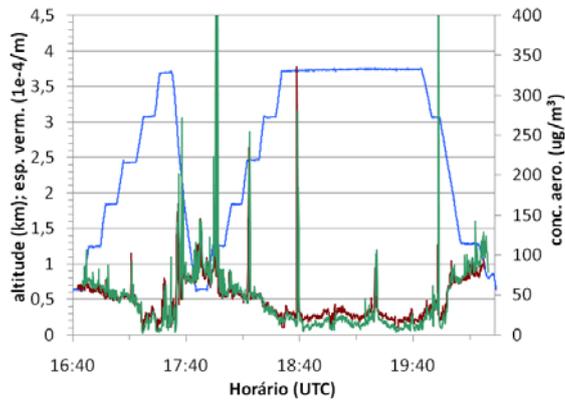
Vôo 13 – 19out2007



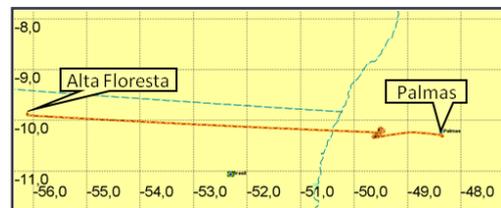
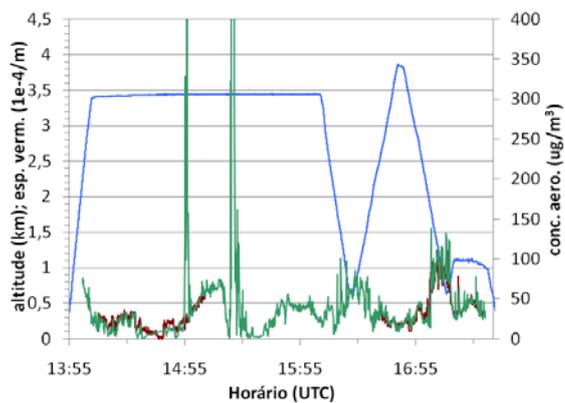
Vôo 14 – 20out2007



Vôo 15 – 20out2007



Vôo 16 – 21out2007



— altitude — nefelometro — dataram

Figura 3.2 – Conclusão

A campanha CLAIM ocorreu durante o mês de outubro, considerado o mês de transição entre as estações seca e chuvosa na região amazônica. Em 2007, a precipitação em outubro ficou abaixo da média climatológica na região norte do Estado do MT, como mostra a Figura 3.3, assim como em grande parte do Brasil. Na cidade de Alta Floresta, a precipitação total mensal foi da ordem de 111 mm, sendo que mais de 60% deste total foi registrado nos dias 06 e 14 (Figura 3.4). Segundo o Boletim Climanálise de outubro de 2007 (CAVALCANTI et al., 2007) a anomalia negativa de precipitação ocorreu devido à massa de ar seco na região causada pela atuação de um intenso escoamento anticiclônico configurado pela Alta da Bolívia e um cavado sobre o Nordeste do Brasil. Essa massa de ar seco presente no centro do país contribuiu, na primeira quinzena do mês, para a ocorrência de valores de umidade relativa do ar inferiores a 20% em cidades dos Estados de MT, Minas Gerais, Goiás e TO. Na segunda quinzena do mês, acumulados de precipitação foram observados em parte da Região Centro-Oeste e principalmente na Região Sudeste, devido ao primeiro caso de Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) da estação chuvosa do ano. Em Alta Floresta, as temperaturas mínimas ficaram entre 18°C e 21°C na maioria dos dias de outubro enquanto as máximas se mantiveram entre 30°C e 35°C, como pode ser observado na Figura 3.4. As anomalias de temperatura em outubro de 2007 foram pequenas na região norte do MT, onde se observou anomalias positivas de temperatura mínima na ordem de 1°C a 2°C, e anomalias negativas de temperatura máxima na ordem de 1°C a 2°C na região de Alta Floresta e noroeste do Estado do MT. Na região leste e metade sul de MT a anomalia de temperatura máxima foi de até 5°C positivos (figura não mostrada).

Para mostrar a situação do transporte de poluentes na atmosfera durante o período de estudo, foi utilizada a simulação padrão do CCATT-BRAMS, na qual não há implementações da assimilação. Durante o período da campanha, o escoamento na região dos vãos se manteve de leste, com variações para nordeste e sudeste, da superfície até o nível sigma-z aproximado de 1500m. Na Figura 3.5 são mostrados os campos de vento no nível sigma-z de 2.000m e de material particulado integrado na coluna (PM_{INT}) (mg/m^2) simulados pelo CCATT-BRAMS. Nota-se a diferença na distribuição espacial do PM_{INT} entre os vãos realizados no período da manhã e os

realizados à tarde. Como a maioria das queimadas ocorre no período da tarde, os valores de material particulado nos vôos matutinos são relativamente mais baixos.

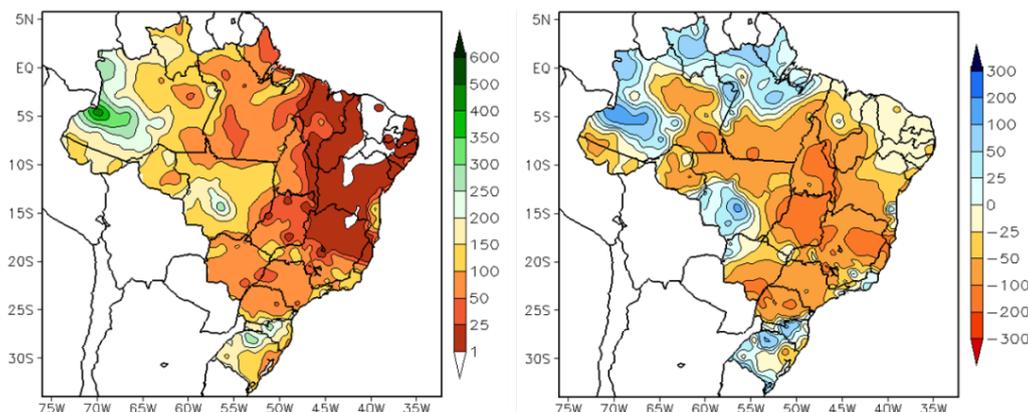


Figura 3.3 – Precipitação total (mm) (à esquerda) e anomalia de precipitação (mm) (à direita) para outubro de 2007.

Fonte: Cavalcanti et al. (2007)

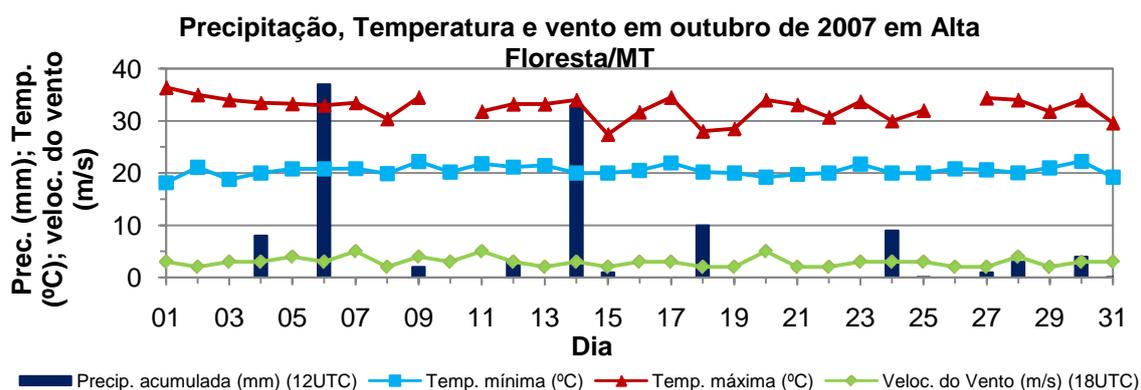


Figura 3.4 – Precipitação acumulada às 12UTC, temperatura do ar (°C) máxima e mínima, velocidade do vento (m/s) às 18 UTC medidos na estação sinótica e AOD médio diário e respectivo desvio padrão da estação da AERONET para o mês de outubro de 2007 em Alta Floresta/MT, Brasil.

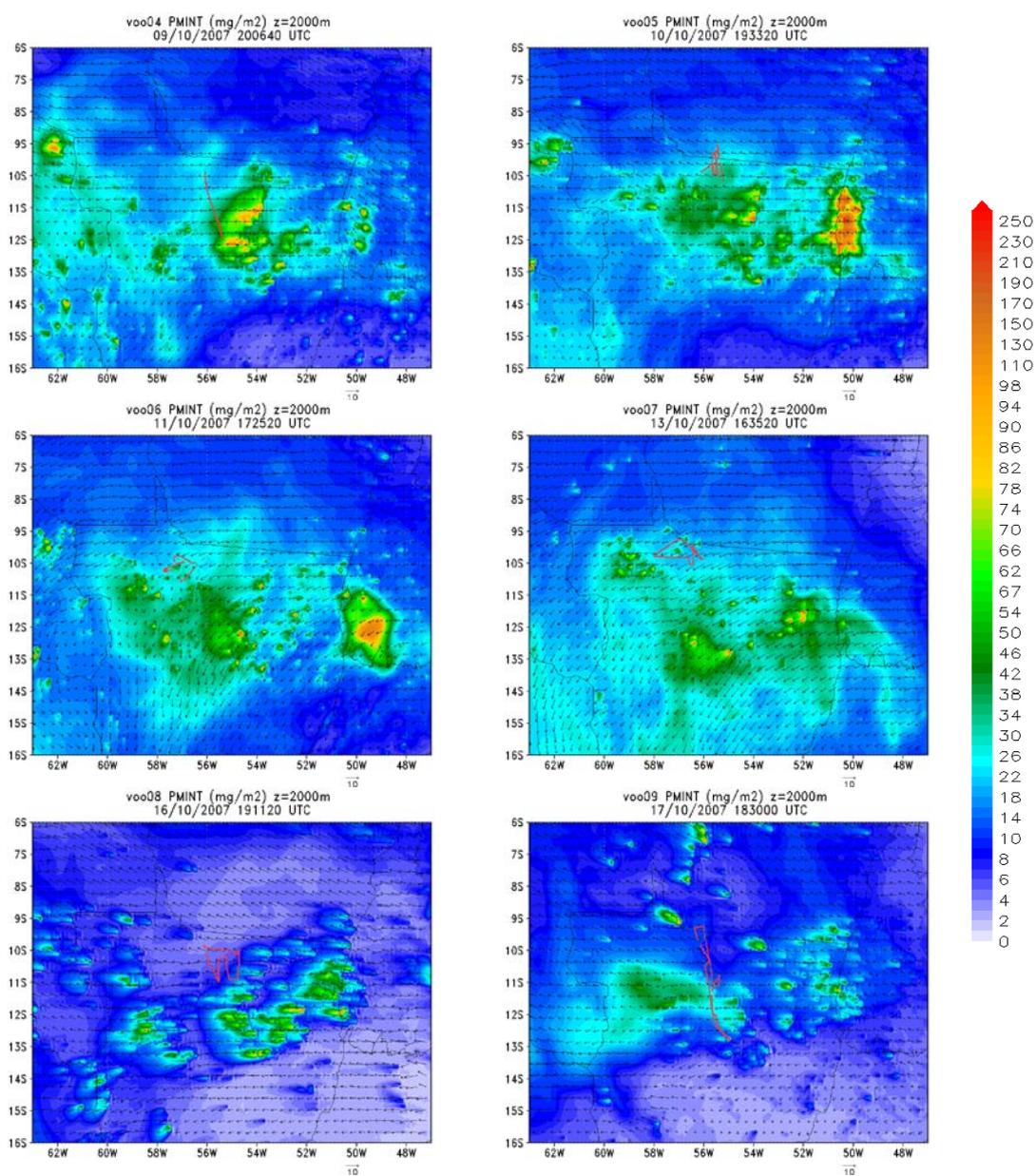


Figura 3.5 – Vento (m/s) no nível σ_z de 2.000m, PM_{INT} (mg/m^2) na escala de cores e as trajetórias dos vôos (em vermelho).

(continua)

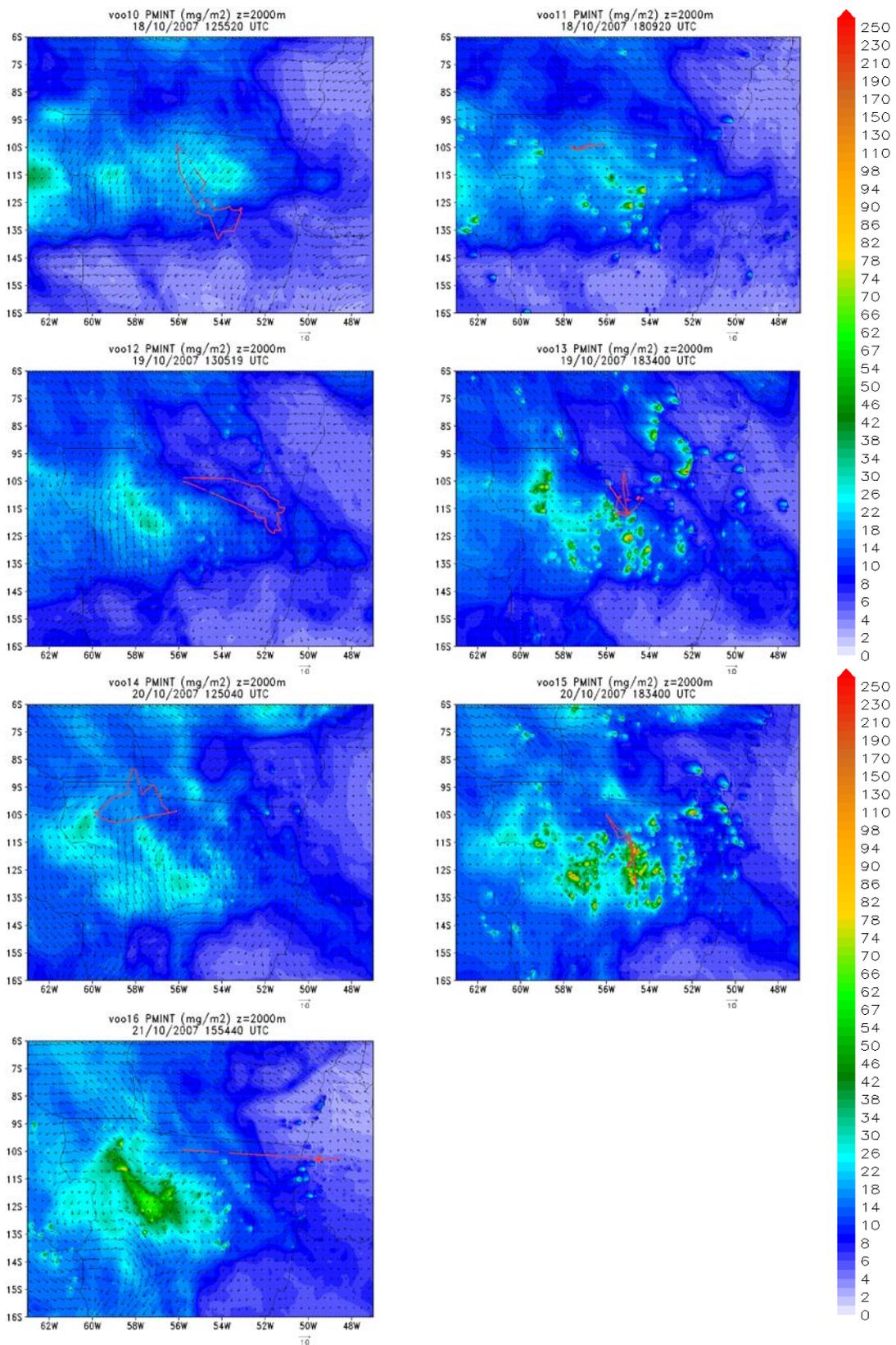


Figura 3.5 – Conclusão

3.2 Dados de Emissões

Os dados de emissões de queimadas utilizadas neste trabalho foram geradas utilizando o modelo de emissões de queimadas *Brazilian Biomass Burning Emission Model* (3BEM). Também foram utilizados os dados do inventário gerado por Yevich e Logan (2003), com informações de quantidade de biomassa queimada por ano devido à queima de resíduos da produção agrícola.

O modelo 3BEM estima a quantidade de gases traço e aerossóis emitidos na queima de biomassa com base nos focos de queimada detectados através de sensoriamento remoto, combinando o produto do *Geostationary Operational Environmental Satellite - Wildfire Automated Biomass Burning Algorithm* (GOES-WFABBA) (PRINS et al., 1998), e o produto do INPE, o qual utiliza os dados do sensor *Advanced Very High Resolution Radiometer* (AVHRR), a bordo dos satélites da série NOAA (SETZER; PEREIRA, 1991), e do MODIS a bordo dos satélites Terra e Aqua (GIGLIO et al., 2003). Esses bancos de dados foram utilizados juntamente com mapas de densidade de carbono na vegetação (OLSON et al., 2000; HOUGHTON et al., 2001) e de uso da terra.

A metodologia aplicada neste trabalho é apresentada a seguir, onde serão descritos o modelo ambiental CCATT-BRAMS, bem como o método de assimilação variacional em duas dimensões, os experimentos realizados e o método de avaliação destes.

3.3 Modelo Numérico Ambiental

O CCATT-BRAMS é um modelo ambiental composto pelo modelo químico CCATT acoplado de forma *on-line* ao modelo atmosférico BRAMS. Este por sua vez é baseado no modelo *Regional Atmospheric Modelling System* (RAMS) (WALKO et al., 2000) com desenvolvimentos brasileiros, como a caracterização do uso do solo, especialmente na região amazônica, uma versão de *ensemble* do esquema de *cumulus* rasos e profundos entre outras modificações. As equipes responsáveis pelo RAMS e pelo BRAMS têm colaborado mutuamente, mantendo as versões sincronizadas. Atualmente o CPTEC/INPE é responsável por centralizar os desenvolvimentos, padronizá-los e implementá-los no modelo BRAMS. A versão 4.1 do *Coupled Aerosol-Tracer*

Transport – Brazilian Regional Modelling System (CATT-BRAMS) é rodada operacionalmente, com previsões de CO e PM_{2.5}, para até 72h de integração, disponibilizadas no site <http://meioambiente.cptec.inpe.br>. Neste trabalho foi utilizada a versão de pesquisa 4.2.1 do CCATT-BRAMS.

O RAMS é um modelo atmosférico baseado nas equações não-hidrostáticas compressíveis (WALKO et al, 2000). Possui um sistema de aninhamento que possibilita simulações numéricas com várias grades de diferentes resoluções, obtendo informações mais refinadas em regiões específicas e *feedbacks* da grade mais fina para a mais grosseira. O modelo possui uma gama de parametrizações físicas para processos de formação de nuvens, precipitação, transferência de radiação, transporte turbulento de calor, umidade e momentum, e interação com o solo

O CATT é um modelo euleriano de transporte e processos de aerossóis e gases traços. Ele foi desenvolvido por Freitas et al. (2009) e Longo et al. (em fase de elaboração) para estudos de química atmosférica. O modelo é baseado na solução de continuidade de massa, na seguinte forma:

$$\underbrace{\frac{\partial \bar{s}}{\partial t}}_A = \underbrace{\left(\frac{\partial \bar{s}}{\partial t} \right)_{ADV}}_B + \underbrace{\left(\frac{\partial \bar{s}}{\partial t} \right)_{CLP}_{DIF}}_C + \underbrace{\left(\frac{\partial \bar{s}}{\partial t} \right)_{CONV}_{PROF}}_D + \underbrace{\left(\frac{\partial \bar{s}}{\partial t} \right)_{CONV}_{RASA}}_E + \underbrace{W_{PM2.5}}_F + \underbrace{R}_G + \underbrace{Q}_H \quad (3.2)$$

em que os termos significam:

A - tendência local da razão mistura média de um traço ($s = \rho / \rho_{ar}$) em um *grid Box*;

B - termo advectivo (transporte em três dimensões) resolvido na grade do modelo;

C – termo de difusão na Camada Limite Planetária (CLP) na escala sub-grade;

D e E – termo de transporte na escala sub-grade devido à convecção profunda e rasa, respectivamente;

F – termo de deposição úmida para PM_{2.5};

G – termo genérico de sumidouro, associado à deposição seca e/ou transformações químicas;

H – termo fonte de emissão associado a processos de queima de biomassa (mecanismo de levantamento de pluma).

Alguns dos processos sub-grade estão ilustrados na Figura 3.6.

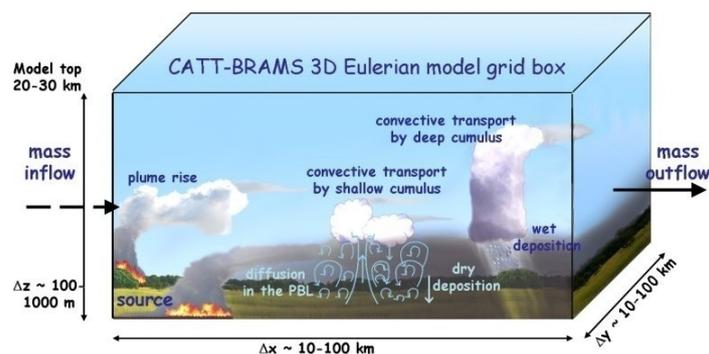


Figura 3.6 – Processos sub-grade envolvidos no transporte de gases/aerossóis simulados pelo modelo CATT-BRAMS.
Fonte: Freitas et al. (2009)

A versão utilizada neste trabalho possui a implementação do módulo químico, que possibilita a simulação de processos químicos que ocorrem na atmosfera, como a produção e remoção de ozônio. Porém, esse módulo foi desligado por não ser o foco deste trabalho.

Neste trabalho, foi utilizada a opção de radiação de Chen e Cotton (1987), a qual não considera efeitos de poluentes na radiação. Esta opção teve o objetivo de permitir a análise e calibração do código de assimilação verificando unicamente o impacto na variável $PM_{2.5}$, eliminando a interferência nos resultados devido ao efeito radiativo semi-direto dos aerossóis. Esse ponto será abordado em trabalhos futuros, a partir do momento em que o sistema estiver calibrado. Os efeitos dos aerossóis na microfísica de nuvens ainda não foram incluídos no modelo.

A coordenada vertical utilizada pelo modelo é a sigma-z (σ_z), descrito por Trípoli e Cotton (1982), e a grade utilizada é a C de Arakawa. A configuração do domínio das grades é feita fixando o ponto central, o número de pontos na direção x (longitude) e y

(latitude) e a resolução de cada grade a ser utilizada. Na Figura 3.7 é mostrada a localização da grade 1 (G1) e grade 2 (G2) utilizadas nos experimentos realizados. Para determinar os níveis verticais, o modelo utiliza um valor inicial de resolução vertical, referente à primeira camada mais próxima ao solo, uma razão de incremento e o valor máximo de resolução vertical. As configurações das grades utilizadas, bem como o passo de tempo e a quantidade de níveis verticais simulado são mostrados na Tabela 3.2. O primeiro nível vertical foi fixado em 100m de resolução, com fator de 1.1 e 950m de resolução máxima, totalizando 38 níveis verticais.

Foram utilizados como condição inicial e de contorno atmosféricos os dados do Modelo de Circulação Geral Atmosférico (MCGA do CPTEC) (BONATTI, 1996) na resolução T126L28 a cada seis horas. Os dados de topografia de 10 km e 1 km utilizados na grade um e dois, respectivamente, são provenientes do *US-Geological Survey* (<http://www.usgs.gov>). A temperatura da superfície do mar (TSM) foi obtida por Reynolds et al. (2002) através de dados *in situ* e obtidos pelo sensor AVHRR, gerando dados semanais e com resolução de 0,5° x 0,5°. O mapa de uso do solo foi obtido através do sensor AVHRR no projeto ProVeg (SESTINI et al., 2003) com resolução de 1km, e os dados de NDVI obtidos pelo sensor MODIS e processados pelo *Terrestrial Biophysics and Remote Sensing Lab* (tbrs.arizona.edu). As condições iniciais de umidade do solo foram obtidas por Gevaerd e Freitas (2006) através de medidas de precipitação por sensoriamento remoto e modelo hidrológico, gerando estimativas diárias com o objetivo de utilizá-los operacionalmente.

