



Ministério da
Ciência e Tecnologia



INPE-15390-TDI/1407

**O USO DE SATÉLITES AMBIENTAIS PARA A
ESTIMATIVA DOS FLUXOS DE GASES TRAÇOS E DE
AEROSSÓIS LIBERADOS NA QUEIMA DE BIOMASSA
E SUA ASSIMILAÇÃO EM MODELOS NUMÉRICOS DE
QUALIDADE DO AR**

Gabriel Pereira

Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto,
orientada pelos Drs. Nelson Jesus Ferreira e Elisabete Caria Moraes, aprovada em
31 de março de 2008

Registro do documento original:

<<http://urlib.net/sid.inpe.br/mtc-m17@80/2008/02.13.16.15>>

INPE
São José dos Campos
2008

PUBLICADO POR:

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE

Gabinete do Diretor (GB)

Serviço de Informação e Documentação (SID)

Caixa Postal 515 - CEP 12.245-970

São José dos Campos - SP - Brasil

Tel.:(012) 3945-6911/6923

Fax: (012) 3945-6919

E-mail: pubtc@sid.inpe.br

CONSELHO DE EDITORAÇÃO:

Presidente:

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

Membros:

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

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

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

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

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

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

BIBLIOTECA DIGITAL:

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

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

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

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

REVISÃO E NORMALIZAÇÃO DOCUMENTÁRIA:

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

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

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

EDITORAÇÃO ELETRÔNICA:

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



Ministério da
Ciência e Tecnologia



INPE-15390-TDI/1407

**O USO DE SATÉLITES AMBIENTAIS PARA A
ESTIMATIVA DOS FLUXOS DE GASES TRAÇOS E DE
AEROSSÓIS LIBERADOS NA QUEIMA DE BIOMASSA
E SUA ASSIMILAÇÃO EM MODELOS NUMÉRICOS DE
QUALIDADE DO AR**

Gabriel Pereira

Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto,
orientada pelos Drs. Nelson Jesus Ferreira e Elisabete Caria Moraes, aprovada em
31 de março de 2008

Registro do documento original:

<<http://urlib.net/sid.inpe.br/mtc-m17@80/2008/02.13.16.15>>

INPE
São José dos Campos
2008

P414u Pereira, Gabriel.

O uso de satélites ambientais para a estimativa dos fluxos de gases traços e de aerossóis liberados na queima de biomassa e sua assimilação em modelos numéricos de qualidade do ar / Gabriel Pereira. – São José dos Campos: INPE, 2008.

105p. ; (INPE-15390-TDI/1407)

Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2008.

1. Queimadas. 2. Energia Radiativa do Fogo (ERF). 3. Coeficiente de emissão baseado na ERF. 4. CCATT-BRAMS. 5. Gases do efeito estufa. I. Título.

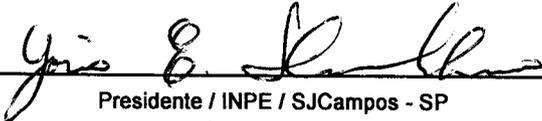
CDU 528.8

Copyright © 2008 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, microfílmico, reprográfico ou outros, sem a permissão escrita da Editora, com exceção de qualquer material fornecido especificamente no propósito de ser entrado e executado num sistema computacional, para o uso exclusivo do leitor da obra.

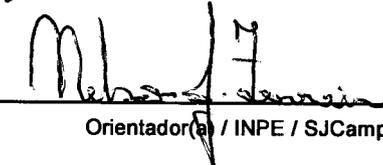
Copyright © 2008 by MCT/INPE. No part of this publication may be reproduced, stored in a retrieval system, or transmitted in any form or by any means, electronic, mechanical, photocopying, microfilming, recording or otherwise, without written permission from the Publisher, with the exception of any material 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
Sensoriamento Remoto

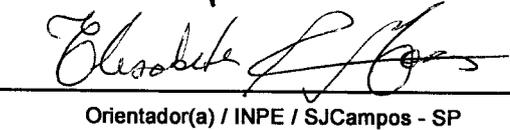
Dr. Yosio Edemir Shimabukuro


Presidente / INPE / SJCampos - SP

Dr. Nelson Jesus Ferreira


Orientador(a) / INPE / SJCampos - SP

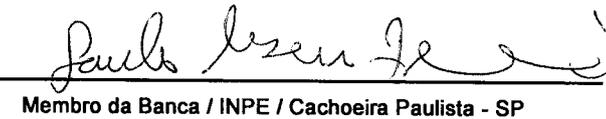
Dra. Elisabete Caria Moraes


Orientador(a) / INPE / SJCampos - SP

Dr. Alberto Waingort Setzer


Membro da Banca / INPE / SJCampos - SP

Dr. Saulo Ribeiro Freitas


Membro da Banca / INPE / Cachoeira Paulista - SP

Dr. Irving Foster Brown


Convidado(a) / WHRC / Rio Branco - AC

Aluno (a): Gabriel Pereira

São José dos Campos, 31 de Março de 2008

“A própria estrutura das combinações geográficas nos impede de considerar isoladamente os fatores que as compõem (...). Eles existem, somente, como elementos da combinação e é nas combinações de que fazem parte que convém apreciá-los. (...), devemos, então, procurar estabelecer as relações que os encadeiam aos demais elementos da combinação e a função que lhes cabe no processo em que participa a combinação e no dinamismo que a anima”.

André Cholley, 1948

AGRADECIMENTOS

Agradecer a todos que ajudaram a construir esta dissertação é uma árdua tarefa, pois se corre o risco de não mencionar pessoas que, de alguma maneira, contribuíram com o desenvolvimento deste projeto. Desta forma, gostaria de agradecer a todos os meus amigos que surgiram nestes dois anos de “INPE”, muitos não contribuíram na dissertação propriamente dita, porém, contribuíram para o amadurecimento profissional e, principalmente, pessoal. Gostaria de agradecer a meus pais, Edson Luiz Pereira e Eliete Maria Pereira, pelo contínuo apoio em todos estes anos, ensinando-me a importância da construção e coerência de meus próprios valores. Ainda, sou grato aos meus orientadores, Dr. Nelson Jesus Ferreira, Dra. Elisabete Caria Moraes e Dr. Saulo Ribeiro de Freitas, pela confiança em mim depositada, por toda ajuda prestada, pelas inúmeras dúvidas sanadas, pelo grande apoio, pelos ensinamentos e inúmeras lições aprendidas. À Francielle da Silva Cardozo pelo apoio, pelas inúmeras revisões textuais e pelas sugestões dadas na dissertação. Aos amigos feitos no INPE: Egídio Arai, Marcos Adami, Marcelo Alonso e Rafael Melo pela grande disposição em me ajudar nestes dois anos nos assuntos referentes à dissertação. E por último, aos colegas do vôlei que no decorrer destes anos permitiram uma descontração semanal, com um voleibol de mais alto nível, que como diria Mancuso (Francisco S. L. Moura): têm muito empenho, ataques pesados, defesas impossíveis, bloqueios monstruosos (...). A todos um MUITO OBRIGADO!

RESUMO

As queimadas na América do Sul afetam significativamente o meio ambiente, alterando o balanço de radiação da superfície e da atmosfera, os ciclos biogeoquímicos e hidrológicos e causam problemas de saúde para populações localizadas nestas áreas. O presente trabalho avalia o emprego da energia radiativa do fogo (ERF) para estimar as emissões de aerossóis carbonáceos (material particulado com diâmetro menor que $2,5\mu\text{m}$ – $\text{PM}_{2,5\mu\text{m}}$) e monóxido de carbono (CO) para o período de queimadas na América do Sul. Realizaram-se 16 experimentos de combustão de pequena escala próximos ao laboratório de radiometria (LARAD) do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) para a obtenção do coeficiente que relaciona o consumo de biomassa com a ERF liberada. Utilizaram-se os dados provenientes dos produtos do MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*): MOD14/MYD14 (*MODIS Thermal Anomalies / Fire 5-MIN L2 SWATH 1KM V004*) e MOD04/MYD04 (*MODIS Atmosphere Aerosol Product*); e o produto derivado do satélite GOES (*Geostationary Operational Environmental Satellite*): WFABBA (*Wildfire Automated Biomass Burning Algorithm*) para originar os coeficientes de emissão baseados na ERF para o satélite GOES e para calcular o total de gases e aerossóis emitidos para a atmosfera. Através do CCATT-BRAMS (*Coupled Chemistry-Aerosol-Tracer Transport model coupled to Brazilian Regional Atmospheric Modelling System*) estimou-se a emissão do CO e de $\text{PM}_{2,5\mu\text{m}}$ provenientes da queima de biomassa, onde foram avaliados sete métodos diferentes, comparados com os dados de campo obtidos nos experimentos do LBA (*Large Scale Biosphere-Atmosphere*) SMOCC (*Smoke, Aerosols, Clouds, rainfall, and Climate*) e RaCCI (*Radiation, Cloud, and Climate Interactions*). As estimativas da emissão de $\text{PM}_{2,5\mu\text{m}}$ ($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) e CO (ppb) modelados no CCATT-BRAMS apresentaram resultados similares, porém, a grande maioria obteve coeficientes de determinação e correlação com os dados do SMOCC/RaCCI superiores a 0,70 e 80%, respectivamente. Desta forma, o método que utiliza a ERF do MODIS e do GOES pode ser apontado com uma metodologia inovadora, pois mostrou uma boa correlação com os dados medidos em campo, apresentando um coeficiente de determinação de 0,74 e correlação de 86% para os dados de $\text{PM}_{2,5\mu\text{m}}$ e coeficiente de determinação de 0,72 e correlação de 85% para os dados de CO.

MODELLING THE TRACE GASES AND AEROSOLS FLUXES EMITED IN THE BIOMASS BURNING BY REMOTE SENSING

ABSTRACT

The biomass burning in South America affects the environment, altering the surface and atmosphere radiation balance, the biogeochemical and hydrological cycles and cause health problems for people located in these areas. The main objective of this work is to use the fire radiative energy (FRE) to estimate the carbonaceous aerosols (particulate matter with diameter less than 2.5 μm) and carbon monoxide emissions for the South America burning season. Sixteen small scale combustion experiments near the laboratory of radiometry at INPE were performed to obtain the coefficient that relates the consumption of biomass with the ERF released. The MOD14/MYD14, MOD04/MYD04 and WFABBA products were utilized to calculate the total amount of gases and aerosols emitted to the atmosphere. The seven methods that use the FRE to estimate the emission of gases and aerosols were modeled using CCATT-BRAMS and evaluated via data obtained from field experiments in the LBA SMOCC/RaCCI. The application of the seven methods to estimate the emission of PM_{2,5} μm and CO modeled in the CCATT-BRAMS showed similar results, however, the coefficients of determination and correlation values were greater than 0.70 and 80%, respectively. Thus, the method that uses the MODIS and GOES FRE seems to be a new methodology which showed a good correlation with the SMOCC/RaCCI data measured on the field, with a coefficient of determination of 0.74 and correlation of 86% for the PM_{2,5} μm data and coefficient of determination of 0.72 and correlation of 85% for the CO data.

SUMÁRIO

Pág.

LISTA DE FIGURAS

LISTA DE TABELAS

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

LISTA DE SÍMBOLOS

CAPÍTULO 1	27
INTRODUÇÃO	27
1.1 Considerações Iniciais	27
1.1 Problema	30
1.2 Objetivos Gerais	30
1.2.1 Objetivos Específicos	30
CAPÍTULO 2	33
FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	33
2.1 As queimadas na América do Sul e os métodos para detecção	33
2.2 Método Dozier	34
2.3 Energia Radiativa do Fogo (ERF)	35
2.4 Coeficientes de emissão baseados na ERF	37
CAPÍTULO 3	41
ÁREA DE ESTUDO	41
3.1 América do Sul	41
3.2 O regime de chuvas no Brasil	41
CAPÍTULO 4	45
MATERIAIS E MÉTODOS	45
4.1 Produtos MOD04 e MYD04	45
4.2 Produtos MOD14 e MYD14	46
4.3 Produtos WFABBA/GOES	46
4.4 FieldSpec Pro FR	47
4.5 Descrição do experimento com a ERF	48
4.6 Método para gerar o Coeficiente de Emissão para o GOES	49
4.7 Modelo CCATT-BRAMS	50
4.8 Integração da FRP e dados de entrada no modelo CCATT-BRAMS	52
4.9 Avaliação das metodologias e comparação com dados de campo	54

CAPÍTULO 5	55
COEFICIENTES DE EMISSÃO BASEADOS NA ERF PARA O GOES E DISTRIBUIÇÃO MENSAL DAS QUEIMADAS NA AMÉRICA DO SUL	55
5.1 Coeficientes de emissão para o GOES	55
5.2 Focos de Queimada Acumulados para a América do Sul	58
CAPÍTULO 6	65
OS EXPERIMENTOS COM A ERF E SUAS RESPOSTAS ESPECTRAIS	65
6.1 Respostas Espectrais e a Radiância liberada	65
6.2 Relação entre o consumo de biomassa e a ERF	68
CAPÍTULO 7	71
MODELAGEM NO CCATT-BRAMS E AVALIAÇÃO DOS RESULTADOS.....	71
7.1 Comparação do PM _{2,5µm} simulado com os dados do SMOCC/RaCCI.....	71
7.2 Comparação do CO modelado com os dados de campo do SMOCC/RaCCI.....	81
7.3 Avaliação dos Perfis de CO.....	87
7.4 Discussões sobre os métodos.....	89
CAPÍTULO 8	93
CONSIDERAÇÕES FINAIS E CONCLUSÕES	93
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	97
ANEXO A – CORRELAÇÕES BOOTSSTRAP	101
A.1 Anexo	101

LISTA DE FIGURAS

	<u>Pág.</u>
2.1 – Localização da área de estudo e coeficientes de emissão baseados na ERF	38
3.1 – Climatologia Trimestral de Precipitação para o Brasil.....	43
4.1 – Estrutura montada para o campo e posicionamento dos equipamentos	48
5.1 – Coeficiente de emissão baseado na ERF para a Região Amazônica e Cerrado. ...	56
5.2 – Coeficiente de emissão baseado na ERF para a Região Nordeste do Brasil.	57
5.3 – Coeficiente de emissão baseado na ERF para a Região da América do Sul abaixo de 20°.	57
5.4 – Focos de queimada acumulados (1992 – 2007).....	58
5.5 – Focos Mensais de queimada acumulados de Janeiro a Junho.	61
5.6 – Focos Mensais de queimada acumulados de Julho a Dezembro.	62
6.1 – Comportamento Espectral da vegetação colhida no Pantanal (vermelho), da vegetação retirada no INPE de São José dos Campos (verde) e da placa Spectralon (azul).....	65
6.2 – Exemplo de amostras da radiância espectral de um experimento no intervalo de tempo de 5 a 395 segundos após o início do processo de combustão.	67
6.3 – Temperatura Máxima, Média e Mínima dos experimentos realizados com a ERF.....	68
6.4 – a) Exemplo da variação da temperatura com o tempo de um dos experimentos; b) Relação entre a ERF e o tempo total de combustão.	69
6.5 – Regressão linear relacionando o total de biomassa consumida e a ERF medida pelo FieldSpec Pro II.	70
7.1 – Mapa da emissão total de $PM_{2,5\mu m}$ ($\mu g.m^{-3}$) para o período de 15/Jul/2002 a 15/Nov/2002; Série temporal do $PM_{2,5\mu m}$ ($\mu g.m^{-3}$) observado (em preto) e o estimado pelo método tradicional do CCATT-BRAMS (em azul claro); Regressão linear entre o dado modelado e o dado observado.....	73
7.2 – Mapa da emissão total de $PM_{2,5\mu m}$ ($\mu g.m^{-3}$) para o período de 15/Jul/2002 a 15/Nov/2002; Série temporal do $PM_{2,5\mu m}$ ($\mu g.m^{-3}$) observado (em preto) e o estimado	

pela ERF para o MODIS e GOES (em verde); Regressão linear entre o dado modelado e o dado observado.	74
7.3 – Mapa da emissão total de $PM_{2,5\mu m}$ ($\mu g.m^{-3}$) para o período de 15/Jul/2002 a 15/Nov/2002; Série temporal do $PM_{2,5\mu m}$ ($\mu g.m^{-3}$) observado (em preto) e o estimado pela ERF para o MODIS e GOES tradicional em uma grade de 4 km (em azul escuro); Regressão linear entre o dado modelado e o dado observado.	75
7.4 – Mapa da emissão total de $PM_{2,5\mu m}$ ($\mu g.m^{-3}$) para o período de 15/Jul/2002 a 15/Nov/2002; Série temporal do $PM_{2,5\mu m}$ ($\mu g.m^{-3}$) observado (em preto) e o estimado pela ERF para o MODIS e GOES tradicional em uma grade de 50 km (em vermelho); Regressão linear entre o dado modelado e o dado observado.....	76
7.5 – Mapa da emissão total de $PM_{2,5\mu m}$ ($\mu g.m^{-3}$) para o período de 15/Jul/2002 a 15/Nov/2002; Série temporal do $PM_{2,5\mu m}$ ($\mu g.m^{-3}$) observado (em preto) e o estimado pelo método proposto por Wooster et al. (2005) (em laranja); Regressão linear entre o dado modelado e o dado observado.....	78
7.6 – Mapa da emissão total de $PM_{2,5\mu m}$ ($\mu g.m^{-3}$) para o período de 15/Jul/2002 a 15/Nov/2002; Série temporal do $PM_{2,5\mu m}$ ($\mu g.m^{-3}$) observado (em preto) e o estimado pelo método proposto por Freeborn et al. (2008) (em marrom); Regressão linear entre o dado modelado e o dado observado.....	79
7.7 – Mapa da emissão total de $PM_{2,5\mu m}$ ($\mu g.m^{-3}$) para o período de 15/Jul/2002 a 15/Nov/2002; Série temporal do $PM_{2,5\mu m}$ ($\mu g.m^{-3}$) observado (em preto) e o estimado pelo coeficiente obtido no experimento do LARAD/INPE (em cinza); Regressão linear entre o dado modelado e o dado observado.....	80
7.8 – Mapa da emissão total de CO (ppb) para o período de 15/Jul/2002 a 15/Nov/2002; Série temporal do CO (ppb) observado (em preto) e o estimado pelo método tradicional do CCATT-BRAMS (em azul claro); Regressão linear entre o dado modelado e o dado observado.....	81
7.9 – Mapa da emissão total de CO (ppb) para o período de 15/Jul/2002 a 15/Nov/2002; Série temporal do CO (ppb) observado (em preto) e o estimado pela ERF para o MODIS e GOES (em verde); Regressão linear entre o dado modelado e o dado observado.	82

7.10 – Mapa da emissão total de CO (ppb) para o período de 15/Jul/2002 a 15/Nov/2002; Série temporal do CO (ppb) observado (em preto) e o estimado pela ERF para o MODIS e GOES tradicional em uma grade de 4 km (em azul escuro); Regressão linear entre o dado modelado e o dado observado.	83
7.11 – Mapa da emissão total de CO (ppb) para o período de 15/Jul/2002 a 15/Nov/2002; Série temporal do CO (ppb) observado (em preto) e o estimado pela ERF para o MODIS e GOES tradicional em uma grade de 50 km (em vermelho); Regressão linear entre o dado modelado e o dado observado.	84
7.12 – Mapa da emissão total de CO (ppb) para o período de 15/Jul/2002 a 15/Nov/2002; Série temporal do CO (ppb) observado (em preto) e o estimado pelo método proposto por Wooster et al. (2005) (em laranja); Regressão linear entre o dado modelado e o dado observado.	85
7.13 – Mapa da emissão total de CO (ppb) para o período de 15/Jul/2002 a 15/Nov/2002; Série temporal do CO observado (em preto) e o estimado pelo método proposto por Freeborn et al. (2008) (em marrom); Regressão linear entre o dado modelado e o dado observado.	86
7.14 – Mapa da emissão total de CO (ppb) para o período de 15/Jul/2002 a 15/Nov/2002; Série temporal do CO observado (em preto) e o estimado pelo coeficiente obtido no LARAD/INPE (em cinza); Regressão linear entre o dado modelado e o dado observado.	87
7.15 – Média dos Perfis de CO observados nas campanhas do SMOCC/RaCCI realizadas próximas a região de Ouro Preto do Oeste / RO (em preto); Desvio padrão das observações (em cinza); Dados modelados pelo CCATT-BRAMS com barras de erros horizontais que indicam o desvio padrão (múltiplas cores).	88
7.16 – Fonte utilizada como entrada de dados no modelo CCATT-BRAMS com o total PM _{2,5µm} no período de 15/Jul/2002 a 15/Nov/2002. Estimativa pelo método tradicional do CCATT-BRAMS em (a); Dados estimados a partir da ERF do MODIS e do GOES em (b).	90
7.17 – Distribuição dos coeficientes de correlação, dos coeficientes angulares e dos interceptos utilizando a técnica de <i>bootstrap</i> para os dados do 3BEM e do MODIS e GOES ERF.	91

LISTA DE TABELAS

	<u>Pág.</u>
5.1 – Focos Acumulados por Estados e Países	59
7.1 – Nomenclatura adotada	71

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ABBA – Automated Biomass Burning Algorithm
AC – Acre
AL – Alagoas
AM – Amazonas
AP – Amapá
AVHRR – Advanced Very High Resolution Radiometer
BA – Bahia
CCATT-BRAMS – Coupled Chemistry-Aerosol-Tracer Transport model coupled to Brazilian Regional Atmospheric Modeling System
CPTEC – Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos
DF – Distrito Federal
CE – Ceará
ES – Espírito Santo
GO – Goiás
GOES – Geostationary Operational Environmental Satellite
INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change
MA – Maranhão
MG – Minas Gerais
MODIS – Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer
MS – Mato Grosso do Sul
MT – Mato Grosso
NASA – National Aeronautics and Space Administration
NCEP – National Centers for Environmental Prediction
NOAA – National Oceanic and Atmospheric Administration
PA – Pará
PB – Paraíba
PR – Paraná
PE – Pernambuco
PI – Piauí
RJ – Rio de Janeiro
RN – Rio Grande do Norte
RS – Rio Grande do Sul
RO – Rondônia
RR – Rorâima
SC – Santa Catarina
SP – São Paulo
SE – Sergipe
TO – Tocantins
VAS – Visible Infrared Spin Scan Radiometer Atmospheric Sounder

LISTA DE SÍMBOLOS

a e b	- Constantes dependentes do comprimento de onda e do intervalo térmico
a_{fogo}	- Área queimada
A_n	- Área parcial do enésimo (n) componente termal no interior do pixel (m^2)
A_p	- Tamanho da área do pixel no sub-pixel
A_{sampl}	- Tamanho da área do pixel (m^2)
AOT_{550nm}^f	- Espessura óptica da camada no pixel de fogo
AOT_{550nm}^b	- Espessura óptica da camada no background
$B(\lambda_{x\mu m}, T_x)$	- Função da lei de Planck para um determinado comprimento de onda e uma dada temperatura
BC	- Biomassa Consumida (kg)
C_1	- Constante da lei de Planck ($1,19 \times 10^{-6} \text{ W.m}^2.\text{sr}^{-1}$)
C_2	- Constante da lei de Planck ($1,44 \times 10^{-2} \text{ m.K}$)
C_e	- Coeficiente de emissão de fumaça baseado na energia radiativa do fogo (kg/MJ)
CH₂O	- Carboidrato
CH₃Cl	- Cloreto de metil
CH₄	- Metano
CO	- Monóxido de carbono
CO₂	- Dióxido de Carbono
$EF_{veg}^{[\epsilon]}$	- Fator de emissão para cada espécie ϵ
ERF	- Energia Radiativa do Fogo (MW)
FRE	- Fire Radiative Energy (MW)
h	- Altitude do sensor (705 km)

H₂O	- Molécula de Água
L_λ	- Radiância espectral (W.m ⁻² sr ⁻¹ μm ⁻¹)
M_d	- Densidade de aerossol da coluna (g.m ⁻²)
M_x	- Total de biomassa consumida pelo fogo (kg.s ⁻¹)
M^[ε]	- Emissão da espécie ε
N	- Número de pixels de cada linha na passagem do satélite
N_{af}	- Pixels de aerossol que contém áreas que estão sendo queimadas
N_{aa}	- Pixels que possuem informações sobre a camada de espessura óptica da área
NO_x	- Óxidos nitrosos (NO (monóxido de nitrogênio) + NO ₂ (dióxido de nitrogênio))
O₂	- Oxigênio
p	- Representa a resolução espacial do pixel no NADIR (km)
Q	- Fonte de emissão associada com o processo de queimada
R	- Termo associando com a remoção seca genérica e/ou transformações químicas
R_e	- Raio da Terra (6378.137 km)
R_{fre}	- Taxa de emissão de energia radiativa do fogo (MW)
R_{sa}	- Taxa de emissão de fumaça por unidade de tempo (kg/s)
s	- Taxa de mistura de gases traço (ρ/ρ _{ar})
S	- Relação entre o pixel no NADIR e a altitude do satélite
t_p	- Tempo necessário para limpar os gases emitidos do pixel de queimada (s)
T₄	- Temperatura de brilho do pixel com anomalia térmica (K)
T_{4b}	- Temperatura de brilho do background (8 pixels vizinhos) (K)
T_n	- Temperatura da enésima componente termal (K)

u	-	Componente meridional do vento em 850 hPa (m/s)
$W_{PM_{2,5}}$	-	Remoção convectiva úmida para o material particulado (PM _{2,5})
ΔS	-	Variação ao longo da varredura
ΔT	-	Variação ao longo da trajetória
α_{veg}	-	Fração de biomassa acima
β_e	-	Eficiência mássica de extinção (m ² .g ⁻¹)
β_a e β_s	-	Coeficientes mássicos de absorção e espalhamento (m ² .g ⁻¹)
β_{veg}	-	Eficiência de queima da vegetação
$\frac{\partial s}{\partial t}$	-	Tendência local
ϵ	-	Emissividade
\mathcal{E}_{CO}	-	Emissão de CO para a atmosfera (g.s ⁻¹)
θ	-	Ângulo de varredura calculado para um dado pixel i
λ	-	Comprimento de onda
σ	-	Constante de Stefan-Boltzmann (5,67x10 ⁻⁸ J.s ⁻¹ .m ⁻² .K ⁻⁴)
τ_{a550nm}	-	Densidade de massa da fumaça
ρ	-	Reflectância
v	-	Componente zonal do vento em 850 hPa (m/s)

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

Existem evidências de que as queimadas ocorriam nos ecossistemas terrestres desde a Era Paleozóica no final do período Siluriano, a aproximadamente 415 milhões de anos atrás. Nesta época os níveis de oxigênio (O₂) começavam a aumentar devido ao surgimento de plantas vasculares, favorecendo o avanço das queimadas naturais provocadas principalmente por raios e combustão espontânea. Detritos das combustões de biomassa são bem representados na Era Mesozóica, onde os fósseis encontrados em sedimentos marinhos e terrestres, em hidrocarbonetos aromáticos cíclicos e em vegetações carbonizadas remotam ao período Jurássico e Cretáceo indicando a presença de paleofogos intrínsecos às ações naturais (GLASSPOOL et al., 2004; FINKELSTEIN et al., 2006; BERNER et al., 2003; SCOTT, 2000; VENKATESAN; DAHL, 1989; KILLOPS; MASSOUD, 1992; FINKELSTEIN, 2004). Neste capítulo serão abordadas algumas considerações iniciais sobre as queimadas e suas conseqüências para o meio ambiente, os problemas que envolvem este tema e os objetivos que devem ser alcançados no decorrer da pesquisa.

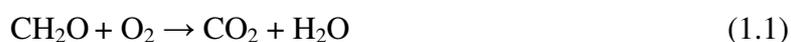
1.1 Considerações Iniciais

Nos dias atuais estima-se que aproximadamente 90% das queimadas sejam de origem antropogênica (ANDREAE, 1991). Frequentes em todas as regiões do mundo as queimadas consomem grandes quantidades de biomassa e liberam enormes quantidades de gases traços e aerossóis para a atmosfera (ANDREAE; MERLET, 2001). A queima de biomassa, além de ser considerada uma das maiores fontes destes gases e de aerossóis troposféricos, modifica as características da superfície terrestre e, conseqüentemente, afeta o clima (MORAES et al., 2004). Dentre os principais fatores modificadores do clima destacam-se os impactos da energia liberada pelo fogo, os gases traços e aerossóis emitidos para a atmosfera, a alteração do albedo da superfície (ICHOKU; KAUFMAN, 2005), as modificações no balanço radiativo da atmosfera e nos ciclos hidrológicos causados principalmente pelos aerossóis (ANDREAE et al.,

2004), além de provocar problemas de saúde nas populações situadas próximas as áreas de incidência de queimadas (SILVA; SILVA, 2006).

Com o consumo de grandes quantidades de biomassa pelo fogo, gases traços e materiais particulados (aerossóis carbonáceos) são emitidos para a atmosfera. Estima-se que $3,1 \times 10^9$ toneladas de carbono, presentes na vegetação, sejam expostos anualmente à queima, na qual $1,1 \times 10^9$ toneladas são emitidos para a atmosfera (FEARNSIDE, 2000). Inúmeros estudos foram realizados por Badarinath et al. (2004), Hao et al. (2005), Tripathi et al. (2005), Duncan et al. (2003), Gleason et al. (1998) e Liu et al. (2005) para a caracterização dos aerossóis proveniente da queima de biomassa e para a validação dos produtos de satélites que estimam a espessura óptica da atmosfera. Os resultados demonstraram-se satisfatórios, permitindo a utilização destes produtos na estimativa das emissões de gases provenientes da queima de biomassa.

A queima de biomassa vegetal viva e/ou morta, em condições ideais de completa combustão, produz dióxido de carbono (CO_2) e vapor d'água (H_2O), de acordo com a reação a seguir (LEVINE, 1994):



onde CH_2O representa a composição média da biomassa vegetal. Porém, o processo de combustão geralmente não é completo, sendo comum encontrar, além do CO_2 , outras espécies de gases, como por exemplo, o monóxido de carbono (CO), o metano (CH_4), o monóxido de nitrogênio (NO), o dióxido de nitrogênio (NO_2) e o cloreto de metil (CH_3Cl) (BADARINATH et al., 2004).

Segundo Setzer et al. (1988), Setzer e Pereira (1990), Kaufman et al. (1992) e Ward et al. (1992) o aumento das queimadas na década de 90 estava associado principalmente ao desflorestamento da Amazônia e ao aumento das áreas agrícolas no continente africano. As queimadas são fontes de gases do efeito estufa (CO_2 , CH_4), que propiciam o aquecimento global, principal responsável pelas mudanças climáticas. Além disso, alguns gases emitidos na queimada (monóxido de carbono, hidrocarbonetos não-metanos, ácido nítrico, entre outros) são quimicamente ativos e interagem com as concentrações de hidroxilas (OH) presentes na atmosfera, alterando a eficiência de

oxidação e modificando a quantidade de ozônio troposférico, que é um dos gases do efeito estufa (LEVINE, 1994; KAUFMAN et al., 1992; GALANTER et al., 2000).

O impacto da queima de biomassa no ciclo biogeoquímico, no clima mundial, na química atmosférica, na biodiversidade e na população em geral, tornou-se uma grande preocupação mundial. Estudos indicam que a ocorrência de grandes incêndios tenderá a aumentar significativamente nas próximas décadas (IPCC, 2001). Esta problemática induz à busca de metodologias coerentes que visem estimar a quantidade de aerossóis carbonáceos e gases traços emitidas para a atmosfera, sem a necessidade do cálculo da quantidade de biomassa queimada (KAUFMAN et al., 1998).

As informações obtidas por aeronaves, satélites e dados terrestres foram, por muito tempo, utilizadas apenas para indicar focos de queimadas e não apresentavam estimativas eficazes sobre a quantidade de vegetação queimada e as emissões liberadas no processo de combustão (WOOSTER et al., 2003). Kaufman et al. (1996) introduziram o conceito de energia radiativa do fogo (ERF), que permite gerar dados capazes de serem relacionados diretamente com a intensidade do fogo e com o total de vegetação consumida por unidade de tempo. A ERF pode ser definida como a parte da energia química liberada na queima de biomassa emitida como radiação no processo de combustão (WOOSTER et al., 2003).

Os gases do efeito estufa liberados na queima de biomassa apresentam tempo de vida na atmosfera variável. O tempo de vida pode ser definido como a quantidade emitida dividida pela deposição global média em Tg/ano (IPCC, 2001). Entre os gases do efeito estufa, o carbono apresenta um tempo de vida variável, pois as emissões e mecanismos de deposição mudam constantemente. Estudos mostram que o tempo de vida do CO₂ permanece na atmosfera varia de 100 a 200 anos. O CH₄ associado a apenas um processo de remoção na atmosfera, a oxidação do radical de hidroxila (OH), possui um tempo de vida de aproximadamente 12 anos. Outras espécies de gases do efeito estufa, como os óxidos nitrosos, podem permanecer na atmosfera por até 114 anos, enquanto que o ozônio troposférico permanece por horas ou dias apenas (IPCC, 2001).

1.1 Problema

Diversos estudos foram realizados para se estimar a intensidade das emissões de gases provenientes da queima de biomassa (SETZER et al., 1988; SETZER; PEREIRA, 1990; ANDREAE, 1991; KAUFMAN et al., 1992; KAUFMAN et al., 1998; ARAÚJO et al., 1999; BADARINATH et al., 2004; ANDREAE et al., 2004; ICHOKU; KAUFMAN, 2005; WERF et al., 2006; entre outros). Os métodos atuais para a estimativa das emissões de gases liberados pelas queimadas consistem em se obter o total de biomassa consumida pelo fogo através da relação entre as estimativas da área queimada e da densidade de biomassa, multiplicada pelos fatores de emissão de cada espécie. Embora estes fatores de emissão sejam conhecidos com uma boa acurácia, atualmente existem dificuldades para se obter a massa de biomassa seca utilizada nesta estimativa (ICHOKU; KAUFMAN, 2005).

Desta forma, torna-se necessário a utilização de metodologias que estimem com uma maior precisão a quantidade dos gases provenientes da queima de biomassa emitidos para a atmosfera. Essas estimativas devem incorporar fatores como o tamanho das áreas queimadas e as áreas mínimas detectadas pelos sensores remotos, assim como, gerar dados em tempo quase-real para serem utilizados como dados de entradas em modelos ambientais, como, por exemplo, o CCATT-BRAMS, que fornece prognósticos de poluição do ar.

1.2 Objetivos Gerais

O presente trabalho tem como objetivo principal utilizar a energia radiativa do fogo derivados do sensor MODIS e do GOES para estimar as emissões de CO e material particulado com diâmetro menor que 2,5 μm ($\text{PM}_{2,5}$) para o período de queimadas de 2002 na América do Sul, e modelar estas emissões no CCATT-BRAMS.

1.2.1 Objetivos Específicos

(a) Gerar os coeficientes de emissão baseados na energia radiativa do fogo para o GOES;

- (b) Utilizar os coeficientes propostos por Ichoku e Kaufman (2005) para o MODIS e os gerados para o GOES para se estimar a quantidade de gases liberados para a atmosfera na América do Sul em 2002;
- (c) Verificar a relação entre o consumo de biomassa e a energia radiativa do fogo liberada nos experimentos realizados no LARAD/INPE;
- (d) Modelar os resultados das transformações da energia radiativa do fogo em taxa de emissão de fumaça e biomassa consumida no modelo ambiental CCATT-BRAMS;
- (e) Comparar os resultados obtidos através da conversão da energia radiativa do fogo em taxa de emissão de fumaça com dados de verdade terrestres utilizados para validar o modelo CCATT-BRAMS em 2002;
- (f) Comparar a utilização destes métodos com o método já implementado no modelo CCATT-BRAMS

CAPÍTULO 2

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Inúmeras pesquisas foram desenvolvidas nestas últimas décadas com o intuito de permitir uma melhor compreensão das queimadas e suas influências no sistema Terra. Um dos desafios das pesquisas de mudanças climáticas tem sido quantificar o total anualmente queimado de biomassa no planeta e suas emissões para a atmosfera. Neste capítulo serão abordados os problemas ocasionados pelas queimadas na América do Sul (2.1), o método de extração de informações da temperatura e da área do subpixel detectado como fogo utilizado pelo WFABBA/GOES (*Wildfire Automated Biomass Burning Algorithm*) (2.2), a análise dos métodos que determinam a energia radiativa do fogo (2.3) e a derivação do coeficiente de emissão baseado na energia radiativa do fogo (2.4).

2.1 As queimadas na América do Sul e os métodos para detecção

A queima de matéria orgânica, constituídas principalmente de carbono (C), possui aplicações no desflorestamento, na produção de energia, no aquecimento de casas e de estabelecimentos, no controle de pestes e na renovação de pastos e de campos para a agricultura (GALANTER et al., 2000; ARAÚJO et al., 1999; MARTINS et al., 1998; KAUFMAN et al., 1990).

Na América do Sul a maior frequência de queimadas ocorre no período seco, entre os meses de junho a novembro. No Brasil esta prática é utilizada na agricultura e no desflorestamento, em particular na Amazônia. Segundo Araújo et al. (1999) uma ação bastante comum para a derrubada da floresta é o corte das árvores três meses antes de se atear fogo, tempo suficiente para que os materiais percam a umidade e possam sustentar as chamas. No cerrado brasileiro, assim como em outras partes do continente, as queimadas são muito utilizadas como práticas de renovações de pastagens.

Segundo Freitas et al. (2005) o começo e a manutenção das queimadas dependem principalmente do tipo de biomassa, da localização geográfica, da temperatura do ar, da

precipitação, da umidade e dos ventos. Este conjunto de fatores permite que as queimadas extrapolem a escala de atuação local e passem a afetar escalas regionais, interferindo no ciclo hidrológico e no padrão de distribuição de energia dos trópicos para latitudes médias e altas.

Com o avanço das técnicas de sensoriamento remoto e com o surgimento de novos satélites que permitem o monitoramento de queimadas, inúmeras pesquisas foram realizadas por Prins e Menzel (1992), Duncan et al. (2003), Werf et al. (2006), Kaufman et al. (1998), Wooster et al. (2003). Estes estudos utilizaram satélites ambientais com diferentes características, com destaques para o *Advanced Very High Resolution Radiometer* (AVHRR) a bordo da constelação de satélites do *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA) e o *Visible Infrared Spin Scan Radiometer Atmospheric Sounder* (VAS) a bordo do GOES e o MODIS/Terra e Aqua.

Desde 1980 o sensor VAS/GOES promove um monitoramento multiespectral das Américas. O satélite GOES está posicionado numa órbita geoestacionária a uma altitude média de 36.000 km. Segundo Kaufman et al. (1998) o algoritmo de detecção de queimadas do VAS/GOES desenvolvido por Prins e Menzel (1992) se baseia na determinação do tamanho do sub-pixel caracterizado como queimada e na temperatura do mesmo. Outro sensor utilizado para o monitoramento de queimadas é o AVHRR/NOAA, posicionado em uma órbita heliosíncrona a uma altitude média de 850 km. O modelo utilizado para este sensor na detecção de áreas queimadas consiste na classificação supervisionada, cujo principal objetivo é classificar os pixels da banda 3, referente ao infravermelho médio, com elevados valores de temperatura (KAMPEL, 2004; RAO et al. 1990; PEREIRA et al., 2004). A área mínima detectada pelo VAS/GOES a uma temperatura de 450 K é 0,03 km², enquanto que para o sensor AVHRR/NOAA essa área é de 0,00015 km² (PRINS; MENZEL, 1992).

2.2 Método Dozier

O primeiro método para se caracterizar a temperatura e a área do fogo em nível de sub-pixel foi introduzido por Dozier (1981) para as bandas 3 e 4 do sensor AVHRR, correspondente, respectivamente, aos canais em 3,7 µm e 11 µm. Neste método, o pixel

é dividido em duas componentes termais: uma contendo a região com alta temperatura, correspondente a área que apresenta o processo de combustão, e a outra região referente ao background. A partir deste modelo, Dozier (1981) introduziu um conjunto de equações não-lineares que podem ser resolvidas em função da temperatura e área do subpixel.

O método Dozier pode ser expresso pelas equações (2.1) e (2.2), nas quais a radiância espectral (L_λ) coletada pelo sensor nos dois canais centrados em $4_{\mu m}$ e $11_{\mu m}$ é expressa em função da lei de Planck $B(\lambda, T)$. A radiância do pixel é dada pelas radiâncias provenientes das áreas em combustão (T_f) que ocupa uma região Ap do pixel (entre $0 \leq Ap \leq 1$) e pela temperatura de *background* (T_b), que ocupa a parcela do pixel restante ($1 - Ap$) (GIGLIO; KENDALL, 2001).

$$L_{4\mu m} = Ap \cdot B(\lambda_{4\mu m}, T_f) + (1 - Ap) \cdot B(\lambda_{4\mu m}, T_b) \quad (2.1)$$

$$L_{11\mu m} = Ap \cdot B(\lambda_{11\mu m}, T_f) + (1 - Ap) \cdot B(\lambda_{11\mu m}, T_b) \quad (2.2)$$

Este método foi aplicado a dados do AVHRR e de outros sensores de média resolução por Giglio e Kendall (2001), Matson e Dozier (1981), Matson e Holben (1987), Prins e Menzel (1992), Menzel e Prins (1996), entre outros. Os dados de focos de queimadas provenientes do WFABBA (cimss.ssec.wisc.edu/goes/burn/wfabba.html; Prins et al., 1998), utilizam este método para estimar a temperatura do fogo e a área queimada.

2.3 Energia Radiativa do Fogo (ERF)

Os primeiros estudos sobre a ERF foram realizados utilizando o MAS (*MODIS Airborne Simulator*) nos experimentos SCAR-C e SCAR-B (*Smoke, Cloud and Radiation, Califórnia/Brazil*) (KAUFMAN et al., 1996; KAUFMAN et al., 1998; KAUFMAN et al., 1998b; CHU et al., 1998). Os resultados já demonstravam que as estimativas das emissões através da ERF eram mais confiáveis que as estimativas por focos de queimada (pixels caracterizados como fogo – *hot spots*). Wooster (2002) testou as relações entre a ERF e o total de biomassa consumida em combustões experimentais de pequeno porte, demonstrando a existência de uma relação linear que permite o uso

desta metodologia na estimativa do total de gases liberados para a atmosfera no processo de combustão.

A ERF pode ser obtida de várias maneiras: Kaufman et al. (1996) usaram uma relação semi-empírica entre a ERF e a radiância espectral do infravermelho, referente à banda 21 do MODIS centrada em 4μm, associando, desta forma, a ERF com a temperatura de brilho do pixel com anomalia térmica ($T_{f4\mu m}$) e com a temperatura do background ($T_{b4\mu m}$) da respectiva banda. A fórmula (2.3) representa a ERF obtida através do sensor MODIS.

$$ERF = [4,3 \times 10^{-19} \cdot (T_{f4\mu m}^8 - T_{b4\mu m}^8)] * A_{sampl} \quad (2.3)$$

onde A_{sampl} representa o tamanho da área do pixel (km²). Pode-se, ainda obter a ERF a partir de outras formulações, como exemplificado abaixo:

$$ERF = A_{sampl} \cdot \varepsilon \cdot \sigma \cdot \sum_{i=1}^n A p_n \cdot T_n^4 \quad (2.4)$$

onde σ é a constante de Stefan-Boltzmann ($5,67 \times 10^{-8} \text{Js}^{-1} \text{m}^{-2} \text{K}^{-4}$), $A p_n$ é a área parcial do enésimo (n) componente termal no interior do pixel, T_n é a temperatura da enésima componente termal (K) e ε é a emissividade da superfície estudada.

Além disto, pode-se determinar a ERF a partir da radiância no infravermelho médio obtida a partir da lei de Planck. Esta lei permite o cálculo da radiância espectral (L_λ) emitida por um corpo negro num determinado comprimento de onda e a uma dada temperatura (2.5), que pode ser aproximada pela fórmula (2.6) proposta por Wooster e Rothery (1997). A uma dada temperatura a equação (2.6) pode ser simplificada na equação (2.7), esta representa o enésimo sub-pixel que contém a anomalia termal. Das formulações (2.4) e (2.7) obtém-se a ERF conforme mostra a equação (2.8) (WOOSTER et al., 2003)

$$L_{(\lambda,T)} = \left\{ \frac{c_1}{\lambda^5 \left[\exp\left(\frac{c_2}{\lambda T}\right) - 1 \right]} \right\} \quad (2.5)$$

$$L(\lambda, T) = a \cdot T^b \quad (2.6)$$

$$L_{IVM,f} = a \cdot \varepsilon_{IVM} \cdot \sum_{i=1}^n A_n \cdot T_n^4 \quad (2.7)$$

$$ERF_{IVM} = \left[\left(\frac{A_{sampler} \cdot \varepsilon \cdot \sigma}{a \cdot \varepsilon_{IVM}} \right) * L_{IVM,f} \right] \quad (2.8)$$

onde $L_{(\lambda,T)}$, $L_{IVM,f}$ e ERF_{IVM} representam a radiância espectral a uma dada temperatura, a radiância espectral do infravermelho médio para o pixel com anomalia térmica e a energia radiativa do fogo para o infravermelho médio, λ é o comprimento de onda, C_1 e C_2 são as constantes da lei de Planck ($3,74 \times 10^8 \text{ W.m}^2$ e $1,44 \times 10^4 \text{ } \mu\text{m.K}$, respectivamente), a e b são constantes obtidas por Wooster e Rothery (1997), que dependem do comprimento de onda e do intervalo térmico utilizado.

2.4 Coeficientes de emissão baseados na ERF

Com base nas informações acima descritas, Ichoku e Kaufman (2005) propuseram uma metodologia para estimar a taxa de emissão de fumaça através da ERF. A relação linear entre a taxa de liberação de ERF, integrada no tempo, e o consumo de biomassa, permitiram a determinação de um coeficiente de emissão de fumaça baseado na energia radiativa do fogo (C_e), dada em kg/MJ. O produto deste coeficiente com a ERF, em MJ, resulta no total de biomassa liberada para a atmosfera, como mostra a equação (2.9):

$$M_x = C_e \cdot ERF \quad (2.9)$$

onde M_x representa a taxa de emissão de fumaça calculada pelo satélite. A taxa de emissão de fumaça quando multiplicada pelos fatores de emissão descritos por Andreae e Merlet (2001) permite a obtenção da taxa de emissão de diversos gases para a atmosfera. Andreae e Merlet (2001) reuniram uma completa revisão bibliográfica sobre emissões de diferentes tipos de espécies vegetais submetidas a queimadas. Desta forma, os fatores de emissão são aplicados para se obter o total da espécie emitida para a atmosfera durante o processo de combustão.

A obtenção do C_e originou-se de alguns procedimentos, como por exemplo, do cálculo da área real presente no produto MODIS AOT_{550nm}, da estimativa da densidade de aerossol na atmosfera, das relações entre a densidade de massa da fumaça emitida na

queima da biomassa e a eficiência mássica de extinção, da obtenção do tempo necessário para limpar os gases emitidos do pixel, entre outros.

Ichoku e Kaufman (2005) obtiveram o C_e para três diferentes regiões da América do Sul, como mostra a **Figura 2.1**, separadas principalmente de acordo com o tipo de vegetação predominante: Região de Floresta Tropical (a), Região Nordeste (b) e Região da América do Sul abaixo da latitude 20° (c). Obtiveram para estas os coeficientes, 0,063; 0,048; e 0,061, respectivamente.

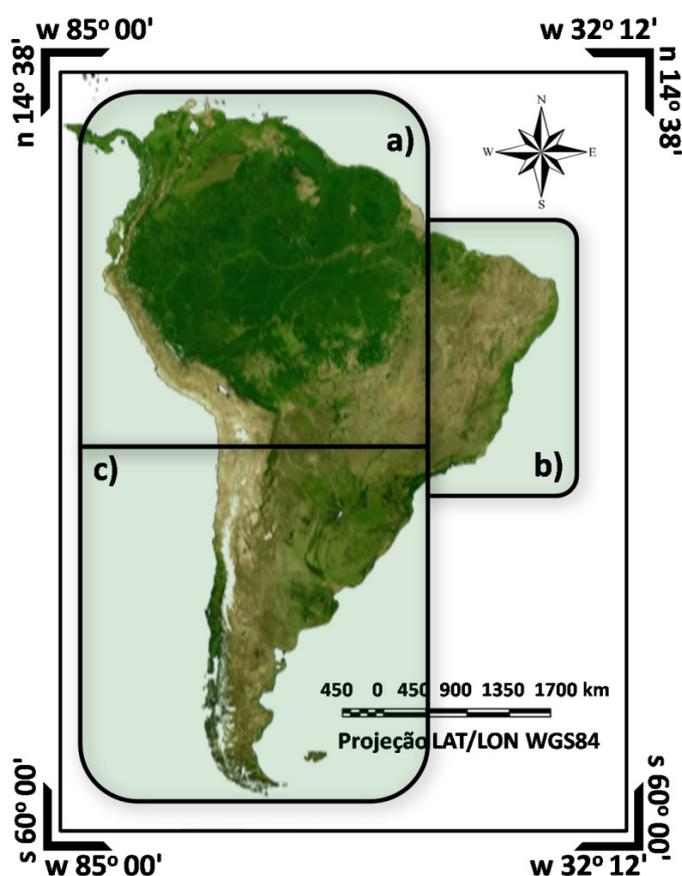


Figura 2.1 – Localização da área de estudo e coeficientes de emissão baseados na ERF

Wooster et al. (2005) e Freeborn et al. (2008) realizaram experimentos que estimaram a ERF (2.8) a partir de medidas da radiância emitida pela queima controlada de quantidades conhecidas de biomassa. Nestes experimentos a temperatura da região em processo de combustão era obtida através da inversão da lei de Planck. A análise da relação entre o consumo de biomassa e a energia radiativa liberada pela mesma originou

as fórmulas 2.10 e 2.11, que mostram a expressão para o cálculo da taxa de consumo de biomassa propostas por Wooster et al. (2005) e Freeborn et al. (2008), respectivamente. A expressão (2.12) apresenta o coeficiente de emissão de CO proposto por Freeborn et al. (2008).

$$BC = 0,368.ERF \quad (2.10)$$

$$BC = 0,710.ERF \quad (2.11)$$

$$\varepsilon_{co} = 45,58.ERF - 20,87 \quad (2.12)$$

onde BC representa a quantidade de biomassa consumida em kg.s^{-1} , ε_{co} a emissão de CO para a atmosfera em g.s^{-1} , ERF a energia radiativa do fogo em MJ.s^{-1} .

CAPÍTULO 3

ÁREA DE ESTUDO

A América do Sul possui uma distinta e importante biodiversidade espacialmente distribuída em múltiplos ecossistemas naturais. Entretanto, este complexo sistema, à mercê das ações antropogênicas, é ameaçado constantemente pelo avanço do desmatamento, da agricultura e das queimadas. Neste capítulo descrevem-se as principais características da América do Sul, como, por exemplo, os domínios paisagísticos do Brasil e seu regime de chuvas.

3.1 América do Sul

A área de estudo, representada na **Figura 2.1** do capítulo anterior, compreende a América do Sul (AS), localizada entre as coordenadas 85°00'W e 32°12'W; e 14°38'N e 60°00'S, com uma área de aproximadamente $1,95 \times 10^7$ km². A AS destaca-se principalmente pelas diferenças culturais, econômicas e pela grande biodiversidade. Formada por 15 países, tem como principais fontes econômicas a agricultura, a pecuária e a produção de bens industrializados.

O maior país em extensão e economia é o Brasil, nele podemos encontrar 6 grandes domínios paisagísticos que comportam um mostruário bastante complexo das principais paisagens e ecologias do mundo (AB'SABER, 1977). Quatro deles são intertropicais e dois deles subtropicais: domínio das terras baixas florestadas da Amazônia; domínio das depressões interplanálticas semi-áridas do Nordeste; domínio dos “mares de morros” florestados, da fachada atlântica brasileira; domínio dos chapadões recobertos por cerrados e penetrados por florestas-galerias; domínio dos planaltos de Araucárias, do Brasil Meridional; e domínio das pradarias mistas do sudeste do Rio Grande do Sul, terras uruguaias e argentinas.

3.2 O regime de chuvas no Brasil

O Brasil, dada a sua localização espacial e sua grande extensão territorial, apresenta um diversificado padrão de circulação regional. É comum encontrar no Brasil

características regionais específicas com grande variedade de climas, ocasionadas pelos diferentes e complexos sistemas de circulação, como, por exemplo, massas de ar e correntes perturbadas (descontinuidades atmosféricas promovidas por frentes polares, linhas de instabilidades tropicais e ondas de leste).

A região Norte do Brasil, caracterizada como clima equatorial, não apresenta uma estação seca bem definida, nesta região as chuvas são ocasionadas, principalmente, por processos de convecção (FISCH et al., 1996). Na região Nordeste a estação chuvosa ocorre com baixos valores pluviométricos típico de um clima semi-árido, sendo a época chuvosa provenientes, em sua grande maioria, das correntes perturbadas de leste e da ondulação da zona de convergência intertropical (ZCIT) (CAVALCANTI, 1982). No Centro-Oeste e Sudeste do Brasil existe uma estação seca no inverno e uma estação chuvosa no verão, entre os sistemas tropicais e de latitudes médias que atuam nesta região pode-se citar as frentes polares e a zona de convergência do Atlântico Sul (ZCAS) (ROCHA; GANDU, 1996). O Sul do país, de clima temperado, não possui uma estação seca bem definida, entre os principais sistemas meteorológicos podem-se citar as correntes perturbadas de sul (frente polar atlântica), os complexos convectivos de mesoescala (CCM) (DIAS, 1996), entre outros.

A **Figura 3.1** mostra a climatologia trimestral Jan/Fev/Mar; Abr/Mai/Jun; Jul/Ago/Set; e Out/Nov/Dez disponibilizada pelo CPTEC, extraídas de dados do INMET de 1961 a 1990 (período climatológico de 30 anos). Nota-se que o trimestre que apresenta os maiores volume de chuva é o trimestre Jan/Fev/Mar, nestes a região amazônica apresenta os maiores índices pluviométricos com volumes superiores a 1000 mm; as regiões Sul, Sudeste e Centro-Oeste apresentam volumes entre 400 e 700 mm. Porém, a região Nordeste apresenta valores inferiores a 100 mm. A configuração desta característica para os meses de Jan/Fev/Mar está relacionada com a posição da ZCIT, uma vez que os núcleos de precipitação acompanham a migração anual de convecção profunda, como, por exemplo, a Alta da Bolívia (AB), que se configura na região Norte do país; as ZCAS no Centro-Oeste e Sudeste; as chuvas convectivas em todo o Brasil e a formação de vórtices ciclônicos em altos níveis no Nordeste (VCAN) (QUADRO et al., 1996; GAN; KOUSKY, 1986).

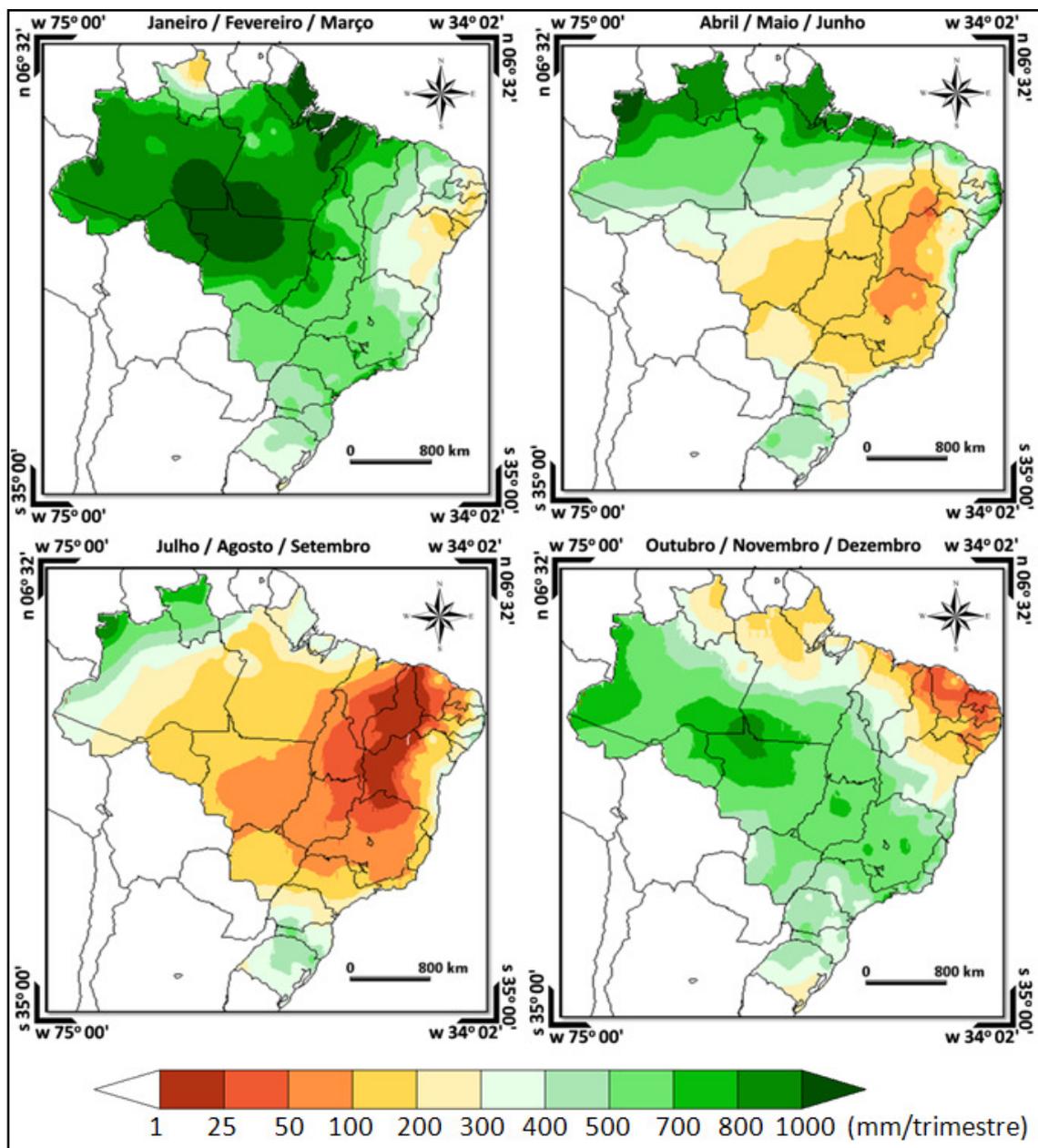


Figura 3.1 – Climatologia Trimestral de Precipitação para o Brasil

Fonte: Adaptada de CPTEC <www.cptec.inpe.br> (2007).

Nos meses de Abr/Mai/Jun os maiores índices pluviométricos deslocam-se para o extremo norte do país, compreendendo os Estados do Pará, Amapá, Rondônia e Amazonas com índices acima de 800 mm. No litoral do Nordeste os índices aumentam, atingindo valores superiores a 500 mm, devido ao reforço das ondas de leste. Na região

central do país o volume de chuva cai consideravelmente ficando entre 50 e 200 mm, característica do deslocamento da Alta Subtropical do Atlântico Sul (ASAS).

Os meses de Jul/Ago/Set são marcados pelo maior período de seca nas regiões Sudeste, Centro-Oeste, Norte e Nordeste. Nestes meses o volume de chuva é muito pequeno, atingindo valores inferiores a 25 mm próximo ao sertão nordestino e valores entre 25 e 100 mm em grande parte dos Estados do Mato Grosso, Mato Grosso do Sul, Tocantins, Pará, Roraima, São Paulo, Minas Gerais, entre outros. Os maiores volumes de chuva, com valores superiores a 400 mm, estão concentrados no extremo noroeste do Brasil (ondulação da ZCIT) e no Sul (relacionados com a passagem de frentes polares, cavados invertidos e posicionamento de jatos subtropicais da América do Sul).