Tabela 3.2 – Configuração das simulações

	GRADE 1	GRADE 2
Número de pontos em X e Y	240 × 240	224 × 167
Ponto central (lat ; lon)	-20° ; -57,5°	-12,5° ; -55°
Resolução Horizontal	30 Km	10 Km
Níveis Verticais	38	38
Passo de tempo	40 s	13 s

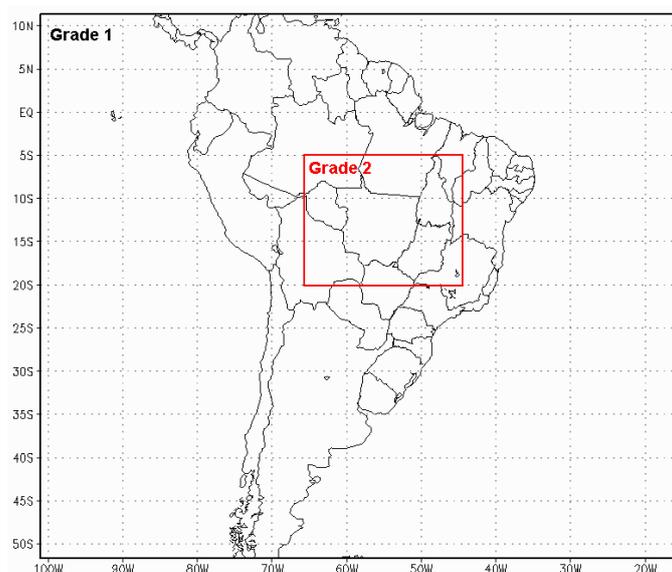


Figura 3.7 – Localização das grades 1 e 2 utilizadas.

3.4 Sistema de Assimilação de Dados

O método de assimilação utilizado foi o esquema de assimilação de dados variacional em duas dimensões (2D-Var), baseado no sistema 4D-Var utilizado no *Rhenish Institute for Environmental Research* (RIU) da Universidade de Colônia, desenvolvido por Elbern e Schmidt (2001) e implementado no modelo CCATT-BRAMS por Hoelzemann et al. (2007a; 2010; em fase de elaboração). No presente estudo, o sistema foi adaptado para assimilar concentração de massa de material particulado medido por aeronave, enquanto que originalmente o sistema estava sendo desenvolvido para assimilar produtos de aerossol medidos de sensoriamento remoto, especificamente MODIS e AERONET.

O esquema variacional resolve o problema de encontrar uma análise ótima (x_a) que minimize a função custo (J). Esta é definida como a distância (ponderada) entre o estado atual da atmosfera (x) e o *background* (x^b), somado à distância (ponderada) entre o estado atual da atmosfera e as observações (y^o). J é definido como (KALNAY, 2003):

$$\mathbf{J}(\mathbf{x}) = \underbrace{\frac{1}{2}(\mathbf{x} - \mathbf{x}^b)^T \mathbf{B}^{-1}(\mathbf{x} - \mathbf{x}^b)}_{\mathbf{J}_b(\mathbf{x})} + \underbrace{\frac{1}{2}(\mathbf{y}^o - H(\mathbf{x}))^T \mathbf{R}^{-1}(\mathbf{y}^o - H(\mathbf{x}))}_{\mathbf{J}_o(\mathbf{x})} \quad (3.3)$$

na qual \mathbf{B} é a matriz da covariância do erro do *background*, H é o operador observação, que interpola as variáveis que estão em ponto de grade do modelo para os pontos de observação. Dependendo do tipo de observação, o H converte variáveis, como no caso de assimilação de radiância medida por satélite, onde o H seria um Modelo de Transferência Radiativa. \mathbf{R} é a matriz de covariância do erro das observações. Para encontrar o mínimo desta função, é calculado seu gradiente, dado pela Equação 3.4,

$$\nabla \mathbf{J}(\mathbf{x}) = [\mathbf{B}^{-1} + \mathbf{H}^T \mathbf{R}^{-1} \mathbf{H}](\mathbf{x} - \mathbf{x}^b) - \mathbf{H}^T \mathbf{R}^{-1} \{\mathbf{y}^o - H(\mathbf{x}^b)\} \quad (3.4)$$

na qual \mathbf{H} é o operador observação linearizado, e igualando a zero para $x = x^a$, $\nabla J(x^a) = 0$, obtém-se:

$$\begin{aligned} [\mathbf{B}^{-1} + \mathbf{H}^T \mathbf{R}^{-1} \mathbf{H}](\mathbf{x}^a - \mathbf{x}^b) &= \mathbf{H}^T \mathbf{R}^{-1} \{\mathbf{y}^o - H(\mathbf{x}^b)\} \\ \mathbf{x}^a &= \mathbf{x}^b + [\mathbf{B}^{-1} + \mathbf{H}^T \mathbf{R}^{-1} \mathbf{H}]^{-1} \mathbf{H}^T \mathbf{R}^{-1} \{\mathbf{y}^o - H(\mathbf{x}^b)\} \end{aligned} \quad (3.5)$$

Esta é a solução formal, porém sua implementação numérica direta seria impraticável devido à necessidade de calcular a inversa de matrizes com muitos graus de liberdade, como as matrizes \mathbf{B} e \mathbf{R} . Na prática são utilizados algoritmos minimizadores para calcular a função custo usando métodos iterativos, como o método do gradiente conjugado ou o método quase-Newton (BOUTTIER; COURTIER, 1999).

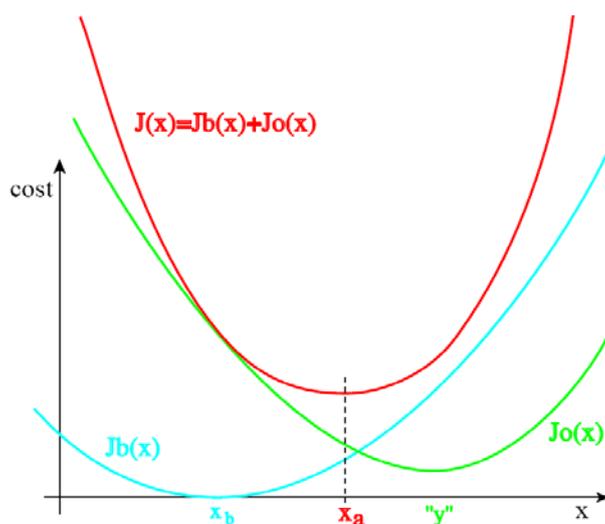


Figura 3.8 – Esquema da minimização da função custo, onde $J_b(x)$ representa a função custo em relação ao *background* e $J_o(x)$ em relação a observação.
 Fonte: Bouttier e Courtier (1999)

Devido a dificuldade na estimativa da matriz \mathbf{B} e o cálculo de sua inversa, Weaver e Courtier (2001) propuseram uma metodologia para estimar a covariância dos erros do *background* considerando que as correlações dos erros do *background* têm comportamento similar ao processo de difusão. Também utilizaram a formulação incremental da função custo, proposta por Courtier (1997) e Derber e Bouttier (1999), que converte a matriz \mathbf{B} em um operador, necessitando assim o cálculo de $\mathbf{B}^{1/2}\mathbf{B}^{T/2}$, e não mais \mathbf{B}^{-1} . Um dos parâmetros que controla a difusão é o raio de influência, que pode ser entendido como a distância na qual dois pontos possuem uma correlação a qual decresce com um fator de $\exp(-1/2)$ (SCHWINGER, 2006). O sistema 2D-Var usado neste trabalho calcula a difusão apenas na horizontal. Por isso, foi necessário utilizar o valor de $\text{PM}_{2.5}$ integrado na coluna (PM_{INT}) (mg/m^2) tanto para o campo de *background* como para os dados da campanha CLAIM. A metodologia aplicada no cálculo do PM_{INT} será descrita na seção 3.4.1. Para aplicar a correção calculada pela assimilação, é necessário calcular um fator de correção denominado *zfac*, utilizando a equação definida abaixo:

$$zfac = \frac{stdobs + analyse}{stdobs + background} \quad (3.6)$$

sendo *stdobs* o desvio padrão médio das observações. Este fator é acrescentado à equação no código fonte do sistema de assimilação para não ocorrer divisão por zero. Este fator multiplica o campo de PM_{2.5} que foi utilizado para calcular o *background*, onde para cada ponto de grade, o mesmo *zfac* é aplicado a todo perfil vertical. Para isso, considera-se a distribuição vertical do modelo perfeita.

A estimativa do erro do *background* é feita por meio da seleção do maior valor entre o Erro Absoluto Mínimo (E_{AM}) e o Erro Relativo do *background* (E_{RB}). O E_{AM} é um valor fixo para toda grade, sendo um erro mínimo do campo de PM_{INT} do *background*, que para este trabalho foi fixado em 2 mg/m². O E_{RB} é calculado para cada ponto de grade do modelo, através da porcentagem do valor de PM_{INT} para o ponto de grade. A matriz **B** é recalculada toda vez que a assimilação é ativada, utilizando o campo de *background* do passo de tempo em que a assimilação é realizada.

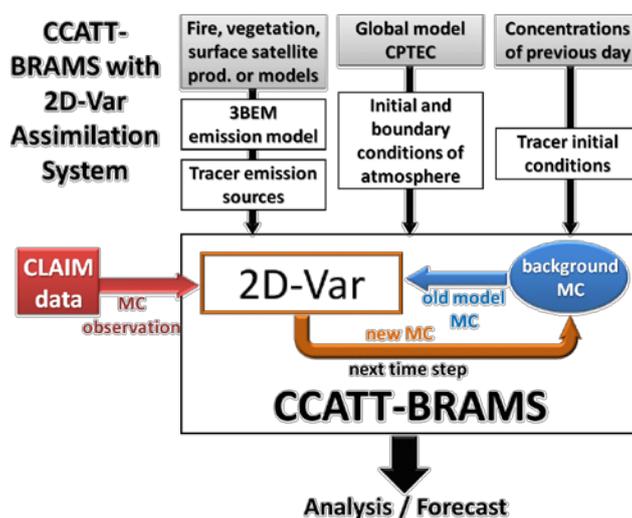


Figura 3.9 – Fluxograma do ciclo de assimilação do 2D-Var no CCATT-BRAMS
Fonte: adaptado de Hoelzemann (2007b)

O ciclo de assimilação é mostrado de forma esquemática na Figura 3.9. O sistema utilizado assimila a observação durante a simulação do modelo, isto é, a observação é assimilada no exato passo de tempo do horário da observação, corrigindo o modelo

durante sua integração. Isto é feito utilizando a concentração de massa de $PM_{2.5}$ no passo de tempo da assimilação, com o qual é calculado o PM_{INT} . O campo de PM_{INT} é o *background* do sistema de assimilação (*background Mass Concentration*). Este campo, juntamente com a observação de $PM_{2.5}$ também integrada na coluna, são utilizados no sistema de assimilação para calcular o *zfac*, que corrige a concentração de massa de $PM_{2.5}$ e retorna ao modelo os novos valores de material particulado. Assim o modelo continua com sua integração utilizando o campo corrigido.

3.4.1 Cálculo do $PM_{2.5}$ Integrado na Coluna Atmosférica

O PM_{INT} do *background* foi calculado utilizando a Equação 3.8, sendo $PM_{2.5}(i, j, k)$ o valor de concentração de $PM_{2.5}$ ($\mu g/m^3$) no ponto de grade (i, j) e nível k do modelo, $\Delta Z(k)$ a espessura da camada k , $minh$ e $maxh$ os níveis mínimo e máximo do vóo, respectivamente, e $rtgt(i, j)$ o parâmetro de rugosidade dado pela Equação 3.7, sendo z_s a altura da topografia e h a altura de topo do modelo.

$$rtgt(i, j) = 1 - \frac{z_s(i, j)}{h} \quad (3.7)$$

$$PM_{INT}(i, j) = \sum_{k=minh}^{maxh} PM_{2.5}(i, j, k) \cdot rtgt(i, j) \cdot \Delta Z(k) \cdot 10^{-3} \quad (3.8)$$

Para as observações foi necessário primeiro calcular a concentração de $PM_{2.5}$ médio em cada camada do modelo, doravante chamada *superobs* (s_{obs}), utilizando a Equação 3.9 e para seu desvio padrão a Equação 3.10.

$$s_{obs}(k) = \frac{\sum AMC(k)}{n_{AMC(k)}} \quad (3.9)$$

$$\sigma_{s_{obs}}(k) = \sqrt{\frac{\sum (AMC(k) - s_{obs}(k))^2}{n_{AMC(k)} - 1}} \quad (3.10)$$

sendo $\sum AMC(k)$ o somatório de todas as observações de concentração de $PM_{2.5}$ durante o voo contidas na camada k do modelo, $n_{AMC(k)}$ a quantidade dessas observações e $\sigma_{s_{obs}}(k)$ o desvio padrão de s_{obs} . Tendo uma *superobs* por camada, em pontos de latitude e longitude médios, foi feito o perfil vertical com o qual era calculado o PM_{INT} das observações de maneira semelhante ao calculado para o *background*. Para calcular o erro do PM_{INT} observado foi utilizada a teoria de propagação de erro segundo Taylor (1997). Considerando uma variável q dependente de uma medida x com uma incerteza δx e uma constante B que não possui incerteza, na forma:

$$q = Bx$$

então a incerteza de q será:

$$\delta q = |B| \delta x$$

Para o caso de somatório de medidas com suas incertezas, consideram-se as incertezas randômicas e independentes, de forma que se:

$$q = x + y + \dots + z$$

a incerteza de q é:

$$\delta q = \sqrt{\delta x^2 + \delta y^2 + \dots + \delta z^2}$$

Assim temos que o erro do PM_{INT} observado será:

$$e_{PMINT_{OBS}} = \sqrt{\sum_{k=\min h}^{\max h} (\sigma_{s_{obs}}(k).rtgt.\Delta Z(k).10^{-3})^2} \quad (3.11)$$

3.5 Descrição dos Experimentos

Com o intuito de testar e avaliar o sistema de assimilação utilizado neste trabalho, foram realizados os experimentos mostrados na Tabela 3.3. Com estes experimentos foi testada a sensibilidade do sistema de assimilação à diferentes E_{RB} , bem como à

diferentes raios de influência e ao novo z_{fac} utilizado. Os resultados dos experimentos são apresentados e discutidos na seção 1.

O modelo foi inicializado no dia 24 de setembro de 2007, considerando um período de 15 dias para o *spin up*. Neste período o modelo foi executado sem interferência da assimilação, utilizando os dados de emissão como fonte de poluentes (seção 3.2). Os experimentos iniciaram no dia 09 de outubro de 2007, utilizando a rodada de *spin up* para inicialização, e foram integrados até dia 22 de outubro, cobrindo o período dos vôos selecionados da CLAIM. Para realizar uma melhor análise do efeito da assimilação, foi fixada uma saída do modelo no passo de tempo em que ocorre a assimilação.

Nos experimentos EXP1 a EXP6 o raio de influência é homogêneo, isto é, o mesmo valor é utilizado para todas as observações. Para os experimentos EXP7 e EXP8 é utilizada a configuração de raios de influência inhomogêneos. Para cada vôo o raio de influência é igual a metade da diferença entre a mínima e máxima latitude ou longitude da trajetória do vôo, sendo escolhida a que possuía maior valor. Outro aspecto dos experimentos EXP7 e EXP8 são as observações utilizadas, nestes casos foram filtrados picos de concentração $PM_{2.5}$ das medições, “suavizando” os dados. Esse processo foi feito visualmente, observando os gráficos da Figura 3.2 e retirando as medições que apresentavam uma variação abrupta em relação às medições vizinhas. Isto é discutido na seção 4.5, onde é justificado a utilização desta metodologia.

Tabela 3.3 – Experimentos realizados para o período de estudo de 09 a 22 de outubro de 2007.

Nome do experimento	Erro do modelo	<i>zfac</i>	Raio de influência
CTRL*	-----	-----	-----
EXP1	50%	Padrão	50 km
EXP2	70%	Padrão	50 km
EXP3	100%	Padrão	50 km
EXP4	200%	Padrão	50 km
EXP5	100%	Novo <i>zfac</i>	50 km
EXP6	200%	Novo <i>zfac</i>	50 km
EXP7	100%	Novo <i>zfac</i>	Inomogêneo
EXP8	200%	Novo <i>zfac</i>	Inomogêneo

* simulação controle do modelo, sem assimilação de dados de aerossol.

3.6 Avaliação dos Resultados

Para analisar os resultados dos experimentos foram feitas avaliações subjetivas, analisando visualmente os resultados dos experimentos, e avaliações objetivas. Para estas foram utilizados os índices estatísticos Erro Médio (viés), Raiz do Erro Quadrático Médio (REQM) e Erro Relativo (ER), calculados com o mesmo banco de dados de concentração de massa de $PM_{2.5}$ utilizada para a assimilação e com as análises geradas pelo sistema de assimilação. Com estes índices é possível avaliar o quanto o sistema de assimilação aproxima o modelo das observações, objetivo este primordial da assimilação de dados. Essa comparação foi feita através de médias de todas as observações contidas em um ponto de grade do modelo com o valor de concentração de massa de $PM_{2.5}$ neste mesmo ponto de grade, ou seja, foram comparadas as observações com as análises ao longo da trajetória do avião.

O viés é um índice que indica o quanto o modelo, em média, está sub ou superestimando em relação às observações. Ele indica a tendência sistemática do modelo, que se positiva indica que o modelo está superestimando o resultado, e se

negativo ele está subestimando. O viés foi calculado através da Equação 3.12 (WILKS, 2006):

$$viés(\alpha) = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N (\alpha_k^M - \alpha_k^O) \quad (3.12)$$

sendo α o valor de $PM_{2.5}$ da análise (M) e observado (O) no ponto de grade k , e N o número de pontos de grades que contém os pares modelo-observação.

O REQM é um índice mais sensível que o viés à valores discrepantes, pois ao elevá-los a diferença ao quadrado, estes valores são ressaltados. Se a amostra for muito pequena, isso pode ser um problema por influenciar de mais o valor do REQM. A Equação 3.13 (WILKS, 2006) foi utilizada para calcular o REQM.

$$REQM(\alpha) = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (\alpha_k^M - \alpha_k^O)^2} \quad (3.13)$$

O ER é muito semelhante ao viés, porém é ponderado pelo valor da observação, ou seja, considera a magnitude em que está sendo calculado o erro. Um mesmo valor de diferença entre a observação e modelo pode ser mais ou menos significativo dependendo da ordem de grandeza dos valores observados. Ele é expresso em porcentagem e calculado utilizando a Equação 3.14.

$$ER(\alpha) = 100 \times \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \left(\frac{\alpha_k^M - \alpha_k^O}{\alpha_k^O} \right) \quad (3.14)$$

4 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

4.1 Versão do código 2D-Var de teste independente

Uma versão do código 2D-Var de teste independente foi elaborada para realizar testes de assimilação de observações sintéticas. Entende-se versão de teste independente como uma versão do código que é utilizada separadamente do modelo numérico, com campo de *background* e observações sintéticas definidos pelo usuário.

O padrão do código de assimilação é utilizar a função de correlação Gaussiana isotrópica e homogênea dos erros do *background* (WEAVER; COURTIER, 2001). Isto significa que a partir do ponto de grade em que a observação é assimilada, a informação é difundida igualmente em todas as direções, causando o formato circular da região influenciada, com uma distribuição gaussiana dentro desta área, e esta por sua vez possui um raio igual para todas as observações assimiladas, variando apenas a distribuição dentro desta área. A distribuição depende do valor da observação assimilada bem como seu erro, como mostra a Figura 4.1b. Porém o código permite a utilização de raios de influência (*corlh*) anisotrópicos e inhomogêneos. Por exemplo, Hoelzemann et al. (2009) utilizaram os dados do MODIS e da AERONET para calcular estas áreas para cada estação da AERONET. Porém, não foi possível aplicar a metodologia de raios de influência anisotrópicos para os dados da CLAIM devido a ausência de outro banco de dados que pudesse ser comparável com os dados de alta resolução da campanha. A Figura 4.1a mostra o decréscimo no número de pontos de grade impactados pela assimilação em função do raio de influência, porém sempre mantendo o mesmo valor no pico, ou seja, no centro da área afetada. Observa-se que o raio de influência não coincide com a distância da abrangência máxima da assimilação. Por exemplo, para um *corlh* de 30 km, esta região é de 120 km. Por outro lado, a resposta à assimilação de diferentes valores de observações são mostrados na Figura 4.1b. Um exemplo de um campo de análise gerado é mostrado na Figura 4.2, onde é apresentado o resultado da assimilação, chamado de análise, de quatro observações sintéticas, com um campo de *background* constante de $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$. As observações (a) e (b) possuem um erro de $1,0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ e valores de concentração de massa de $17 \mu\text{g}/\text{m}^3$ e 15

$\mu\text{g}/\text{m}^3$, respectivamente, e erro de $1,0 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Pode-se observar que, devido ao erro pequeno, a observação assimilada recebeu grande peso, resultando em um valor muito próximo ao observado no centro e um decréscimo em direção as bordas da área influenciada. Já as observações (c) e (d) possuem ambas o valor de concentração de massa de $18 \mu\text{g}/\text{m}^3$, mas erros de $1,0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ e $3,0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ respectivamente. Neste caso, pode-se observar valores mais elevados na região da observação (c), indicando que o código aplica menores pesos às observações com erros mais altos.

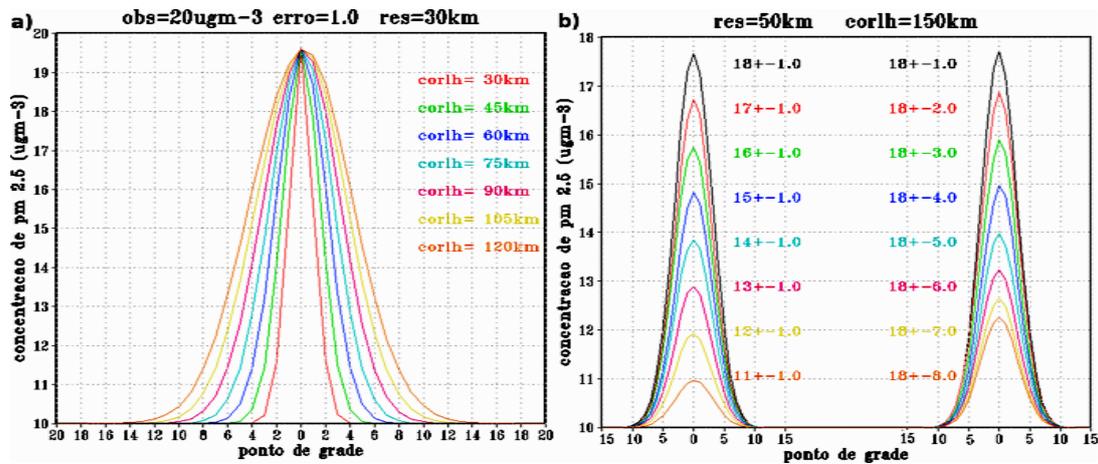


Figura 4.1 – (a) Distribuição na grade do modelo da concentração de massa de $\text{PM}_{2.5}$ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) da análise gerada com a assimilação da observação sintética no valor de $20 \pm 1 (\mu\text{g}/\text{m}^3)$ e *corlh* de 30 km, 45 km, 60 km, 75 km, 90 km, 105 km e 120 km. (b) Distribuição na grade do modelo da concentração de massa de $\text{PM}_{2.5}$ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) da análise.

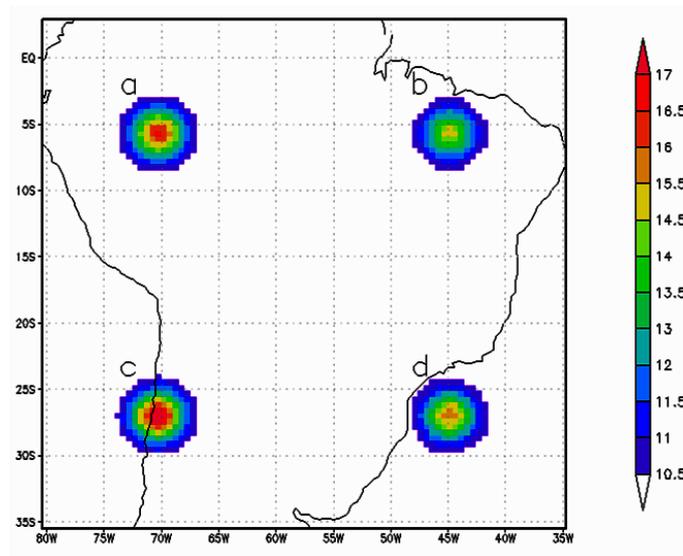


Figura 4.2 – Concentração de massa de $PM_{2.5}$ ($\mu g/m^3$) da análise gerada pela assimilação de quatro observações sintéticas.