Nos meses de Out/Nov/Dez o volume de chuva começa a aumentar gradativamente devido à atuação de processos convectivos. Nestes meses pode-se visualizar duas zonas bem definidas, com orientação noroeste-nordeste referentes à flutuação dinâmica do centro quase-permanente da convecção profunda (QUADRO et al., 1996) e deslocamento meridional da ZCIT, posicionada mais a norte. Com isso a região mais ao norte do Brasil possui valores pluviométricos entre 25 e 100 mm, enquanto que no resto do país estes valores apresentam variações de 300 a 800 mm.

CAPÍTULO 4

MATERIAIS E MÉTODOS

Os dados de sensoriamento remoto provenientes de plataformas orbitais possibilitam informações multiespectrais com variadas resoluções espaciais e permitem um acompanhamento constante de fenômenos que necessitam de uma alta resolução temporal. Neste capítulo serão abordados os dados utilizados e as metodologias adotadas para o trabalho.

4.1 Produtos MOD04 e MYD04

O sensor MODIS das plataformas Terra/Aqua possui órbita polar, ângulo de imageamento de $\pm 55^\circ$, altitude de 700 km e faixa imageada de 2330 km. O horário de passagem varia sobre um dado ponto da superfície de acordo com a plataforma: enquanto a plataforma Terra, cujos produtos originados destas recebem a sigla MOD, cruza o Equador em sua órbita descendente às 10h30min e 22h30min; a plataforma Aqua, onde os produtos são denominados de MYD, em sua órbita ascendente, cruza o Equador às 13h30min e 01h30min. Obtém-se, desta maneira, aproximadamente 4 passagens diárias sobre uma mesma área.

Os produtos de profundidade óptica do aerossol em 555nm (AOT_{555nm}) MOD04/MYD04-C005 com resolução de 10 km x 10 km, separados em *granules* (áreas) de 5° (2330 km por 2030 km), gerados no formato HDF (*hierarchical data format*) e armazenados na forma de SDS (*scientific data set*), são obtidos a partir de dois algoritmos distintos. Um algoritmo é utilizado para se estimar os valores de AOT_{555nm} para a superfície terrestre e o outro para a superfície do oceano (KAUFMAN; TANRÉ, 1998).

Neste trabalho, os 1825 *granules*, obtidos para o período de 15/julho/2002 a 15/novembro/2002 contendo os dados de AOT_{555nm} de ambas as plataformas, foram transformados em arquivos ASCII (*american standard code for information interchange*) através de um programa em IDL (*interactive data language*) e,

posteriormente, foram processados para gerar os coeficientes de emissão baseados na energia radiativa do fogo para o satélite GOES.

4.2 Produtos MOD14 e MYD14

Os produtos de fogo nível 2 MOD14 e MYD14 (*MODIS Thermal Anomalies / Fire 5-MIN L2 SWATH 1KM V004*) são disponibilizados pelo *EOS Data Gateway* (<<http://edcimswww.cr.usgs.gov/pub/imswelcome/>>). Estes incluem informações de fogos ativos e outras anomalias termais e cobrem uma área de aproximadamente 2330 por 2030 km no sentido *across* e *along-track*, respectivamente, com resolução espacial nominal de 1 km (GIGLIO, 2005).

Os produtos MOD14 e MYD14 são disponibilizados em formato HDF e suas informações separadas pelos SDS. Neste trabalho, utilizaram-se os dados de focos de queimadas disponíveis para toda a América do Sul, para o período de julho a novembro de 2002. Destes, foram extraídas as informações de latitude, longitude, coluna e energia radiativa do fogo. Para a obtenção da ERF faz-se necessário o cálculo da área real do pixel onde foi identificado o foco de queimada. A área real do pixel pode ser descrita pela fórmula abaixo (ICHOKU; KAUFMAN, 2005).

$$A_{real} = \left\{ R_e \cdot S \left[\frac{\cos \theta}{\sqrt{(R_e/r)^2 - \sin^2 \theta}} - 1 \right] \right\} * \left\{ [r \cdot S (\cos \theta - \sqrt{(R_e/r)^2 - \sin^2 \theta})] \right\} \quad (4.1)$$

$$\theta = \left(-\frac{1}{2} N \cdot S + \frac{1}{2} S + (i - 1) S \right) \quad (4.2)$$

onde R_e é igual ao raio da Terra (6378,13 km); h a altitude do sensor (705 km), r é a soma de $R_e + h$; $S = p/h$, sendo que p representa a resolução espacial do pixel no NADIR em km; θ é o ângulo de varredura calculado para um dado pixel i e N é o número da coluna do pixel.

4.3 Produtos WFABBA/GOES

O WFABBA é um produto para detecção de anomalias termais/fogo baseado no satélite GOES, disponibilizado com uma alta frequência de observações, numa resolução espacial nominal de 4 x 4 km no NADIR. O algoritmo do WFABBA, assim como no

MODIS, utiliza duas bandas para a detecção do pixel com anomalia térmica, uma banda localizada no canal em 3,9 μm e outra localizada no canal em 10,7 μm (PRINS et al., 1998).

Os dados disponibilizados pela Universidade de Wisconsin - Madison contém a hora da passagem do satélite, a longitude, a latitude, o tamanho e a temperatura do sub-pixel com o foco, a quantidade de CO, o tipo de ecossistema, a fração de chamas, a temperatura no canal em 3,9 μm e a temperatura no canal em 10,7 μm . Os produtos de queimada WFABBA ainda não possuem um algoritmo para se estimar a ERF, estuda-se a possibilidade de adotar a fórmula (4.3) para o cálculo desta grandeza física (JAY HOFFMAN, Comunicação Pessoal, 2007).

$$ERF = A \cdot \sigma \cdot T_f^4 \quad (4.3)$$

onde A representa a fração de área de fogo no pixel, σ é a constante de Stefan-Boltzmann e T_f é a temperatura da fração do sub-pixel com fogo. Em ambos os casos, a área e a temperatura do fogo são derivadas pelo método de Dozier (1981).

4.4 FieldSpec Pro FR

O *FieldSpec Pro FR*, fabricado pela empresa norte-americana *Analytical Spectral Devices*, foi utilizado no experimento de queimada realizado no INPE, próximo ao LARAD/INPE (Laboratório de Radiometria). O intervalo espectral medido pelo *FieldSpec Pro FR* é de 350 a 2500 nm com um campo de visada de 25°, sua resolução espectral é de 3 a 10 nm e o tempo para aquisição de dados é de aproximadamente 1/10 de segundo por espectro. As medidas de radiância/reflectância são feitas por dois diferentes tipos de detectores, um de fotodiodo usado para o intervalo espectral de 350 a 1000 nm e outro conjunto de detectores para o intervalo espectral de 1000 a 2500 nm (MANUAL DO FIELDSPEC, 2007).

Para obtenção do fator de reflectância foi utilizada uma placa Spectralon 11, que é constituída de politetrafluoretileno. Esta placa foi intercalibrada com a placa padrão de laboratório e apresentou reflectância espectral de aproximadamente 100% em todo o espectro solar.

4.5 Descrição do experimento com a ERF

O experimento para medir a ERF e a taxa de consumo do composto orgânico ocorreu no dia 29/Nov/2007 próximo ao LARAD/INPE. Realizou-se o experimento no período noturno sem a influência de luz artificial e interferência da radiação solar no sinal coletado. Na hora do experimento, as 20 h, a condição meteorológica era predominantemente de céu limpo com a temperatura instantânea do ar de 20,4° C, umidade relativa de 60% e ventos entre 2 e 8 km/h.

Foram expostas aos processos de combustão duas espécies vegetais diferentes, uma proveniente do Pantanal-Sul-Matogrossense e outra da região Sudeste. A vegetação do bioma de cerrado, correspondente a uma espécie de gramínea muito encontrada em campos limpos e áreas de pastagem, foi obtida três meses antes do experimento, tempo suficiente para que esta perdesse grande parte da umidade presente em sua estrutura e, deste modo, reproduzir os padrões encontrados no período de seca naquela região. A outra vegetação foi colhida no próprio INPE e corresponde a gramíneas facilmente encontradas em toda a região.

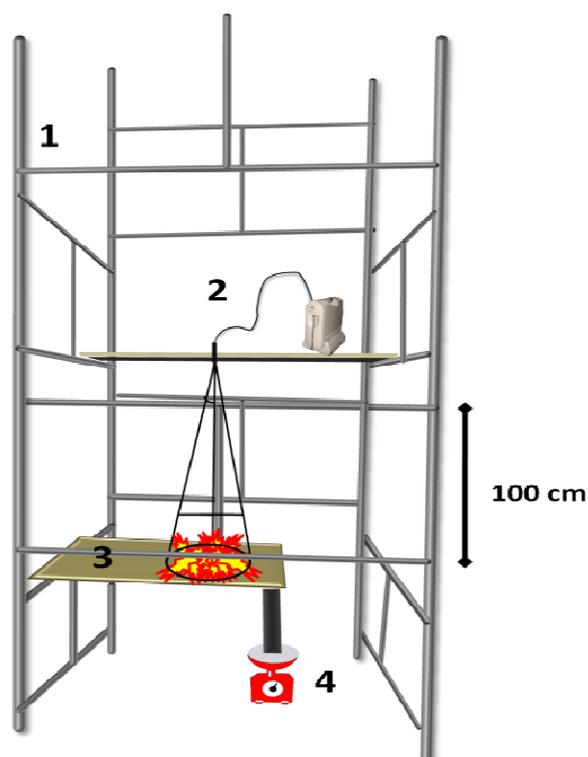


Figura 4.1 – Estrutura montada para o campo e posicionamento dos equipamentos

A **Figura 4.1** mostra a estrutura do experimento. Para posicionar os equipamentos destinados a medir a radiância emitida e calcular a taxa de consumo, montou-se um andaime com aproximadamente 4 metros de altura (1). Nesta plataforma, posicionou-se o Fieldspec Pro FR (2) a uma distância de 110 cm e 265 cm¹ das amostras da biomassa vegetal prontas para o processo de combustão (3). O IFOV do instrumento foi preenchido com as amostras de biomassa para não haver contaminação do fundo no sinal coletado pelo equipamento para cada observação. Após estes procedimentos, a biomassa era pesada a cada intervalo de 10 segundos numa balança posicionada em (4), indicando desta forma, o total de biomassa consumida por unidade de tempo.

Pela inversão da lei de Planck foi obtida a temperatura de brilho do fogo. A fórmula 4.4 mostra o cálculo da temperatura para um dado comprimento de onda e sua respectiva radiância.

$$T(\lambda) = \left\{ \left[\frac{1,43879 \cdot 10^4}{\lambda \cdot \ln \left[\left(\frac{1,17543 \cdot 10^9}{\lambda \cdot L(\lambda, T)} \right) \right]} \right] \right\} \quad (4.4)$$

onde λ representa ao comprimento de onda e $L(\lambda, T)$ a radiância espectral.

4.6 Método para gerar o Coeficiente de Emissão para o GOES

Para gerar os coeficientes de emissão baseados na energia radiativa do fogo (R_{sa} dado em kg/MJ) para o sensor VAS/GOES foi utilizada a mesma metodologia proposta por Ichoku e Kaufman (2005). Este método consiste em calcular a somatória da taxa de fumaça emitida por uma dada área e comparar com o somatório da energia radiativa do fogo emitida para a mesma área. A fórmula abaixo mostra o procedimento para o cálculo dos coeficientes.

$$R_{sa} = \left\{ \frac{\left\{ \sum_{i=1}^{fogo} \left[\left(\frac{AOT_{550nm}^f - AOT_{550nm}^b}{\beta_a + \beta_s} \right) \cdot A_p \right] \right\}}{\sum_{i=1}^{fogo} \left(\frac{\sqrt{A_p}}{\sqrt{u^2 + v^2}} \right)} \right\} \quad (4.5)$$

¹ A altura de 265 cm foi utilizada no último experimento, na qual 1,15 kg foram expostos a queima.

onde AOT_{550nm}^f e AOT_{550nm}^b representam a profundidade óptica do aerossol em 550 nm do pixel com o foco de queimada e seu respectivo valor de background; $^2\beta_a$ e β_s indicam os coeficientes mássicos de absorção e de espalhamento, respectivamente. A_p representa o valor da área do produto MOD04 e MYD04; u e v representam a componente meridional e zonal do vento em 1700 metros de altitude (equivalente a 850 mb), obtidas a partir do modelo BRAMS. Utilizou-se a mesmas regiões definidas por Ichoku e Kaufman (2005), **Figura 2.1**, para o cálculo dos coeficientes.

4.7 Modelo CCATT-BRAMS

O modelo CCATT-BRAMS, desenvolvido para simular a circulação atmosférica em várias escalas, baseia-se no modelo numérico de previsão do tempo BRAMS, originado do modelo RAMS (WALKO et al., 2000). O modelo BRAMS apresenta novas parametrizações e funcionalidades, desenvolvidas principalmente por pesquisadores brasileiros aplicadas à América do Sul, apropriadas para simular transferências radiativas, quantidades de vapor na atmosfera, trocas de calor, transporte turbulento na camada limite planetária, entre outros (FREITAS et al., 2005).

Entre os novos recursos do BRAMS, pode-se citar a assimilação diária de umidade do solo (GEVAERD; FREITAS, 2006); o uso da camada limite planetária do RAMS para a parametrização da energia cinética turbulenta, que modula a máxima altitude que a parcela de ar pode alcançar partindo de sua fonte de emissão; a atualização do uso e ocupação da terra para a bacia amazônica a partir dos dados do PROVEG (Atualização da Representação da Vegetação nos Modelos Numéricos do CPTEC) realizada por Sestini et al. (2003); a utilização dos tipos de solo dos dados do projeto RADAMBRASIL (ROSSATO et al., 2002); o uso do NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) do MODIS, provenientes do ano de 2001 e 2002 e processadas pela TBRS (*Terrestrial Biophysics and Remote Sensing Lab*), entre outros (FREITAS et al., 2007).

² Os valores adotados para β_a (0,6 m²/g) e para β_s (4,0 m²/g) foram os mesmos utilizados por Ichoku e Kaufman (2005) para obter os coeficientes de emissão para o sensor MODIS.

O CCATT, modelo de transporte Euleriano³ acoplado ao BRAMS, é um modelo numérico que simula e estuda os processos e transportes associados à emissão de queimadas. O transporte dos gases traço e aerossóis são feitos simultaneamente com a evolução do estado atmosférico, utilizando os mesmos tempos de simulação e as mesmas parametrizações dinâmicas e físicas da atmosfera. A equação de conservação de massa para o CO e para o PM_{2,5µm} é calculada, sob a forma de equação de tendência, expressa pela seguinte equação (FREITAS et al., 2005):

$$\frac{\partial s}{\partial t} = \left(\frac{\partial s}{\partial t}\right)_{adv} + \left(\frac{\partial s}{\partial t}\right)_{PBL\ turb} + \left(\frac{\partial s}{\partial t}\right)_{Conv. Rasa} + \left(\frac{\partial s}{\partial t}\right)_{Conv. Prof.} + W_{PM2,5\mu m} + R + Q \quad (4.6)$$

onde $\frac{\partial s}{\partial t}$ representa a tendência local, $\left(\frac{\partial s}{\partial t}\right)_{adv}$ a advecção na escala da grade, $\left(\frac{\partial s}{\partial t}\right)_{PBL\ turb}$ o transporte turbulento na camada limite planetária na sub-grade, $\left(\frac{\partial s}{\partial t}\right)_{Conv. Rasa}$ o transporte em sub-grade associado com a convecção rasa de umidade, $\left(\frac{\partial s}{\partial t}\right)_{Conv. Prof.}$ o transporte em sub-grade associado com a convecção profunda de umidade, $W_{PM2,5\mu m}$ a remoção convectiva úmida para o material particulado, R o termo associado com a remoção seca genérica e/ou transformações químicas, Q a fonte de emissão associada com o processo de queimada (FREITAS et al., 2005).

As simulações de emissão para o CO e para o PM_{2,5µm} feitas no CCATT-BRAMS no período de 2002 (15/julho a 15/Nov) tiveram como configurações de entrada uma grade com 50 km de resolução horizontal cobrindo toda a América do Sul. A resolução vertical foi ajustada para variar a uma taxa de 1,07 a partir de 150m, modelando os dados até uma altitude de 20180 metros em 38 níveis verticais. O modelo de solos foi inicializado com 7 camadas, distribuídas nos primeiros 4 metros de profundidade (FREITAS et al., 2007). O tempo total de integração no modelo foi de 124 dias, 15/Jul/2002 as 00:00 UTC ao dia 16/Nov/2002 as 00:00 UTC. Para estes dias adotou-se as condições iniciais da atmosfera e as condições de contorno provenientes do modelo ECMWF (*European Center for Medium range Weather Forecasting*) e do modelo do

³ O modelo de transporte Euleriano pode ser definido como um modelo de dispersão, que calcula matematicamente o movimento e dispersão de parcelas de ar associadas à poluição a partir de estatísticas da trajetória de várias partículas, utilizando uma grade cartesiana tri-dimensional fixa como referência.

CPTEC denominado GAMRAMST062, para as datas de 15/Jul/2002 a 31/Ago/2002; e 01/Set/2002 a 16/Nov/2002, respectivamente.

4.8 Integração da FRP e dados de entrada no modelo CCATT-BRAMS

Os produtos MOD14 e MYD14 obtêm informações das áreas queimadas para uma mesma região de 2 a 3 vezes por dia. Desta forma, torna-se necessário calcular o tempo de permanência de um determinado foco do MODIS para extrair o total emitido naquela localização.

Para verificar a duração de cada foco do MODIS foi criado um programa em FORTRAN (*FORmula TRANslation*) que origina uma matriz de dados para o MODIS e para o WFABBA em grades de 4 e 50 km, desta forma, um mesmo ponto de grade nos dois produtos apresentam as mesmas localizações geográficas. Posteriormente, as duas grades são comparadas e se os focos detectados pelo MODIS, agora agrupados na resolução da grade, forem observados pelo WFABBA no intervalo de 3 horas (90 minutos anteriores e posteriores), um contador é iniciado e incrementado, indicando que houve a observação. Ao final, as emissões totais dos focos dos produtos MOD14/MYD14 são calculadas pela multiplicação do número de contadores pela emissão original calculada na passagem do MODIS.

Para calcular a emissão de gases e aerossóis para a atmosfera, o modelo CCATT-BRAMS, em seu método original, utiliza o 3BEM (*Brazilian Biomass Burning Emission Model*) desenvolvido por Longo et al. (2007). Sendo assim, para um dado pixel detectado como queimada pelos produtos WFABBA ou MOD14/MYD14, depois de percorridos por um filtro para retirar focos duplos em um raio de 1 km e diagnosticados o tipo de uso e cobertura da terra de acordo com Belward (1996) e o carbono presente na vegetação viva (OLSON et al., 2000; HOUGHTON et al., 2001), a estimativa de sua emissão é obtida pela fórmula abaixo:

$$M^{[\epsilon]} = \alpha_{veg} \cdot \beta_{veg} \cdot EF_{veg}^{[\epsilon]} \cdot a_{fogo} \quad (4.7)$$

onde $M^{[\epsilon]}$ representa a emissão da espécie ϵ ; α_{veg} e β_{veg} caracterizam a fração de biomassa acima do solo e a eficiência de queima da vegetação; $EF_{veg}^{[\epsilon]}$ é o fator de emissão para cada espécie ϵ ; e a_{fogo} a área queimada.

Neste trabalho, os dados de entrada no modelo correspondentes aos focos de queimadas detectados pelos algoritmos presentes nos produtos WFABBA e MOD14/MYD14, e correspondem a aproximadamente 506 mil focos detectados pelos produtos MOD14/MYD14 (GIGLIO et al., 2003) e 439 mil focos detectados pelo produto WFABBA (PRINS et al., 1998). As únicas variações nos dados de entrada do modelo referem-se aos diferentes métodos adotados para se estimar a emissão de gases traços e aerossóis:

- a) A primeira metodologia, chamada de dados originais, baseia-se no método tradicional do 3BEM para estimar a quantidade emitida para a atmosfera. Isto é feito de acordo com as coordenadas do foco, uso e ocupação da terra e quantidade de carbono disponível na vegetação queimada.
- b) A segunda metodologia corresponde ao uso de duas metodologias diferentes: enquanto que os dados provenientes do WFABBA/GOES são estimados pelo método tradicional do 3BEM, os dados do MODIS, integrados em grades de 4 km, são estimados a partir da metodologia que utiliza a ERF e os coeficientes de emissão de aerossóis para se estimar o $PM_{2,5\mu m}$ e o CO.
- c) A terceira metodologia para estimar a quantidade de $PM_{2,5\mu m}$ e de CO emitidos para a atmosfera segue os mesmos procedimentos da metodologia descrita em **b)**, porém, com a integração da ERF do MODIS em grades de 50 km.
- d) A quarta metodologia utiliza a ERF para calcular o total emitido para ambos os sensores. Para isto, desenvolveram-se três coeficientes de emissão baseados na ERF para os dados provenientes do WFABBA/GOES e utilizaram-se os coeficientes descritos em Ichoku e Kaufman (2005) para os dados do sensor MODIS.

- e) A quinta metodologia utiliza o coeficiente descrito em Wooster et al. (2005) para calcular o total de biomassa consumida pela queimada. Neste caso, os dados de ERF do MODIS e do WFABBA/GOES são utilizados para gerar o total de biomassa consumida. Estes valores, depois de multiplicados pelos fatores de emissão de cada espécie, indicam o total emitido para a atmosfera por ponto de grade.
- f) Semelhante a metodologia proposta por Wooster et al. (2005), esta metodologia baseia-se no coeficiente gerado pelos experimentos com combustões controladas de pequena escala realizados no INPE e descritos no **Capítulo 6** para calcular o total de biomassa consumida.
- g) A sétima modelagem realizada no CCATT-BRAMS utiliza os coeficientes descritos em Freeborn et al. (2008) para se obter o total de biomassa consumida. Estes experimentos são semelhantes aos realizados por Wooster et al. (2005) e os experimentos realizados no INPE.

4.9 Avaliação das metodologias e comparação com dados de campo

Para avaliar o desempenho das simulações realizadas no CCATT-BRAMS, os resultados foram comparados com os dados de campo coletados na região de Rondônia e Mato Grosso descritos em Freitas et al. (2007). Estes dados fazem parte dos experimentos da LBA (*Large Scale Biosphere-Atmosphere*) SMOCC (*Smoke, Aerosols, Clouds, rainfall, and Climate*) e RaCCI (*Radiation, Cloud, and Climate Interactions*) medidos na região amazônica no período de queimadas de 2002.

Obtiveram-se os dados em superfície de CO e de PM_{2,5µm} na localidade de Ouro Preto do Oeste (62,37° O, 10,75° S; RO) durante as campanhas do SMOCC/RaCCI ocorridas de 10/Set/2002 a 04/Nov/2002 (ANDREAE et al., 2004; FUZZI et al., 2007). Os dados dos perfis de CO, para os meses de setembro e outubro de 2002, foram adquiridos a partir de levantamentos aéreos, realizados com o avião Bandeirante do INPE, na região de Rondônia e Mato Grosso com o instrumento Aero-Laser (AL5002) operando a 1 Hz, descrito em Freitas et al. (2007).

CAPÍTULO 5

COEFICIENTES DE EMISSÃO BASEADOS NA ERF PARA O GOES E DISTRIBUIÇÃO MENSAL DAS QUEIMADAS NA AMÉRICA DO SUL

A cada ano grandes extensões terrestres sofrem a ação antropogênica e natural das queimadas. Estima-se que mais de 100 milhões de toneladas de aerossóis sejam lançados na atmosfera, dos quais 80% ocorrem em regiões tropicais do globo (HAO; LIU, 2000). Na América do Sul as queimadas estão vinculadas essencialmente às atividades agropecuárias e ao desflorestamento, apresentando grande variabilidade temporal e espacial. Este capítulo abordará a distribuição espacial e temporal das queimadas através da análise dos focos acumulados e de sua distribuição mensal nos 16 anos de observações disponíveis, além disso, deve-se discutir o desenvolvimento dos coeficientes de emissão baseados na ERF para o satélite GOES.

5.1 Coeficientes de emissão para o GOES

Os coeficientes de emissão baseados na ERF permitem calcular o total de $PM_{2,5\mu m}$ liberado para a atmosfera a partir da temperatura do fogo. Inicialmente esta metodologia foi desenvolvida por Ichoku e Kaufman (2005) para os produtos MOD14 e MYD14 da plataforma EOS. Neste trabalho, utilizaram-se as mesmas técnicas aplicadas aos dados do MODIS para gerar os coeficientes para os produtos WFABBA/GOES (PRINS et al. 1998).

Os coeficientes de emissão baseados na ERF originados para o GOES foram separados de acordo com o tipo de cobertura vegetal predominante. Desta forma, definiram-se três áreas homogêneas na América do Sul inicialmente separadas por Ichoku e Kaufman (2005) e visualizadas na **Figura 2.1 (pg. 38)**. As áreas correspondem a Floresta Tropical e Cerrado (a), vegetação típica da caatinga (b) e Florestas Ombrófila Densa e região de pradarias (c).

As **Figuras 5.1, 5.2 e 5.3** mostram os gráficos de dispersão e os coeficientes de emissão baseados na ERF para as regiões de Floresta tropical e Cerrado; de vegetação típica da Caatinga; e de Florestas Ombrófila Densa e Pradarias/Campos, respectivamente. O eixo

x representa a energia radiativa do fogo, em MJ.s^{-1} , e o eixo y a emissão de aerossóis, em Kg.s^{-1} . Para os três casos verificou-se que os coeficientes de correlação foram superiores a 86%.

Para a região de Floresta Tropical e Cerrado⁴ (**Figura 5.1**) obteve-se uma correlação de 86% e um coeficiente de determinação de 0,74. O valor do coeficiente de emissão baseado na ERF obtido foi de $0,00078.x^{1,30}$, em kg.MJ^{-1} . Esta análise considerou 4561 amostras, agrupadas em 112 dias, procedentes de observações simultâneas da ERF do WFABBA/GOES e de informações de emissão de aerossóis (Fórmula 4.5, pg.47).

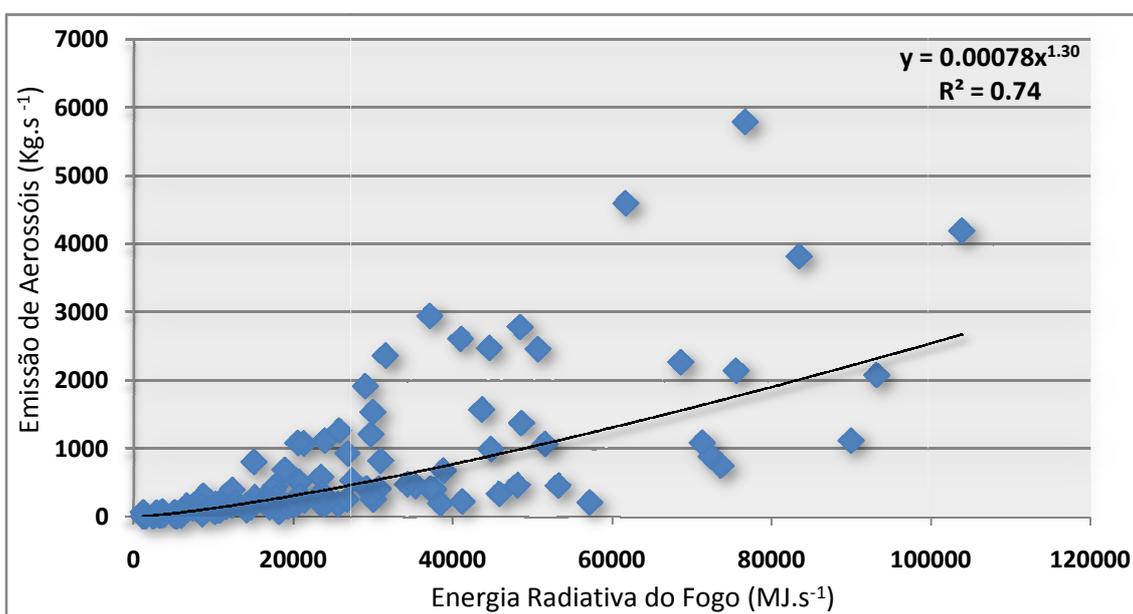


Figura 5.1 – Coeficiente de emissão baseado na ERF para a Região Amazônica e Cerrado.

Para a região típica de caatinga e nordeste brasileiro, entre outros biomas (**Figura 5.2**) obteve-se uma correlação de 92% e coeficiente de determinação de 0,86. A regressão linear entre a Emissão de Aerossóis e a ERF liberada para a mesma localização apresentou um coeficiente de emissão baseado na ERF de 0,006, em kg.MJ^{-1} , referentes a 772 amostras agrupadas em 54 dias.

⁴O coeficiente de emissão baseado na ERF para a região de Floresta Tropical e Cerrado teve seu melhor ajuste utilizando-se a regressão por potência.

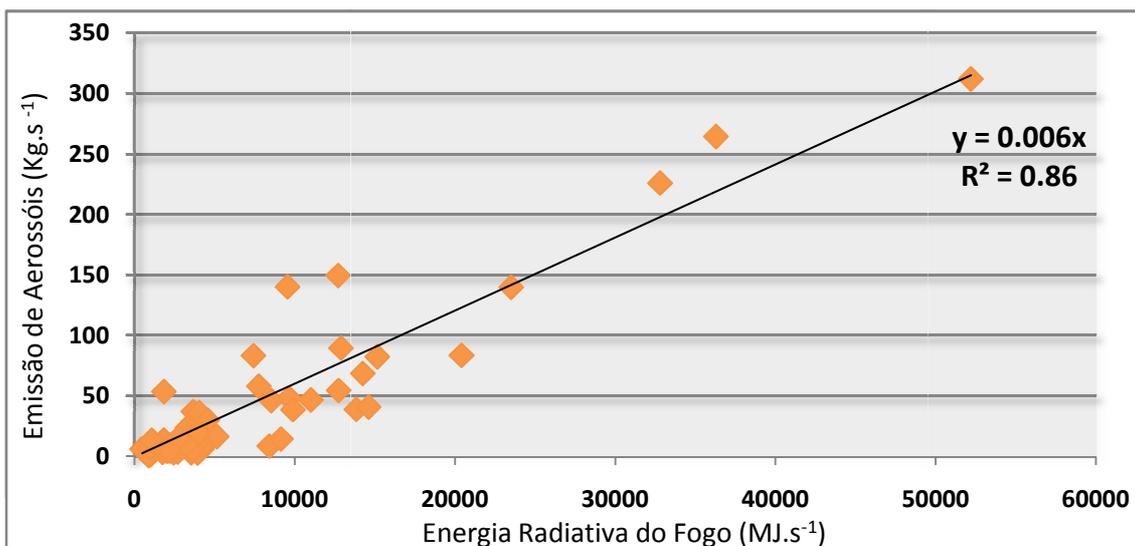


Figura 5.2 – Coeficiente de emissão baseado na ERF para a Região Nordeste do Brasil.

A **Figura 5.3** apresenta a análise realizada para a região da América do Sul abaixo de 20° que abrange os biomas de Floresta Ombrófila Densa e Mista, Pradarias, Campos, Floresta Estacional Semidecidual, entre outros, onde se verificou uma correlação de 93% e coeficiente de determinação de 0,87. Para este caso, o valor do coeficiente de emissão baseado na ERF obtido foi de 0,02 (kg.MJ⁻¹). O coeficiente encontrado, refere-se ao estudo de 294 amostras, agrupadas em 17 dias, avaliados através da relação entre a ERF e a emissão de aerossóis provenientes, principalmente, das informações de AOT_{555nm} do produto MOD04/MYD04.

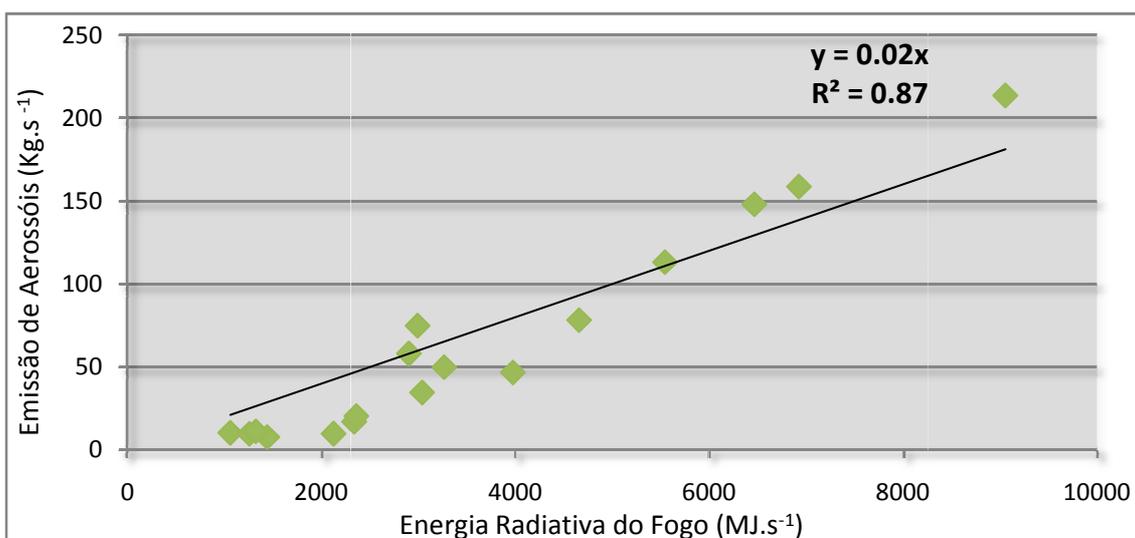


Figura 5.3 – Coeficiente de emissão baseado na ERF para a Região da América do Sul abaixo de 20°.

5.2 Focos de Queimada Acumulados para a América do Sul

A distribuição espacial e temporal das queimadas foi obtida a partir dos dados disponíveis no banco de dados de queimadas do CPTEC (<http://www.cptec.inpe.br/queimadas>). Estes dados representam uma série histórica de 16 anos (1992 a 2007) de focos de queimada (*hot spots*) coletados pelos satélites NOAA-11, NOAA-12, NOAA-14, NOAA-15, NOAA-16, NOAA-17, NOAA-18, GOES-8, GOES-12, EOS-AQUA, EOS-TERRA totalizando, aproximadamente, $6,5 \times 10^6$ focos.

A **Figura 5.4** mostra os focos de queimadas acumulados nos últimos 16 anos (1992 a 2007) para a América do Sul. Nota-se que a maioria dos focos no Brasil está concentrada no “arco do desmatamento”, localizados nas regiões Centro-Oeste e Norte do Brasil. Nesta região o número de focos acumulados em cada ponto de grade de 20 km é superior a 2500.

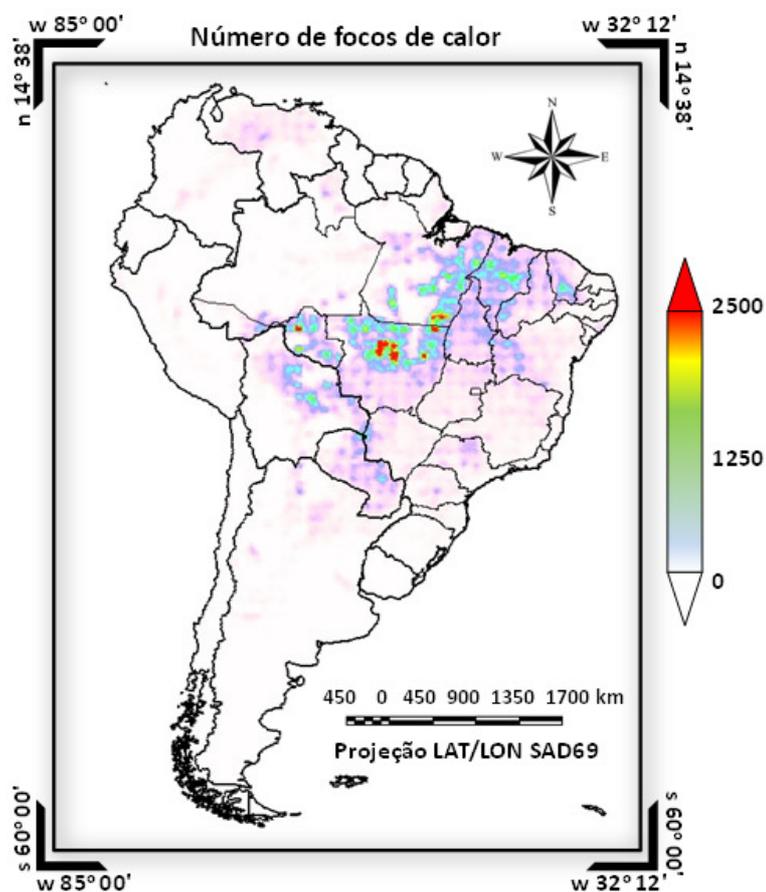


Figura 5.4 – Focos de queimada acumulados (1992 – 2007).

A Tabela 5.1 mostra a quantidade de focos acumulados para os Estados brasileiros e para os países da América do Sul. Nos Estados brasileiros percebemos uma grande variabilidade da distribuição dos focos, sendo o Mato Grosso (MT) o estado brasileiro com o maior número de queimadas, com 1.332.538 focos acumulados nos últimos 16 anos, seguido pelo Estado do Pará (PA), Maranhão (MA), Rondônia (RO) e Tocantins (TO), com, respectivamente, 931.420, 489.855, 321.435 e 313.533 focos. Entre os países da América do Sul, o Brasil possui o maior número de focos de queimadas, com 5.110.560, seguido por Bolívia (516.769), Paraguai (310.360), Argentina (197.099) e Venezuela (181.967).

Tabela 5.1 – Focos Acumulados por Estados e Países

Nome	Focos	Nome	Focos	Nome	Focos
AC	<i>50.154</i>	PA	<i>931.420</i>	TO	<i>313.533</i>
AL	<i>10.295</i>	PB	<i>22.153</i>	Argentina	<i>197.099</i>
AP	<i>21.408</i>	PR	<i>56.195</i>	Bolívia	<i>516.769</i>
AM	<i>109.211</i>	PE	<i>29.690</i>	Chile	<i>5.379</i>
BA	<i>308.229</i>	PI	<i>235.694</i>	Colômbia	<i>46.462</i>
DF	<i>3.088</i>	RJ	<i>7.064</i>	Equador	<i>1.843</i>
CE	<i>148.497</i>	RN	<i>10.288</i>	Guiana	<i>3.149</i>
ES	<i>5.565</i>	RS	<i>14.969</i>	Guiana Francesa	<i>923</i>
GO	<i>156.983</i>	RO	<i>321.435</i>	Paraguai	<i>310.360</i>
MA	<i>489.855</i>	RR	<i>36.957</i>	Peru	<i>46.938</i>
MT	<i>1.332.538</i>	SC	<i>15.009</i>	Suriname	<i>1.285</i>
MS	<i>176.435</i>	SP	<i>113.693</i>	Uruguai	<i>1.960</i>
MG	<i>186.677</i>	SE	<i>3.525</i>	Venezuela	<i>181.967</i>

Os focos de queimadas nestes últimos 16 anos indicam que grande parte destes ocorre sobre áreas de formação vegetal densa. Segundo os dados disponíveis em <<http://www.cptec.inpe.br/queimadas>> cerca de 290.000 focos ocorreram em áreas de contato entre formações vegetais diferentes, como por exemplo, entre o cerrado e a Floresta Amazônica; 95.736 focos foram encontrados em áreas de Floresta Estacional Semidecidual⁵; 43.552 focos em áreas de Floresta Ombrófila Mista⁶; aproximadamente

⁵ Entende-se por Floresta Estacional Semidecidual uma formação vegetal que possui árvores caducifólias, ou seja, perdem de 20 a 50% de suas folhas na estação seca. Esta formação é típica do bioma Mata Atlântica (Paula et al., 2003; Meira-Neto e Martins, 2002).

⁶ A Floresta Ombrófila Mista, também conhecida como Floresta de Araucárias, está presente nos Estados de Santa Catarina, Rio Grande do Sul e Paraná, componente do bioma Mata Atlântica, esta formação vegetal está presente em altitudes elevadas e em clima temperado (Ab`saber, 1977)

329.000 focos de queimadas ocorreram na Floresta Ombrófila Aberta⁷ e aproximadamente 400.000 focos aconteceram em áreas de Floresta Ombrófila Densa⁸.

5.2.1 Distribuição mensal dos focos para a América do Sul

A **Figura 5.5** mostra a distribuição espacial mensal das queimadas na América do Sul para os meses de Janeiro a Junho. Nesta figura estão contabilizados os focos de 1992 a 2007 para cada mês. Nota-se que a Venezuela, Colômbia, Paraguai e algumas partes do Brasil, como, por exemplo, o Amapá e o Nordeste Brasileiro possuem números significativos de queimada nos meses de Janeiro/Fevereiro/Março. Nas outras regiões do Brasil e da América do Sul a quantidade de focos é muito pequena, conseqüência, entre outros fatores, do ciclo hidrológico.

No outono o regime de precipitação sofre uma redução significativa, com um menor volume de chuvas e de teor de umidade na vegetação e no solo, os focos de queimada no Brasil começam a aumentar significativamente, principalmente na região Centro-Oeste, no Estado do Mato Grosso, em junho neste Estado há uma densidade superior a 400 focos por ponto de grade de 20 km. Existem regiões intermediárias, como, por exemplo, São Paulo, Tocantins e Bahia, onde a densidade de focos pode ultrapassar os 100 focos por ponto de grade. Nesta mesma época, os outros países da América do Sul diminuem significativamente o número de focos, o que torna o Brasil o país com o maior número de focos entre Abr/Maio/Junho.

A **Figura 5.6** ilustra os focos de queimada acumulados para os meses de julho a dezembro. Nesta época grande parte do Brasil encontra-se no período seco, com a precipitação trimestral acumulada variando entre 20 e 200 mm nos meses de julho/agosto/setembro em grande parte das regiões Norte e Centro-Oeste (**Figura 3.1**). No mês de julho, a Bolívia e os Estados do Mato Grosso, Pará, Tocantins, Maranhão, e em menor escala São Paulo, concentram em seus territórios grande parte das queimadas

⁷ A Floresta Ombrófila Aberta é caracterizada pela transição da Floresta Amazônica com formações florestais adjacentes com fitomassa e fitovolume de recobrimento de menor densidade (Silva e Pereira, 2005).

⁸ A Floresta Ombrófila Densa é definida como uma floresta perenifólia, com folhas sempre verde, com dosséis superiores a 15 metros e árvores que podem alcançar 40 metros. Este tipo de formação vegetal está presente em grande parte do Brasil e possui um estado avançado de degradação.

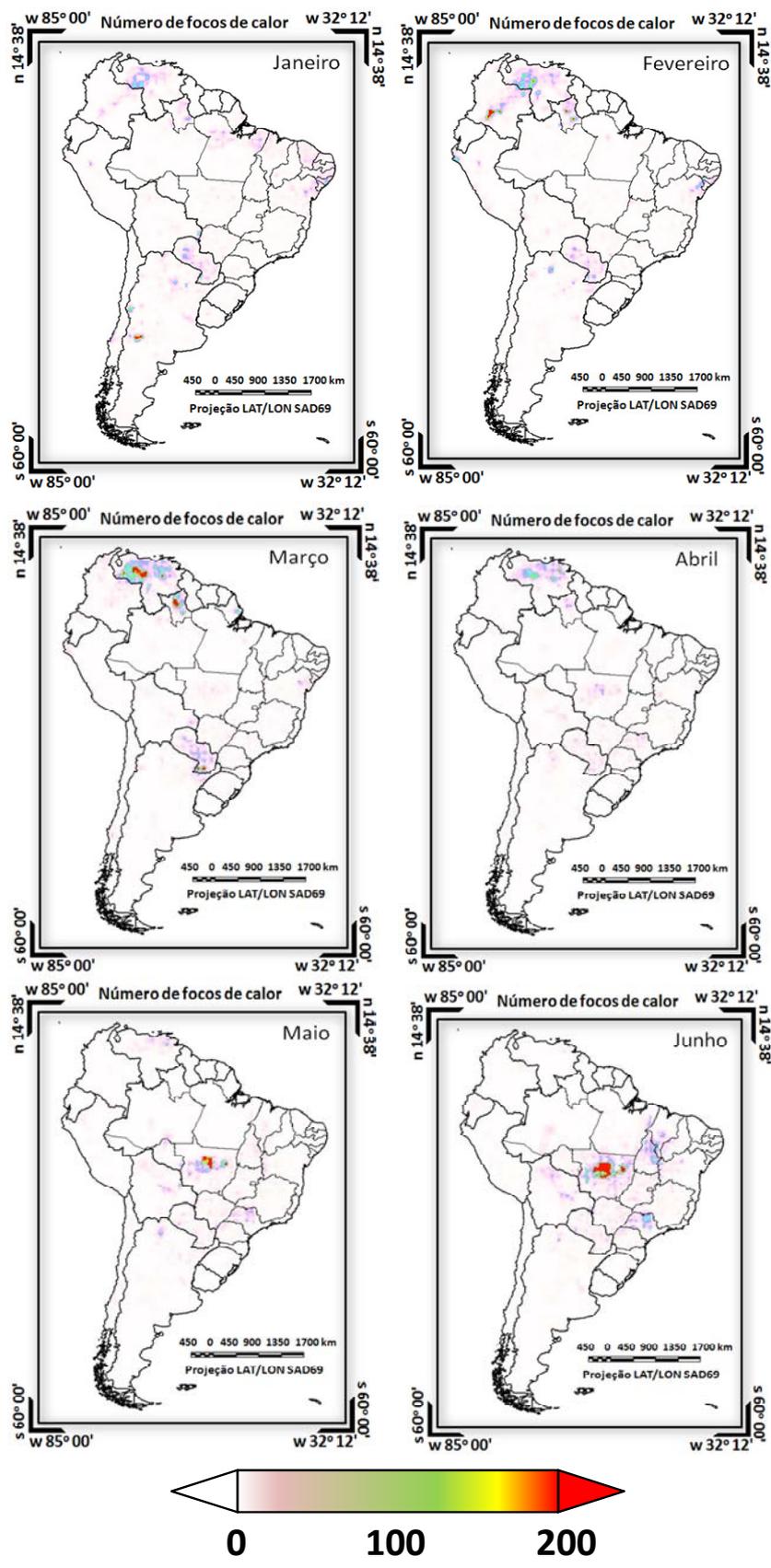


Figura 5.5 – Focos Mensais de queimada acumulados de Janeiro a Junho.

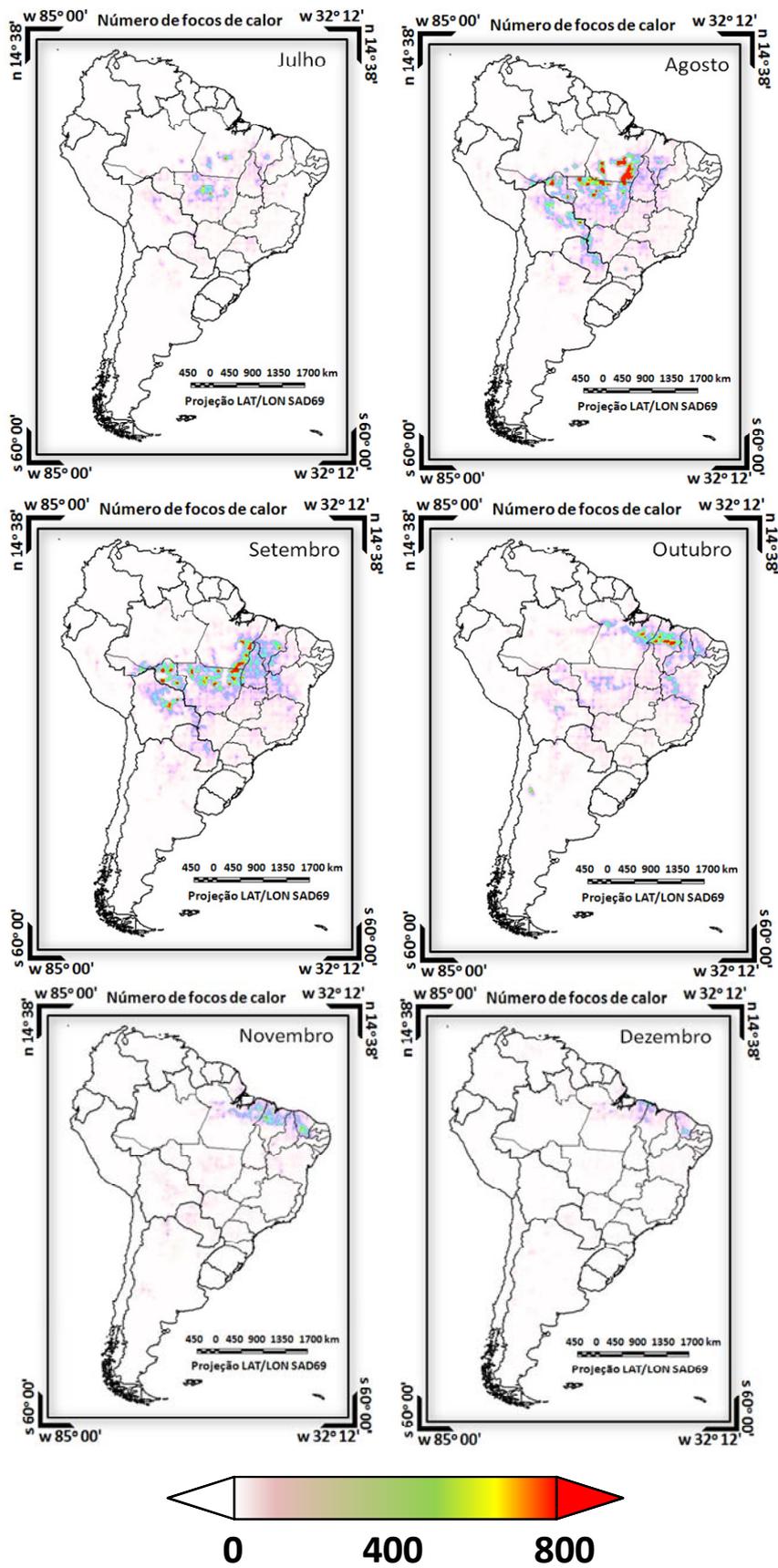


Figura 5.6 – Focos Mensais de queimada acumulados de Julho a Dezembro.

ocorridas neste mês, com uma densidade superior a 400 focos por ponto de grade. Em agosto, a densidade de focos aumenta significativamente. Entre os Estados com os maiores números de queimadas, pode-se citar, por exemplo, Rondônia, Pará, Mato Grosso, São Paulo, Tocantins, Maranhão, Bahia, Paraná e os países Paraguai e Bolívia. No mês de setembro, principal mês de queimadas, a densidade dos focos pode chegar a 1200 focos por ponto de grade. Entre os Estados que apresentam as maiores quantidades pode-se citar o Mato Grosso, Pará, Bahia, Tocantins, Maranhão e, em menor quantidade, São Paulo e Minas Gerais.

No mês de outubro as queimadas acompanham o regime de precipitação e deslocam-se para o norte do país, orientando-se no sentido ONO-ESE a 5° Sul. Nestas condições, os Estados do Pará, Maranhão, Bahia, Piauí, Ceará, Mato Grosso e, em menor quantidade, os estados de Rondônia e Minas Gerais, apresentam elevadas concentrações de focos de queimada. No mês de novembro, a linha de queimada com mesma orientação, desloca-se para aproximadamente 4° Sul, mantendo as queimadas concentradas no Nordeste do Brasil e no Pará. Em dezembro, os focos de queimada diminuem significativamente em todo o Brasil, pode-se visualizar uma pequena concentração no Nordeste do Brasil, orientada no sentido ONO-ESE, permanecendo entre 4° e 2° Sul.

CAPÍTULO 6

OS EXPERIMENTOS COM A ERF E SUAS RESPOSTAS ESPECTRAIS

Atualmente diversas pesquisas são desenvolvidas com o objetivo de estimar o total de biomassa consumida e a relação com a ERF liberada pela mesma. Cada método adotado apresenta suas vantagens e desvantagens referentes, entre outros fatores, aos procedimentos e aos valores assumidos para se gerar os coeficientes. Este capítulo abordará o experimento realizado com 16 amostras de biomassa submetidas à queima controlada, com o objetivo de verificar a relação entre o consumo de biomassa e as medidas de ERF, obtida através da inversão da equação referente a lei de Planck.

6.1 Respostas Espectrais e a Radiância liberada

A **Figura 6.1** apresenta o comportamento espectral das amostras de vegetação submetidas ao processo de combustão no experimento com a ERF e a resposta espectral da placa Spectralon com reflectância de aproximadamente 100% em todo o espectro. Em comprimentos de onda superiores a 2150 nm visualizam-se alguns ruídos, inerentes do equipamento e da fonte de iluminação.

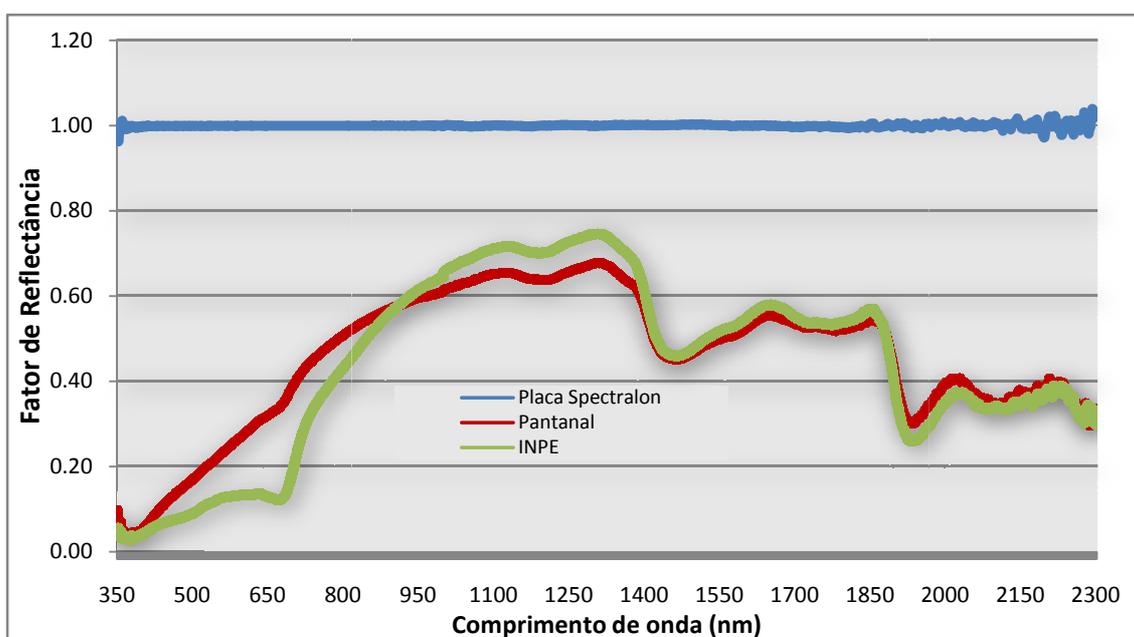


Figura 6.1 – Comportamento Espectral da vegetação colhida no Pantanal (vermelho), da vegetação retirada no INPE de São José dos Campos (verde) e da placa Spectralon (azul).

As amostras da vegetação de campos/pastagens obtidas no Pantanal Sul-Mato-Grossense (em vermelho) referentes ao Bioma de Cerrado foram extraídas três meses antes do processo de combustão realizado no INPE de São José dos Campos (SJC). O gráfico em vermelho indica que a vegetação encontrava-se em avançado estágio de senescência, com elevados valores de fator de reflectância no infravermelho próximo e médio (entre 0,55 a 0,65), o comportamento espectral no visível (400 a 700 nm) apresentou seus valores mais elevados na faixa espectral do amarelo e vermelho, caracterizando uma vegetação sem pigmentação ativa.

As amostras de vegetação extraídas do INPE, uma semana antes do processo de combustão, estão representadas na cor verde. Percebe-se uma grande diferença na resposta espectral na região do visível, com picos na faixa do espectro eletromagnético correspondente ao verde, e elevados valores de fator de reflectância no infravermelho próximo e médio (entre 0,45 a 0,75). A partir de 1350, próximos as bandas de absorção de água, as repostas espectrais das vegetações são semelhantes.

A diferença no comportamento espectral das duas amostras de vegetação indica o grau de senescência de cada uma: enquanto que a vegetação proveniente do Pantanal apresenta pouca pigmentação na sua composição (clorofila a e b, entre outros constituintes), a vegetação do INPE apresenta pigmentos em suas folhas, variando desta forma o fator de reflectância entre 500 e 650 nm e entre 950 e 1400 nm.

A **Figura 6.2** apresenta o comportamento espectral da radiância emitida no experimento de queima controlada de 500 gramas de biomassa vegetal proveniente do Pantanal Sul Mato-Grossense. Embora a curva represente um caso específico de queima, as outras 15 amostras apresentam comportamento similar, diferenciado apenas na intensidade e duração dos valores obtidos.

Observa-se no gráfico abaixo a evolução temporal da radiância emitida no processo de queima da biomassa vegetal. A aquisição dos dados no período noturno faz com que a radiância inicial no $t=0$ apresente valores pequenos, praticamente iguais a zero. A primeira medida radiométrica, geralmente 5 segundos após o início do processo de combustão, indica que embora apenas uma pequena parcela do fogo afete a área do IFOV do sensor, esta pequena contribuição pode ser detectada. À medida que as chamas

aumentam sua intensidade e cobrem uma área maior do IFOV, percebe-se uma elevação nos valores de radiância nos comprimentos de onda superiores a 2300 nm.

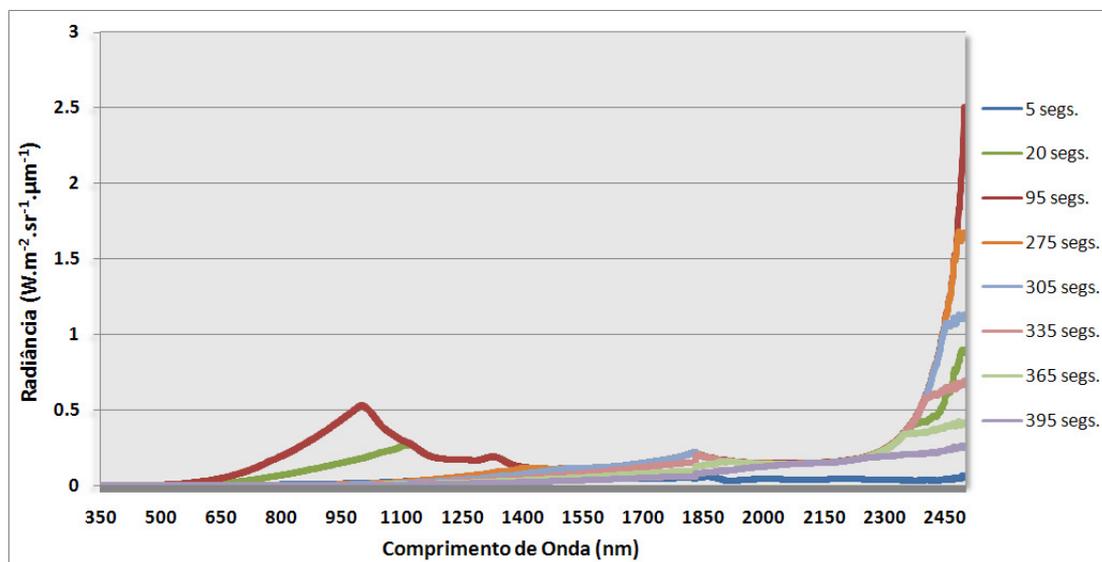


Figura 6.2 – Exemplo de amostras da radiância espectral de um experimento no intervalo de tempo de 5 a 395 segundos após o início do processo de combustão.