4.2 Perfis verticais e superobservações

Os perfis verticais calculados com a metodologia descrita na seção 3.4.1 são mostrados na Figura 4.3, bem como as superobservações (*superobs*) para cada camada e seus respectivos desvios padrões. No cabeçalho de cada gráfico há, além de algumas informações sobre o voo, o valor de PM_{INT} calculado para aquele perfil.

Os vôos 7 e 8 apresentam os maiores valores de PM_{INT} , enquanto os vôos 11 e 12 apresentam os menores. Porém, as medidas realizadas durante estes últimos não são de fato representativas da coluna, uma vez que a aeronave permaneceu a maior parte do tempo abaixo de 2 km. O desvio padrão de PM_{INT} do voo 16 foi o maior entre os vôos, representando 42% do valor absoluto do PM_{INT} , devido a algumas medições de concentração muito elevadas, acima de $500 \mu g/m^3$, na altitude próxima de 3500 km. A informação do desvio padrão é muito importante, pois com ele é calculada a matriz \mathbf{R} , que por sua vez auxiliará o sistema de assimilação a ponderar a observação. Durante os vôos 9, 13 e 15 foram realizados espirais verticais em regiões distintas durante o percurso do voo. Com isso as *superobs* calculadas são mais representativas da distribuição vertical da região na qual o voo passou, comparadas aos demais vôos.

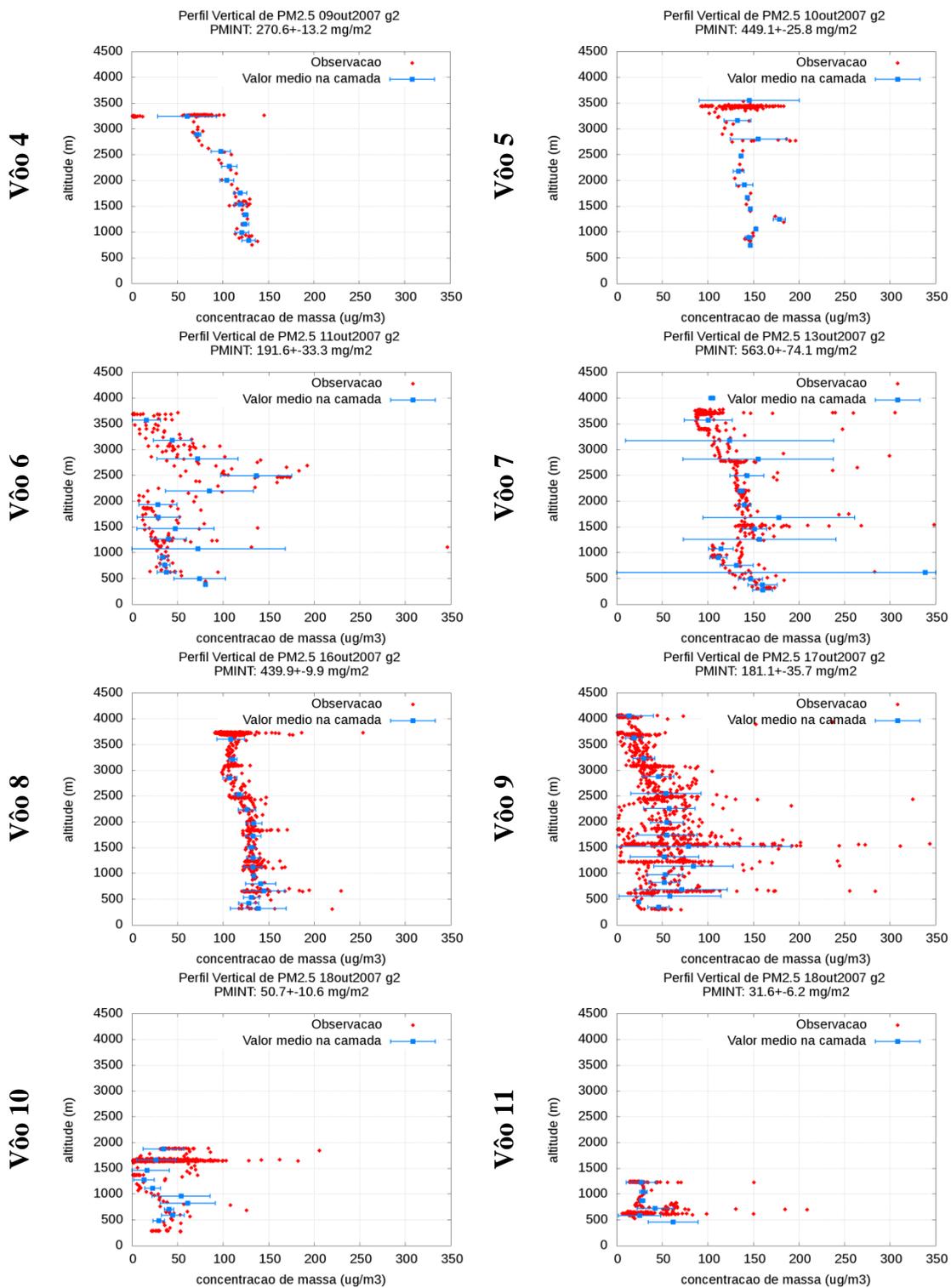


Figura 4.3 – Perfis verticais de PM_{2.5} e PM_{INT} dos vôos 4 ao 16 da campanha CLAIM. (continua)

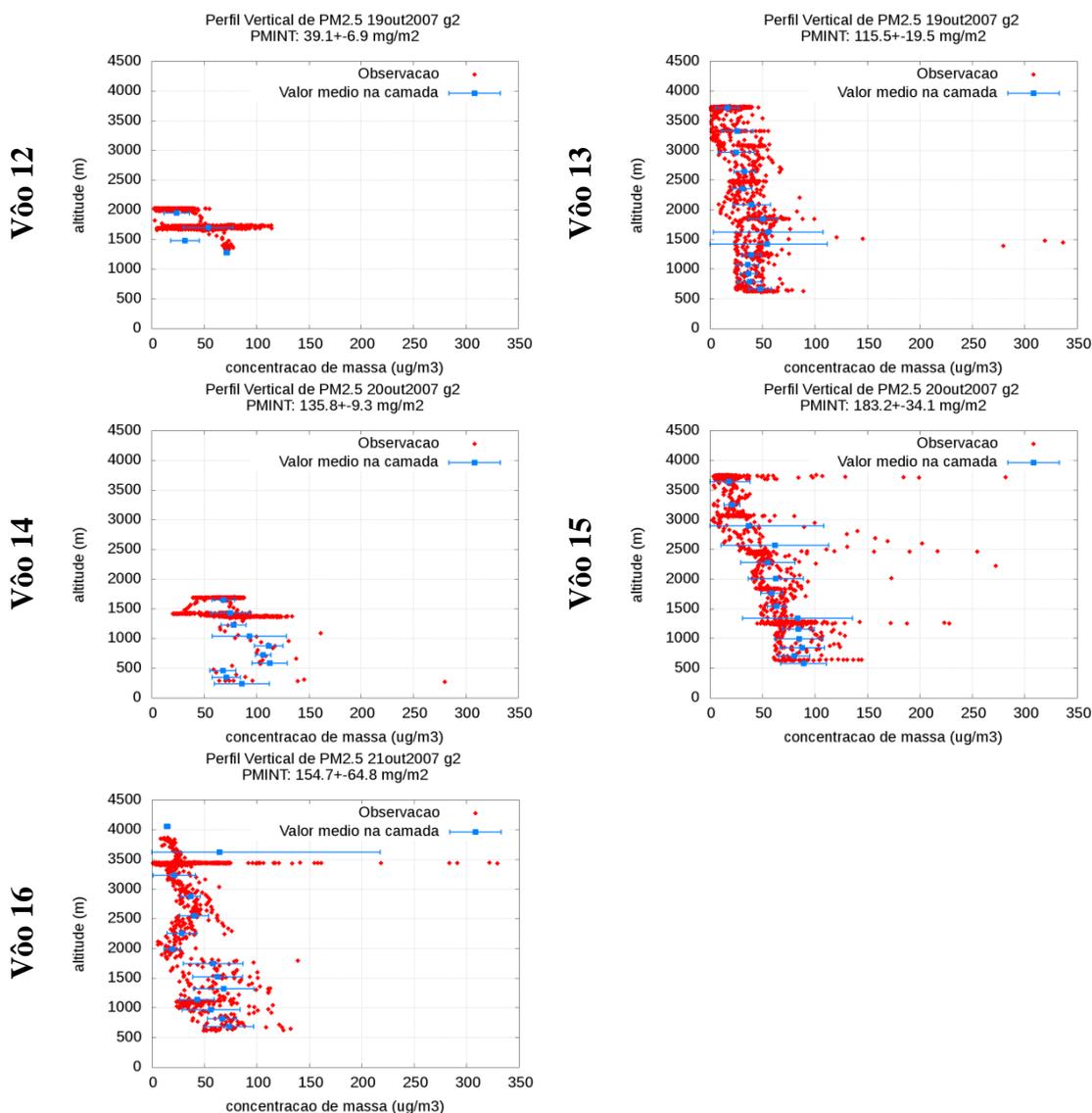


Figura 4.3 – Conclusão

4.3 Sensibilidade da análise ao erro do modelo: EXP1, EXP2, EXP3 e EXP4

Nesta seção serão apresentados os resultados dos experimentos EXP1, EXP2, EXP3 e EXP4, descritos na Tabela 3.3. Nestes experimentos foi testada a sensibilidade do sistema de assimilação de dados de aerossol ao parâmetro de Erro Relativo do *Background* (E_{RB}), cujo valor na versão padrão do sistema é 50%, e foi modificado para 70%, 100% e 200%.

Para o primeiro experimento, é mostrado na Figura 4.4 a distribuição espacial do fator de correção $zfac^1$ e o perfil vertical de $PM_{2.5}$ para o vôo 4 antes e depois da assimilação.

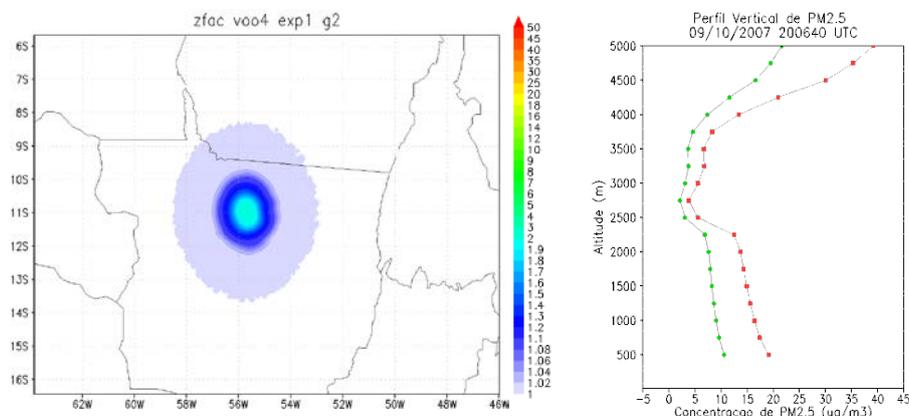


Figura 4.4 – Fator de correção $zfac$ (esquerda) e perfil vertical de concentração de $PM_{2.5}$ ($\mu g/m^3$)(direita) do *background* (verde) e do EXP1 (vermelho).

O comportamento da difusão empregado no sistema de assimilação é semelhante ao comportamento da assimilação de observações sintéticas. Esta correção pode ser vista nos perfis verticais mostrados na Figura 4.4: em verde é mostrado o perfil vertical de concentração de massa de $PM_{2.5}$ original do modelo, que aplicando um $zfac$ de 1,814 gera o perfil da análise, em vermelho. Pode-se notar que o perfil vertical foi apenas amplificado, sem alterar sua distribuição, resultado do $zfac$ constante aplicado em todos os níveis verticais

O impacto da assimilação foi maior nos vôos 4 e 15 para o experimento EXP1, como pode ser visto na Figura 4.5. O vôo15 apresentou uma diferença máxima de 72 mg/m^2 e o vôo 4 de 45 mg/m^2 , enquanto que no vôo 12 houve o menor impacto causado pela assimilação. Embora tipicamente o impacto no campo de PM_{INT} seja muito pequeno, a memória do sistema em relação às observações pode ser observada em vários vôos. No vôo 16 a maior diferença, na região noroeste de MT, é reflexo da influência do dia anterior, quando ocorreu a assimilação dos vôos 14 e 15.

¹O mapa do $zfac$ não possui transformação de projeção de mapa, como as demais figuras com mapas mostradas neste trabalho, o que leva a uma pequena defasagem no posicionamento do campo, impossibilitando a comparação precisa entre as figuras. Mas como exemplo da distribuição espacial do $zfac$ é válida a comparação.

O tempo de permanência do material particulado acrescido pelo sistema de assimilação dependerá da quantidade de massa adicionada, das condições meteorológicas e processos envolvidos como deposição seca e úmida, advecção e difusão. Isso é um fator importante no sistema de assimilação, uma vez que o processo é cíclico, o *background* utilizado durante um determinado voo estará carregando as informações assimiladas de voos anteriores, diminuindo a correção necessária a ser aplicada pelo sistema. Porém as observações da campanha CLAIM não foram regulares, o que levou a situações como nos voos 7 e 8, em que há três dias de intervalo, e no momento em que foi assimilado a observação de PM_{INT} do voo 8, no dia 16, a memória da assimilação do voo 7 já havia dissipado.

Com isso percebe-se que o campo de concentração de massa de $PM_{2.5}$ em que houve assimilação tende a se aproximar do experimento CTRL ao longo do tempo. Este resultado era esperado, uma vez que o material particulado adicionado devido à correção aplicada pela assimilação também está sujeito aos processos atmosféricos. Isto não ocorreria de maneira tão direta se houvesse o efeito dos poluentes nas variáveis meteorológicas, via balanço radiativo, pois alterando o estado da atmosfera, os processos de transporte também seriam modificados, ocasionando diferenças maiores.

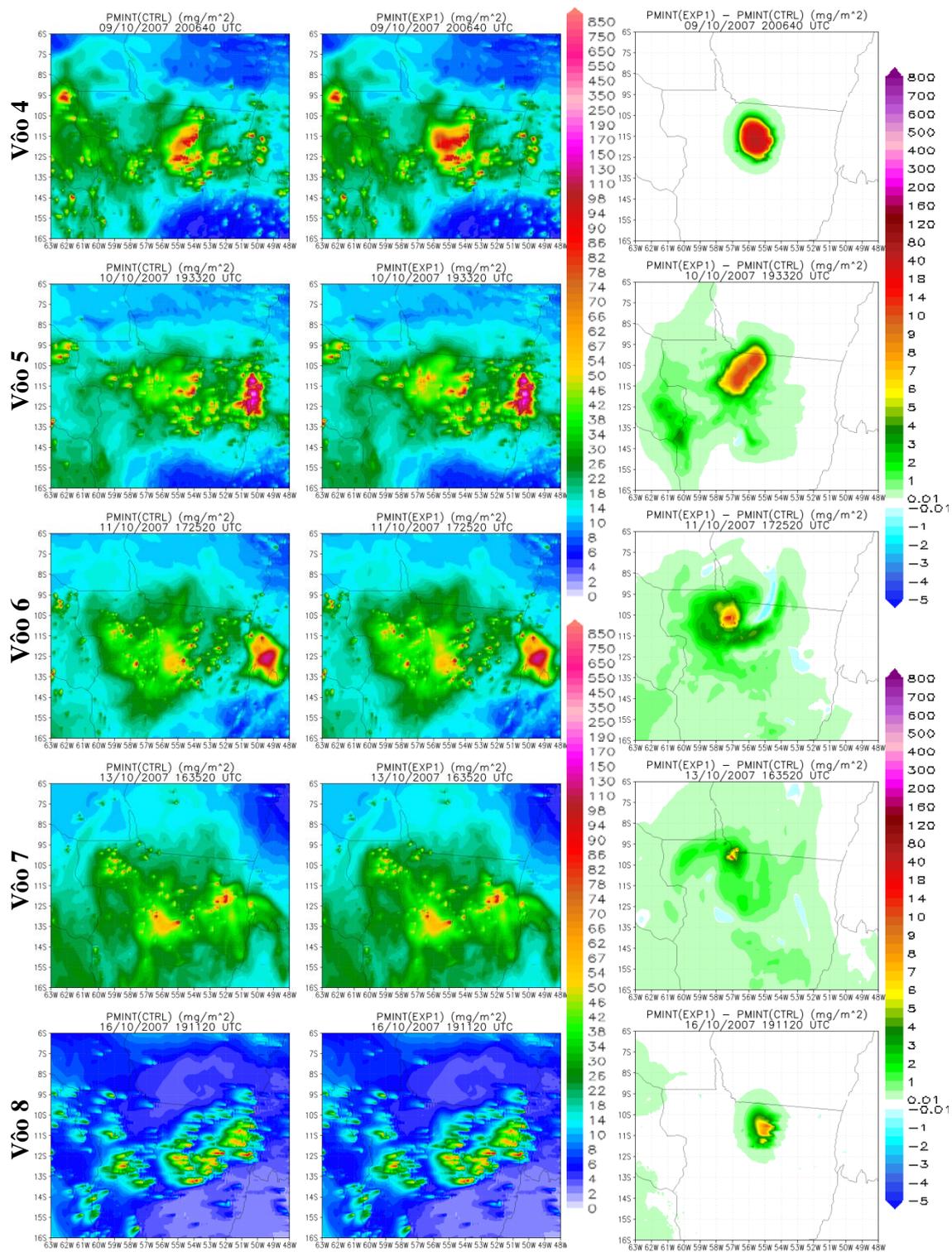


Figura 4.5 – Campo de PM_{INT} (mg/m^2) da análise para os vôos 4 ao 16 da campanha CLAIM, dos experimentos CTRL (coluna esquerda), EXP1 (coluna central) e diferença entre eles (EXP1-CTRL) (coluna direita).

(continua)

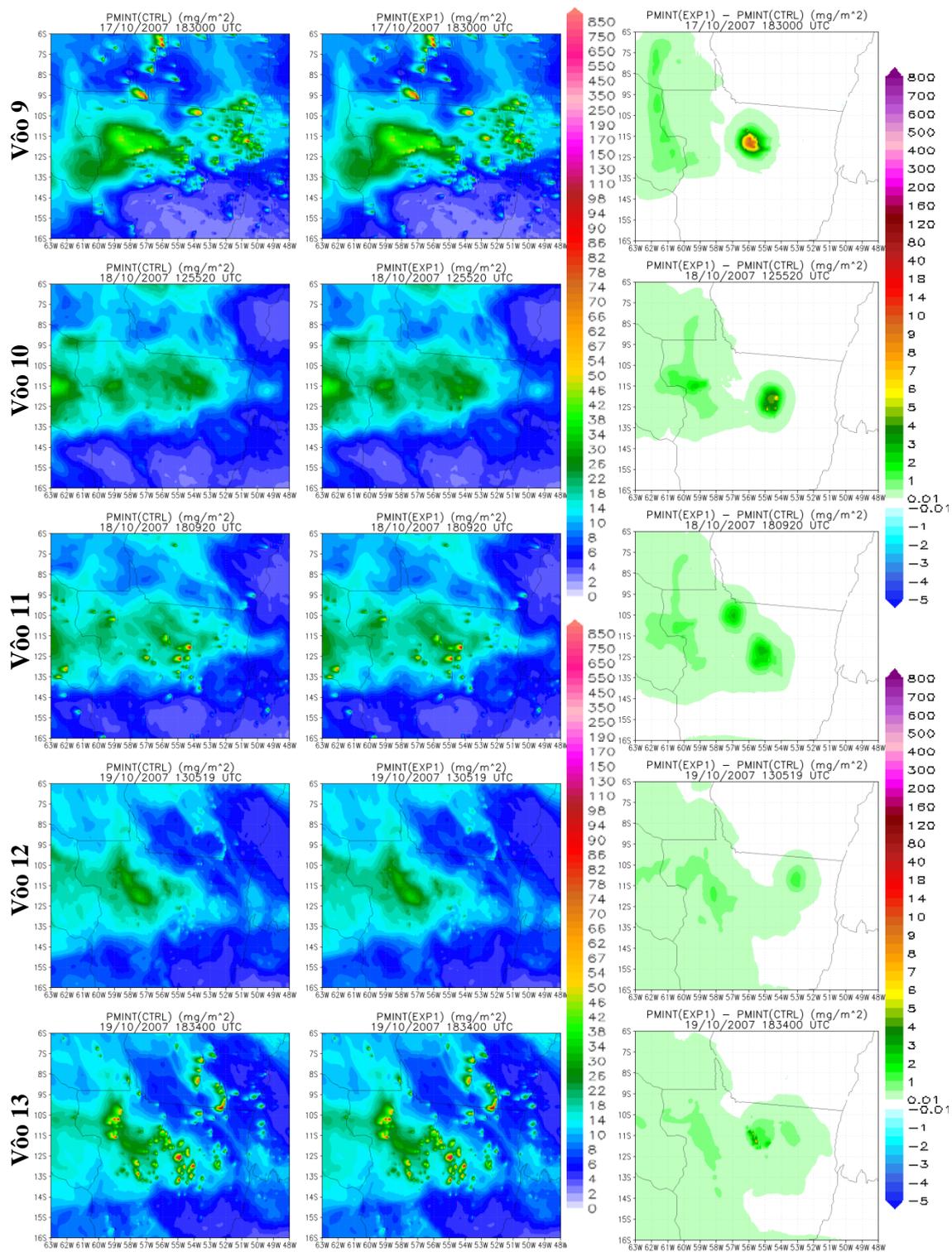


Figura 4.5 – Continuação
(continua)

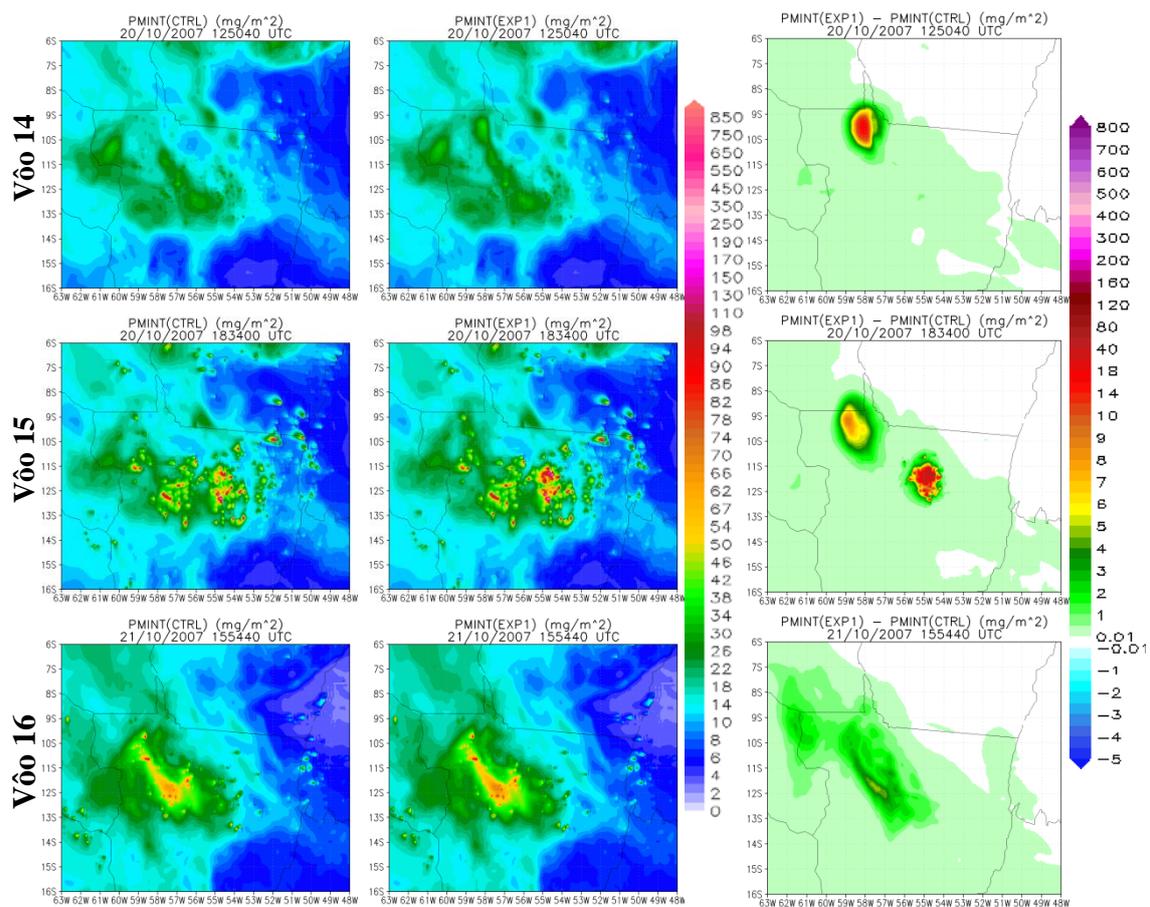


Figura 4.5 – Conclusão

Comparando os resultados dos experimentos CTRL e EXP1 com as observações de concentração de massa de $PM_{2.5}$, percebe-se que não foram alcançados valores satisfatórios. A Figura 4.6 mostra esta comparação para os vôos 4 e 15, com as observações de concentração de massa de $PM_{2.5}$ médias em cada ponto de grade do modelo e o valor de concentração do respectivo ponto de grade da análise gerada nos experimentos CTRL e EXP1. Embora o eixo horizontal do gráfico seja tempo, o horário das análises é fixo no horário em que ocorreu a assimilação. Os vôos mostrados na Figura 4.6 apresentaram a maior diferença entre o CTRL e o EXP1. Este pequeno impacto parece não concordar com a Figura 4.5, porém nesta é mostrado o impacto no material particulado de toda a coluna. Então observa-se que houve aproximação dos valores modelados às observações, porém pouco significativa.