As análises das radiâncias espectrais obtidas nos 16 experimentos a cada 5 segundos mostram que a partir do momento em que as chamas cobrem todo o IFOV do sensor, geralmente depois de 40 a 50 segundos do início da combustão, os valores de radiância espectral não sofrem alterações significativas, permanecendo, desta forma, constantes. Neste período, percebe-se uma elevação nos valores de radiância na região do infravermelho próximo (800 a 1100 nm) e na região do infravermelho médio (2300 a 2500 nm). Provavelmente o primeiro pico em 1000 nm represente a saturação do sinal, devido à diferença de sensibilidade dos detectores, porém, o segundo pico em 2500 nm está relacionado com a emissão da radiância de acordo com a temperatura.

O gráfico presente na **Figura 6.2** mostra que após a extinção de grande parte da biomassa disponível, os valores de radiância sofrem uma redução gradual com o decorrer do tempo. Entre os principais fatores desta redução está a diminuição das chamas e o início da fase de brasas, onde a temperatura e o consumo de biomassa são menores.

6.2 Relação entre o consumo de biomassa e a ERF

A partir da radiância espectral coletada no intervalo de 400 a 2500 nm pôde-se extrair a temperatura do fogo pela inversão da equação correspondente a lei de Planck. A **Figura 6.3** mostra a temperatura máxima, a temperatura mínima e a temperatura média obtida na queima controlada da biomassa vegetal por unidade de massa. Percebe-se que embora a quantidade de biomassa disponível para a queima varie consideravelmente entre os 16 experimentos, a temperatura máxima e média sofreram pequenas alterações.

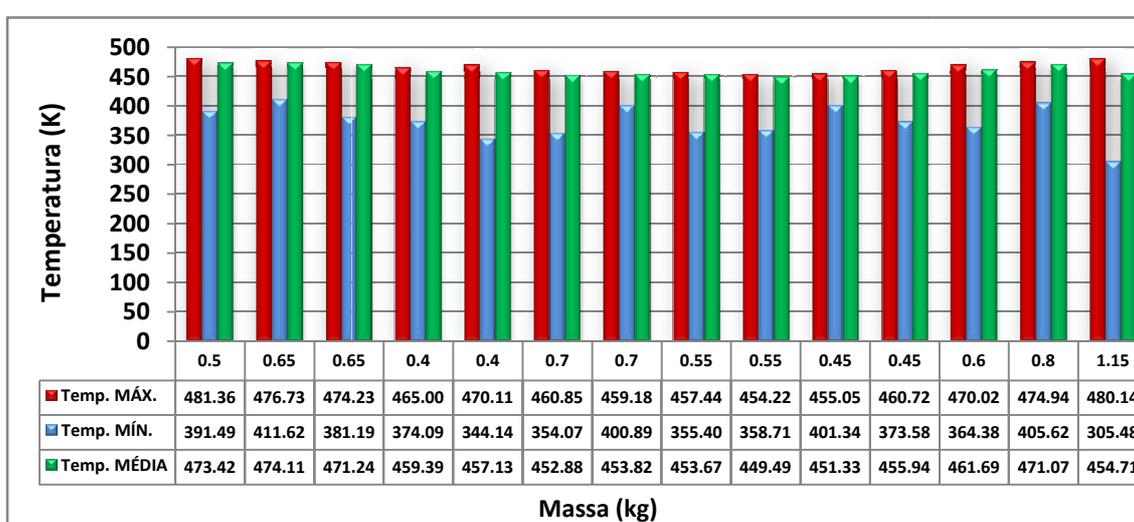


Figura 6.3 – Temperatura Máxima, Média e Mínima dos experimentos realizados com a ERF.

Entre os fatores que proporcionam temperaturas máximas e médias semelhantes está o preenchimento de toda a área do campo de visada do sensor (IFOV) pelas chamas. Na **Figura 6.3** nota-se que a temperatura mínima apresenta as maiores variações. Esta variável pode ser entendida como a primeira tomada das medidas de radiância das amostras, indicando, desta forma, a velocidade inicial do processo de combustão.

A **Figura 6.4** exibe a variação da temperatura no experimento realizado com 1,15 kg de biomassa vegetal expostas ao processo de combustão controlada e a relação entre o tempo de queima das 16 amostras e a ERF por elas liberada. Ao analisar o gráfico (a) desta figura, que mostra o comportamento da temperatura (em Kelvin) pelo tempo decorrido (em minutos), percebe-se que a mesma atinge um pico máximo nos momentos iniciais de combustão, geralmente após 10 - 20 segundos. Neste momento a temperatura obtida não sofre alterações significativas permanecendo por minutos no

mesmo patamar térmico, essas características também foram observadas nos outros experimentos.

Como visualizado no gráfico de temperatura máxima, de temperatura média e de temperatura mínima de todos os experimentos realizados, a variação de temperatura máxima e média são pequenas. Entretanto, o diagrama de dispersão, que indica a relação entre o tempo total de combustão (min.) e a ERF (kW) liberada, indica que a principal diferença entre os experimentos está no tempo total de combustão e na ERF total emitida. Com um coeficiente de determinação de 0,98 e uma correlação de 99%, pode-se dizer que quanto maior a quantidade de biomassa disponível no processo de queima, maior será a duração da queimada e, conseqüentemente, maior a ERF liberada.

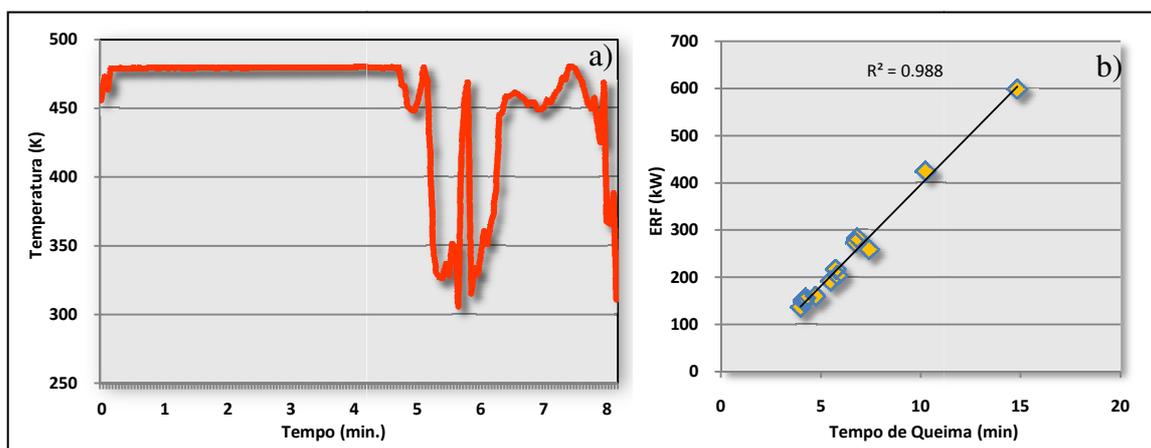


Figura 6.4 – a) Exemplo da variação da temperatura com o tempo de um dos experimentos; b) Relação entre a ERF e o tempo total de combustão.

A **Figura 6.5** mostra o resultado final dos experimentos que relacionam o total de biomassa consumida e a ERF liberada neste processo. Atualmente, encontram-se na literatura alguns coeficientes que multiplicados pela ERF permitem calcular o total de biomassa consumida pela queimada, pode-se citar o coeficiente encontrado por Wooster et al. (2005) de **0,368**; e o coeficiente calculado por Freeborn et al. (2008) de **0,710**.

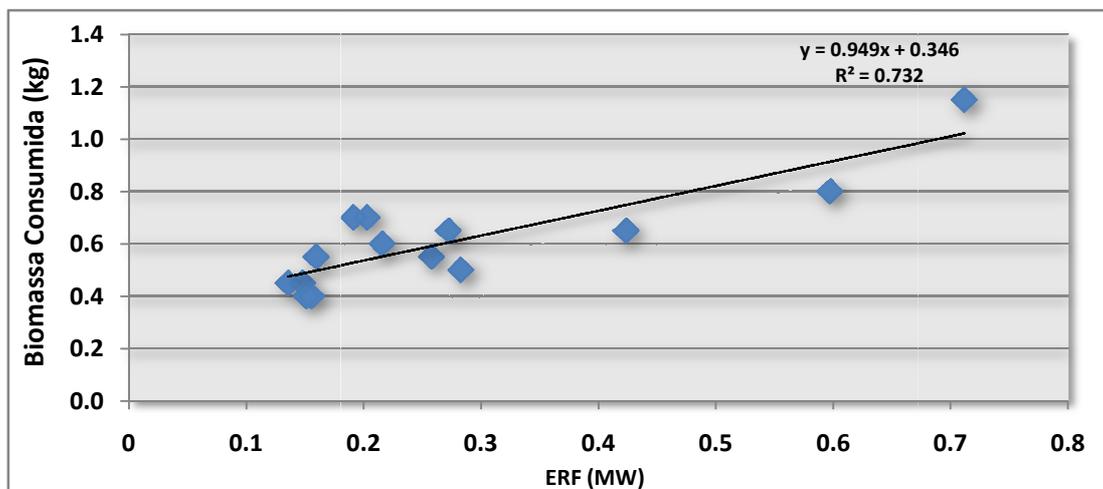


Figura 6.5 – Regressão linear relacionando o total de biomassa consumida e a ERF medida pelo FieldSpec Pro II.

Com um coeficiente de determinação de 0,73 e correlação de 85% o valor encontrado neste trabalho foi de **0,949** (em kg.MW^{-1} ou kg.s.MJ^{-1}), ou seja, para cada MW ou MJ/s liberado pela queimada é consumido aproximadamente 1 kg de biomassa vegetal. Como descrito em Wooster et al. (2005), os coeficientes encontrados em experimentos de combustão de pequena escala devem sofrer algumas alterações para serem aplicados aos dados de satélites, como, por exemplo, o MODIS e o GOES. A relação entre o consumo de biomassa e a energia radiativa liberada pode ser calculada pela fórmula 6.1:

$$(6.1)$$

onde BC representa a quantidade de biomassa consumida em kg.s^{-1} e ERF a energia radiativa do fogo em MW.

CAPÍTULO 7

MODELAGEM NO CCATT-BRAMS E AVALIAÇÃO DOS RESULTADOS

A modelagem ambiental de diversos processos físicos e elementos terrestres permitem transpor o mundo contínuo para o mundo discreto. Desta forma, os modelos simulam as interações entre os múltiplos sistemas ambientais, como, por exemplo, a atmosfera, a superfície terrestre, o oceano e as interações existentes entre eles. Este capítulo avaliará os resultados obtidos na simulação das emissões de CO e de PM_{2,5µm}, através do uso da energia liberada pelo fogo e dos coeficientes de emissão baseados na ERF. Estas simulações foram comparadas com os dados de campo coletados durante as campanhas do SMOCC/RaCCI.

7.1 Comparação do PM_{2,5µm} simulado com os dados do SMOCC/RaCCI

Como descrito no **item 4.8 (Capítulo 4)**, neste trabalho foram adotadas sete maneiras distintas para se estimar o total de PM_{2,5µm} que serviram como entrada para o CCATT-BRAMS. A tabela abaixo mostra um resumo do método utilizado e a nomenclatura que será empregada neste capítulo.

Tabela 7.1 – Nomenclatura adotada

Metodologia utilizada atualmente para estimar a emissão de gases traços e aerossóis no CCATT-BRAMS, desenvolvida por Longo et al. (2007)	<i>3BEM</i>
Metodologia que utiliza a ERF do MODIS e do GOES para estimar a emissão de gases traços e aerossóis	<i>MODIS e GOES ERF</i>
Metodologia que estima a emissão de gases traços e aerossóis a partir do 3BEM para os dados provenientes do GOES; e utiliza a ERF para os dados provenientes do MODIS, calculados a partir de uma grade de 4 km (adotada para a integração)	<i>4 km MODIS ERF e GOES trad.</i>

Continua

Tabela 7.1 – Conclusão.

Metodologia que estima a emissão de gases traços e aerossóis a partir do 3BEM para os dados provenientes do GOES; e utiliza a ERF para os dados provenientes do MODIS, calculados a partir de uma grade de 50 km (adotada para a integração)	<i>50 km MODIS ERF e GOES trad.</i>
Metodologia que utiliza o coeficiente para o cálculo da biomassa consumida proposto por Wooster et al. (2005)	<i>Wooster et al. (2003)</i>
Metodologia que utiliza o coeficiente para o cálculo da biomassa consumida proposto por Freeborn et al. (2005)	<i>Freeborn et al. (2008)</i>
Metodologia que utiliza o coeficiente para o cálculo da biomassa consumida gerado pelos experimentos realizados no INPE/SJC	<i>Pereira et al.</i>

A **Figura 7.1** mostra o mapa do total de $PM_{2,5\mu m}$ emitido para a atmosfera no período de 15/Jul/2002 a 15/Nov/2002 baseado no método tradicional (3BEM) implementado atualmente no modelo CCATT-BRAMS (LONGO et al., 2007). Adjacentes ao mapa visualizam-se: a série temporal do $PM_{2,5\mu m}$ coletada nas campanhas do SMOCC/RaCCI, cujos valores representam a média diária centralizada em 12:00Z (em preto) e os valores resultantes da modelagem no CCATT-BRAMS às 12:00Z (em azul claro); e a regressão linear existente entre os dados modelados de $PM_{2,5\mu m}$ (no eixo x, em $\mu g.m^{-3}$) e os dados coletados em campo (no eixo y, em $\mu g.m^{-3}$).

No mapa os maiores valores de concentração do $PM_{2,5\mu m}$ localizam-se nos Estados Brasileiros do Mato Grosso, de Rondônia e do Pará e na Bolívia. Nestas regiões os valores totais de emissão no período de 15/Jul/2002 a 15/Nov/2002 foram superiores a $35.000 \mu g.m^{-3}$. Neste método, que utiliza o tipo de uso e cobertura da terra (BELWARD, 1996) e o carbono presente na vegetação viva (OLSON et al., 2000; HOUGHTON et al., 2001), obteve-se uma correlação de 87% entre os dados estimados e os dados utilizados como verdade terrestre. Nota-se que os valores estimados são 77% menores que os valores encontrados em campo, sendo as maiores diferenças constatadas entre os dias 15/Set/2002 a 24/Set/2002 e 02/Out/2002 a 07/Out/2002. Nestes períodos são verificados valores elevados de $PM_{2,5\mu m}$, indicativos de grandes queimadas na

região de Ouro Preto do Oeste / RO. Entre as desvantagens deste método está a utilização de uma base de dados de uso e ocupação da terra e densidade de carbono que não é atualizada constantemente, desta forma, um pixel de queimada que pode ocorrer na mesma localização geográfica no mesmo ano ou em anos diferentes irá emitir a mesma quantidade de carbono e terá o mesmo fator de emissão, embora a região afetada tenha sido transformada, como, por exemplo, em pasto para a criação de gado ou agricultura.

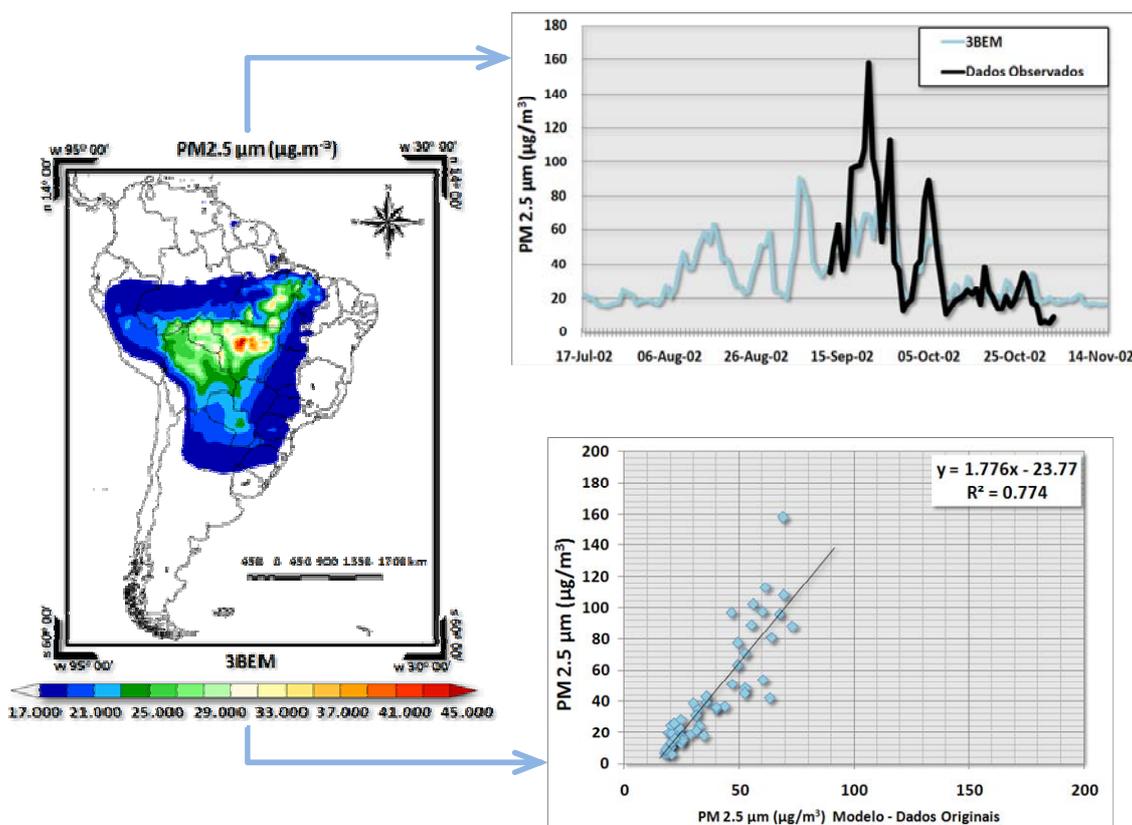


Figura 7.1 – Mapa da emissão total de $\text{PM}_{2,5\mu\text{m}}$ ($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) para o período de 15/Jul/2002 a 15/Nov/2002; Série temporal do $\text{PM}_{2,5\mu\text{m}}$ ($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) observado (em preto) e o estimado pelo método tradicional do CCATT-BRAMS (em azul claro); Regressão linear entre o dado modelado e o dado observado.

A **Figura 7.2** mostra o mapa do total de $\text{PM}_{2,5\mu\text{m}}$ emitido para a atmosfera no período de 15/Jul/2002 a 15/Nov/2002, cuja simulação utilizou a ERF e os coeficientes de emissão baseados na ERF extraídos dos dados do MODIS (ICHOKU; KAUFMAN, 2005) e dos dados do GOES (**Capítulo 5, item 5.1**). Neste método os maiores valores de $\text{PM}_{2,5\mu\text{m}}$

localizam-se nos Estados Brasileiros do Mato Grosso, de Rondônia, do Pará e do Mato Grosso do Sul e na Bolívia e Paraguai. Nestes locais os valores acumulados de $PM_{2,5\mu m}$ excederam $37.000 \mu g.m^{-3}$.

O uso da ERF e dos coeficientes de emissão para estimar o $PM_{2,5\mu m}$ emitido na queimada mostrou uma correlação de aproximadamente 86% entre os dados estimados e os dados utilizados como verdade terrestre. Os valores simulados foram subestimados em 23%, contudo, percebe-se uma melhora significativa entre os dias 15 a 24/Set/2002, onde são verificados valores elevados de $PM_{2,5\mu m}$ em Ouro Preto do Oeste / RO.

A principal vantagem deste método está na independência de uma base de dados de carbono disponível para a queima. Neste método a utilização da temperatura e da área queimada permite o cálculo da emissão de $PM_{2,5\mu m}$ e, possivelmente, possibilita uma melhor estimativa das emissões nas regiões abaixo do trópico de Capricórnio.

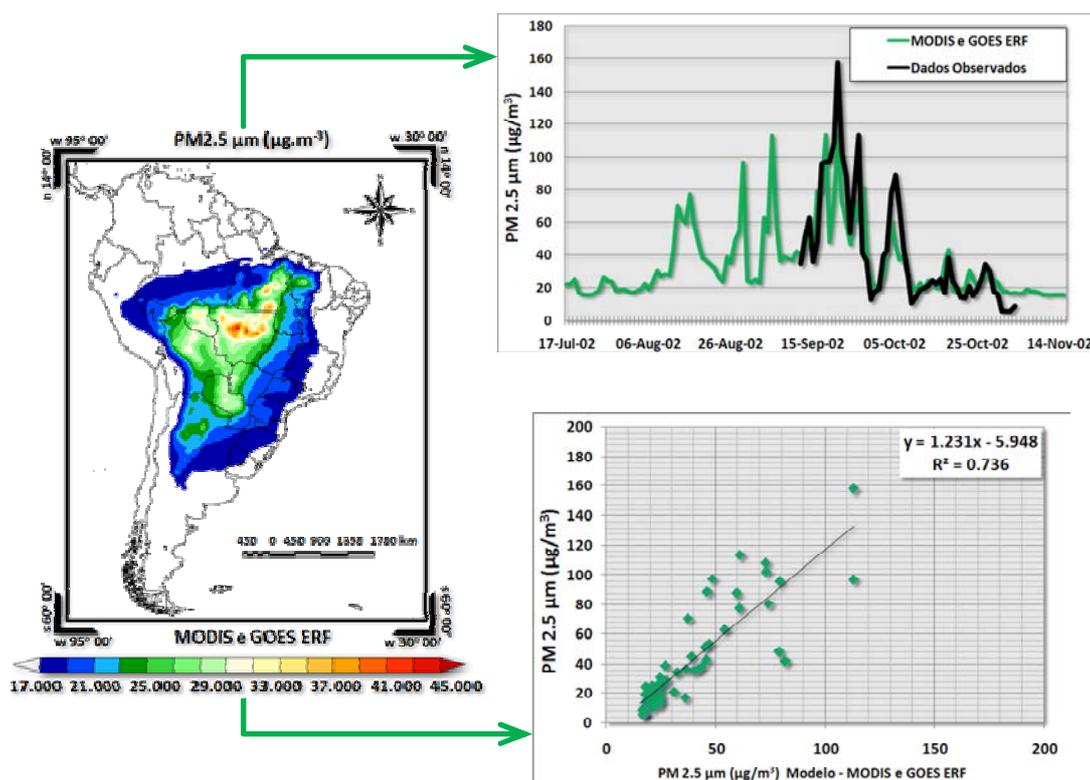


Figura 7.2 – Mapa da emissão total de $PM_{2,5\mu m}$ ($\mu g.m^{-3}$) para o período de 15/Jul/2002 a 15/Nov/2002; Série temporal do $PM_{2,5\mu m}$ ($\mu g.m^{-3}$) observado (em preto) e o estimado pela ERF para o MODIS e GOES (em verde); Regressão linear entre o dado modelado e o dado observado.

A **Figura 7.3** mostra o mapa da emissão total de $PM_{2,5\mu m}$ emitido para a atmosfera no período estudado adotando-se o método 4 km ERF MODIS e GOES trad. que utiliza os coeficientes de emissão baseados na ERF para o MODIS (ICHOKU; KAUFMAN, 2005) e o 3BEM para os dados provenientes do WFABBA/GOES (LONGO et al., 2007). Neste método os maiores valores de $PM_{2,5\mu m}$ localizam-se nos Estados Brasileiros do Mato Grosso, de Rondônia e do Pará e na Bolívia. Nestes locais os valores acumulados de $PM_{2,5\mu m}$ excederam $39.000 \mu g \cdot m^{-3}$.

O uso dos coeficientes de emissão baseados na ERF para estimar o $PM_{2,5\mu m}$ emitido pelos dados do MODIS e o método 3BEM para estimar o GOES em uma grade integrada de 4 km apresentou uma correlação de aproximadamente 86% entre os dados estimados e os dados utilizados como verdade terrestre. Entretanto, o modelo subestimou os valores em aproximadamente 17%.

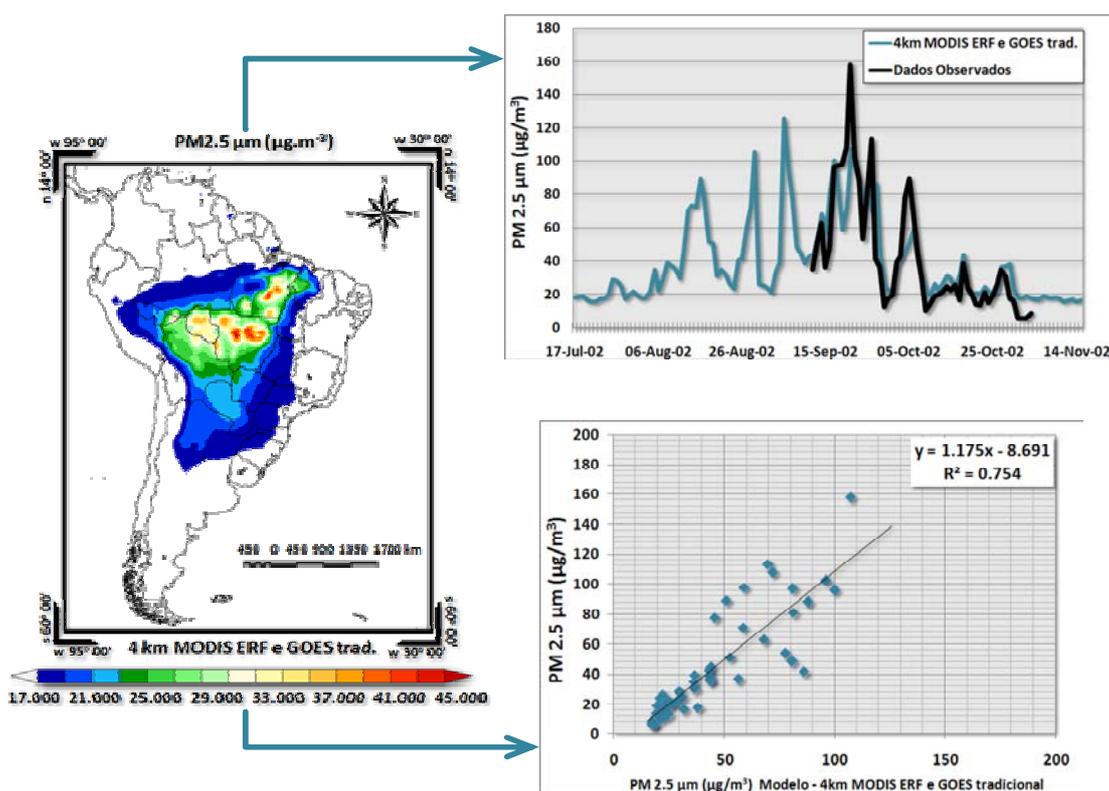


Figura 7.3 – Mapa da emissão total de $PM_{2,5\mu m}$ ($\mu g \cdot m^{-3}$) para o período de 15/Jul/2002 a 15/Nov/2002; Série temporal do $PM_{2,5\mu m}$ ($\mu g \cdot m^{-3}$) observado (em preto) e o estimado pela ERF para o MODIS e GOES tradicional em uma grade de 4 km (em azul escuro); Regressão linear entre o dado modelado e o dado observado.

Percebe-se uma boa coerência entre os dados modelados e os dados observados, semelhantes aos encontrados na **Figura 7.2**, que utilizou a ERF para ambos os sensores. A diferença entre os dois métodos é visualizada em locais mais afastados da região tropical, como, por exemplo, o Paraguai e as áreas próximas aos Andes, onde os valores encontrados são de 6.000 a 10.000 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ menores do que os encontrados no método MODIS e GOES ERF.

A **Figura 7.4** mostra o mapa da emissão total de $\text{PM}_{2,5\mu\text{m}}$ emitido para a atmosfera no período de 15/Jul/2002 a 15/Nov/2002 utilizando o método 50 km MODIS ERF e GOES trad.. O uso do método desenvolvido por Longo et al. (2007) para estimar os dados do WFABBA/GOES e o uso de uma grade de 50 km para, a partir da integração da emissão proveniente do MODIS, estimar o $\text{PM}_{2,5\mu\text{m}}$ mostrou uma correlação de aproximadamente 67% entre os dados estimados e os dados utilizados como verdade terrestre. Entretanto, o modelo superestimou os valores em aproximadamente 6%.

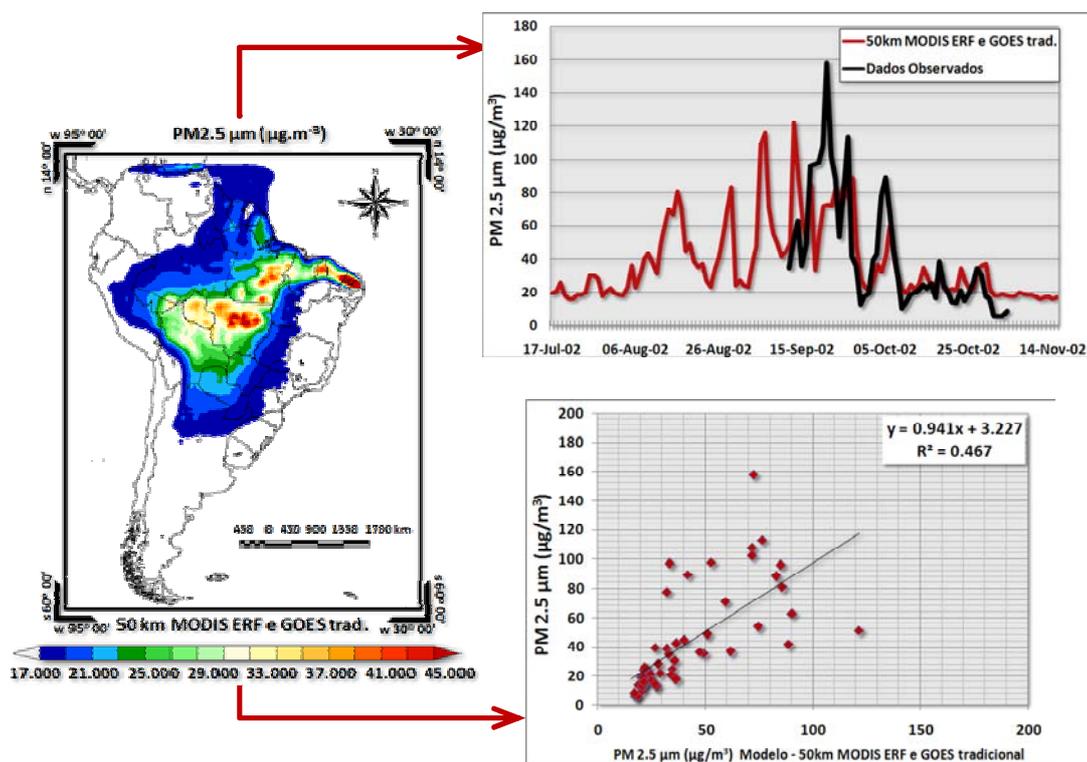


Figura 7.4 – Mapa da emissão total de $\text{PM}_{2,5\mu\text{m}}$ ($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) para o período de 15/Jul/2002 a 15/Nov/2002; Série temporal do $\text{PM}_{2,5\mu\text{m}}$ ($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) observado (em preto) e o estimado pela ERF para o MODIS e GOES tradicional em uma grade de 50 km (em vermelho); Regressão linear entre o dado modelado e o dado observado.

Neste método notaram-se algumas diferenças significativas não encontradas nos métodos anteriores, pois além de apresentar um baixo coeficiente de determinação (0,467), a integração em grades de 50km dos valores de emissão do MODIS provocou elevados valores no Nordeste Brasileiro. Estes valores foram originados pela superestimativa na integração dos dados de entrada, os quais ocasionaram acentuados valores de $PM_{2,5\mu m}$.

A **Figura 7.5** mostra o mapa do total de $PM_{2,5\mu m}$ emitido para a atmosfera no período de 15/Jul/2002 a 15/Nov/2002 utilizando o método proposto por Wooster et al. (2005). Este método baseia-se na conversão da ERF na taxa de biomassa consumida ($kg.s^{-1}$), desta forma, para originar o total consumido (kg), os dados foram integrados presumindo que a queima de biomassa durou uma hora para cada foco detectado pelos satélites. O total diário de biomassa consumida pelas queimadas foram inseridos no 3BEM (LONGO et al., 2007), que estimou o total emitido para a atmosfera a partir dos fatores de emissão definidos para cada espécie, segundo o mapa de uso e cobertura da terra.

Percebe-se que os valores modelados pelo método proposto por Wooster et al. (2005) ficaram abaixo dos valores encontrados pelos outros métodos. No mapa os maiores valores de concentração do $PM_{2,5\mu m}$ localizam-se nos Estados Brasileiros do Mato Grosso e do Pará que alcançam $33.000 \mu g.m^{-3}$. Através do gráfico de dispersão observa-se que os valores modelados pelo método de Wooster et al. (2005) são aproximadamente três vezes menores que os dados de campo coletados em Ouro Preto do Oeste / RO, embora os valores modelados apresentem uma grande diferença com os dados observados, o método mostrou uma correlação de 80%.

Entre as desvantagens deste método está a integração do consumo de biomassa, que insere mais uma incerteza no método adotado, a utilização de uma base de dados de uso e ocupação da terra que não é atualizada constantemente, e os diferentes valores encontrados em experimentos similares.

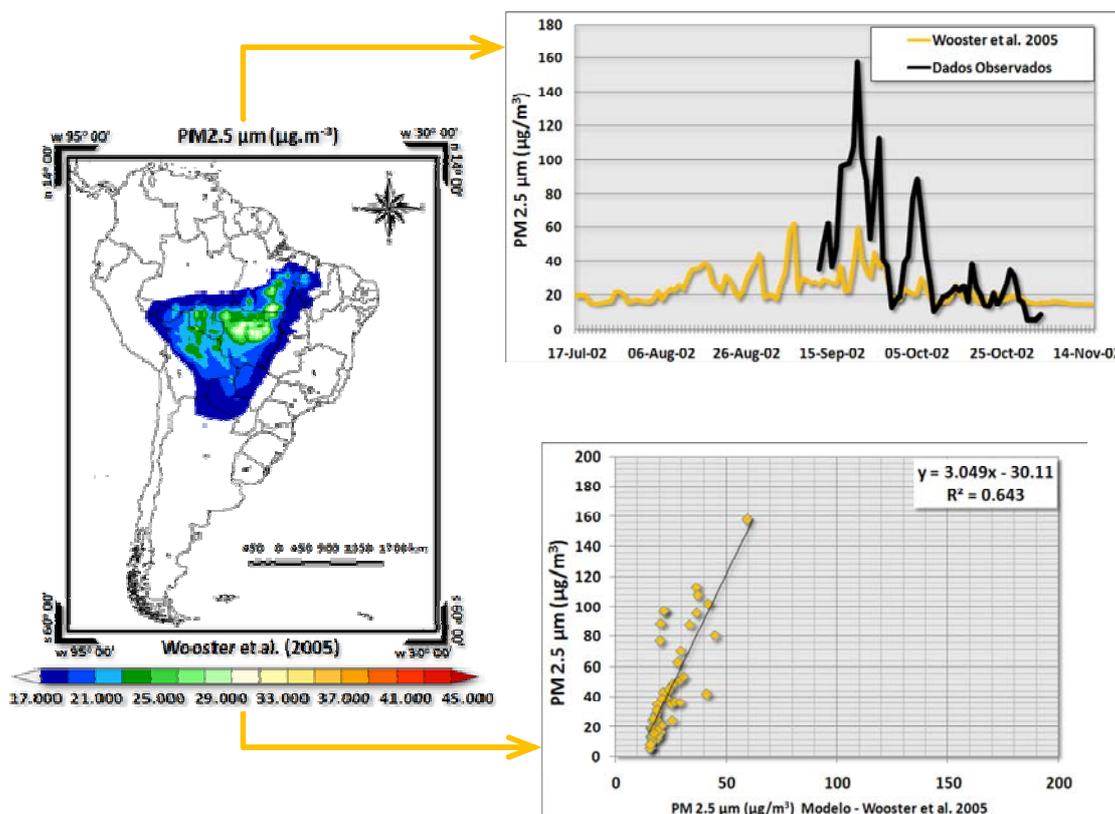


Figura 7.5 – Mapa da emissão total de PM_{2,5} μm ($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) para o período de 15/Jul/2002 a 15/Nov/2002; Série temporal do PM_{2,5} μm ($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) observado (em preto) e o estimado pelo método proposto por Wooster et al. (2005) (em laranja); Regressão linear entre o dado modelado e o dado observado.

A **Figura 7.6** utiliza o coeficiente proposto por Freeborn et al. (2008) para se estimar o PM_{2,5} μm emitido para a atmosfera no período de 15/Jul/2002 a 15/Nov/2002. Este método baseia-se na conversão da ERF em total de biomassa consumida (kg), semelhante ao método proposto por Wooster et al. (2005). Nesta análise, empregaram-se os mesmos procedimentos metodológicos para a integração e inclusão dos dados no modelo.

Este método, apresentou uma correlação de 80% entre os dados modelados e os dados coletados em campo, entretanto, as concentrações de PM_{2,5} μm foram subestimadas em aproximadamente 58%. No mapa do total emitido de PM_{2,5} μm os maiores valores encontrados ocorreram nos Estados Brasileiros do Mato Grosso, de Rondônia e do Pará e na Bolívia que atingiram 38.000 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. Embora este método apresente-se como uma

alternativa para se estimar o total de gases traços e aerossóis emitidos pelos focos de queimada detectados, ele necessita dos dados de uso e ocupação do solo e dos fatores de emissão das espécies vegetais. Isto infere ao método uma grande quantidade de incertezas, ocasionadas principalmente na integração dos dados e nas origens dos coeficientes.

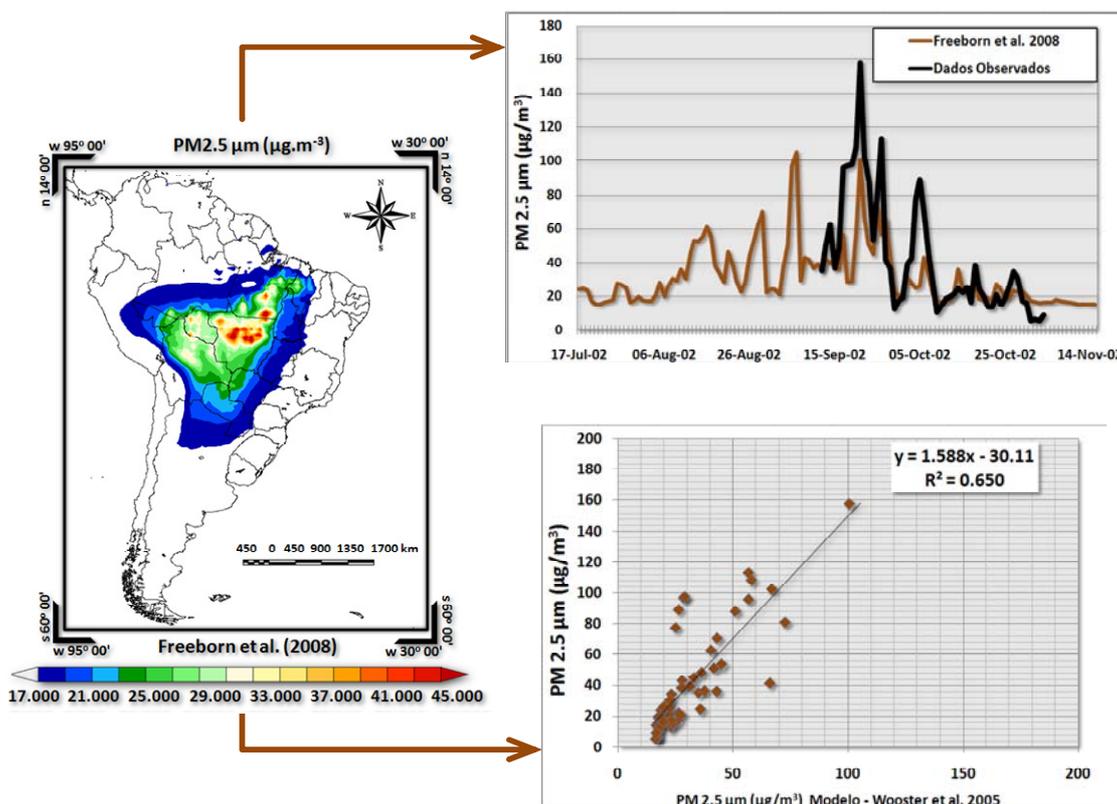


Figura 7.6 – Mapa da emissão total de PM_{2,5} μm ($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) para o período de 15/Jul/2002 a 15/Nov/2002; Série temporal do PM_{2,5} μm ($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) observado (em preto) e o estimado pelo método proposto por Freeborn et al. (2008) (em marrom); Regressão linear entre o dado modelado e o dado observado.

Com os experimentos realizados no INPE próximos ao LARAD, definiu-se um coeficiente semelhante aos propostos por Wooster et al. (2005) e Freeborn et al. (2008), a diferença deste coeficiente está na relação entre a quantidade de biomassa consumida e a ERF liberada. Enquanto que o coeficiente proposto inicialmente por Wooster et al. (2005) é de 0,368 e o coeficiente encontrado por Freeborn et al. (2008) é de 0,710; encontrou-se no experimento realizado no INPE o valor de 0,949, ou seja, aproximadamente 258% e 134% maiores que os encontrados anteriormente. A emissão

de $PM_{2.5\mu m}$ no período de 15/Jul/2002 a 15/Nov/2002, estimada com o uso do coeficiente obtido através dos experimentos realizados no INPE é apresentada na **Figura 7.7**. Neste caso, empregaram-se os mesmos procedimentos metodológicos para a integração e inclusão dos dados no modelo utilizados nos dois métodos anteriores.

Esta metodologia, com correlação de 80% entre os dados modelados e os dados coletados em campo, apresentou uma subestimativa de aproximadamente 17% no valor modelado de $PM_{2.5\mu m}$. No mapa do total emitido os maiores valores foram encontrados nos Estados Brasileiros do Mato Grosso, do Pará e de Rondônia e na Bolívia que alcançam valores superiores a $41.000 \mu g.m^{-3}$. Assim como no uso dos coeficientes propostos por Wooster et al. (2005) e Freeborn et al. (2008) este método necessita dos fatores de emissão das espécies vegetais e mapa de uso e ocupação do solo para estimar o total de gases e aerossóis emitidos.

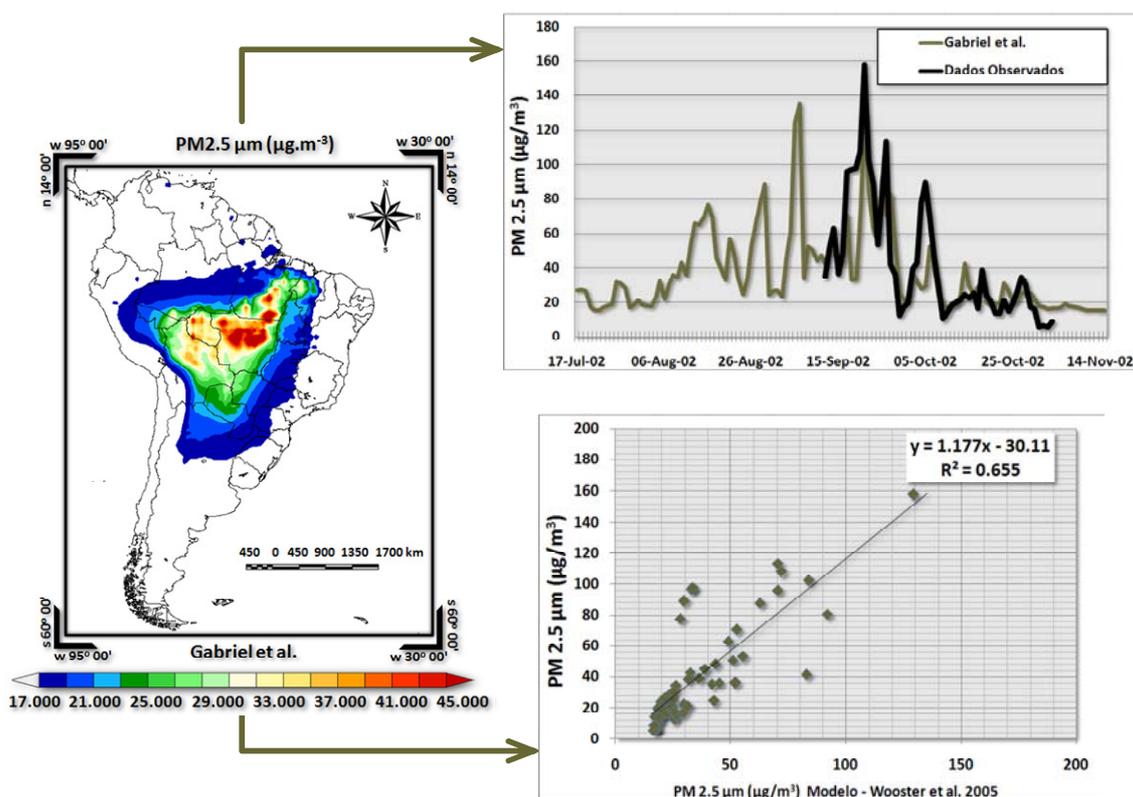


Figura 7.7 – Mapa da emissão total de $PM_{2.5\mu m}$ ($\mu g.m^{-3}$) para o período de 15/Jul/2002 a 15/Nov/2002; Série temporal do $PM_{2.5\mu m}$ ($\mu g.m^{-3}$) observado (em preto) e o estimado pelo coeficiente obtido no experimento do LARAD/INPE (em cinza); Regressão linear entre o dado modelado e o dado observado.

7.2 Comparação do CO modelado com os dados de campo do SMOCC/RaCCI

A **Figura 7.8** mostra o mapa da emissão total de CO (ppb) emitido para a atmosfera no período de 15/Jul/2002 a 15/Nov/2002 empregando o 3BEM (LONGO et al., 2007), que foram originados a partir do emprego da tabela de Andreae e Merlet (2001) na conversão do $PM_{2,5\mu m}$. Junto ao mapa pode-se visualizar a série temporal do CO e a regressão linear entre os dados modelados e os dados coletados em campo. A série temporal representa as informações coletadas pelas campanhas do SMOCC/RaCCI, cujos valores representam a média diária centralizada em 12:00Z (em preto) e os dados resultantes da modelagem no CCATT-BRAMS as 12:00Z (em azul claro). O gráfico de dispersão, representa a regressão linear entre os dados observados pela campanha do SMOCC/RaCCI (no eixo y, em ppb) e os dados do modelo CCATT-BRAMS (no eixo x, em ppb).

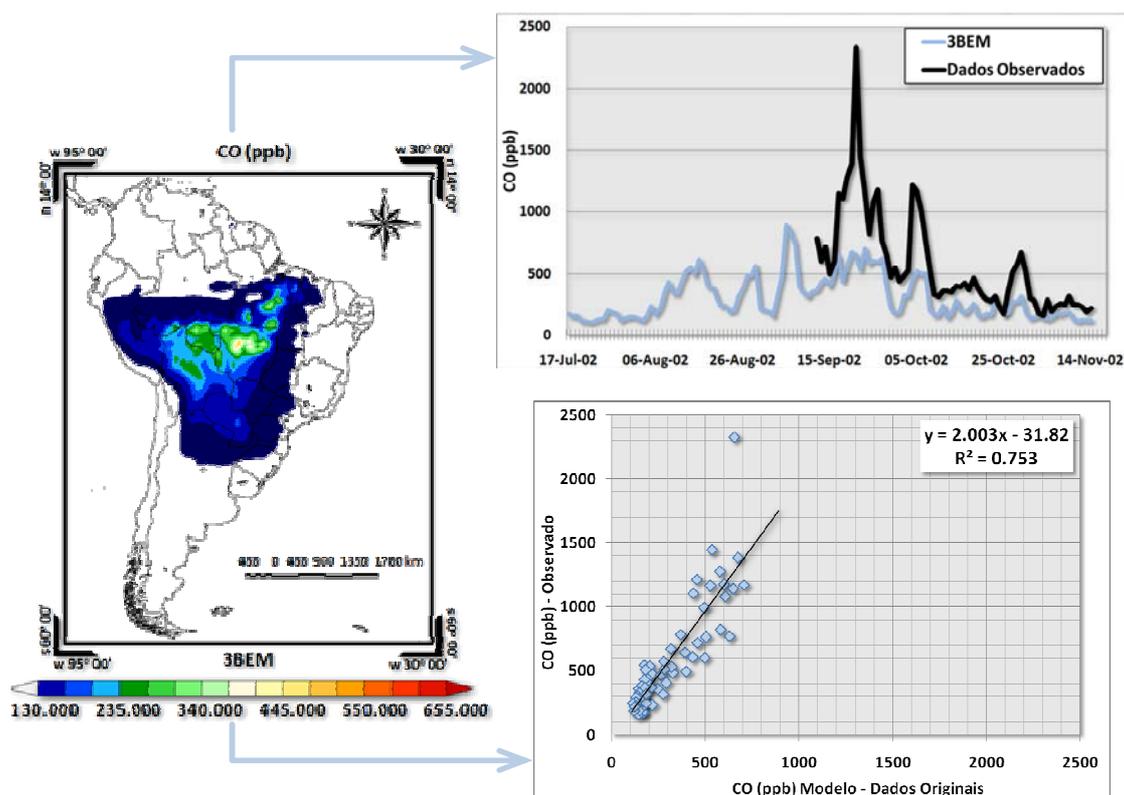


Figura 7.8 – Mapa da emissão total de CO (ppb) para o período de 15/Jul/2002 a 15/Nov/2002; Série temporal do CO (ppb) observado (em preto) e o estimado pelo método tradicional do CCATT-BRAMS (em azul claro); Regressão linear entre o dado modelado e o dado observado.

Percebe-se que os mapas de CO são muito similares aos resultados encontrados na modelagem do PM_{2,5µm}. No mapa abaixo os maiores valores de concentração do CO localizaram-se no Estado Brasileiro do Mato Grosso, onde os valores podem chegar a 440.000 ppb. Neste método, que utiliza como bases o mapa de uso e ocupação da terra e a quantidade de carbono disponível, obteve-se uma correlação de aproximadamente 87% e os valores encontrados foram duas vezes menores que os observados em campo. As maiores diferenças foram encontradas entre os dias 15/Set/2002 a 24/Set/2002, 02/Out/2002 a 07/Out/2002 e 25/Out/2002 a 02/Nov/2002, onde se constataram elevados valores de CO na região de Ouro Preto do Oeste / RO.

Para o mesmo período do ano modelou-se a emissão total de CO para a atmosfera através dos coeficientes de emissão baseados na ERF para os dados do MODIS (ICHOKU; KAUFMAN, 2005) e para os dados do GOES (**Capítulo 5, item 5.1**), como mostra a **Figura 7.9**. Neste método os maiores valores de CO foram localizados nos Estados Brasileiros do Mato Grosso, de Rondônia, do Pará e do Mato Grosso do Sul e na Bolívia e Paraguai, cujos valores acumulados de CO excedem 500.000 ppb.

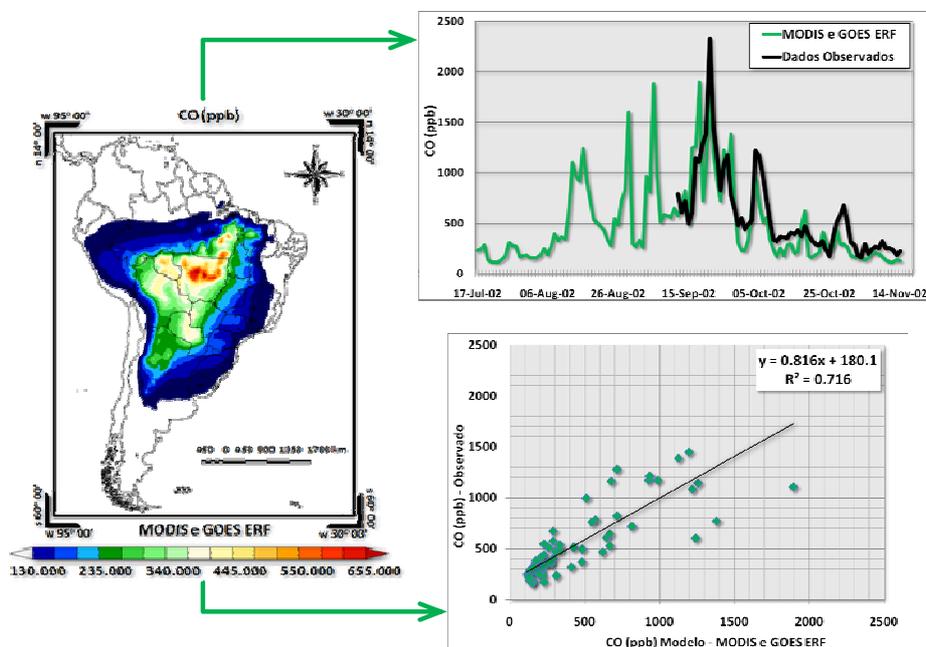


Figura 7.9 – Mapa da emissão total de CO (ppb) para o período de 15/Jul/2002 a 15/Nov/2002; Série temporal do CO (ppb) observado (em preto) e o estimado pela ERF para o MODIS e GOES (em verde); Regressão linear entre o dado modelado e o dado observado.

Este método apresentou uma correlação de aproximadamente 85% entre os dados modelados e os dados observados, sendo superestimados em aproximadamente 18%. Entretanto, a série temporal mostra um melhor ajuste dos dados modelados com os dados observados entre as datas 15/Set/2002 a 24/Set/2002 e 02/Out/2002 a 07/Out/2002. Este método possui a característica de aumentar a emissão na maioria das regiões, inclusive na Bolívia, no Paraguai e na Argentina.

A **Figura 7.10** mostra o total de CO emitido para a atmosfera para as simulações realizadas no período de queimadas de 2002 baseados na metodologia 4 km MODIS ERF e GOES trad. (ICHOKU; KAUFMAN, 2005; LONGO et al., 2007). Com uma correlação de 87% entre os dados simulados por esta metodologia e os dados de verdade terrestre, este método apresentou uma subestimativa de aproximadamente 5%. As maiores concentrações de CO são visualizadas nos Estados Brasileiros do Mato Grosso, do Pará e de Rondônia.

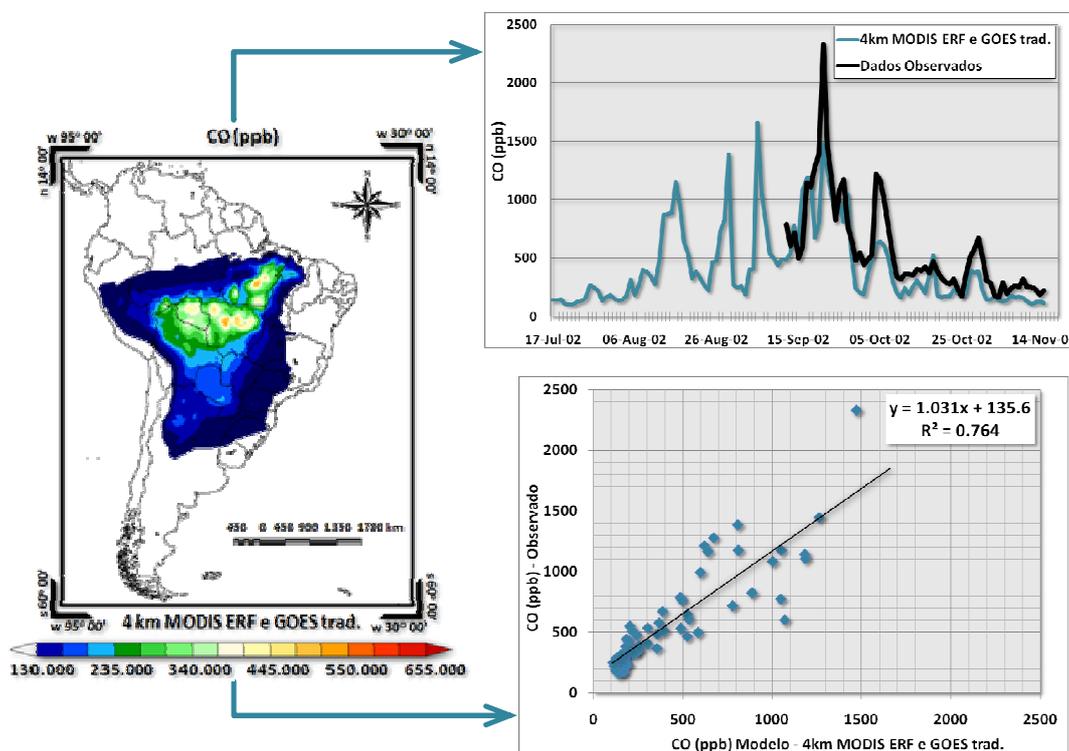


Figura 7.10 – Mapa da emissão total de CO (ppb) para o período de 15/Jul/2002 a 15/Nov/2002; Série temporal do CO (ppb) observado (em preto) e o estimado pela ERF para o MODIS e GOES tradicional em uma grade de 4 km (em azul escuro); Regressão linear entre o dado modelado e o dado observado.

A **Figura 7.11** exibe a concentração total de CO simuladas para o mesmo período de queimadas de 2002 da América do Sul. Os valores encontrados são resultados das estimativas de emissão que emprega a metodologia 50 km MODIS ERF e GOES trad. (ICHOKU; KAUFMAN, 2005; LONGO et al., 2007). Os dados provenientes deste método apresentaram elevadas concentrações de CO no Nordeste Brasileiro, indicando um erro de integração dos dados de entrada. Isto pode ser constatado no gráfico de dispersão e na série temporal. O método 50 km MODIS ERF e GOES trad. apresenta correlação de 60% e superestima os valores modelados em até 30%.