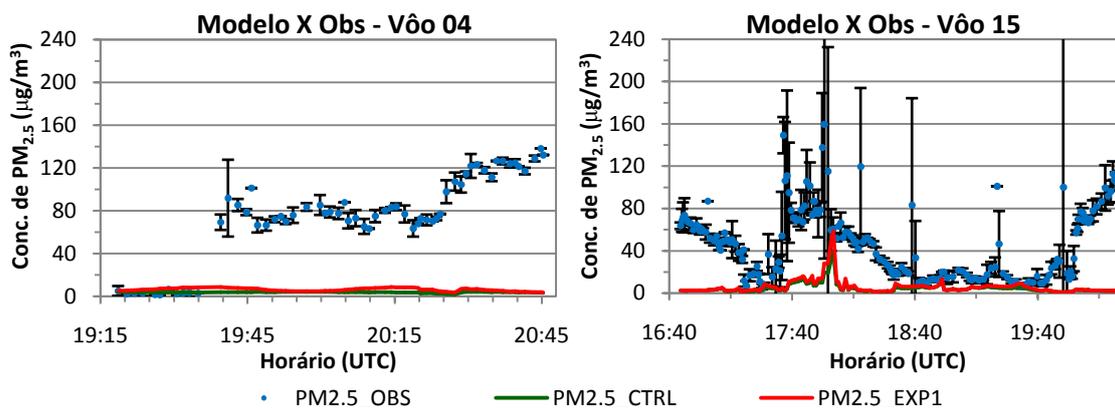


Figura 4.6 – Concentração de massa de PM_{2.5} observado (pontos azuis) e da análise dos experimentos CTRL (verde) e EXP1 (vermelho) nos vôos 4 (esquerda) e 15 (direita).

Os experimentos seguintes (EXP2, EXP3 e EXP4, vide Tabela 3.3) foram elaborados em função da baixa resposta do sistema ao EXP1, na expectativa que valores maiores de E_{RB} conduzam o sistema a dar um peso menor ao modelo, resultando em valores modelados mais próximos às observações.

Como esperado, os experimentos EXP2, EXP3 e EXP4 apresentaram $zfac$ s maiores que o EXP1, com o EXP4 apresentando os maiores valores, e o valor máximo e 11,4 no vôo 8, como mostra a Figura 4.7. Nesta são mostrados no gráfico à esquerda, os valores máximos do $zfac$ para cada vôo e os valores médios calculados para a grade 2 com valores maiores que 1,001. Isto foi feito para obter-se uma média representativa da área influenciada pela assimilação. É possível ver que o sistema respondeu à modificação no E_{RB} . Na figura também percebe-se que o comportamento do $zfac$ para os diferentes vôos foi semelhante ao do EXP1, com maiores valores nos vôos 4, 8, 14 e 15, enquanto que no 12 e 16 mostraram os menores valores. Analisando as diferenças entre observação e *background* (O-F), mostradas na Figura 4.7 à direita, vemos que os vôos 5, 7 e 8 possuem o maior O-F, mas no vôo 8 o $zfac$ respondeu a essa grande diferença, enquanto que nos vôos 5 e 7 isto não ocorreu na mesma proporção. Um dos fatores que influenciou estes resultados é a dimensão do erro das observações assimiladas nos vôos 5 e 7, que são maiores que a do vôo 8. O vôo 12 apresentou um comportamento distinto dos demais nos quatro experimentos, pois os valores de $zfac$ não apresentaram sensibilidade à modificação do E_{RB} . Os valores do campo de *background* estavam

baixos no horário e região do voo 12, com valores de aproximadamente $0,8 \text{ mg/m}^2$ nos quatro experimentos na região em que a observação foi assimilada, levando o sistema a utilizar o Erro Absoluto Mínimo (E_{AM}) nos 4 experimentos. Comparando os vãos 10 e 12, que possuem valores de O-F e erros semelhantes, observa-se que o $zfac$ calculado para o voo 10 foi maior, devido aos valores mais elevados de PM_{INT} no *background* deste voo.

Entretanto, os campos de análise mostraram que um $zfac$ com valor mais elevado não necessariamente gera o maior impacto final. Como o $zfac$ é aplicado ao campo de $PM_{2.5}$ original do modelo, a análise dependerá da magnitude dos valores provenientes do modelo. Nestes experimentos foi visto uma diferença entre os campos de PM_{INT} dos EXP2, EXP3 e EXP4 menos CTRL maior no voo 4 (Figura 4.8), sendo que o $zfac$ para este voo é o segundo maior entre os vãos da campanha. Nota-se que o tamanho da área influenciada pela assimilação permaneceu muito semelhante nos três experimentos, porém o gradiente da diferença ficou mais intenso no EXP4.

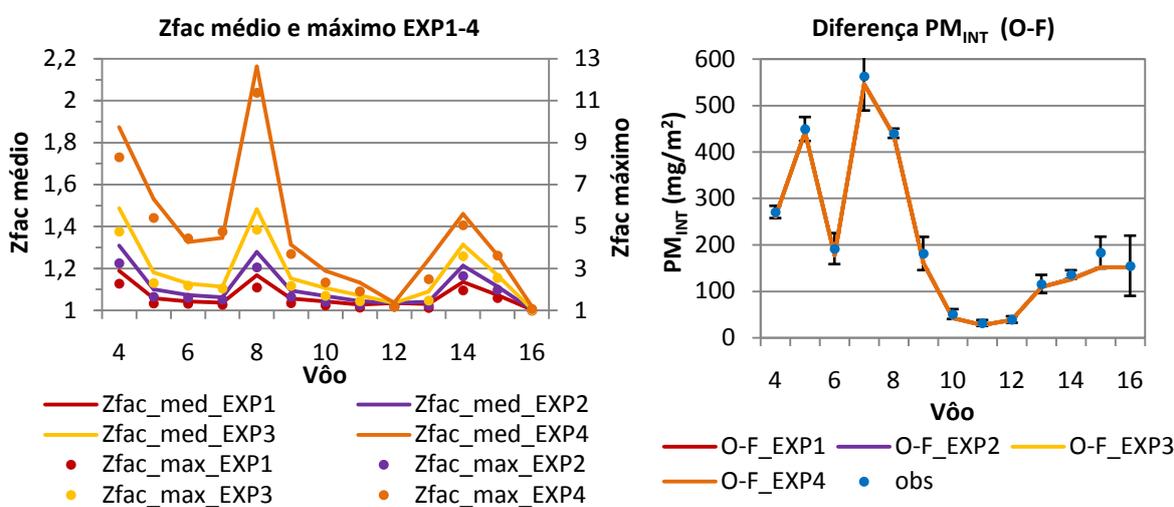


Figura 4.7 – À esquerda: $zfac$ médio e máximo. À direita: diferença de PM_{INT} (mg/m^2) entre observação e *background* (O-F) e observações de PM_{INT} (mg/m^2) durante os vãos 4 ao 16. Ambas para os experimentos EXP1, EXP2, EXP3 e EXP4. Obs.: No gráfico à direita, as curvas dos experimentos estão sobrepostas, mostrando apenas a diferença O-F_EXP4.

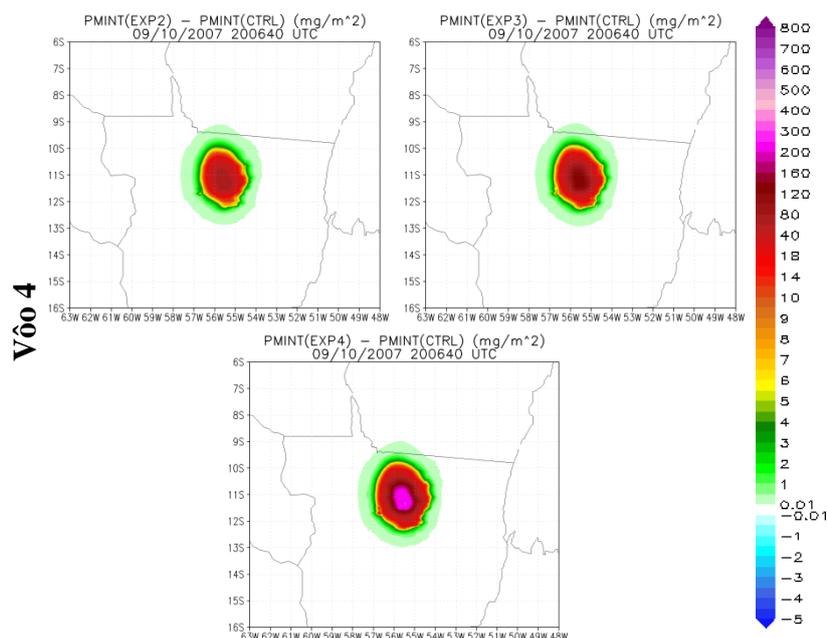


Figura 4.8 – Diferença entre PM_{INT} da análise e CTRL para vôo 4 nos experimentos EXP2, EXP3 e EXP4.

Embora o aumento do E_{RB} tenha levado o sistema a correções maiores, estas foram mais ou menos sensíveis a este aumento, em função de características específicas de cada vôo. De qualquer forma, comparando as análises com as observações de $PM_{2.5}$ viu-se que correções ainda maiores eram necessárias, pois os valores de concentração de massa modelados ainda estavam muito abaixo do observado. Para testar possíveis melhoras na correção aplicada pela assimilação foram elaborados os EXP5 e EXP6.

4.4 Sensibilidade do Sistema de Assimilação à Modificação do Fator de Correção $zfac$: EXP5 e EXP6

Como descrito na metodologia, nos experimentos EXP5 e EXP6 o raio de influência permaneceu o mesmo dos experimentos anteriores, no valor de 50 km, e com um E_{RB} de 100% e 200%, respectivamente. Estes valores foram escolhidos por apresentarem os melhores resultados nos experimentos anteriores. A versão do $zfac$ anterior utilizava a razão entre a análise e o *background*, na qual era somado ao numerador e ao denominador um desvio padrão médio referente às observações (*stdobs*). A segunda versão do $zfac$, utilizada nos experimentos EXP5 e EXP6, é muito semelhante, porém sem o fator do desvio padrão, sendo apenas a razão entre análise e *background*. Com

isso, o sistema é mais sensível aos valores de *background* e análise calculados, alcançando um *zfac* mais variável.

Nos EXP5 e EXP6 a distribuição dos maiores e menores valores do *zfac* nos vôos permaneceu semelhante aos experimentos anteriores (Figura 4.12). A maior diferença entre estes experimentos foi no vôo 8. Neste vôo houve um aumento de 50% no valor máximo do *zfac* e de 23% no *zfac* médio no EXP5 em relação ao EXP4. Mas como esperado, os valores do EXP6 foram os mais altos.

Avaliando os campos de diferença de PM_{INT} dos EXP5 e EXP6 menos o CTRL, percebe-se que as análises dos vôos 4 e 5 foram as que sofreram o maior impacto pela assimilação, com uma diferença que chegou a 610 e 725 mg/m^2 , respectivamente. Enquanto nos vôos 12 e 16 houve as menores diferenças, como ocorreu nos experimentos anteriores. Na Figura 4.9 é mostrado o campo de PM_{INT} das análises dos vôos 4 e 12, casos de máximo e mínimo impacto nestes experimentos. Para demais vôos, vide figuras no APÊNDICE A. No vôo 12 é possível ver o impacto da assimilação dos vôos anteriores, sobre a metade oeste do Estado do MT, enquanto o impacto do vôo 12 se encontra na região nordeste do MT. No mapa do experimento CTRL no vôo 12 é observado que os valores de concentração de massa no horário da assimilação estavam baixos, especialmente na região em que ocorreu a assimilação. Para esta região os valores de PM_{INT} utilizados como *background* estão muito próximos aos do experimento CTRL, pois havia pouco efeito da assimilação de vôos anteriores nesta região. O *zfac* calculado para o vôo 12 é muito semelhante nos experimentos EXP5 e EXP6, devido aos baixos valores de PM_{INT} no background, ocasionando o mesmo efeito discutido para os experimentos anteriores.

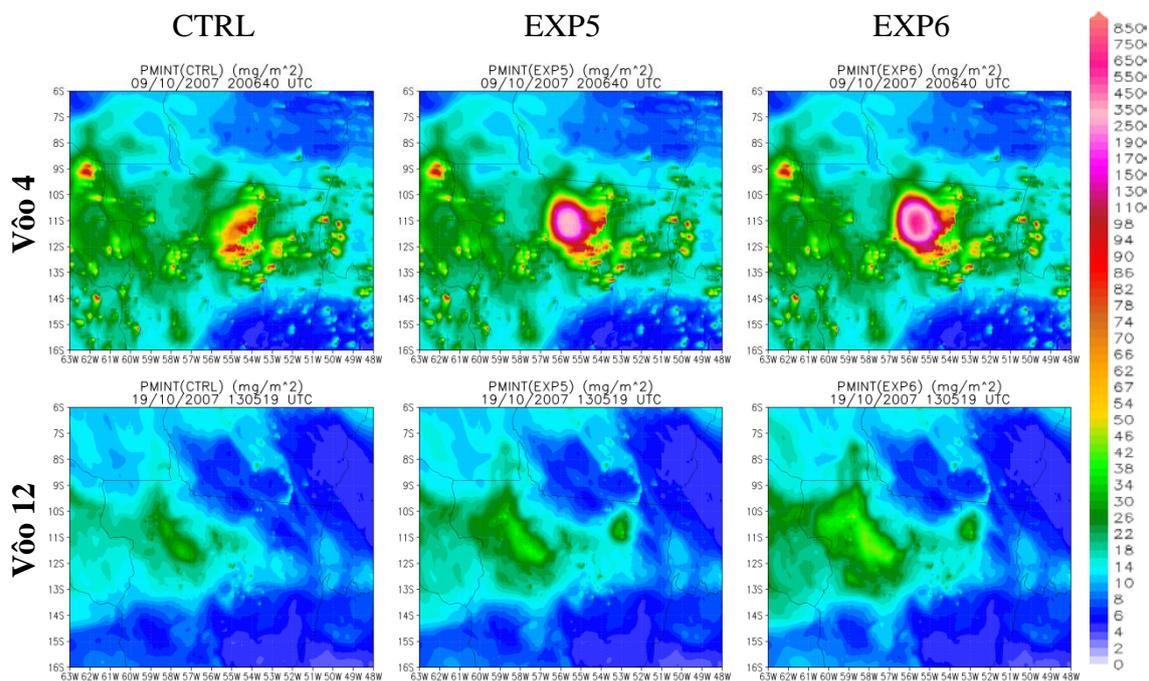


Figura 4.9 – Campos de Análises de PM_{INT} (mg/m²) dos vãos 4 e 12 dos experimentos CTRL (coluna esquerda), EXP5 (coluna central) e EXP6 (coluna direita)

O EXP5 apresentou resultados com um desempenho em aproximar a análise da observação melhor que o EXP4 em alguns vãos, mas os valores de concentração de massa de PM_{2.5} foram muito próximos. O experimento EXP6 apresentou resultados mais satisfatórios que o EXP5, pois conseguiu elevar a concentração de massa de material particulado a valores ainda não alcançados nos experimentos anteriores. A Figura 4.10 mostra a concentração de massa de PM_{2.5} observada e das análises nos vãos 4 e 12 dos experimentos EXP1 a EXP6. Demais vãos, vide APÊNDICE A. Na figura referente ao vão 4 é visível a melhora gradativa com os experimentos, culminando no EXP6 com os valores mais próximos às observações. Esse comportamento é visto na maioria dos vãos. Entretanto, analisando o vão 12 percebe-se a pouca efetividade do sistema de assimilação neste vão, que possui valores muito próximos ao experimento CTRL, ou seja, foi feita uma correção muito pequena, enquanto era necessária uma correção maior. No vão 4 notou-se também um comportamento em forma de onda nos experimentos, que foi amplificado no EXP6. Este comportamento foi verificado apenas no vão 4, e ocorreu porque este vão possui uma rota quase retilínea, sendo que o avião sobrevoou a mesma região na ida e na volta, cruzando transversalmente a região

influenciada pela assimilação. Como o z_{fac} tem a forma de uma gaussiana isotrópica, os valores do modelo referentes aos locais das observações adquiriram esse comportamento. Com isso percebeu-se que o raio de influência estava pequeno, pois considerando um raio maior, esse comportamento de onda seria amenizado de maneira que a região de vale do gráfico seria elevada aos mesmos valores dos picos.

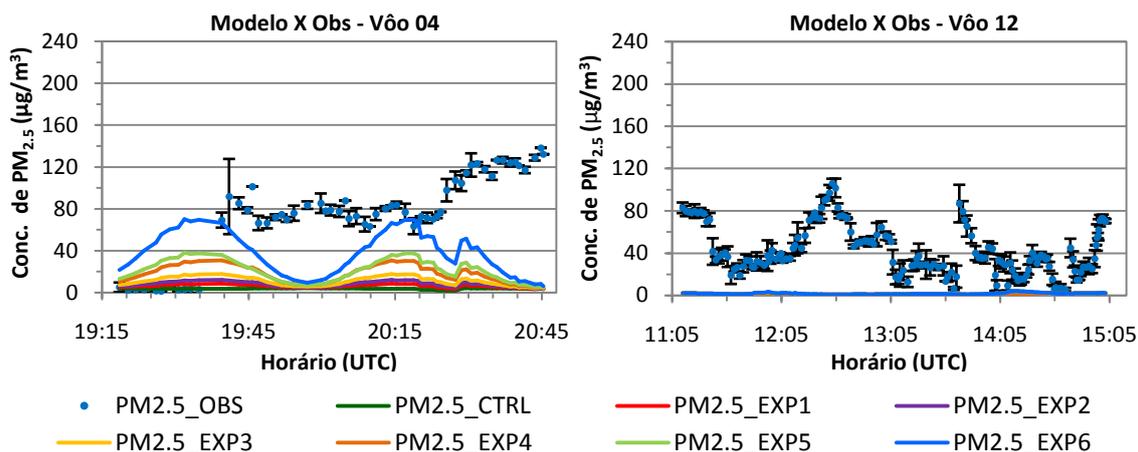


Figura 4.10 – Concentração de massa de $PM_{2.5}$ observado (pontos azuis) e das análises dos experimentos CTRL, EXP1-6, para os vôos 4 e 12 da campanha CLAIM.

Apesar do EXP6 ter apresentado análises com boas correções, elas ainda estavam distantes das observações de $PM_{2.5}$. Para obter uma melhor aproximação do campo de análise às observações, foram testadas novas abordagens no sistema de assimilação com os EXP7 e EXP8.

4.5 Teste de Assimilação com Dados Suavizados

Com um sistema de assimilação bidimensional não é possível acrescentar ao modelo fenômenos de escala local, como plumas isoladas de queimadas. Porém observações de plumas não incluídas nos dados de emissão influenciam negativamente no desvio padrão do PM_{INT} , aumentando seu valor e fazendo com que o sistema de assimilação considere aquela observação como menos representativa da área coberta pelo vôo. Isto causa um efeito não desejado nos resultados, uma vez que o sistema não conseguiria corrigir de maneira satisfatória os valores de $PM_{2.5}$ de *background*. O conceito de *background* empregado neste caso é o estado da atmosfera cujo material particulado

apresenta características mais homogêneas, em regiões sem influência direta de fontes de emissão. Para evitar ambigüidade em seu uso, o conceito de *background* empregado em estudos de química da atmosfera será usado como “valor de fundo”. Percebendo então a desvantagem de considerar os picos isolados de concentração de material particulado, foi testado para o vôo 9 a assimilação dos dados de concentração de massa de PM_{2.5} dos quais foram retirados de forma visual valores individuais de concentração muito altos comparados às observações vizinhas. A Figura 4.11 mostra os perfis verticais calculados para o vôo 9 com os dados originais, à esquerda, e à direita os dados sem os picos de concentração. Para este vôo é possível ver que o valor do material particulado integrado ficou cerca de 10% menor, enquanto que o desvio padrão reduziu 45%.

Com os dados suavizados do vôo 9 foi simulado um experimento teste com as mesmas configurações que o EXP6, a partir do dia 9 até o dia 17, dia este em que ocorre o vôo 9. Os dados utilizados na assimilação dos vôos anteriores ao vôo 9 são os originais, sem retirar os picos de concentração. Os resultados deste teste foram mais promissores. O valor do PM_{INT} observado foi menor, logo a diferença O-F também ficou menor, o que levaria a necessidade de uma correção menor. Mas este teste resultou em um *zfac* calculado maior, com um aumento de 23% no *zfac* máximo em relação ao EXP6, e de 8% no *zfac* médio. Este aumento ocorreu devido à diminuição do erro da observação.

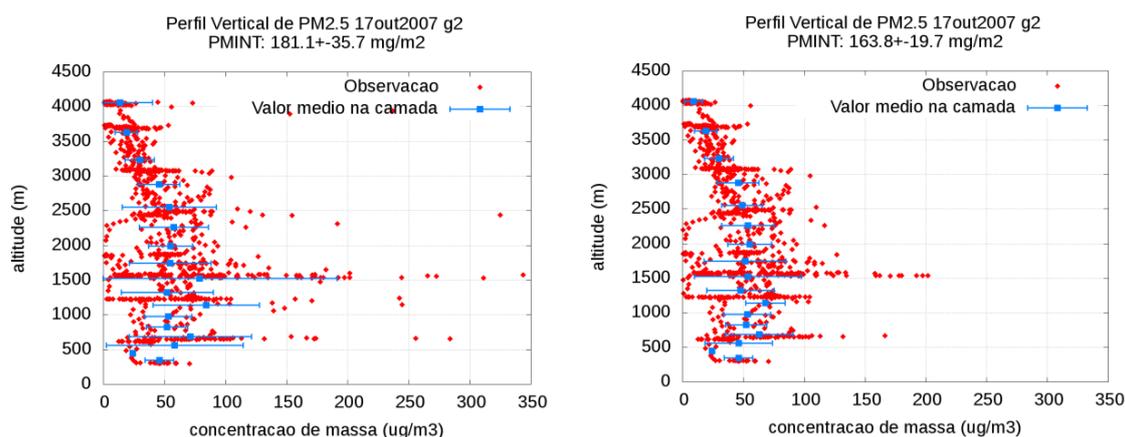


Figura 4.11 – PM_{2.5} ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) observado (vermelho) e PM_{2.5} ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) médio na camada (azul) para as observações originais (esquerda) e sem picos de concentração (direita), coletadas durante o vôo 9.

Com o objetivo de obter essa melhora para todos os vôos a serem assimilados, aplicou-se esta metodologia a todos os vôos (EXP7 e EXP8). Os novos valores de PM_{INT} calculados com a metodologia recém descrita são mostrados na seção seguinte, na Figura 4.14. Nesta figura nota-se a diminuição no desvio padrão, principalmente nos vôos 7 e 16.