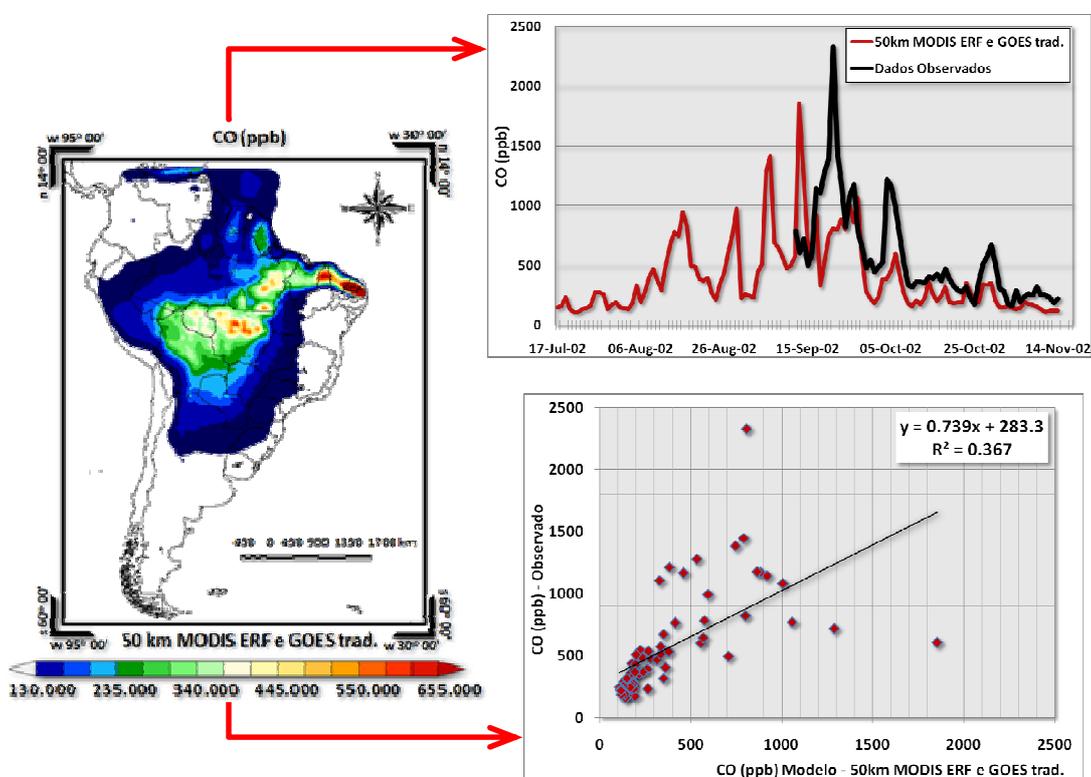


Figura 7.11 – Mapa da emissão total de CO (ppb) para o período de 15/Jul/2002 a 15/Nov/2002; Série temporal do CO (ppb) observado (em preto) e o estimado pela ERF para o MODIS e GOES tradicional em uma grade de 50 km (em vermelho); Regressão linear entre o dado modelado e o dado observado.

A **Figura 7.12** mostra a concentração total de CO estimada pelo método proposto por Wooster et al. (2005) presumindo que a queima de biomassa durou uma hora para cada foco detectado pelo MODIS e pelo GOES. Nota-se, pelo gráfico de dispersão e pelo mapa de concentração total de CO, que os valores modelados pelo método de Wooster

et al. (2005) são aproximadamente 4 vezes menores que os dados de campo coletados em Ouro Preto do Oeste / RO. Embora os valores modelados representem uma grande diferença com os dados observados, o método mostrou uma correlação de 83%.

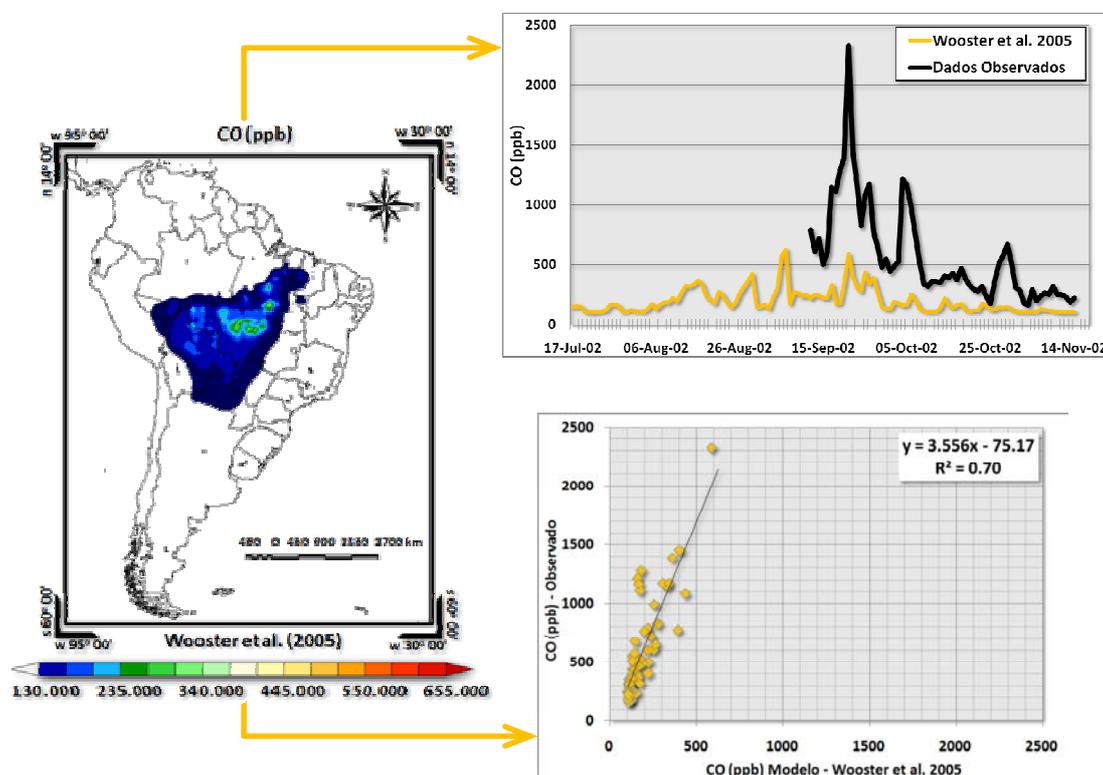


Figura 7.12 – Mapa da emissão total de CO (ppb) para o período de 15/Jul/2002 a 15/Nov/2002; Série temporal do CO (ppb) observado (em preto) e o estimado pelo método proposto por Wooster et al. (2005) (em laranja); Regressão linear entre o dado modelado e o dado observado.

A **Figura 7.13** mostra a concentração total de CO estimada ao se utilizar o coeficiente baseado na ERF para calcular o total de biomassa consumida proposto por Freeborn et al. (2008), integrado com uma persistência de uma hora para cada foco detectado pelos satélites MODIS e GOES. Embora o gráfico de dispersão apresente uma correlação entre os dados modelados e os dados do SMOCC/RaCCI de 83%, percebe-se na série temporal que os dados foram subestimados em aproximadamente 90% ao serem comparados com os dados de campo coletados em Ouro Preto do Oeste / RO.

Neste método as maiores concentrações de CO total foram localizadas nos estados Brasileiros do Mato Grosso e do Pará, contudo, em regiões abaixo da latitude 20° S os

valores estimados são baixos, diferentes dos encontrados na **Figura 7.9**, onde os valores estimados atingiram concentrações superiores a 345.000 ppb de CO. Na série temporal percebe-se que as maiores diferenças foram encontradas nos dias 15/Set/2002 a 20/Set/2002, 02/Out/2002 a 07/Out/2002 e 25/Out/2002 a 30/Out/2002, onde ocorrem elevados valores de CO provenientes de intensas queimadas na região de Ouro Preto do Oeste / RO.

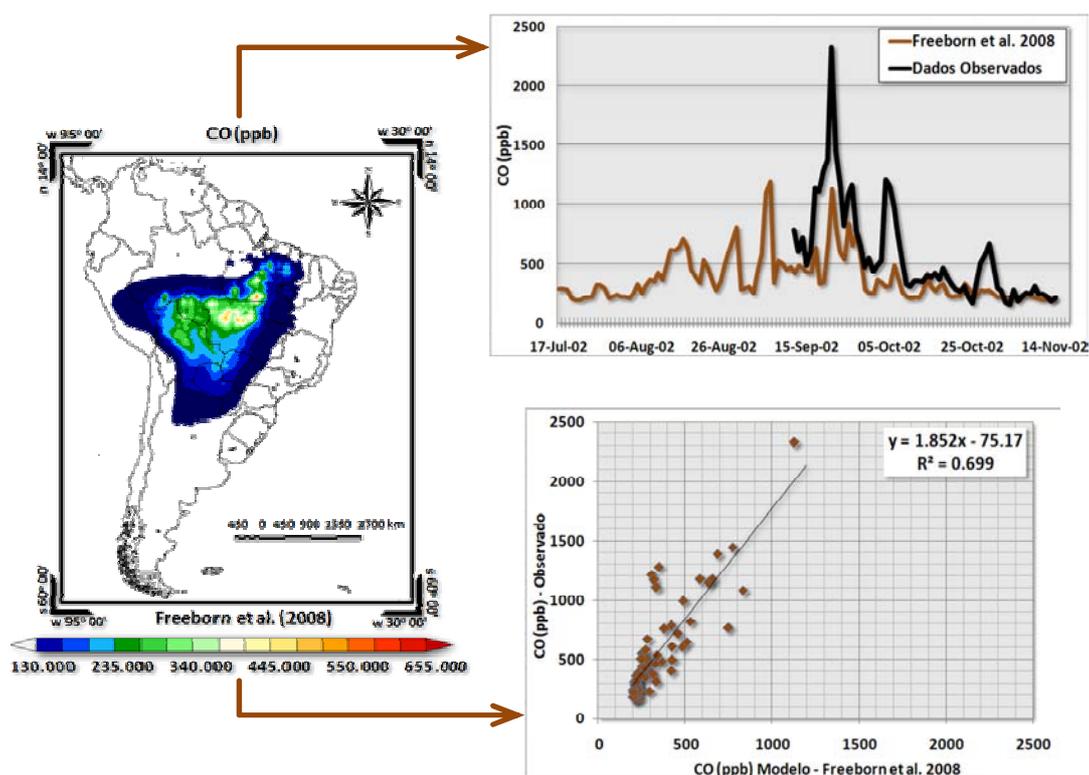


Figura 7.13 – Mapa da emissão total de CO (ppb) para o período de 15/Jul/2002 a 15/Nov/2002; Série temporal do CO observado (em preto) e o estimado pelo método proposto por Freeborn et al. (2008) (em marrom); Regressão linear entre o dado modelado e o dado observado.

A **Figura 7.14** utiliza o coeficiente gerado no **Capítulo 6** (pg. 67) para estimar o total de CO emitido para atmosfera, assim como nos coeficientes desenvolvidos por Wooster et al. (2005) e Freeborn et al. (2008), presumiu-se que a queima de biomassa durou uma hora para cada foco detectado. Neste método as maiores concentrações de CO estão localizadas nos estados Brasileiros do Mato Grosso, do Pará e de Rondônia onde os valores podem superar os 440.000 ppb.

Ainda que o gráfico de dispersão apresente uma correlação entre os dados modelados e os dados coletados no SMOCC/RaCCI de 83%, percebe-se na série temporal que os dados foram subestimados em aproximadamente 30%. As maiores diferenças foram encontradas nos dias 15/Set/2002 a 20/Set/2002, 02/Out/2002 a 07/Out/2002 e 25/Out/2002 a 30/Out/2002, onde intensas queimadas na região de Ouro Preto do Oeste / RO originam elevados valores de CO.

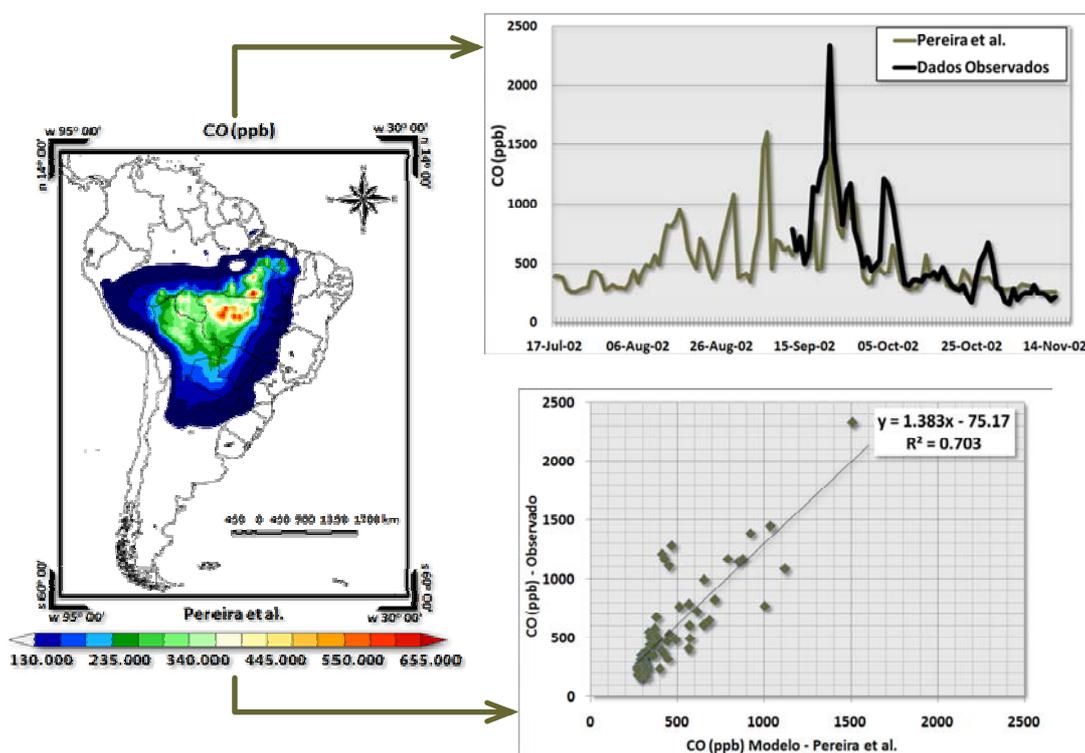


Figura 7.14 – Mapa da emissão total de CO (ppb) para o período de 15/Jul/2002 a 15/Nov/2002; Série temporal do CO observado (em preto) e o estimado pelo coeficiente obtido no LARAD/INPE (em cinza); Regressão linear entre o dado modelado e o dado observado.

7.3 Avaliação dos Perfis de CO

Ao observar a **Figura 7.15** tem-se em preto a média de 23 perfis de CO coletados durante as campanhas do SMOCC/RaCCI na região de Ouro Preto do Oeste no Estado de Rondônia e no Estado do Mato Grosso para o período de 25/Set/2002 a 18/Out/2002. Em cinza observa-se o desvio padrão da média destas observações. Para cada quadro da figura pode-se visualizar os dados modelados no CCATT-BRAMS pelos diferentes

métodos testados e suas respectivas barras de erros horizontais com o desvio padrão: 3BEM, MODIS e GOES ERF, 4 km MODIS ERF e GOES trad., 50 km MODIS ERF e GOES trad., Wooster et al. (2005), Freeborn et al. (2008) e os dados modelados pelo coeficiente gerado pelos experimentos no LARAD/INPE.

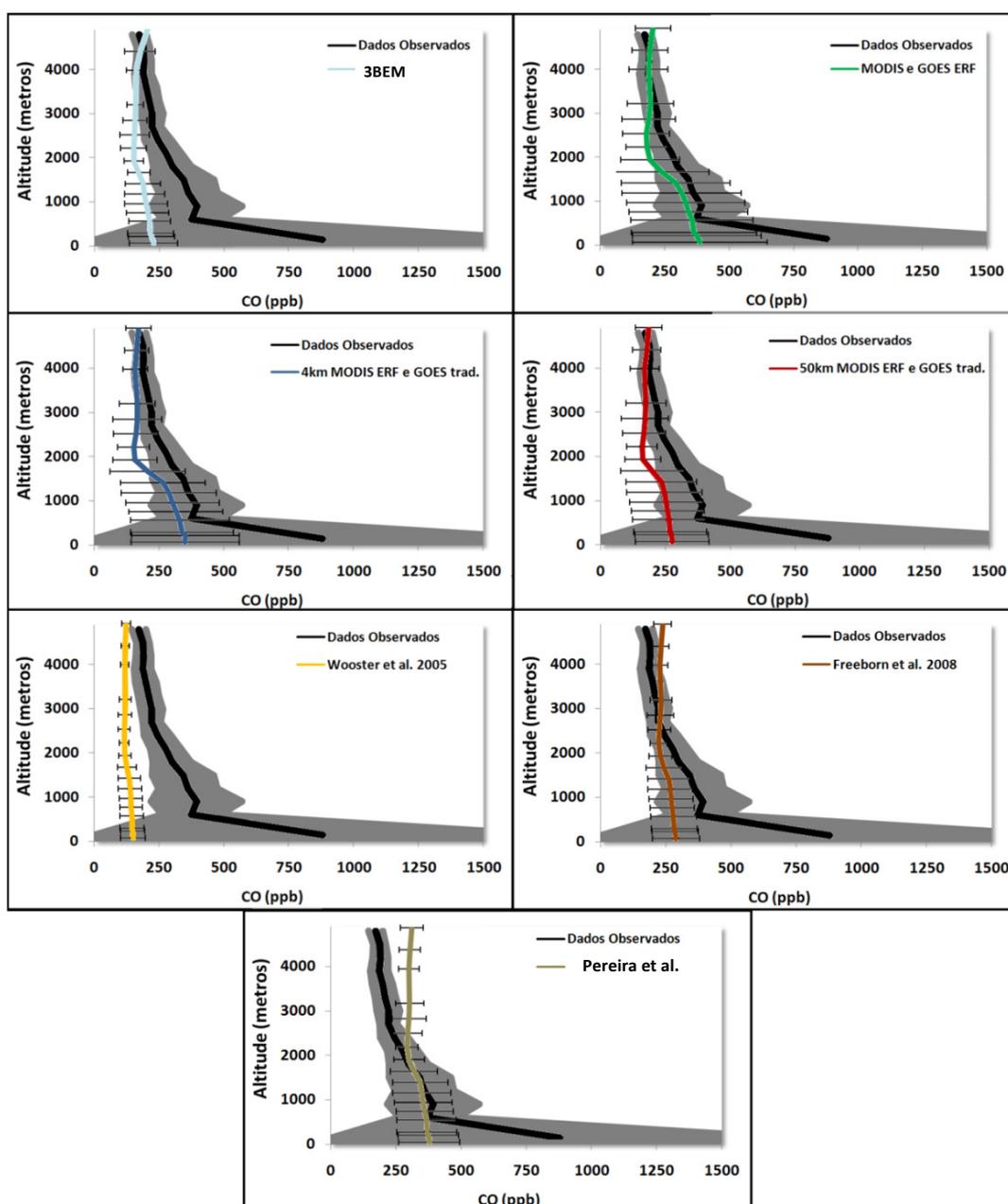


Figura 7.15 – Média dos Perfis de CO observados nas campanhas do SMOCC/RaCCI realizadas próximas a região de Ouro Preto do Oeste / RO (em preto); Desvio padrão das observações (em cinza); Dados modelados pelo CCATT-BRAMS com barras de erros horizontais que indicam o desvio padrão (múltiplas cores).

Deve-se salientar que os dados foram modelados com uma resolução espacial de 50 km e que os dados observados possuem características específicas, realizadas em áreas de grande concentração de gases e aerossóis liberados pelas queimadas. Dadas as circunstâncias mencionadas, em algumas metodologias os dados modelados apresentam certa coerência com os dados observados. Entre os métodos que apresentam um bom ajuste com os dados modelados, podem-se citar o 3BEM, os dados provenientes do MODIS e GOES ERF, os dados da grade de 4 km MODIS ERF e GOES tradicional e os dados gerados com o coeficiente de Freeborn et al. (2008).

Verifica-se que o modelo não acompanha exatamente o perfil observado, isto se deve principalmente a heterogeneidade dos processos que ocorrem em escala local, como, por exemplo, a presença isolada de plumas de fumaça, as camadas muito finas de fumaça procedentes de sistemas convectivos ou a ascensão de plumas oriundas das queimadas (FREITAS et al., 2007). Nos métodos acima mencionados, observou-se uma boa consistência dos perfis simulados pelo CCATT-BRAMS, pois em grande parte dos níveis atmosféricos os valores modelados encontram-se dentro do desvio padrão das observações do SMOCC/RaCCI.

7.4 Discussões sobre os métodos

O emprego dos sete métodos para a estimativa da emissão de $PM_{2,5\mu m}$ ($\mu g.m^{-3}$) e CO (ppb) modelados no CCATT-BRAMS apresentaram resultados distintos, porém, na grande maioria observou-se que os coeficientes de determinação e de correlação com os dados medidos em campo foram superiores a 0,70 e 80%, respectivamente. A única exceção é o método 50 km MODIS ERF e GOES trad. (ICHOKU; KAUFMAN, 2005; LONGO et al., 2007), com correlação inferior a 65%.

Após a análise dos sete métodos para se estimar o fluxo de gases traços e aerossóis provenientes da queima de biomassa, percebe-se que o método que utiliza apenas a ERF obtidas pelo MODIS e pelo GOES, obtém uma melhoria significativa nos valores estimados de $PM_{2,5\mu m}$ e CO para latitudes entre 20° S e 45° S. Desta forma, a Figura 7.16 mostra o total de $PM_{2,5\mu m}$ ($kg.m^{-2}$) estimado pelo método 3BEM, desenvolvido por Longo et al. (2007) e atualmente utilizado com dado de entrada para o CCATT-

BRAMS (a) e os valores estimados ao utilizar a ERF e os coeficientes de emissão para o MODIS e GOES (b).

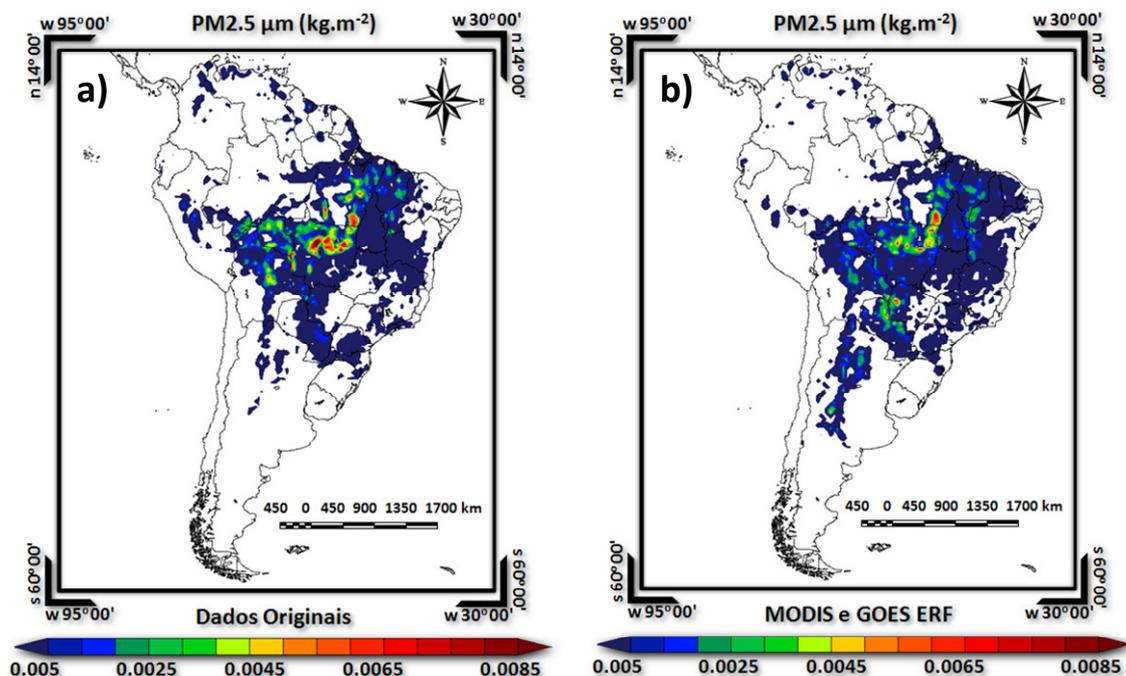


Figura 7.16 – Fonte utilizada como entrada dados no modelo CCATT-BRAMS com o total $PM_{2,5\mu m}$ no período de 15/Jul/2002 a 15/Nov/2002. 3BEM em (a); MODIS e GOES ERF em (b).

Na figura acima, nota-se que existem algumas diferenças significativas na estimativa do $PM_{2,5\mu m}$ que será utilizado como a fonte de emissões pelo CCATT-BRAMS. Estas são encontradas principalmente nos Estados Brasileiros do Mato Grosso, de Rondônia, do Acre e do Pará e no Peru e Bolívia, onde o método proposto por Longo et al. (2007) apresenta valores de $PM_{2,5\mu m}$ ($kg.m^{-2}$) maiores que os estimados pelo método em (b). Todavia, nos Estados Brasileiros Mato Grosso do Sul, São Paulo, Minas Gerais, Goiás, Tocantins, Maranhão e Bahia e nos países sul-americanos Paraguai e Argentina, o método que utiliza os coeficientes de emissão baseados na ERF apresentam valores mais elevados, promovendo uma melhor estimativa das emissões. Este fato está relacionado principalmente com o valor dos coeficientes encontrados no Capítulo 5.

A **Figura 7.17** mostra a frequência de observações das amostras referentes à correlação, ao coeficiente angular e ao intercepto, retiradas de forma aleatória da regressão linear entre os dados de campo (SMOCC/RaCCI) e os dados simulados no CCATT-BRAMS (3BEM; e MODIS e GOES trad.). Neste caso, utilizou-se a técnica *bootstrap* desenvolvida por Efron (1982) que, a partir do universo amostral de $1,0 \times 10^4$, reconstrói a curva original dos dados e fornece os parâmetros para originar o intervalo de confiança para as estimativas do modelo (EFRON, 1982).

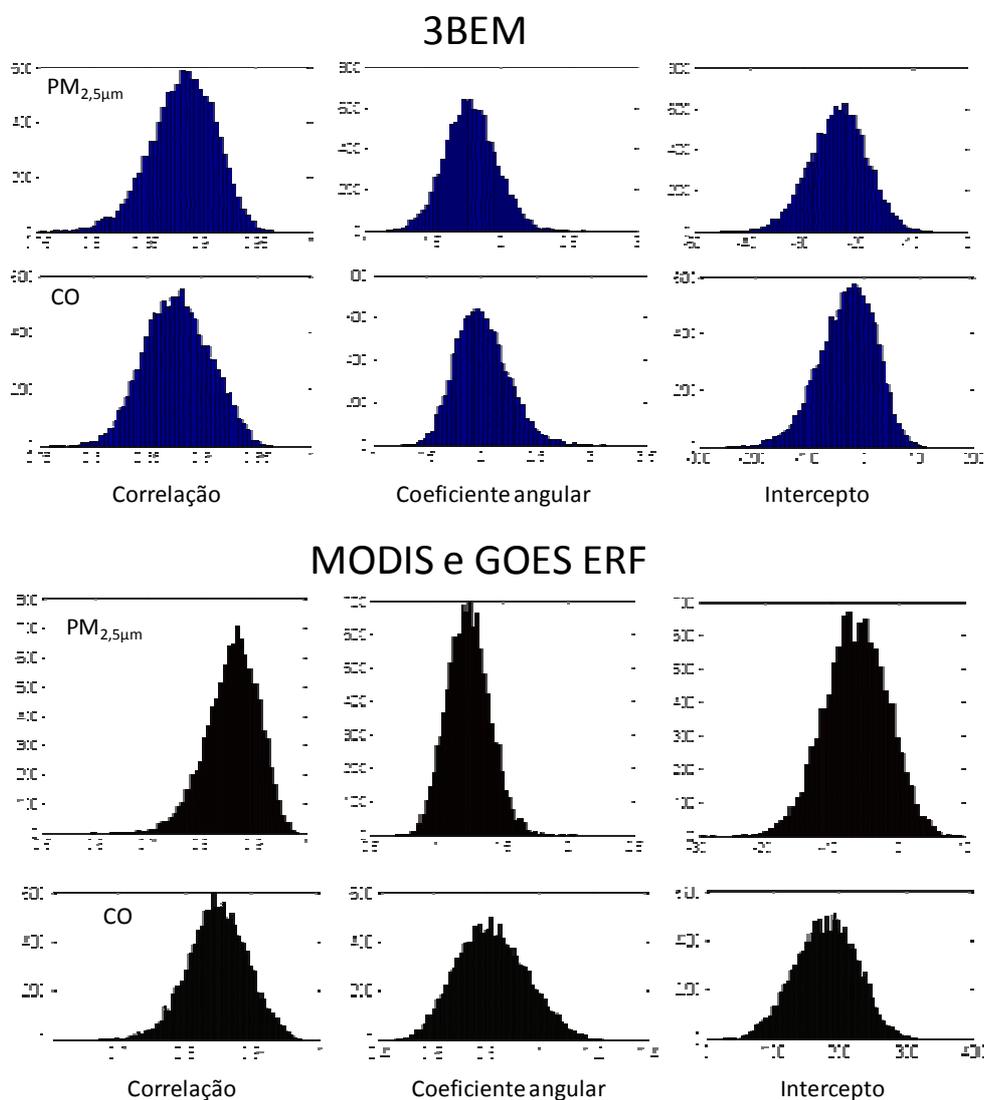


Figura 7.17 – Distribuição dos coeficientes de correlação, dos coeficientes angulares e dos interceptos utilizando a técnica de *bootstrap* para os dados do 3BEM e do MODIS e GOES ERF.

Como visualizado na figura acima, os dois principais métodos para se estimar o total de gases traços e aerossóis para a atmosfera apresentaram boas correlações com os dados de campo. No método 3BEM, a maior frequência das amostras da correlação encontra-se entre 87 e 90%, tanto para o $PM_{2,5\mu m}$ como para o CO. Entretanto, neste método o coeficiente angular encontra-se entre 1,7 e 2 para o $PM_{2,5\mu m}$; e entre 1,7 e 2,2 para o CO, indicando que os valores são subestimados em até 2 vezes ao serem comparados com os dados de campo. Neste método os valores do intercepto encontram-se entre -25 e -20 para o $PM_{2,5\mu m}$ e entre -50 e 10 para o CO.

O método MODIS e GOES ERF apresentou valores de correlação entre 88 e 90% para o $PM_{2,5\mu m}$ e entre 84 e 88% para o CO. Todavia, os coeficientes angulares apresentaram comportamentos distintos, enquanto que os dados de $PM_{2,5\mu m}$ apresentaram coeficientes angulares entre 1,2 e 1,4; os dados de CO apresentaram valores entre 0,8 e 0,9; indicando uma subestimativa do $PM_{2,5\mu m}$ e uma superestimativa dos valores de CO. Neste método os valores de intercepto apresentam uma maior frequência entre -10 e -5 para o $PM_{2,5\mu m}$; e entre 170 e 210 para o CO.