4.6 Impacto de Raios de Influência Inomogêneos e Observações Suavizadas: EXP7 e EXP8

Nesta seção serão apresentados os resultados dos experimentos EXP7 e EXP8, cujos resultados foram considerados os melhores dentre todos os experimentos realizados no desenvolvimento deste trabalho. Nestes experimentos são utilizados o E_{RB} de 100% e 200%, respectivamente. Também é utilizado um método de calcular o z_{fac} semelhante ao discutido na seção 4.4, porém com uma modificação. Ao invés de aplicar o z_{fac} ao perfil vertical de $PM_{2.5}$ completo, a correção foi aplicada desde a superfície até o nível máximo alcançado pelo avião durante as medições. Essa modificação foi feita para evitar erros de representatividade, uma vez que não havia observação nem informação de correlação com os níveis acima do alcançado pelo avião. Para os níveis abaixo do mínimo alcançado pelo avião a correção é válida, uma vez que a altitude mínima dos vôos (*minh*) encontra-se dentro da camada de mistura, cuja característica de homogeneidade permite esta aproximação. A mudança mais significativa nestes experimentos foi a utilização dos dados sem picos de concentração, discutidos na seção anterior, e a implementação do raio de influência inomogêneo descrito na seção 3.5, que levou à maior independência de cada observação.

O comportamento do z_{fac} no período de estudo nos experimentos EXP7 e EXP8 foi diferente dos anteriores. A diminuição do erro das observações fez com que o sistema de assimilação desse um peso maior à observação, aproximando mais os valores de concentração de material particulado modelado aos observados. Este efeito ficou claro nos vôos 7 e 16, cujos erros sofreram a maior modificação devido a suavização dos dados de concentração de aerossol, resultando em valores de z_{fac} mais altos, como

mostra a Figura 4.12. Nesta são mostrados os valores médio e máximo de z_{fac} para os experimentos EXP5, EXP6, EXP7 e EXP8 para todos os vôos utilizados neste estudo.

A implementação do raio de influência inhomogêneo teve forte impacto nos resultados, principalmente no vôo 16. Neste vôo o raio de influência calculado foi cerca de sete vezes maior que o raio utilizado nos experimentos anteriores, enquanto que nos demais vôos o aumento foi de duas a quatro vezes. Isto auxiliou a elevar o valor do z_{fac} médio nos vôos

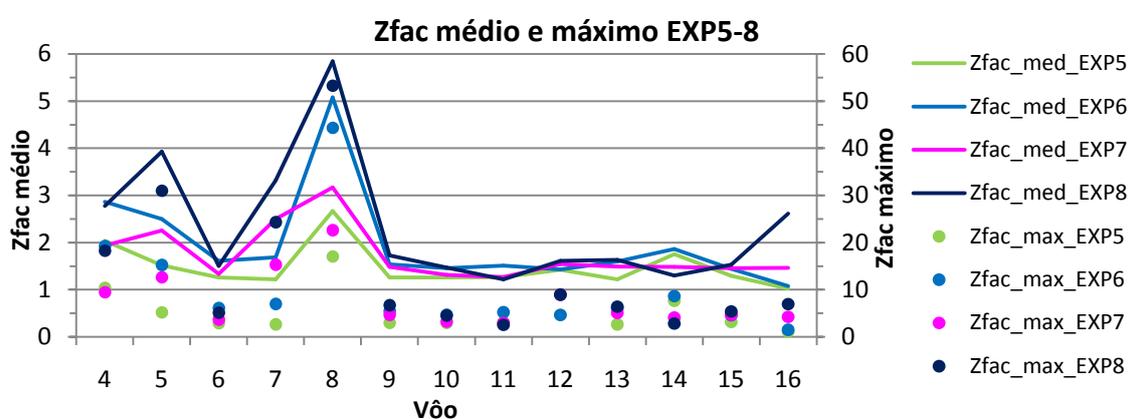


Figura 4.12 – Z_{fac} médio e z_{fac} máximo nos experimentos EXP5, EXP6, EXP7 e EXP8 para todos os vôos utilizados.

Com valores de z_{fac} maiores e mais abrangentes, a quantidade total de material particulado adicionado à atmosfera modelada aumentou com as correções calculadas pelo sistema de assimilação, tornando mais longo o efeito da assimilação. Com isso a diferença entre a observação e a estimativa inicial ficou menor em alguns vôos. A Figura 4.13 mostra a diferença observação menos estimativa inicial (O-F) e observação menos análise (O-A) dos experimentos EXP5, EXP6, EXP7 e EXP8 para os vôos utilizados neste estudo. Nesta figura podemos ver as correções aplicadas pelo sistema de assimilação. A distância entre os valores de O-F e O-A mostram o quanto a assimilação corrigiu o modelo no ponto considerado.

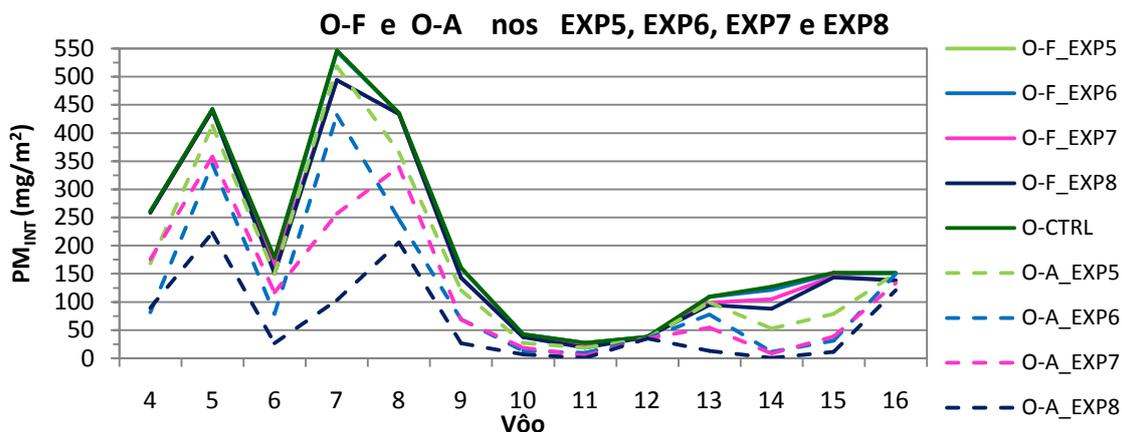


Figura 4.13 – Diferença observação menos estimativa inicial (O-F) e observação menos análise (O-A) dos experimento EXP5, EXP6, EXP7 e EXP8 para todos os vôos.

Com a diminuição do erro das observações o sistema pode acompanhar melhor os valores de PM_{INT} observado (Figura 4.14). Os vôos do 9 ao 15, exceto o vôo 12, apresentaram valores de PM_{INT} na análise muito próximos à observação assimilada, mostrando que o sistema foi capaz de utilizar a observação de maneira satisfatória. Os vôos 5 e 7 apresentaram uma correção maior no EXP8, o que não ocorreu em experimentos anteriores, e também pode ser visto na Figura 4.13, em que a distância entre o O-A e O-F nestes dois vôos foram consideráveis comparadas com os experimentos anteriores. Visualmente, o vôo 12 não apresentou mudanças entre os experimentos. Mas houve uma melhora com as modificações implementadas, especialmente com o novo método de cálculo do z_{fac} . Nos experimentos EXP1 a EXP4, o valor do PM_{INT} da análise no ponto de observação era de $0,94 \text{ mg/m}^2$, onde o *background* era de $0,79 \text{ mg/m}^2$. Nos EXP5 ao EXP8 o valor do PM_{INT} da análise foi de $3,7 \text{ mg/m}^2$, com um valor de *background* semelhante ao dos experimentos anteriores.

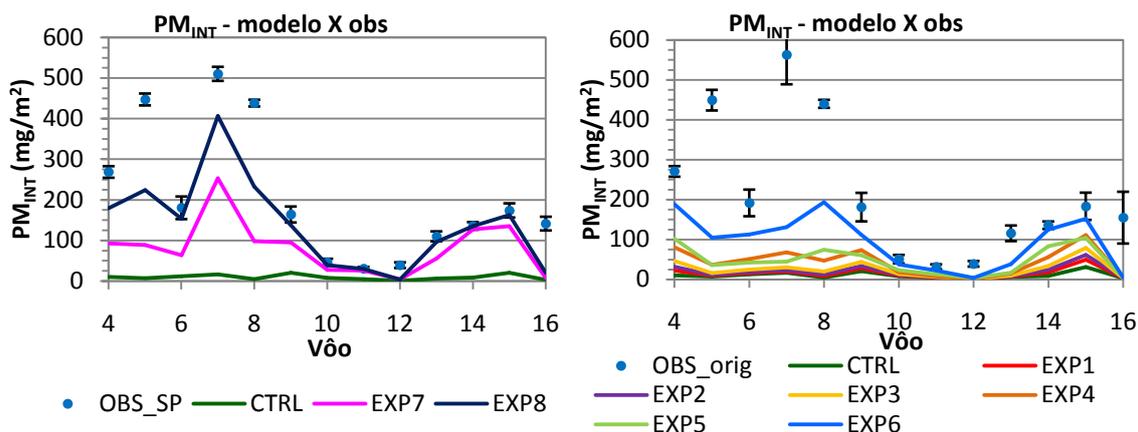


Figura 4.14 – PM_{INT} (mg/m^2) calculado com as observações com (orig) e sem (SP) picos de concentração, PM_{INT} do experimento CTRL e das análises de todos os experimentos.

As comparações de concentração de massa de $PM_{2.5}$ das análises dos EXP7 e EXP8 com o observado durante os vôos mostram resultados da assimilação de dados de aerossóis com valores de concentração significativos. A Figura 4.15 contém os gráficos com os valores de concentração de massa de $PM_{2.5}$ ($\mu g/m^3$) observados e dos experimentos CTRL, EXP7 e EXP8. Os resultados dos experimentos EXP7 e EXP8 ainda mostram o comportamento original do modelo, representado pelo experimento CTRL, porém amplificado. As análises geradas nos vôos 6, 9, 13 e 15 apresentaram os melhores resultados deste trabalho, pois há uma grande proximidade entre os valores de concentração de massa de $PM_{2.5}$ observados e modelados. Nos momentos em que houve a elevação ou diminuição dos valores de concentração observada, as análises acompanharam com boa destreza. No vôo 6, o pico de concentração observado próximo às 17 UTC também é observado nos valores da análise, porém aparentemente com uma defasagem. Como estas comparações estão sendo feitas entre as observações discretizadas no tempo e a análise gerada pela assimilação em um horário médio das observações, podem ocorrer defasagens deste tipo. No exemplo citado, a diferença no pico de concentração modelado e observado foi de um ponto de grade, o que é desprezível em uma comparação desta natureza. A análise gerada pela assimilação no vôo 13 apresentou o melhor desempenho, aproximando os valores de $PM_{2.5}$ do modelo às observações de maneira excelente. Os vôos que apresentaram os melhores resultados possuem perfis verticais em sua trajetória. Isso mostra que o perfil vertical do modelo

possui uma boa descrição da estrutura vertical da atmosfera, porém com valores subestimados. Mas a correção aplicada pela assimilação foi capaz de elevar estes valores e diminuir a diferença entre observação e análise. Logo, mesmo sendo o sistema de assimilação bidimensional, a análise apresentou bons resultados na correção vertical para os vãos que continham perfis verticais em suas trajetórias.

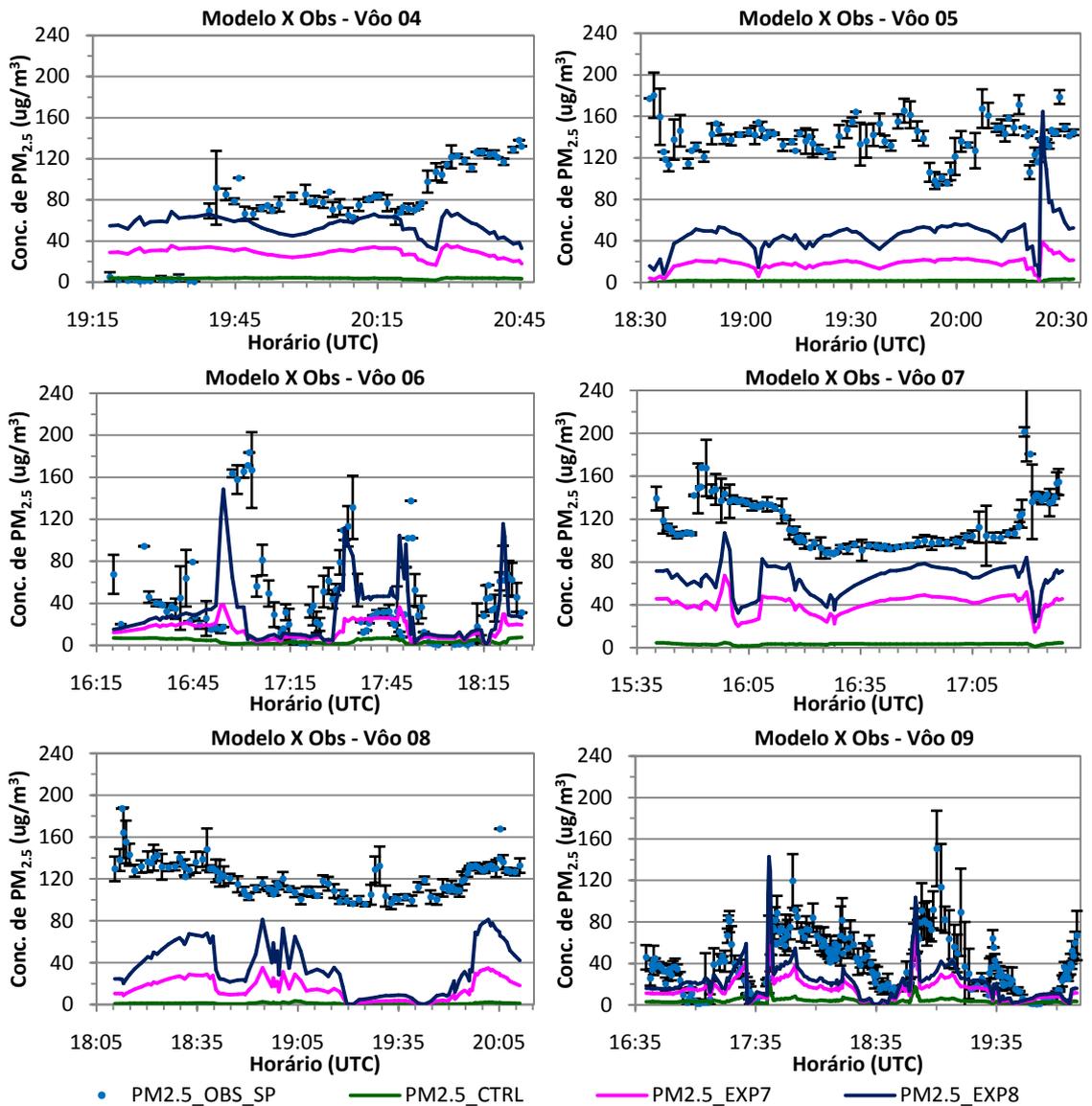


Figura 4.15 – Concentração de massa de PM_{2.5} ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) observado (pontos azuis) e da análise dos experimentos CTRL, EXP7 e EXP8 para os vãos 4 ao 16 da campanha CLAIM.

(continua)

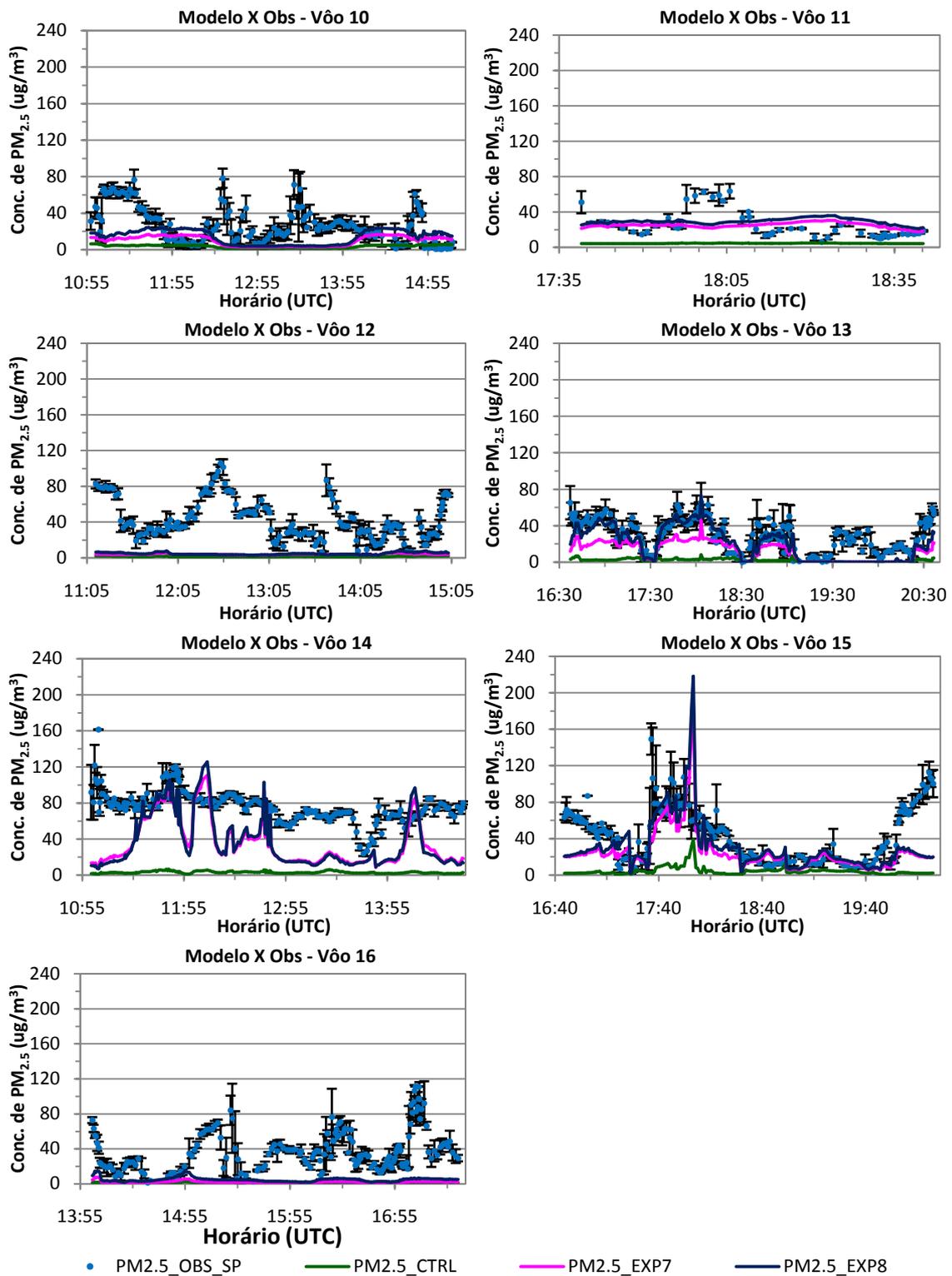


Figura 4.15 – Conclusão

Nos vôos 11 e 14, nas regiões onde os valores modelados superestimam os observados, o EXP7 apresentou uma melhor aproximação às observações do que o EXP8. Do mesmo modo, observou-se no vôo 14, que no EXP7 houve uma menor subestimativa em relação ao EXP8. Com isto, a análise nos vôos 11 e 14 do EXP7 apresentaram resultados melhores que do EXP8. Isto será mostrado também na seção 4.7, onde serão discutidos os índices estatísticos de erro dos experimentos.

O vôo 16 também possui perfis verticais em sua trajetória, porém a maior parte deste vôo foi feita em uma altitude fixa. Isto pode ter causado o baixo desempenho do sistema de assimilação neste vôo, pois a área de abrangência do vôo foi grande, comparada aos demais vôos, causando uma baixa representatividade da observação a essa região.

Os campos de PM_{INT} das análises do EXP8 mostram a grande quantidade de material particulado adicionada à atmosfera devido às correções aplicadas pela assimilação (Figura 4.16). O impacto individual de cada observação se torna difícil de analisar devido a memória remanescente da assimilação de observações anteriores. Para uma verificação aproximada da região influenciada por cada vôo, as figuras com o $zfac$ calculado para cada vôo no EXP8 estão no APÊNDICE B.

Para manter a equivalência do PM_{INT} da análise com o observado, na Figura 4.14 os níveis verticais do modelo utilizados para calcular a integral na coluna são exatamente os mesmos que foram utilizados para o cálculo do PM_{INT} observado. No caso do PM_{INT} mostrado na Figura 4.16, foram utilizados todos os níveis do modelo, utilizando o cálculo de PM_{INT} padrão.

Os vôos 12 e 16 não apresentaram bons resultados nas comparações com as observações (Figura 4.15), entretanto é possível ver na Figura 4.16 que os valores de material particulado sofreram correções razoáveis nos experimentos EXP7 e EXP8, embora muito menores que nos demais vôos. Porém, as áreas influenciadas pelo $zfac$ nos vôos 12 e 16 foram as maiores, levando a uma correção mais abrangente. A assimilação da observação no vôo 16 influenciou toda a grade 2, sendo o centro da área influenciada pelo $zfac$ na região de fronteira entre MT, PA e TO. O impacto no vôo 16 fica mais evidente analisando a grade 1, mostrada na Figura 4.17 e Figura 4.18, nas quais são

mostrados, respectivamente, o PM_{INT} da análise gerada no vôo 16 para o EXP8 e do CTRL, e a diferença de PM_{INT} entre os experimentos EXP8 e CTRL para os vôos 15 e 16. A assimilação da observação do vôo 16 teve impacto visível sobre os Estados do PA, TO, GO e leste do MT. Comparando os mapas da Figura 4.18 é possível ver o acréscimo de material particulado nesta região. Deve-se considerar que os mapas da Figura 4.18 possuem aproximadamente 21h de defasagem, mas para análise feita é válida a comparação.

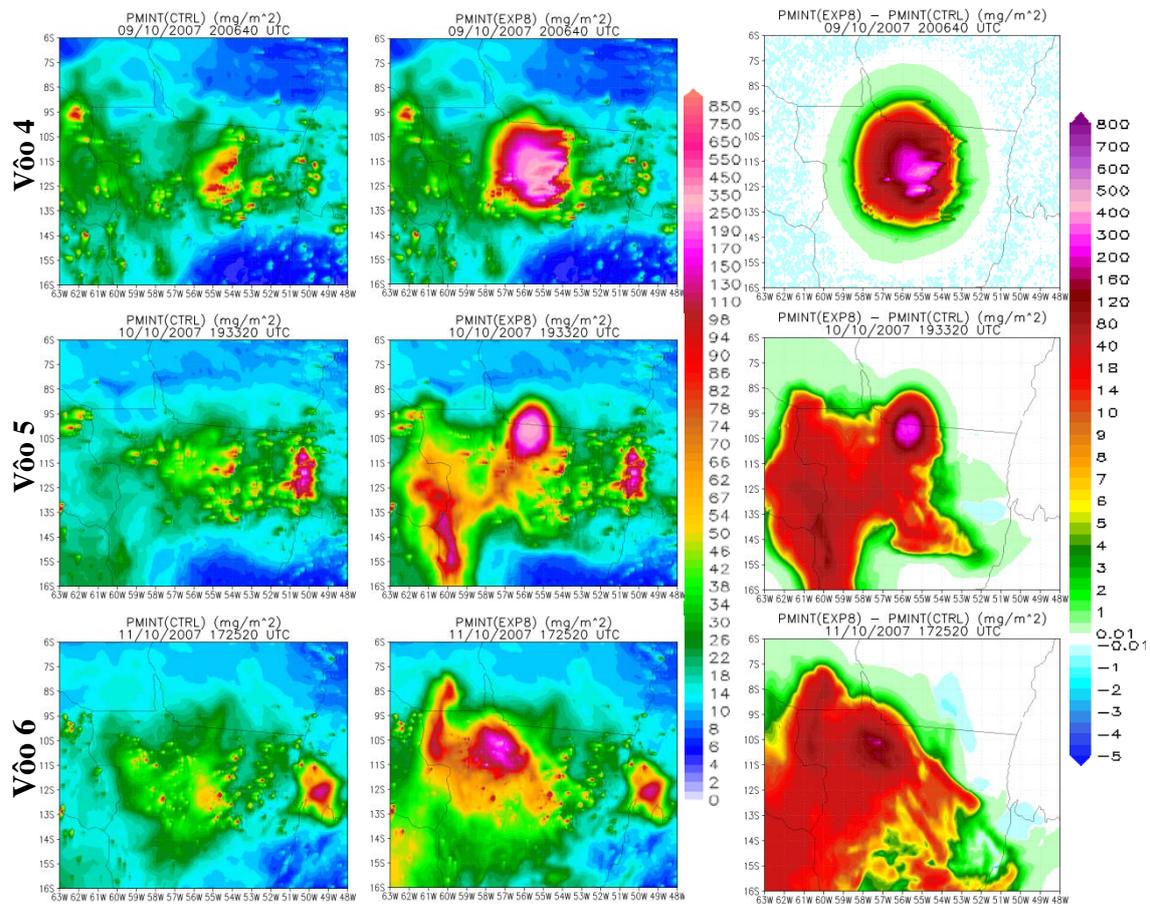


Figura 4.16 – Campo de PM_{INT} (mg/m^2) das análises dos experimentos CTRL (coluna esquerda), EXP8 (coluna central) e diferença entre eles (EXP8-CTRL) (coluna direita).

(continua)

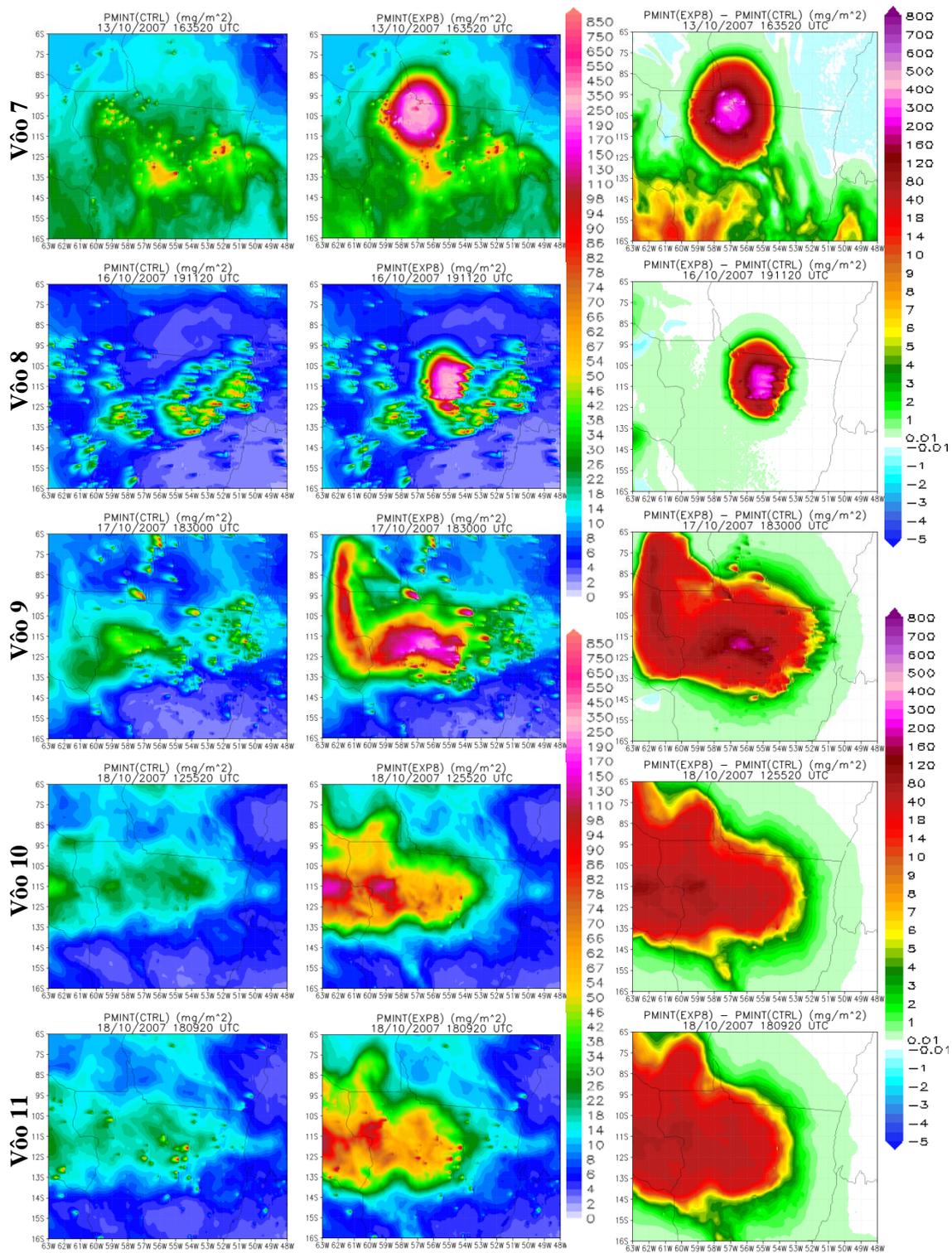


Figura 4.16 – Continuação
(continua)

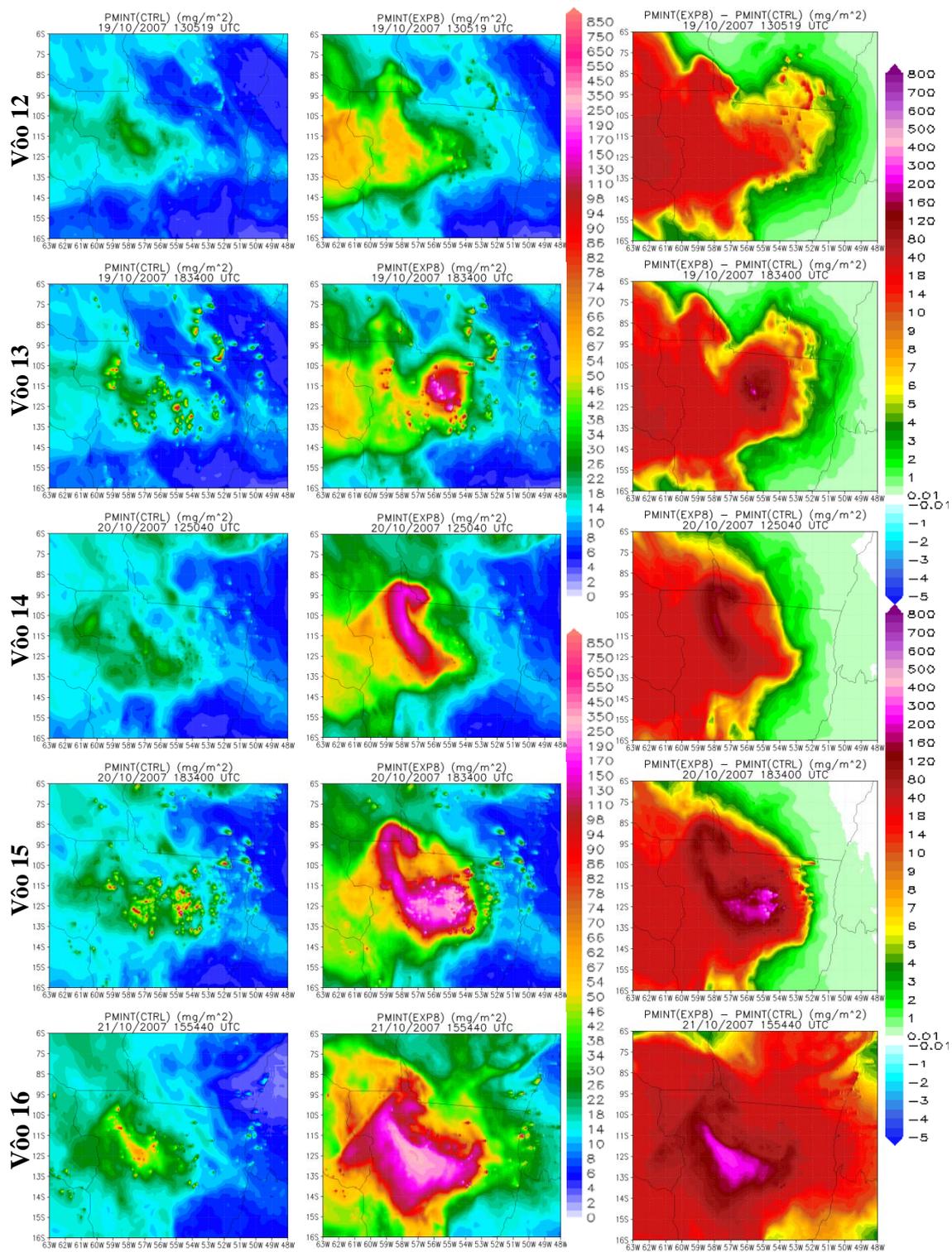


Figura 4.16 – Conclusão

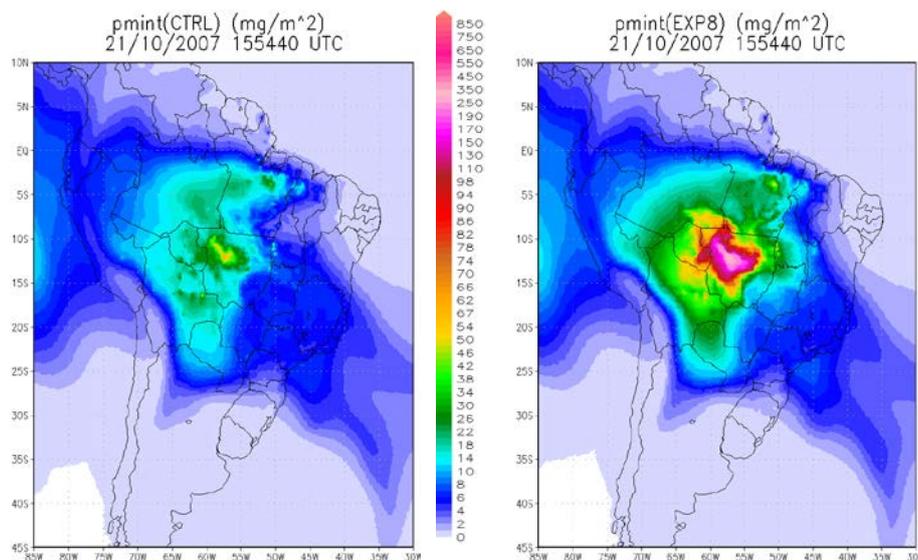


Figura 4.17 – PM_{INT} (mg/m^2) dos experimentos CTRL (esquerda) e EXP8 (direta).

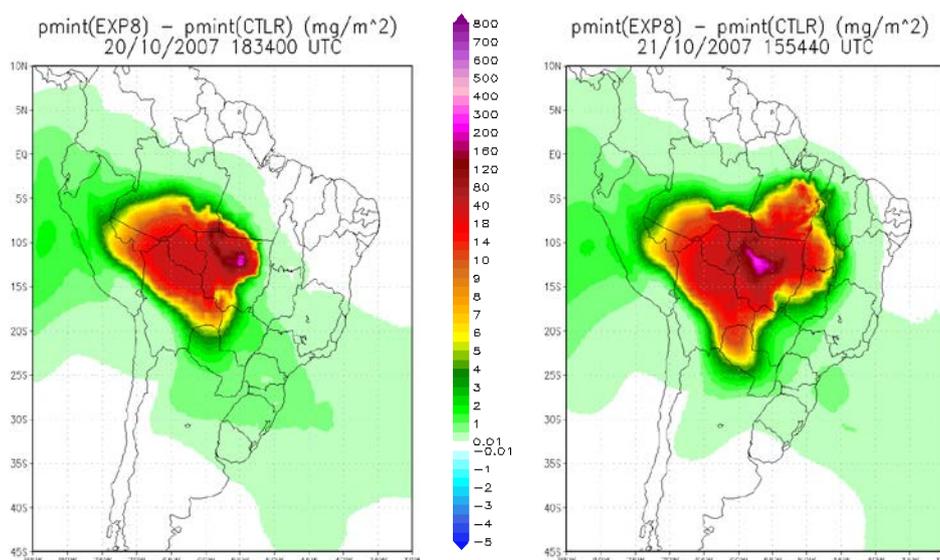


Figura 4.18 – Diferença entre PM_{INT} (mg/m^2) do EXP8 menos CTRL para os vô 15 (esquerda) e vô 16 (direita).

A assimilação de observações de concentração de massa de $PM_{2.5}$ sobre o norte de MT não impactou apenas a região a qual o *zfac* corrigiu. Com o transporte do material particulado, demais áreas da América do Sul são impactadas. Países vizinhos do Brasil como Peru, Bolívia, Paraguai e Argentina foram fortemente influenciados pelas sucessivas assimilações das observações coletadas durante a campanha CLAIM (Figura 4.18). Este resultado concorda com Freitas et al (2005), cujo estudo mostra que o padrão de transporte de material particulado na baixa troposfera sobre a AS é associado à Alta

Subtropical do Atlântico Sul, aos ventos alísios e à Cordilheira dos Andes, ocasionando um escoamento na direção sul, sudeste da AS.

4.7 Avaliação dos Erros da Análise

Uma avaliação estatística do sistema de assimilação de aerossóis foi feita com base nos valores de concentração de massa de $PM_{2.5}$ em cada ponto de grade da análise gerada ao longo do vôo e nas médias feitas com as observações de $PM_{2.5}$ da campanha ocorridas dentro do volume do respectivo ponto de grade. Esta metodologia foi aplicada com o objetivo de avaliar o desempenho do sistema ao assimilar valores de material particulado integrado na coluna aproximando o modelo às observações assimiladas.

Os experimentos conduziram a uma melhora do sistema com uma redução significativa do REQM (Figura 4.19). Os melhores resultados, como já foram discutidos, são do EXP8, cujo REQM em todos os vôos apresentaram os menores valores, exceto nos vôos 11 e 14, nos quais o EXP7 apresentou valores de REQM menores que o EXP8.

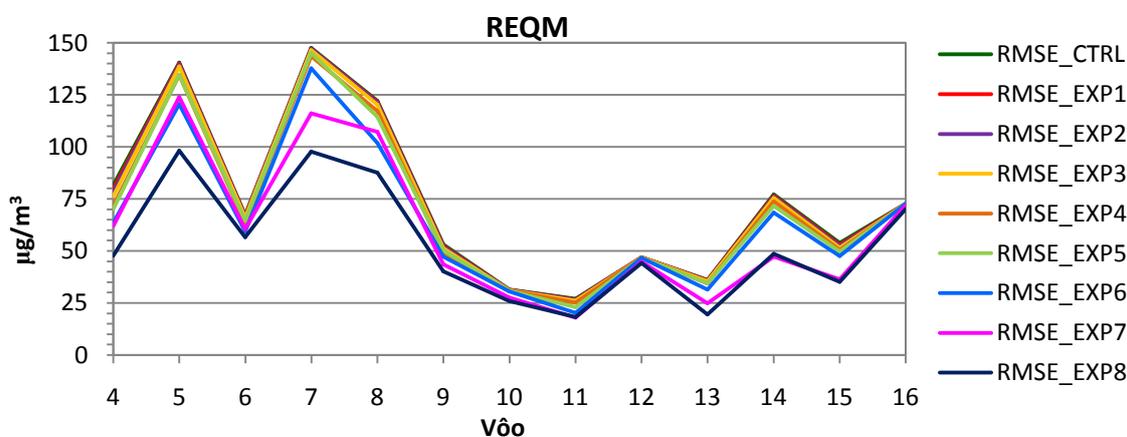


Figura 4.19 – Raiz do Erro Quadrático Médio (REQM) da concentração de massa de $PM_{2.5}$ do experimento CTRL e das análises de todos os experimentos.

Os valores de Erro Médio calculado para o experimento CTRL e para as análises dos experimentos EXP1 a EXP8 (Figura 4.20) apresentaram comportamento semelhante ao REQM.

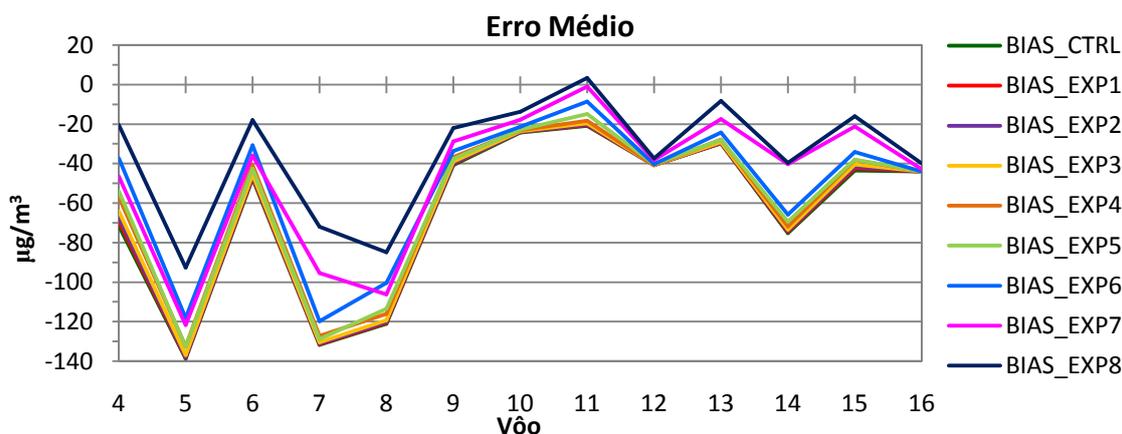


Figura 4.20 – Erro Médio da concentração de massa de $PM_{2.5}$ do experimento CTRL e das análises de todos os experimentos.

O Erro Relativo mostrou um comportamento semelhante aos índices anteriores, porém com algumas discrepâncias (Figura 4.21). Isto ocorreu porque o Erro Relativo pondera cada diferença entre a análise e a observação pelo valor da observação, o que causa maior sensibilidade aos valores observados. No vôo 4 ocorreram as maiores diferenças, devido aos baixos valores de concentração de material particulado nos primeiros horários do vôo. Para exemplificar o caso deste vôo, o Erro Relativo, considerando apenas o início do vôo até 19:35 UTC, seria de 2002%, enquanto o restante do vôo apresenta Erro Relativo de -36,5%. Assim conclui-se que para este caso os momentos em que a análise superestimou as observações foram mais significativos do que os momentos em que houve a subestimativa, causando o elevado valor de Erro Relativo. Outra diferença significativa entre os valores do Erro Relativo e do Erro Médio ocorreu nos vôos 6 e 10, em que o Erro Relativo apresenta uma tendência da análise de superestimar a concentração de $PM_{2.5}$, enquanto o Erro Médio apresenta tendência de subestimar para estes vôos. Em ambos os vôos, a maior parte dos valores da análise subestima os valores observados, porém nos pontos onde ocorreram superestimativas, o Erro Relativo foi grande, ocasionando valores positivos de Erro Relativo nos vôos 6 e 10.

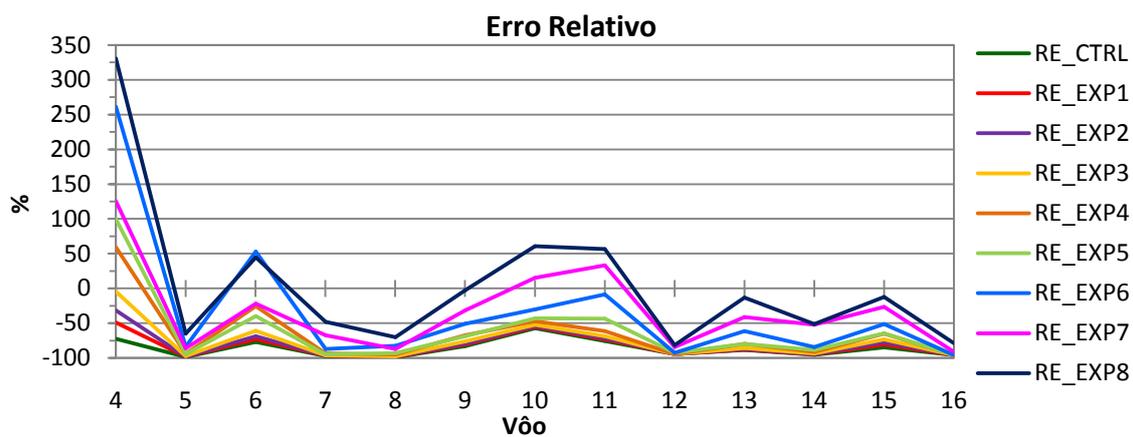


Figura 4.21 – Erro Relativo da concentração de massa de $PM_{2.5}$ do experimento CTRL e das análises dos experimentos EXP1 a EXP8 geradas pelo sistema de assimilação de aerossóis durante os vôos 4 ao 16 da campanha CLAIM.

5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Neste trabalho foi utilizado um sistema de assimilação de dados de aerossóis variacional em duas dimensões, acoplado ao modelo ambiental CCATT-BRAMS. Com este sistema foram realizados experimentos a fim de adaptá-lo para assimilar dados de concentração de massa de material particulado medido por aeronave, e obter os parâmetros do sistema com os quais haveria a melhor aproximação entre os valores de $PM_{2.5}$ modelados e as observações. Estas foram coletadas em outubro de 2007, durante a campanha CLAIM realizada no Estado do MT. Para alcançar tal objetivo foram realizados oito experimentos, nos quais foram implementados e testados novos valores de erros de *background*, um novo método de cálculo do fator de correção *zfac*, cujo propósito é de multiplicar o perfil de $PM_{2.5}$ original do modelo para corrigi-lo. Raios de influência inhomogêneos também foram implementados, aplicando um raio de influência calculado para cada voo. Além disso, foi utilizado um banco de dados suavizado, retirando das observações valores singulares muito elevados comparando com observações vizinhas.

A modificação do erro relativo de *background* (E_{RB}) de 50% para 70%, 100% e 200% resultou em uma diminuição do peso dado ao *background* durante a assimilação levando a maior aproximação dos valores de concentração de massa de $PM_{2.5}$ modelados aos valores observados durante a campanha. O E_{RB} de 200% apresentou o melhor desempenho entre os valores testados. Isto era esperado uma vez que tanto as observações como o *background* que possuem erros maiores, devem sofrer maiores penalizações atribuídas pelo sistema de assimilação.

A nova metodologia de cálculo do fator de correção *zfac* permitiu correções significativamente maiores, permitindo ao sistema alcançar valores de $PM_{2.5}$ mais elevados. O sistema de assimilação era suavizado pelo *stdobs* presente no cálculo da primeira versão do *zfac*, limitando o a variação dos seus valores. Com a nova definição deste fator, o impacto resultante da assimilação foi visivelmente maior, apresentando diminuições razoáveis nos erros.

Com a utilização de raios de influência homogêneos, as correções aplicadas impactavam a mesma área para todos os voos, independente das diferenças na área de abrangência

de cada vôo. Com a implementação dos raios de influência inhomogêneos, o sistema consegue calcular correções com valores satisfatórios para regiões mais abrangentes. Com a área de abrangência maior, a quantidade de massa adicionada foi maior. Isto foi uma das causas da diminuição na diferença entre observação e estimativa inicial observado em alguns vôos que possuíam efeitos da assimilação de vôos anteriores. Este resultado mostra também que o impacto da assimilação é ainda observado depois de várias horas após o momento em que ocorreu a assimilação.

O EXP8 apresentou os melhores resultados, com valores de concentração de massa de $PM_{2.5}$ muito próximos do observado. Esta análise mostrou uma diminuição no REQM de até $50 \mu g/m^3$ e no Erro médio de até $60 \mu g/m^3$. As análises geradas na assimilação das observações de vôos com perfis verticais observados durante sua trajetória acompanharam satisfatoriamente as observações, mostrando que o perfil vertical do modelo possui uma boa representação da verdade, porém com valores subestimados. Mas o sistema de assimilação foi capaz de corrigir esses valores baixos, aproximando de forma excelente a concentração de massa de $PM_{2.5}$ modelado ao observado. Ou seja, mesmo com um sistema de assimilação 2D-Var, a aproximação dos valores de $PM_{2.5}$ no perfil vertical das análises com as observações foram muito boas.

A suavização dos dados observados, com a retirada dos picos de concentração isolados diminuiu consideravelmente os erros das observações. Uma vez que a resolução do modelo utilizada e um sistema de assimilação bidimensional não seriam capazes de simular fenômenos de escala local, como plumas isoladas com dimensão inferior a escala da grade, a filtragem de medições com valores muito elevados comparadas com as medições vizinhas é uma abordagem válida para as configurações utilizadas neste trabalho. Com isso os erros das observações foram menores e assim a assimilação pôde aplicar correções maiores ao modelo, elevando os valores de $PM_{2.5}$ de fundo na atmosfera a valores próximos às observações.

Neste trabalho foi verificado que em casos de valores muito baixos de concentração de massa de $PM_{2.5}$ modelado, o sistema de assimilação não corrigiu de maneira satisfatória os valores modelados. Isto ocorreu devido a metodologia na qual se multiplica o fator de

correção z_{fac} ao campo com o qual foi calculado o *background* utilizado na assimilação. Essa metodologia seria desnecessária em um sistema de assimilação tridimensional, uma vez que o processo de assimilação seria feito diretamente em concentração de massa e não mais em concentração de massa integrada na coluna, acrescentando informação na distribuição vertical. Assim, a análise calculada pelo sistema de assimilação, substituiria os valores provenientes do modelo, e não mais os multiplicaria

Como sugestões para trabalhos futuros sugerem-se os seguintes desenvolvimentos:

- Implementar uma versão tridimensional do sistema variacional de assimilação, utilizando assim as observações de concentração de massa diretamente no sistema, no exato local em que foram obtidas;
- Utilizar um modelo de transferência radiativa que considera as informações de material particulado no balanço radiativo, verificando assim o impacto nas variáveis meteorológicas e permitindo a validação do sistema utilizando as medições de AOD disponíveis, por exemplo medições do MODIS e AERONET;
- Analisar o impacto da assimilação de dados de aerossóis coletados por aeronave na previsão numérica de qualidade do ar, verificando assim o ganho na previsão de poluentes, bem como quanto tempo um sinal significativo do aerossol assimilado permanece no campo modelado de $PM_{2.5}$.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADHIKARY, B. et al. A regional scale chemical transport modeling of Asian aerosols with data assimilation of AOD observations using optimal interpolation technique. **Atmospheric Environment**, v. 42, p. 8600-8615, 2008.

AGUIAR, A. "Chuva laranja" foi resultado de queimadas no Centro-Oeste. **Correio do Povo**. Porto Alegre, 13 ago. 2010. Notícias, Geral. Disponível em: <
<http://www.correiodopovo.com.br/Noticias/?Noticia=182043> >. Acesso em 15 jul. 2010.

ALBRECHT, B. A. Aerosol, Cloud Microphysics, and Fractional Cloudiness. **Science**, v. 245, p. 1227-1230, 1989.

ANDREAE, M. O. Biomass burning: Its history, use and distribution and its impact on environmental quality and global climate. In: LEVINE, J. S. (Ed.). **Global biomass burning: atmospheric, climatic, and biospheric implications**. Cambridge, USA: MIT Press, 1991. p.3-21.

ANDREAE, M. O. et al. Smoking Rain Clouds over the Amazon. **Science**, v. 303, p. 1337-1342, 2004.

ARTAXO, P. et al. Physical and chemical properties of aerosols in the wet and dry seasons in Rondônia, Amazonia. **Journal of Geophysical Research**, v. 107, p. 8.081–8.095, 2002.

_____. Efeitos Climáticos de partículas de aerossóis biogênicos e emitidos em queimadas na Amazônia. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 21, p. 168-189, 2006.

BENEDETTI, A. et al. Aerosol analysis and forecast in the European Centre for Medium-Range Weather Forecasts Integrated Forecast System: 2. Data assimilation. **Journal of Geophysical Research**, v. 114, p. D13205, 2009. Disponível em: <
<http://www.agu.org/journals/jd/jd0913/2008JD011115/2008JD011115.pdf> >.

BERGTHÓRSSONZ, P.; DÖÖS, B. R. Numerical Weather Map Analysis. **Tellus**, v. 7, n. 3, p. 329-340, 1955. Disponível em: <
<http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/j.2153-3490.1955.tb01170.x/abstract> >.

BLANCHARD, D. C.; WOODCOCK, A. H. Production, concentration, and vertical distribution of the sea salt aerosol. **Annals of the New York Academy of Sciences**, v. 338, p. 330–347, 1980.

BONATTI, J. P. Modelo de Circulação Geral Atmosférico do CPTEC. **Climanálise Especial: edição comemorativa de 10 anos**. Cachoeira Paulista, Brasil: INPE, 1996. cap. 26, p.198-202.

BOUQUIER, F.; COURTIER, P. Data assimilation concepts and methods. **Meteorological Training Course Lecture Series**, 1999. Disponível em: < http://www.ecmwf.int/newsevents/training/rcourse_notes/DATA_ASSIMILATION/AS_SIM_CONCEPTS/index.html >.

BRANIŠ, M. et al. Exposure of children to airborne particulate matter of different size fractions during indoor physical education at school. **Building and Environment**, v. 44, p. 1246-1252, 2009.

Climanálise - Boletim de Monitoramento e Análise Climática. Cachoeira Paulista, Brasil: CPTEC/INPE, v.22, n.10, 2007. p.40. Disponível em: < <http://climanalise.cptec.inpe.br/~> >.

CHARLSON, R. J. et al. Climate forcing by anthropogenic aerosols. **Science**, v. 255, p. 423– 430, 1992.

CHEN, C.; COTTON, W. R. The Physics of the Marine Stratocumulus-Capped Mixed Layer. **Journal of the Atmospheric Sciences**, v. 44, n. 22, p. 2951–2977., 15 de outubro 1987. Disponível em: < <http://journals.ametsoc.org/doi/pdf/10.1175/1520-0469%281987%29044%3C2951%3ATPOTMS%3E2.0.CO%3B2> >.

COAKLEY, J. A. et al. The effect of tropospheric aerosol on the earth's radiation budget: A parameterization for climate models. **Journal of the Atmospheric Sciences**, v. 40, p. 116-138, 1983.

COHEN, J. C. P. **Um estudo observacional de linhas de instabilidade na Amazônia**. 1989. 174 p. (INPE-4865-TDL/376). Dissertação (Mestrado em Meteorologia) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 1989. Disponível em: <<http://urlib.net/sid.inpe.br/MTC-m13@80/2005/08.18.17.31>>. Acesso em: 05 mar. 2011.

COHN, S. E. et al. Assessing the effects of data selection with the dao physical-space statistical analysis system. **Monthly Weather Review**, v. 126, n. 11, p. 2913–2926, nov. 1998.

COLLINS, W. D. et al. Simulating aerosols using a chemical transport model with assimilation of satellite aerosol retrievals: Methodology for INDOEX. **Journal of Geophysical Research**, v. 106, p. 7313-7336, 2001.

COURTIER, P. Dual formulation of four-dimensional variational assimilation. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v. 120, n. 544, p. 2449-2462, 1997.

CRESSMAN, G. P. An Operational Objective Analysis System. **Monthly Weather Review**, v. 87, n. 10, p. 367-374, 1959. Disponível em: <
<http://journals.ametsoc.org/doi/abs/10.1175/1520-0493%281959%29087%3C0367%3AAOOAS%3E2.0.CO%3B2> >.

DA SILVA, A. M. et al. Assessing the effects of data selection with dao's physical-space statistical analysis system. In: INTERNATIONAL WMO SYMPOSIUM ON ASSIMILATION OF OBSERVATION IN METEOROLOGY AND OCEANOGRAPHY, 02, 1995, Tokyo. **proceedings...** Tokyo, Japan, 1995.
DECESARI, S. et al. Characterization of the organic composition of aerosols from Rondônia, Brazil, during the LBA-SMOCC 2002 experiment and its representation through model compounds. **Atmospheric Chemistry and Physics**, v. 6, p. 375–402, 2006.

DERBER, J.; BOUTTIER, F. A reformulation of the background error covariance in the ECMWF global data assimilation system. **Tellus**, v. 51A, p. 195-221, 1999.

DÍAZ, R. V.; DOMINGUEZ, E. R. Health risk by inhalation of PM_{2.5} in the metropolitan zone of the City of Mexico. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, v. 72, p. 866-871, 2009.

DOCKERY, D. W. et al. An association between air pollution and mortality in six U.S. cities. **New England Journal of Medicine**, v. 329, p. 1753-1759, 1993.

ECMWF. **IFS Documentation – Cy31r**. p.177 2006. Disponível em: <
<http://www.ecmwf.int/research/ifsdocs/CY31r1/index.html> >. Acesso em: 30 mai. 2009.

ELBERN, H.; SCHMIDT, H. Ozone episode analysis by four-dimensional variational chemistry data assimilation. **Journal of Geophysical Research**, v. 106, n. D4, p. 3569-3590, 27 de Fevereiro 2001.

ELBERN, H. et al. Emission rate and chemical state estimation by 4-dimensional variational inversion. **Atmospheric Chemistry and Physics**, v. 7, p. 3749–3769, 2007. Disponível em: < www.atmos-chem-phys.net/7/3749/2007/ >.

ENGELSTAEDTER, S. et al. North African dust emissions and transport. **Earth-Science Reviews**, v. 79, p. 73–100, 2006.

FISH, G. et al. Clima na Amazônia. **Climanálise Especial: edição comemorativa de 10 anos**, p. 24-41, 1996.

FORSTER, P. et al. Changes in Atmospheric Constituents and in Radiative Forcing. In: SOLOMON, S.; QIN, D., *et al* (Ed.). **Climate change 2007: the physical science basis. contribution of working group I to the fourth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2007. cap. 2, p.129-234.

FREITAS, S. R. et al. Monitoring the Transport of Biomass Burning Emissions in South America. **Environmental Fluid Mechanics**, v. 5, p. 135-167, 2005.

_____. The Coupled Aerosol and Tracer Transport model to the Brazilian developments on the Regional Atmospheric Modeling System (CATT-BRAMS) – Part 1: Model description and evaluation. **Atmospheric Chemistry and Physics**, v. 9 p. 2843–2861, 2009. Disponível em: < www.atmos-chem-phys.net/9/2843/2009/ >.

GANDIN, L. **Objective analysis of meteorological fields**. Leningrad: Hydrometeoizdat, 1963. 242p

GEVAERD, R.; FREITAS, S. Estimativa Operacional da Umidade de Solo para Iniciação de Modelos de Previsão Numérica da Atmosfera - Parte I: Descrição da Metodologia e Validação. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 21, n. 3a, p. 59-73, 2006.

GIGLIO, L. et al. An enhanced contextual fire detection algorithm for MODIS. **Remote Sensing of Environment**, v. 87, p. 273-282, 2003. Disponível em: < http://servir.msfc.nasa.gov/library/papers/Giglio2003_RSE.pdf >.

GONG, S. L.; ZHANG, X. Y. CUACE/Dust – an integrated system of observation and modeling systems for operational dust forecasting in Asia. **Atmospheric Chemistry and Physics**, v. 8, p. 2333-2340, 2008.

HANEA, R. G. et al. Data assimilation of ground-level ozone in Europe with a Kalman filter and chemistry transport model. **Journal of Geophysical Research**, v. 109, p. D10302, 2004.

HERDIES, D. L. et al. The Impact of High-Resolution SALLJEX Data on Global NCEP Analyses. **Journal of Climate**, v. 20, p. 5765, 2007.

HOELZEMANN, J. J. et al. PSAS and 4D-var Data Assimilation for Chemical State Analysis by Urban and Rural Observation Sites. **Physics and Chemistry of the Earth (B)**, v. 26, n. 10, p. 807-812, 2001.

HOELZEMANN, J. J. **Global wildland fire emission modeling for atmospheric chemistry studies**. 2006. 206 p. (ISSN 1614 -1199). Tese publicada no Reports on Earth System Science, 28/2006 (Doutorado em Geociências) - Max Planck Institute for Meteorology / University of Hamburg, Hamburg, Germany, 2006.

HOELZEMANN, J. J. et al. Assimilação de aerossóis atmosféricos por satélite no modelo de transporte químico CATT – BRAMS. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 13., 2007a, Florianópolis, Brasil. **Anais...** São José dos Campos, SP: INPE, 21 a 26 abr., 2007. p.4473-4475. DVD + e-book. ISBN 978-85-17-00031-7.

_____. **Assimilation of atmospheric aerosols into the CATT-BRAMS model.** Santiago, Chile, 2007b. Palestra realizada no 1st SAEMC-IAI, STIC-AmSud Workshop - Data Assimilation Theory and Applications in Chemical Weather Forecast, em 5-7 jun. de 2007. Disponível em: < http://dataassimilation07.cmm.uchile.cl/documentos/chile_DA_jjh_final.pdf >.

_____. Regional representativity of AERONET observation sites in South America determined by correlation studies with MODIS Aerosol Optical Depth. **Journal of Geophysical Research**, 2009.

_____. Asimilación de aerosoles sobre Sudamérica utilizando el modelo atmosférico ccatt-brams. In: Congreso Colombiano y Conferencia Internacional de Calidad del Aire y Salud Pública, 2., 2010, Bogotá, Colombia. **memorias...** Bogotá, Colombia: Ediciones Uniandes, 2010. p.428. ISBN 978-958-695-486-0.

_____. Assimilation of satellite and ground-based Aerosol Optical Depth over South America into the Brazilian CCATT-BRAMS model. **Journal of Geophysical Research**, em fase de elaboração.

HOLBEN, B. N. et al. AERONET—A Federated Instrument Network and Data Archive for Aerosol Characterization. **Remote Sensing of Environment**, v. 66, p. 1-16, 1998.

HOUGHTON, R. A. et al. The spatial distribution of forest biomass in the Brazilian Amazon: a comparison of estimates. **Global Change Biology** v. 7, p. 731-746, 2001. Disponível em: < <http://www.rainforestcoalition.org/documents/SpatialdistributionofforestbiomassintheAmazon.pdf> >.

HUNT, B. R. et al. Efficient data assimilation for spatiotemporal chaos: A local ensemble transform Kalman filter **Physica D**, v. 230, n. 1-2, p. 112–126, jun. 2007.

IGNOTTI, E. et al. Efeitos das queimadas na Amazônia: método de seleção dos municípios segundo indicadores de saúde. **Revista Brasileira de Epidemiologia**, v. 10(4), p. 453-464, 2007.

_____. Impact on human health of particulate matter emitted from burnings in the Brazilian Amazon region. **Revista de Saúde Pública**, v. 44(1), p. 121-130, 2010.

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). **Mapas trimestrais de focos de Queimadas:** Queimadas. Disponível em: < <http://www.cptec.inpe.br/queimadas/> >. Acesso em 20 nov. 2010

Intergovernmental Panel on Climate Change. Climate change 2007: the physical science basis. Contribution of working group I to 734 the fourth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2007. 996p

JACOBSON, M. Z. **Fundamentals of atmospheric modeling.** 2. ed. New York, USA: Cambridge University Press, 1999. 813p

Japan Meteorological Agency. **Numerical Weather Prediction.** 2009. Disponível em: < http://www.jma.go.jp/jma/jma-eng/jma-center/nwp/specifications_analysis.pdf >. Acesso em: 30 mai. 2009.

KALNAY, E. **Atmospheric modeling, data assimilation and predictability.** New York, USA: Cambridge University Press, 2003. 345p

KAUFMAN, Y. J. et al. Operational remote sensing of tropospheric aerosol over land from EOS moderate resolution imaging spectroradiometer. **Journal of Geophysical Research**, v. 102, p. 17,051-17,067, 1997.

KHAIN, A. et al. Aerosol impact on the dynamics and microphysics of deep convective clouds. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v. 131, p. 2639-2663, 2005.

LAHOZ, W. A. et al. Data assimilation of stratospheric constituents: a review. **Atmospheric Chemistry and Physics**, v. 7, p. 5745-5773, 2007. Disponível em: < <http://www.atmos-chem-phys.org/7/5745/2007/acp-7-5745-2007.pdf> >.

LONGO, K. M. et al. Numerical modelling of the biomass-burning aerosol direct radiative effects on the thermodynamics structure of the atmosphere and convective precipitation. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON SOUTHERN HEMISPHERE METEOROLOGY AND OCEANOGRAPHY (ICSHMO), 8., 2006, Foz do Iguaçu. **proceedings...** São José dos Campos: INPE, 2006. p.283-289. CD-ROM. ISBN 85-17-00023-4.

_____. The Coupled Aerosol and Tracer Transport model to the Brazilian developments on the Regional Atmospheric Modeling System (CATT-BRAMS) Part 2: Model sensitivity to the biomass burning inventories. **Atmospheric Chemistry and Physics**, v. 10, p. 5785-5795, 2010.

_____. The Chemistry-CATT BRAMS model: a new efficient tool for atmospheric chemistry studies at local and regional scales. **Geoscientific Model Development**, em fase de elaboração.

LOON, M. V. et al. Data assimilation of ozone in the atmospheric transport chemistry model LOTOS. **Environmental Modelling & Software**, v. 15, p. 603-609, 2000.

MAENHAUT, W. et al. Two-year study of atmospheric aerosols in Alta Floresta, Brazil: Multielemental composition and source apportionment. **Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B**, v. 189, p. 243–248, 2002.

MATTOS, J. G. Z. **Sensibilidade do uso de "Pseudo-temps" na assimilação de dados do modelo de circulação geral atmosférica do CPTEC/COLA**. 2006. 129 p. (INPE-14794-TDI/1237). Dissertação (Mestrado em Meteorologia) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2006. Disponível em: <<http://urlib.net/sid.inpe.br/mtc-m17@80/2007/02.15.17.37>>. Acesso em: 05 mar. 2011.

MÉNARD, R. et al. Assimilation of Stratospheric Chemical Tracer Observations Using a Kalman Filter. Part I: Formulation. **Monthly Weather Review**, v. 128, p. 2654-2671, 2000.

MILLMAN, A. et al. Air Pollution Threatens the Health of Children in China. **Pediatrics**, v. 122, p. 620-628, 2008. Disponível em: <<http://www.pediatrics.org/cgi/content/full/122/3/620>>.

MOLION, L. C. B. On the Dynamic Climatology of the Amazon Basin and associated Rain Producing Mechanisms. In: DICKINSON, R. E. (Ed.). **The Geophysiology of Amazonia Vegetation and Climate Interactions** New York: Wiley & Sons, 1987. p.391-407.

National Aeronautics and Space Administration (NASA). **MOD08_D3.005 e MYD08_D3.051: Giovanni**. Disponível em: <<http://disc.sci.gsfc.nasa.gov/giovanni>>. Acesso em 20 nov. 2010

National Aeronautics and Space Administration (NASA). **Aerosol Optical Depth (AOD): Aerosol Robotic Network** Disponível em: <<http://aeronet.gsfc.nasa.gov>>. Acesso em 08 abr. 2009

NEPSTAD, D. et al. Road paving, fire regime feedbacks, and the future of Amazon forests. **Forest Ecology and Management**, v. 154, n. 3, p. 395-407, 2001.

NIU, T. et al. Data assimilation of dust aerosol observations for the CUACE/dust forecasting system. **Atmospheric Chemistry and Physics**, v. 8, p. 3473-3482, 2008.

NOBRE, C. A. et al. Amazonian Deforestation and Regional Climate Change. **Journal of Climate**, v. 4, p. 957-988, out. 1991.

OLSON, J. S. et al. **Major world ecosystem complexes ranked by carbon in live vegetation: A database**. Carbon Dioxide Information Analysis Center Oak Ridge National Laboratory. Oak Ridge, USA, 10.3334/CDIAC/lue.ndp017. 2000. Disponível em: <<http://cdiac.esd.ornl.gov/ndps/ndp017.html>>.

PARRISH, D. F.; DERBER, J. C. The National Meteorological Center's Spectral Statistical-Interpolation Analysis System. **Monthly Weather Review**, v. 120, p. 1747-1763, 1992.

PENNER, J. E. et al. Aerosols, their Direct and Indirect Effects. In: NYENZI, B. e PROSPERO, J. (Ed.). **Climate change 2001: the scientific basis. Contribution of working group I to the third assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2001. cap. 5, p.189-348.

PIAZZOLA, J.; DESPIAU, S. Vertical distribution of aerosol particles near the air-sea interface in coastal zone. **Journal of Aerosol Science**, v. 28, p. 1579-1599, 1997.

PRINS, E. M. et al. An overview of GOES-8 diurnal fire and smoke results for SCAR-B and 1995 fire season in South America. **Journal of Geophysical Research**, v. 123, n. D24, p. 31,821-31,835, 1998.

PRODES. **Monitoramento da cobertura florestal da Amazônia por satélites - sistema PRODES, DETER, DEGRAD e queimadas 2007-2008**. INPE. São José dos Campos. 2008.

PROSPERO, J. M. et al. Environmental characterization of global sources of atmospheric soil dust identified with the NIMBUS 7 Total Ozone Mapping Spectrometer (TOMS) absorbing aerosol product. **Reviews of Geophysics**, v. 40(1), p. 2-1-2-31, 2002.

PYNE, S. J. Sky of ash, Earth of Ash: A Brief History of Fire in the United States. In: (Ed.). **Global biomass burning: atmospheric, climatic, and biospheric implications**: MIT Press, 1991. p.504-511.

REYNOLDS, R. W. et al. An Improved In Situ and Satellite SST Analysis for Climate. **Journa of Climate**, v. 15, p. 1609-1625, 2002.

ROSENFELD, D. et al. Flood or Drought: How Do Aerosols Affect Precipitation? **Science**, v. 321, p. 1309-1313, 2008.

SCHWINGER, J. **Four-dimensional variational data assimilation for estimation of the atmospheric chemical state from the tropopause to the lower mesosphere**. 2006. 141 p. Tese (Doutorado em Matemática e Ciências Naturais) - University of Cologne, Cologne, 2006.

SEINFELD, J. H.; PANDIS, S. N. **Atmospheric chemistry and physics : from air pollution to climate change**. 2. ed. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2006. 1225p

SESTINI, M. F. et al. Mapa de cobertura da terra da Amazônia Legal para uso em modelos meteorológicos. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 11. (SBSR), 2003, Belo Horizonte. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2003. p. 2901 - 2906. CD-ROM. ISBN 85-17-00017-X. (INPE-16175-PRE/10778). Disponível em: <<http://urlib.net/ltid.inpe.br/sbsr/2002/11.22.20.34>>. Acesso em: 05 mar. 2011.

SETZER, A. W.; PEREIRA, M. C. Amazonia biomass burnings in 1987 and an estimate of their tropospheric emissions. **Ambio**, v. 20, n. 1, p. 19–22, 1991.

STOWE, L. L. et al. Development, validation and potential enhancement to the second generation operational aerosol product at the National Environmental Satellite, Data and Information Service of the National Oceanic and Atmospheric Administration. **Journal of Geophysical Research**, v. 102, p. 16,923– 16,934, 1997.

STRUNK, A. **Tropospheric chemical state estimation by four-dimensional variational data assimilation on nested grids**. 2006. 139 p. Tese (Doutorado em Matemática e Ciências Naturais) - University of Cologne, Cologne, 2006.

TALAGRAND, O. Assimilation of Observations, an Introduction. **Journal of the Meteorological Society of Japan**, v. 75, p. 191-209, 1997.

TAYLOR, J. R. **Introduction to error analysis : the study of uncertainties in physical measurements**. 2. ed. Sausalito, Ca University Science Books, 1997. 327p

TORRES, O. et al. A long-term record of aerosol optical depth from TOMS observations and comparison to ARONET measurements. **Journal of Atmospheric Science**, v. 59, p. 398–413, 2002.

TRIPOLI, G. J.; COTTON, W. R. The Colorado State University three-dimensional cloud mesoscale model, 1982: PartI: General theoretical framework and sensitivity experiments. **Journal de Recherches Atmospheriques**, v. 16, p. 185-220, 1982.

TWOMEY, S. Pollution and Planetary Albedo. **Atmospheric Environment**, v. 8, p. 1251-1256, 1974.

_____. The influence of pollution on the shortwave albedo of clouds. **Journal of the Atmospheric Sciences**, v. 34, p. 1149– 1152, 1977.

WALKO, R. L. et al. Coupled Atmosphere–Biophysics–Hydrology Models for Environmental Modeling. **Journal of Applied Meteorology**, v. 39, p. 931-944, 2000. Disponível em: < <http://journals.ametsoc.org/doi/abs/10.1175/1520-0450%282000%29039%3C0931%3ACABHMF%3E2.0.CO%3B2> >.

WALLACE, J. M.; HOBBS, P. V. **Atmospheric science: an introductory survey**. 2. ed. Burlington, USA: Elsevier Inc, 2006. 483p

WANG, J. et al. Effects of aerosol organics on cloud condensation nucleus (CCN) concentration and first indirect aerosol effect. **Atmospheric Chemistry and Physics Discussions**, v. 8, p. 9783-9818, 2008.

WARD, D. E. et al. Smoke and Fire Characteristics for Cerrado and Deforestation Burns in Brazil' BASE-B Experiment. **Journal of Geophysical Research**, v. 97, n. D13, p. 14,601-14,619, 1992. Disponível em: <
<http://www.agu.org/journals/jd/v097/iD13/92JD01218/92JD01218.pdf> >.

WEAVER, A.; COURTIER, P. Correlation modelling on the sphere using a generalized diffusion equation. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v. 127, p. 1815-1846, 2001.

World Health Organization. **WHO Air quality guidelines for particulate matter, ozone, nitrogen dioxide and sulfur dioxide - Global update 2005 - Summary of risk assessment**. Geneva, Switzerland: WHO Press, 2005. 20p Disponível em: <
http://whqlibdoc.who.int/hq/2006/WHO_SDE_PHE_OEH_06.02_eng.pdf >.

WILKS, D. S. **Statistical methods in the atmospheric sciences**. 2. ed. Burlington, USA: Elsevier Inc., 2006. 630p

WINKER, D. M. et al. Initial performance assessment of CALIOP. **Geophysical Research Letters**, v. 34, p. L19803, 2007. Disponível em: <
<http://www.agu.org/journals/gl/gl0719/2007GL030135/2007GL030135.pdf> >.

YANG, Y. Q. et al. Sand/dust storm processes in Northeast Asia and associated large-scale circulations. **Atmospheric Chemistry and Physics**, v. 8, p. 25–33, 2008. Disponível em: < www.atmos-chem-phys.net/8/25/2008/ >.

YEVICH, R.; LOGAN, J. A. An assessment of biofuel use and burning of agricultural waste in the developing world. **Global Biogeochemical Cycles**, v. 17, n. 4, 1095, p. 6-1 - 6-21, 2003. Disponível em: <
<http://www.agu.org/journals/gb/gb0304/2002GB001952/2002GB001952.pdf> >.

ZHANG, X. Y. et al. Sources of Asian dust and role of climate change versus desertification in Asian dust emission. **Geophysical Research Letters**, v. 30, n. 24, p. ASC 8 -- 1 - ASC 8 -- 4, 2003.

**APÊNDICE A – RESULTADOS DOS EXPERIMENTOS CTRL, EXP1,
EXP2, EXP3, EXP4, EXP5 E EXP6**

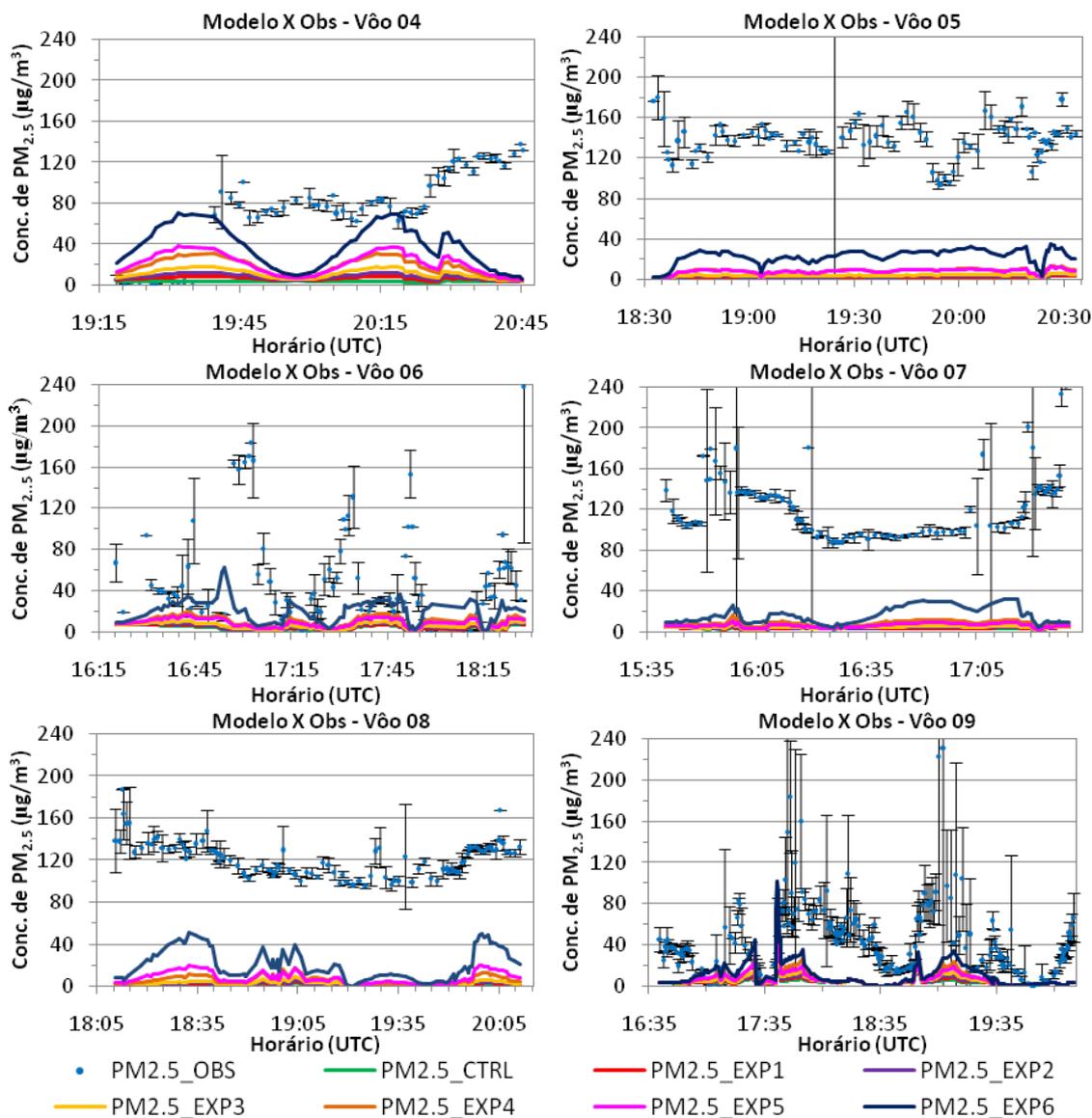


Figura A.1 – Comparação de PM_{2.5} (µg/m³) observado (pontos azuis) com os experimentos CTRL, EXP1, EXP2, EXP3, EXP4, EXP5 e EXP6 ao longo da trajetória dos vôos 4 ao 16 da campanha CLAIM.

(continua)

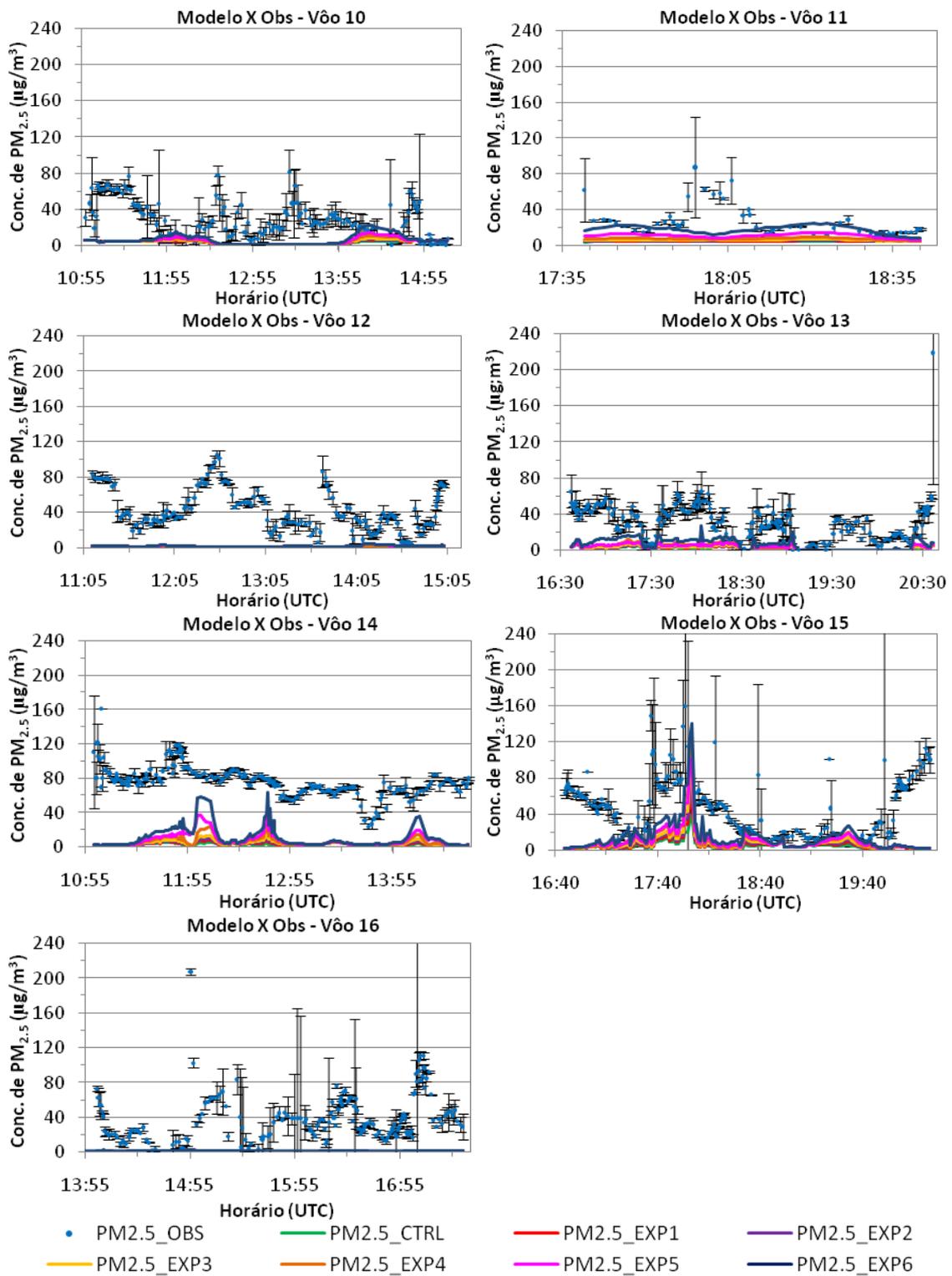


Figura A.1 - Conclusão

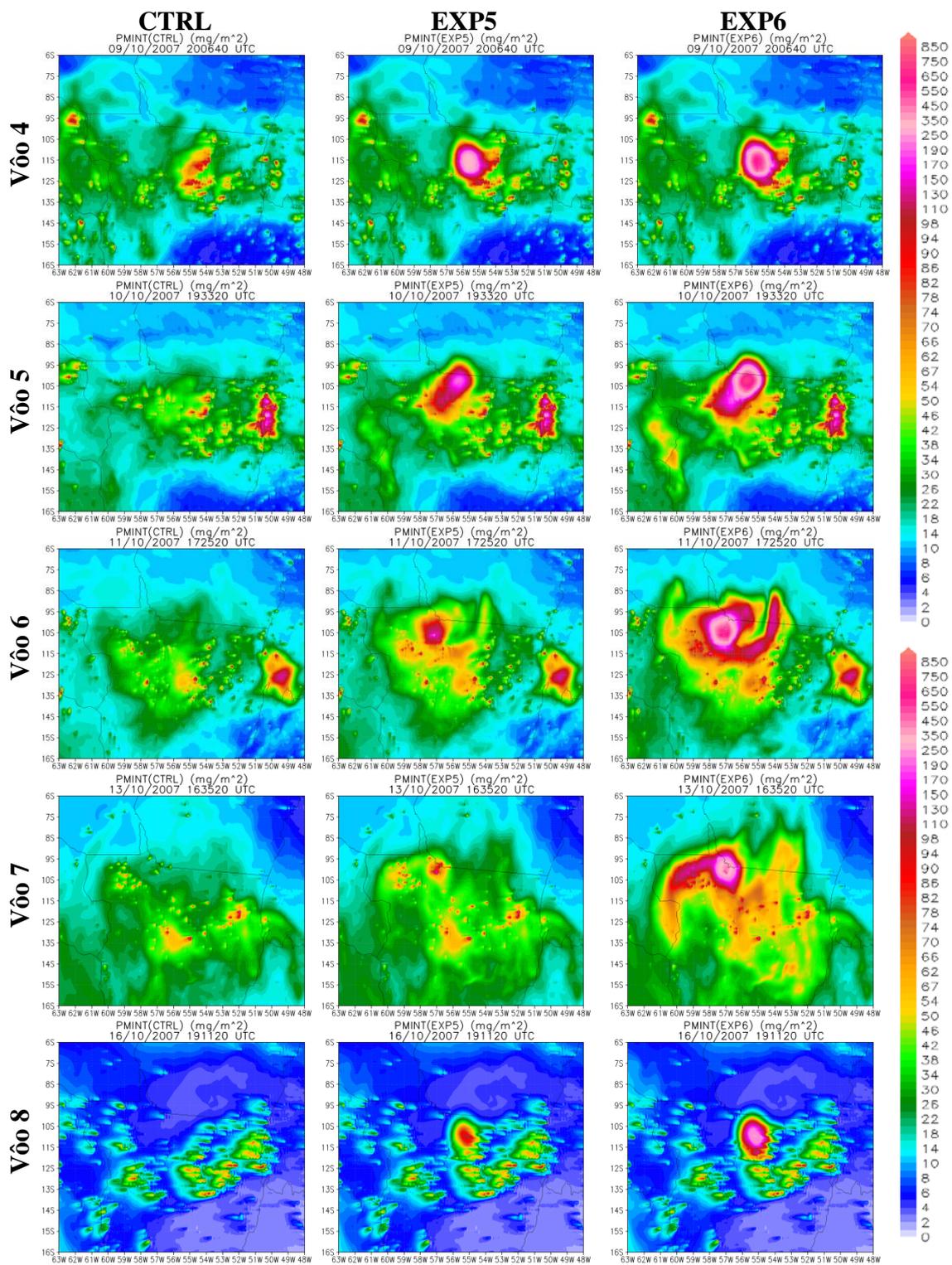


Figura A.2 – PM_{INT} (mg/m²) das análises geradas pela assimilação das observações dos vôos 4 ao 16 da campanha CLAIM, nos experimentos CTRL (coluna esquerda), EXP5 (coluna central) e EXP6 (coluna direita).

(continua)

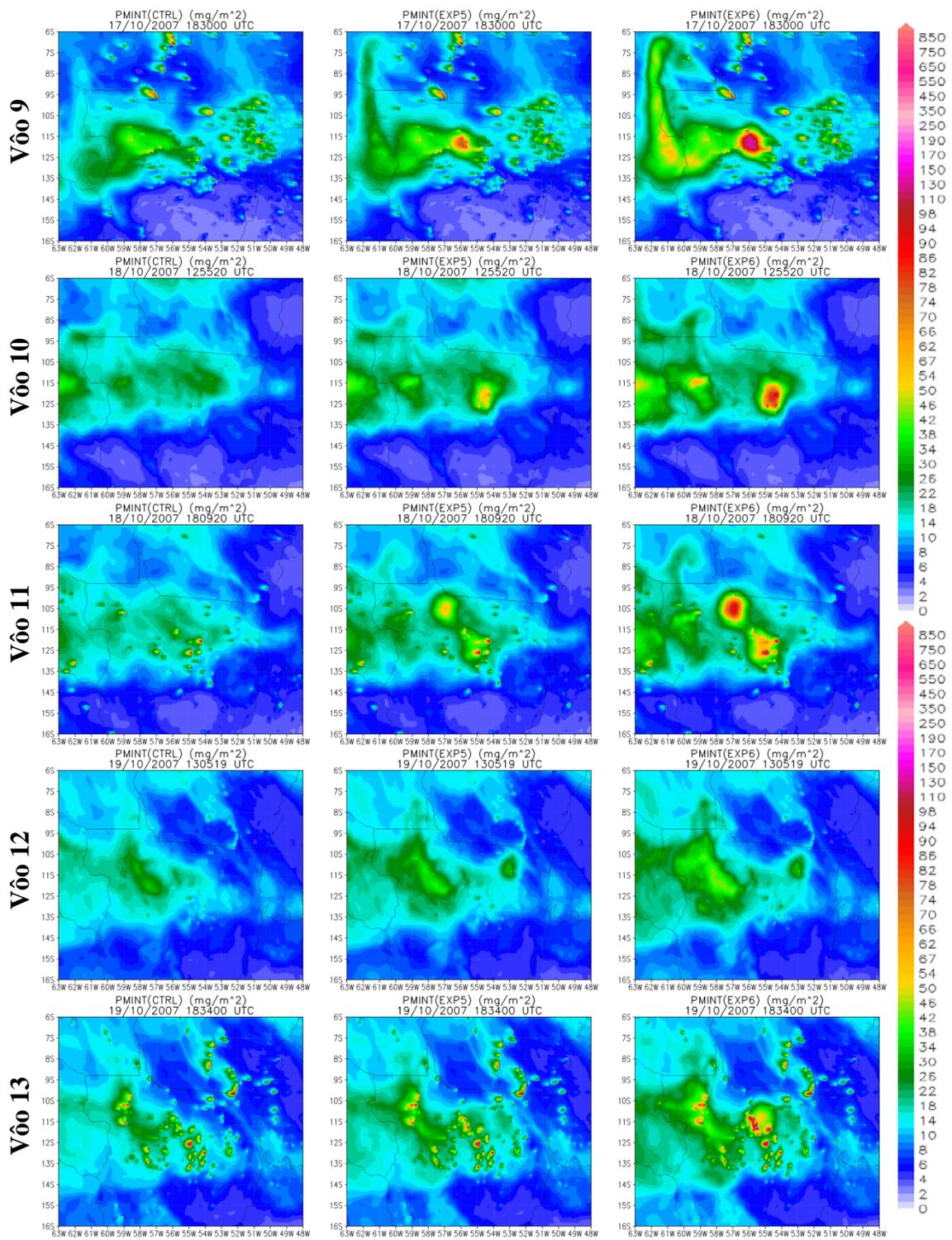


Figura A.2 – Continuação
(continua)

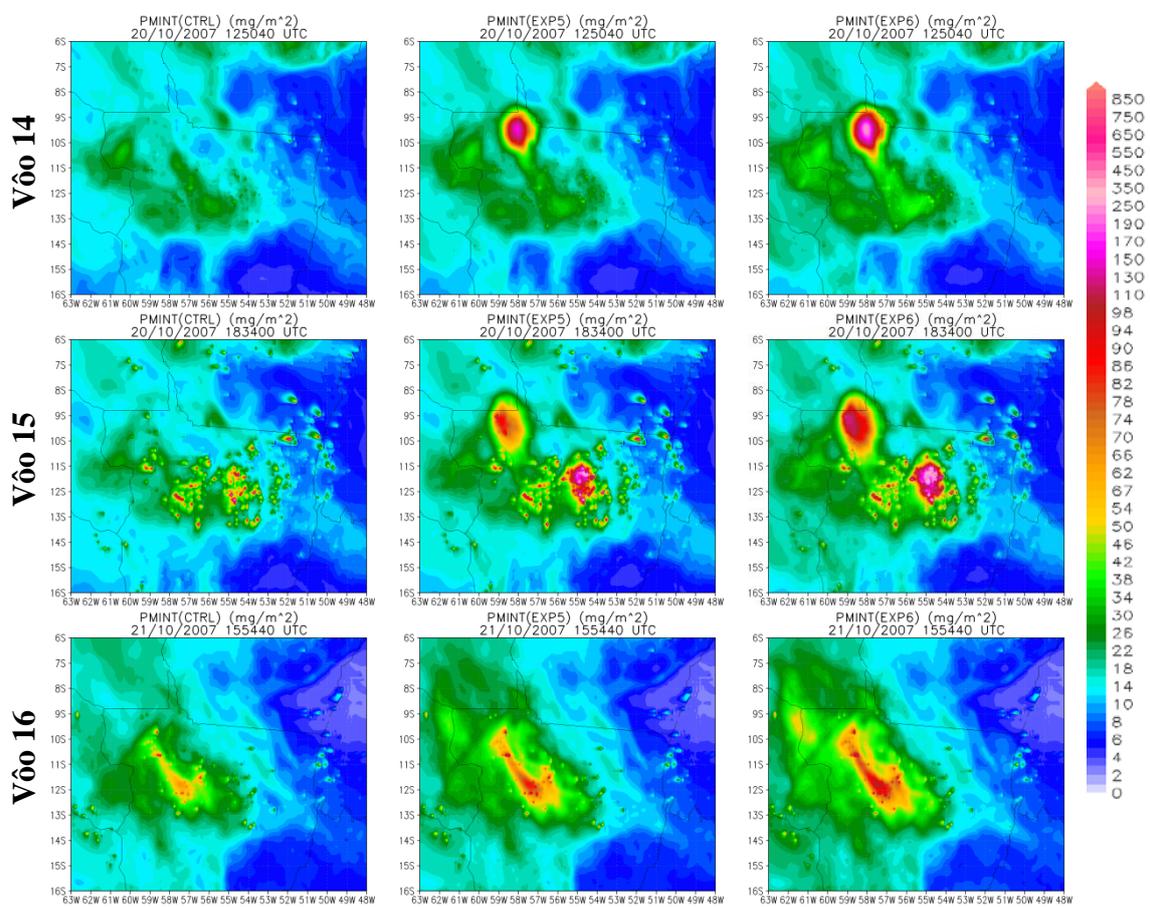


Figura A.2 – Conclusão

APÊNDICE B – FATOR DE CORREÇÃO ZFAC DO EXP8

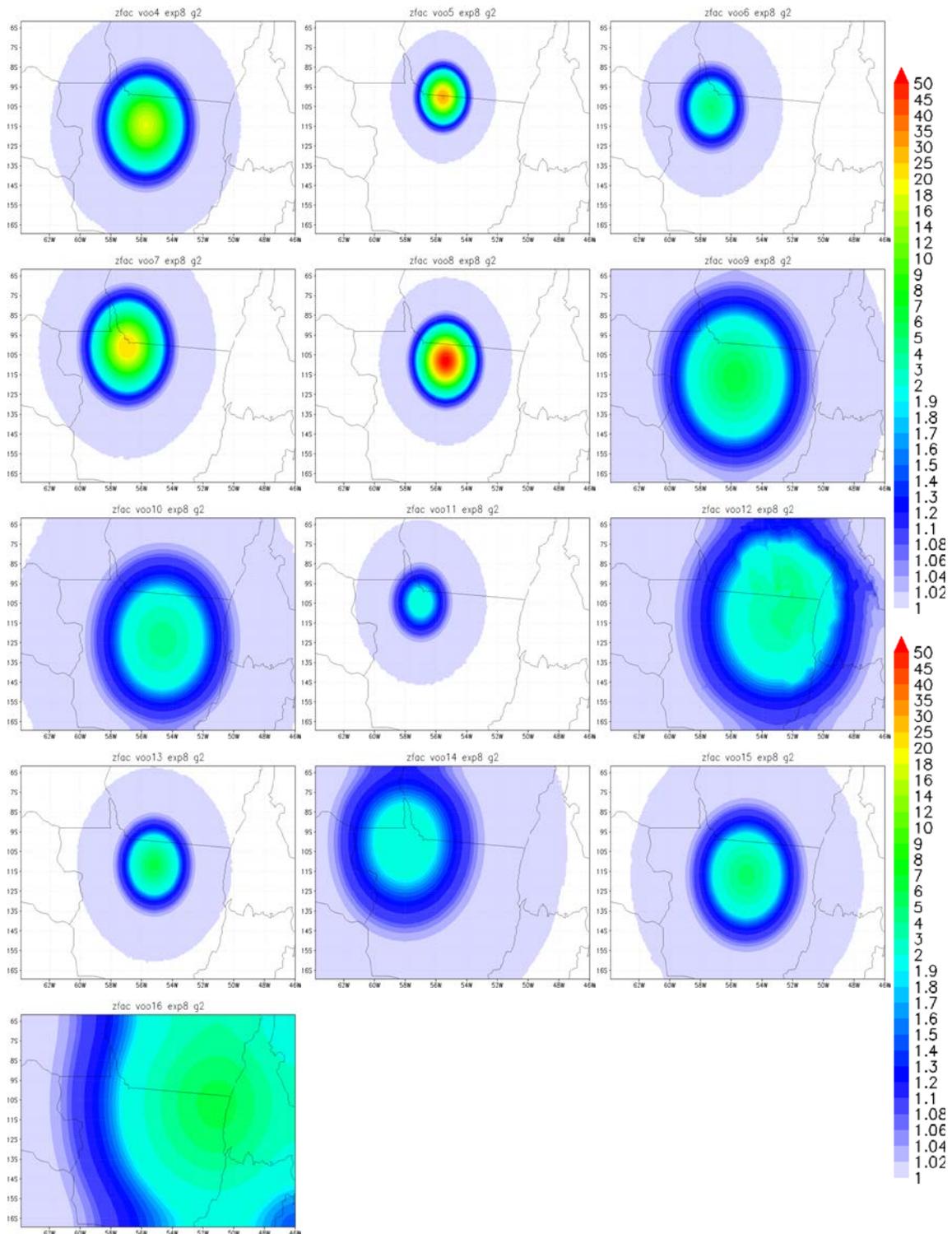


Figura B.1 – Distribuição espacial do fator de correção $zfac$ calculado pelo sistema de assimilação no EXP8 para os vôos 4 ao 16 da campanha CLAIM.