Embora os outros métodos apresentem resultados significativos, as metodologias denominadas 4 km MODIS ERF e GOES trad., 50 km MODIS ERF e GOES trad. e 3BEM (LONGO et al., 2007) necessitam, desta forma, do banco de dados com a disponibilidade de carbono e do mapa de uso e ocupação da terra, que não são atualizados constantemente. Além disso, os coeficientes propostos por Wooster et al. (2005), Freeborn et al. (2008) e o desenvolvido no Capítulo 6 deste trabalho, apresentaram subestimativas dos valores de $PM_{2,5\mu m}$ e CO, assim como na maioria dos métodos, porém, a utilização destes coeficientes para calcular o total de biomassa consumida retorna ao problema do mapa de uso e ocupação da terra para definir o fator de emissão que deve ser empregado para calcular o total emitido por espécie, assim como, as imprecisões nas integrações destes dados.

CAPÍTULO 8

CONSIDERAÇÕES FINAIS E CONCLUSÕES

No Brasil as queimadas estão vinculadas essencialmente às atividades agropecuárias, apresentando grande variabilidade temporal e espacial. Percebe-se que a grande maioria das queimadas ocorre no “arco do desmatamento” localizado principalmente nos Estados do Mato Grosso, do Pará e de Rondônia, nestas localidades a densidade de focos de queimada pode chegar a 125 focos/km². Nos últimos 16 anos o Mato Grosso (MT) é o Estado Brasileiro com o maior número de queimadas, com 1.332.538 focos, seguido pelo Estado do Pará (PA) com 931.420 focos.

A quantização das emissões dos gases do efeito estufa provenientes da queima de biomassa é necessária para inventários anuais e sua estimativa a partir de dados derivados dos satélites ambientais é de fundamental importância para a modelagem do tempo e clima, pois alimentariam modelos como o CCATT-BRAMS, rodado diariamente pelo CPTEC/INPE.

Com uma correlação superior a 86% entre os dados de emissão de aerossóis (kg.s⁻¹) e a energia radiativa do fogo (MJ.s⁻¹), originaram-se três coeficientes para os dados provenientes do satélite GOES. Estes coeficientes permitem estimar a partir da ERF a quantidade de PM_{2,5µm} liberada para a atmosfera a partir de três grandes biomas: região de Floresta tropical e Cerrado; vegetação típica da Caatinga; e Floresta Ombrófila Densa e Pradarias/Campos. Estes coeficientes seguem a metodologia proposta por Ichoku e Kaufman (2005) e podem ser desenvolvidos para outros satélites que atualmente detectam os focos de queimada, como, por exemplo, os dados do SEVERI/METEOSAT-8 e do AVHRR/NOAA.

Com um coeficiente de determinação de 0,73 e correlação de 85%, os experimentos de combustão controlada de biomassa vegetal de pequena escala realizados no INPE permitem calcular o total de biomassa consumida pela queimada a partir da ERF. O coeficiente encontrado é aproximadamente 258% e 134% maior que os encontrados

anteriormente pelos métodos de Wooster et al. (2005) e Freeborn et al. (2008), respectivamente. Embora as bibliografias sugiram que a quantidade de biomassa consumida é proporcional a ERF liberada, percebe-se que os três experimentos foram realizados com espécies vegetais distintas, encontrando valores diferentes para cada ocasião. Desta forma, sugere-se que os experimentos de combustão de pequena escala sejam realizados com mais espécies vegetais para verificar possíveis alterações em seus coeficientes.

A modelagem dos sete métodos (**3BEM; MODIS e GOES ERF; 4 km MODIS ERF e GOES trad.; 50 km MODIS ERF e GOES trad.; Wooster et al. 2005; Freeborn et al. 2008; e Pereira et al.**) no CCATT-BRAMS e a avaliação dos valores estimados pelo modelo com os dados de campo coletados na região de Ouro Preto do Oeste no Estado de Rondônia na campanha do SMOCC/RaCCI permitiram ponderar quais métodos são mais apropriados como dados de entrada para o modelo.

Desta forma, o método que utiliza a ERF do MODIS e GOES pode ser apontado com uma metodologia inovadora, pois mostrou uma boa correlação com os dados medidos em campo, cujos coeficientes de determinação e correlação foram, respectivamente, 0,74 e 86% para os dados de $PM_{2,5\mu m}$, 0,72 e 85% para os dados de CO. Entre as principais vantagens deste método pode-se citar: a) a independência de uma base de dados de carbono disponível para a queima; b) a utilização da temperatura e da área queimada para calcular a emissão dos gases e aerossóis que são extraídos com uma boa confiabilidade; c) uma melhor estimativa das emissões nas regiões entre as latitudes 20° S e 45° S.

Outras metodologias mostraram-se eficientes, como, por exemplo, a metodologia 4 km MODIS ERF e GOES trad., o método tradicional do CCATT-BRAMS atualmente utilizado (3BEM) e o método desenvolvido neste trabalho que calcula o total de biomassa consumida. Entretanto, observam-se algumas fontes de erros inerentes aos métodos de estimativa destas emissões. Entre as principais causas destas, estão as incertezas que cercam o Sensoriamento Remoto e os parâmetros utilizados, como por exemplo, os coeficientes mássicos de absorção e de espalhamento, ou mesmo a base de

dados de carbono disponível e uso e ocupação da terra. No entanto, estas são comparáveis às incertezas dos métodos tradicionais de cálculo de emissão dos gases.

Para futuros estudos sugere-se a geração de coeficientes baseado na ERF para outros satélites e para outras regiões, a fim de utilizar mais fontes de dados para os modelos ambientais; a realização de estudos mais aprofundados para diminuir as incertezas inerentes aos processos de aquisição dos dados, de estimativas da ERF e da obtenção dos coeficientes de emissão baseados na ERF, assim como no cálculo da biomassa consumida.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AB´SABER, A. N. Potencialidades paisagísticas brasileiras. **Seleção de Textos de Geomorfologia**. São Paulo, SP:Instituto de Geografia/USP, v. 55, p. 01-25, 1977.
- 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**, The MIT Press, Cambridge, MA, p. 2-21, 1991.
- ANDREAE, M. O.; MERLET, P. Emission of trace gases and aerosols from biomass burning, **Global Biogeochem. Cycles**, n. 15, v.4, p. 955-966, 10.1029/2000GB001382, 2001.
- ANDREAE, M.; ROSENFELD, D.; ARTAXO, P.; COSTA, A.; FRANK, G.; LONGO, K. M.; SILVA DIAS, M. A. F. Smoking rain clouds over the Amazon, **Science**, v. 303, p. 1342-1345, 2004.
- ARAÚJO, T. M.; CARVALHO Jr.^a, J. A.; HIGUCHI, N.; BRASILI Jr., A.C.P.; MESQUITA, A.L.A. A tropical rainforest clearing experiment by biomass burning in the state of Pará, Brazil. **Atmospheric Environment**, n. 33, p. 1991 – 1998, 1999.
- BADARINATH, K. V.S.; LATHA, K. M.; CHAND, T. R. K.; GUPTA, P. K.; GHOSK, A. B.; JAIN, S. L.; GERA, B. S.; SINGH, R.; SARKAR, A. K.; SINGH, N.; PARMAR, R. S.; KOUL, S.; KOHLI, R.; NATH, S.; OJHA, V. K. SIGH, G. Characterization of aerosols from biomass burning – a case study from Mizoram (Northeast), India. **Chemosphere**, n. 54, p. 167-175, 2004.
- BELWARD, A. The IGBP-DIS global 1 km land cover data set (DISCover) proposal and implementation plans, **IGBP-DIS Working Paper**, n.13, 1996.
- BERNER, R. A.; BEERLING, D. J.; DUDLEY, R; ROBINSON, J. M.; WILDMAN JR., R. A. Phanerozoic atmospheric oxygen. **Annu. Rev. Earth Planet. Sci.**, n. 31, p. 105-134, 2003.
- CHU, D. A.; KAUFMAN, Y. J.; REMER, L. A.; HOLBEN, B. N. Remote sensing of smoke from MODIS airborne simulator during the SCAR-B experiment, **Journal of Geophysical Research**, v. 103, n. 24, p. 31979-31987, 1998.
- DOZIER, J. A method for satellite identification of surface temperature fields of subpixel resolution. **Remote Sensing of Environment**, v. 11, p. 221-229, 1981.
- DUNCAN, B. N.; MARTIN, R. V.; STAUDT, A. C.; YEVICH, R.; LOGAN, J. A. Interannual and seasonal variability of biomass burning emissions constrained by satellite observations. **Journal of Geophysical Research**, v. 108, n. D2, p. 1-21, 2003.
- EFRON, B. The jackknife, the bootstrap and other resampling plans, **SIAM**, 1982.
- FEARNSIDE, P. M. Global warming and tropical land-use change: Greenhouse gas emissions from biomass burning, decomposition and soils in forest conversion, shifting cultivation and secondary vegetation, **Clim. Change**, v. 46, n. 1-2, p. 115-158, 2000.
- FINKELSTEIN, D. B.; PRATT, L. M.; BRASSELL, S. C. Can Biomass Burning produce a globally significant carbon-isotope excursion in the sedimentary record? **Earth and Planetary Science Letters**, doi:10.1016/j.epsl.2006.08.010, 2006.
- FINKELSTEIN, D. B. Thoughts on fires. **Palaios**, n. 19, p. 111-112, 2004.

FREEBORN, P.H.; WOOSTER, M.J.; HAO, W.M.; RYAN, C.A.; NORDGREN, B.L.; BAKER, S.P.; ICHOKU, C. Relationships between energy release, fuel mass loss, and trace gas and aerosol emissions during laboratory biomass fires, **J. Geophys. Res.**, v. 113, n. D1, D01102, 10.1029/2007JD008489, 2008.

FREITAS, S. R.; LONGO, K. M.; DIAS, M. A. F. S.; CHATFIELD, R.; DIAS, P. L. S.; ARTAXO, P.; ANDREAE, M.; GRELL, G. A.; RODRIGUES, L.; FAZENDA, A.; PANETTA, J. 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, **Atmos. Chem. Phys. Discuss.**, v.7, p. 8525-8569, 2007.

FREITAS, S. R.; LONGO, K. M.; DIAS, M. A. F. S.; DIAS, P. L. S.; CHATFIELD, R.; PRINS, E.; ARTAXO, P.; GRELL, G. A.; RECUERO, F. S. Monitoring the transport of biomass burning emissions in South América, **Environmental Fluid Mechanics**, v. 5, p. 135-167, 2005.

FUZZI et al. Overview of the inorganic and organic composition of size-segregated aerosol in Rondônia Brazil, from the biomass burning period to the onset of the wet season, **J. Geophys. Res.**, v. 112, n. D01201, doi:10.1029/2005JD006741, 2007.

GALANTER, M.; LEVY II, H.; CARMICHAEL, G. R. Impacts of biomass burning on tropospheric CO, NO_x and O₃. **Journal of Geophysical Research**, v. 105, n. D5, p. 6633-6653, 2000.

GEVAERD, R.; FREITAS, S. R. Estimativa operacional da umidade do solo para iniciação de modelos de previsão numérica da atmosfera. Parte I: Descrição da metodologia e validação. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 21, p. 1-15, 2006.

GIGLIO, L. **MODIS collection 4 active fire product user's guide**. Version 2.2, 2005. Disponível em <maps.geog.umd.edu/products/MODIS_Fire_Users_Guide_2.2.pdf>. Acesso em 26/01/2007.

GIGLIO, L.; KENDALL, J. D. Application of the Dozier retrieval to wildfire characterization: A sensitivity analysis, **Remote Sensing of Environment**, v. 77, p. 34-49, 2001.

GIGLIO, L.; KENDALL, J.; MACK, R. A multi-year active fire dataset for the tropics derived from the TRMM VIRS, **International Journal of Remote Sensing**, v. 24, p. 4505-4525, 2003.

GLASSPOOL, I. J.; EDWARDS, D.; AXE, L. Charcoal in the Silurian as evidence of the earliest wildfires, **Eology**, n. 32, p. 381-383, 2004.

GLEASON, J. F.; HSU, N. C.; TORRES, O. Biomass burning smoke measured using backscattered ultraviolet radiation: SCAR-B and Brazilian smoke interannual variability, **Journal of Geophysical Research**, v. 103, n. D24, p. 31969-31978, 1998.

HAO, W. M.; WARD, D. E.; SUSOTT, R. A.; BABBITT, R. E.; NORDGREN, B. L.; KAUFMAN, Y. J.; HOLBEN, B. N.; GILES, D. M. Comparison of aerosol optical thickness measurements by MODIS, AERONET sun photometers, and Forest Service handheld sun photometers in southern Africa during the Safari 2000 campaign, **International Journal of Remote Sensing**, v. 26, n. 19, p. 4169-4183, 2005.

HOUGHTON, R. A.; LAWRENCE, K. T.; HACKLER, J. L.; BROWN, S. The spatial distribution of 10 forest biomass in the Brazilian Amazon: a comparison of estimates, **Global Change Biol.**, v. 7, p. 731-746, 2001.

ICHOKU, C.; KAUFMAN, Y. J. A method to derive smoke emission rates from MODIS fire radiative energy measurements. **IEEE Trans. on Geosc. & Rem. Sens.**, v. 43, n. 11, p. 2636-2649, 2005.

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). **Third Assessment Report (TAR), climate change, the scientific basis, contribution of working group I to the third assessment report of the international panel on climate change**, New York : Cambridge Univ. Press, 2001.

KAMPEL, M. **Características gerais dos satélites NOAA**: histórico, instrumentos e comunicação de dados. In: Aplicações ambientais brasileiras dos satélites NOAA e TIROS-N.1 ed. São Paulo: Oficina de Textos, v.1, p. 15-40, 2004.

KAUFMAN, Y. J.; TANRÉ, D. Algorithm for Remote Sensing of Tropospheric Aerosol from MODIS. **MODIS ATBD02**, NASA/GSFC, 1998. Available at: http://modis.gsfc.nasa.gov/data/atbd/atbd_mod02.pdf . Acesso em: 20/11/2007.

KAUFMAN, Y. J.; TUCKER, C. J.; FUNG, I. Remote Sensing of Biomass Burning in the Tropics. **Journal of Geophysical Research**, v. 95, n. D7, p. 9927-9939, 1990.

KAUFMAN, Y. J.; SETZER, A. W.; WARD, D.; TANRÉ, D.; HOLBEN, B. N.; MENZEL, P.; PEREIRA, M. C.; RASMUSSEN, R. Biomass Burning and Spaceborne Experiment in the Amazonas (BASE-A). **Journal of Geophysical Research**, v. 97, n. D13, p. 14581-14599, 1992.

KAUFMAN, Y. J.; REMER, L.; OTTMAR, R.; WARD, D.; RONG-R, L.; KLEIDMAN, R.; FRASER, R.; FLYNN, L.; MCDUGAL, D.; SHELTON, G. Relationship between remotely sensed fire intensity and rate of emission of smoke: SCAR-C experiment. In: Levine, J. (Ed.), **Global biomass burning**, Maryland: MIT Press, p. 685-696, 1996.

KAUFMAN, Y. J.; JUSTICE, C. O.; FLYNN, L. P.; KENDALL, E. M. P.; GIGLIO, L.; WARD, D. E.; MENZEL, W. P.; SETZER, A. W. Potencial global fire monitoring from EOS-MODIS. **Journal of Geophysical Research**, v. 103, n. 24, p. 32215-32238, 1998.

KAUFMAN, Y. J.; KLEIDMAN, R. G.; KING, M. D. SCAR-B fires in the tropics: Properties and remote sensing from EOS-MODIS. **Journal of Geophysical Research**, v. 103, n. 24, p. 31955-31968, 1998b.

KILLOPS, S.D.; MASSOUD, M. S. polycyclic aromatic hydrocarbons of pyrolytic origin in ancient sediments: evidence for Jurassic vegetation fires, **Org. Geochem.**, n. 18, p 1-7, 1992.

LEVINE, J. S. Biomass burning and the production of greenhouse gases. In: Zepp, R. G. (Ed.) **Climate Biosphere Interaction: Biogenic Emissions and Environmental Effects of Climate Change**, Isbn 0-471-58943-3, 1994. Disponível em: http://asd-www.larc.nasa.gov/biomass_burn/biomass.html. Acesso em 24/01/2007.

LIU, J.; DRUMMOND, J. R.; LI, Q.; GILLE, J. C.; ZISKIN, D. C. Satellite mapping of CO emission from forest fires in Northwest America using MOPITT measurements, **Remote Sensing of Environment**, n. 95, p. 502-516, 2005.

LONGO, K.; FREITAS, S. R.; SETZER, A.; PRINS, E.; ARTAXO, P.; ANDREAE, M. 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, **Atmos. Chem. Phys. Discuss.**, p. 8571-8595, 2007.

MANUAL DO FIELDSPEC. **FieldSpec® Operating and Post-processing Software**. Disponível em: <www.asdi.com>. Acesso em 29/11/2007.

MARTINS, J. V.; HOBBS, P. V.; WEISS, R. E.; ARTAXO, P. Sphericity and morphology of smoke particles from biomass burning in Brazil, **Journal of Geophysical Research**, v. 103, n. D24, p. 32051-32057, 1998.

MATSON, M.; DOZIER, J. Identification of subresolution high temperature sources using a thermal IR sensor, **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v. 47, p. 1311-1318, 1981.

MATSON, M.; HOLBEN, B. Satellite detection of tropical burning in Brazil, **International Journal of Remote Sensing**, v. 8, p. 509-516, 1987.

- MENZEL, W. P.; PRINS, E. M. Monitoring biomass burning with the new generation of geostationary satellites. In: J. S. Levine (Ed.), **Biomass burning and global change** - remote sensing, modeling and inventory development, and biomass burning in Africa, Cambridge: MIT Press, v. 1, p. 56– 64, 1996.
- MORAES, E. C.; FRANCHITO, S.H.; BRAHMANANDA RAO, V. Effects of biomass burning in Amazonia on climate: A numerical experiment with a statistical-dynamical model, **Journal of Geophysical Research**, v. 109, n. D05109, p. 1-12, 2004.
- OLSON, J. S.; WATTS, J. A.; ALLISON, L. J. Major World Ecosystem Complexes Ranked by Carbon in Live Vegetation: A Database (Revised November 2000). NDP-017. Available on <<http://cdiac.esd.ornl.gov/ndps/ndp017.html>>. **Carbon dioxide information analysis center**, 2000. Acesso em 15/01/2008.
- PEREIRA, M. C.; FERNANDES, A. E.; BRAGA, R. A.; SILVA, R. A. B. Detecção de queimadas com o uso do radiômetro AVHRR. In: **Aplicações ambientais brasileiras dos satélites NOAA e TIROS-N**. São Paulo: Oficina de Textos, v.1, p. 41-55, 2004.
- PRINS, E. M.; MENZEL, W. P. Geostationary satellite detection of biomass burning in South America. **International Journal of Remote Sensing**, v. 13, n. 15, p. 2783-2799, 1992.
- PRINS, E. M.; FELZ, J. M.; MENZEL, W. P.; WARD, D. E. 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. 103, n. D24. p. 31821-31825, 1998.
- QUADRO, M. F. L.; MACHADO, L. H. R.; CALBETE, S.; BATISTA, N. N. M.; OLIVEIRA, G. S. Climatologia da precipitação e temperatura. **Climanálise Especial**. Edição Comemorativa de 10 anos. FUNCEME, p. 136 – 139, 1996.
- RAO, P.K.; HOLMES, S.J.; ANDERSON, R. K.; WINSTON, J.S.; LEHR, P.E. **Weather satellites: systems, data, and environmental applications**, Boston: American Meteorological Society, 1990.
- SCOTT, A. C. The pre-Quaternary history of fire, **Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeocol.**, n. 164, p. 281-329, 2000.
- SESTINI, M.; REIMER, E.; VALERIANO, D.; ALVALÁ, R.; MELLO, E.; CHAN, C.; NOBRE, C. Mapa de cobertura da terra da Amazônia legal para uso em modelos meteorológicos. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto (SBSR), 11., Belo Horizonte. **Anais ...** São José dos Campos: INPE, 2003. Artigos, p. 2901–2906. CD-ROM, On-line. ISBN 85-17-00018-8
- SETZER, A. W.; PEREIRA, M. C. P; ALMEIDA, S. O. **Relatório de atividades do projeto IBDF-INPE "SEQE"- ano 1987**. . - . SAO JOSE DOS CAMPOS, SP: INPE, 1988. 101 p., 93204 cm. (INPE-4534-RPE/565).
- SETZER, A. W.; PEREIRA, M. C. P. **Relatório de atividades do projeto "SEQE" – Ano 1988**. São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 1988. (INPE).
- SILVA, A. S. da; SILVA, M. C. da. Prática de queimadas e as implicações sociais e ambientais na cidade de Araguaína-TO. **Revista Caminhos de Geografia**, v. 18, pg. 8 – 16, 2006.
- VENKATESAN, M. J.; DAHL, J. Organic geochemical evidence for global fires at the Cretaceous / Tertiary boundary, **Nature**, n. 338, p. 57-60, 1989.
- TRIPATHI, S. N.; DEY, S.; CHANDEL, A.; SRIVASTAVA, S.; SINGH, R. P.; HOLBEN, B. N.. Comparison of MODIS and AERONET derived aerosol optical depth over ganga basin, India, **Annales Geophysicae**, v. 23, p. 1093-1101, 2005.

WALKO, R.; BAND, L.; BARON, J.; KITTEL, F.; LAMMERS, R.; LEE, T.; OJIMA, D.; PIELKE, R.; TAYLOR, C.; TAGUE, C.; TREMBACK, C.; VIDALE, P.. Coupled atmosphere-biophysics-hydrology models for environmental modeling, **J. Appl. Meteorol.**, v. 39, p. 931–944, 2000.

WARD, D. E.; SUSOTT, R. A.; KAUFFMAN, J. B.; BABBITT, R. E.; CUMMINGS, D. L.; DIAS, B.; HOLBEN, B. N.; KAUFMAN, Y. J.; RASMUSSEN, R. A.; SETZER, A. W. Smoke and Fire Characteristics for Cerrado and deforestation Burns in Brazil: BASE-B Experiment, **Journal of Geophysical Research**, v. 97, n. D13, p. 14601-14619, 1992.

WERF, G. R.; RANDERSON, J. T.; GIGLIO, L.; COLLATZ, G. J.; KASIBHATLA, P. S.; ARELLANO JR., A. F. Interannual variability in global biomass burning emissions from 1997 to 2004, **Atmospheric Chemistry and Physics**, n. 6, p. 3423-3441, 2006.

WOOSTER, M. J. Small-scale experimental testing of fire radiative energy for quantifying mass combusted in natural vegetation fires. **Geophysical Research Letters**, v. 29, n. 21 (doi: 10.1029/2002GL015487), 2002.

WOOSTER, M.J.; ROBERTS, G.; PERRY, G.; KAUFMAN, Y.J. Retrieval of biomass combustion rates and totals from fire radiative power observations: calibration relationships between biomass consumption and fire radiative energy release, **Journal of Geophysical Research**, v. 110, n. D21111: doi: 10.1029/2005JD006318, 2005.

WOOSTER, M. J.; ROTHERY, D. A. Thermal monitoring of Lascar Volcano, Chile using infrared data from the Along Track Scanning Radiometer: A 1992 – 1995 time series, **Bulletin of Volcanology**, n. 58, p. 566-579, 1997.

WOOSTER, M. J.; ZHUKOV, B.; OERTEL, D. Fire radiative energy for quantitative study of biomass burning: derivation from the BIRD experimental satellite and comparison to MODIS fire products. **Remote Sensing of Environment**, n. 86, p. 83-107, 2003.

ANEXO A – CORRELAÇÕES BOOTSTRAP

A.1 Anexo

Segue em anexo as correlações a partir da técnica bootstrap de todos os coeficientes gerados nesta dissertação.

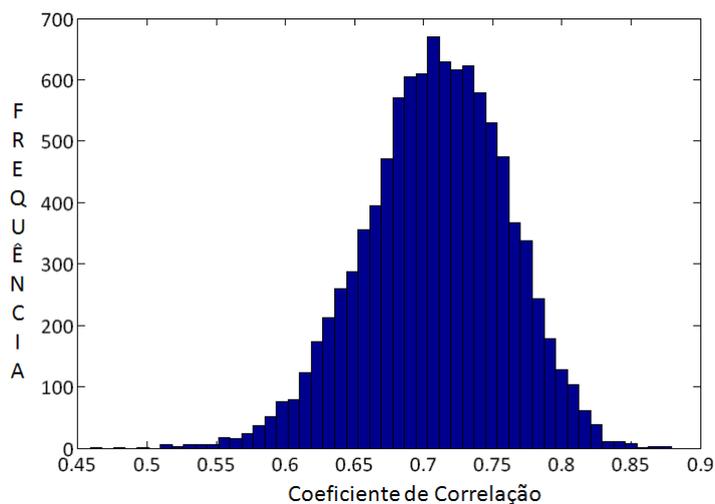


Figura A.1 – Distribuição do coeficiente de correlação utilizando a técnica de *bootstrap* para os dados da relação entre a Emissão de Fumaça e a ERF para a região da Floresta Amazônica e Cerrado.

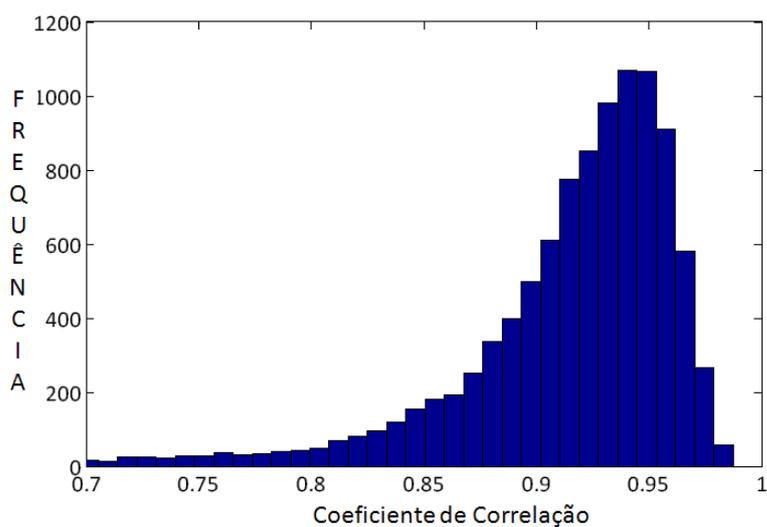


Figura A.2 – Distribuição do coeficiente de correlação utilizando a técnica de *bootstrap* para os dados da relação entre a Emissão de Fumaça e a ERF para a região Nordeste do Brasil.

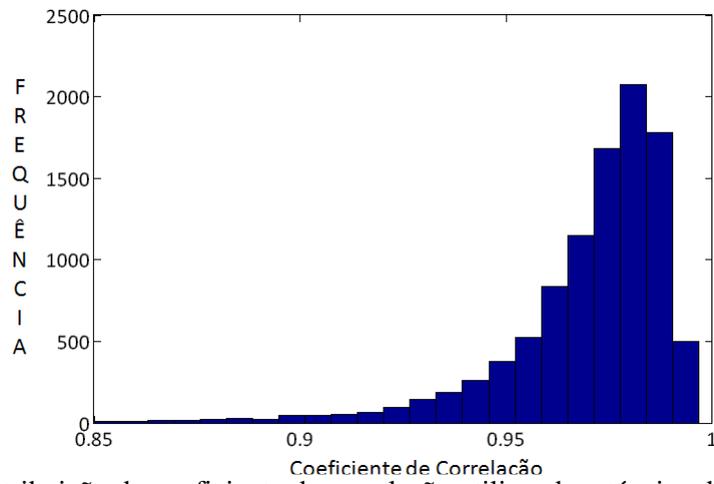


Figura A.3 – Distribuição do coeficiente de correlação utilizando a técnica de *bootstrap* para os dados da relação entre a Emissão de Fumaça e a ERF para a região da América do Sul abaixo de 20°.

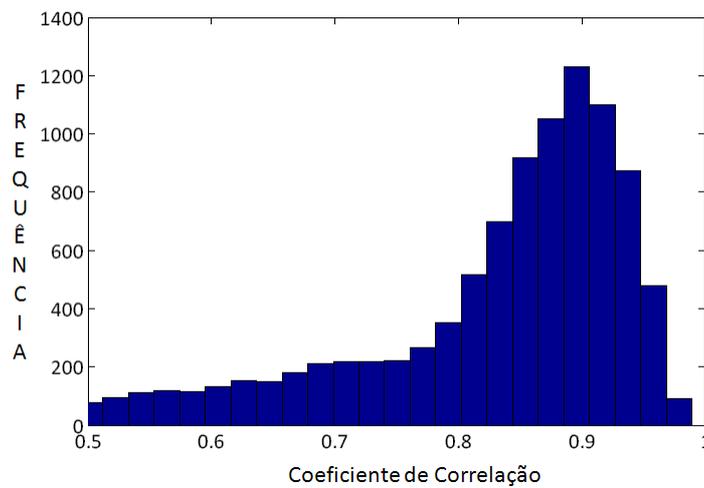


Figura A.4 – Distribuição do coeficiente de correlação utilizando a técnica de *bootstrap* para os dados da relação entre a biomassa consumida e a ERF.

PUBLICAÇÕES TÉCNICO-CIENTÍFICAS EDITADAS PELO INPE

Teses e Dissertações (TDI)

Teses e Dissertações apresentadas nos Cursos de Pós-Graduação do INPE.

Manuais Técnicos (MAN)

São publicações de caráter técnico que incluem normas, procedimentos, instruções e orientações.

Notas Técnico-Científicas (NTC)

Incluem resultados preliminares de pesquisa, descrição de equipamentos, descrição e ou documentação de programa de computador, descrição de sistemas e experimentos, apresentação de testes, dados, atlas, e documentação de projetos de engenharia.

Relatórios de Pesquisa (RPQ)

Reportam resultados ou progressos de pesquisas tanto de natureza técnica quanto científica, cujo nível seja compatível com o de uma publicação em periódico nacional ou internacional.

Propostas e Relatórios de Projetos (PRP)

São propostas de projetos técnico-científicos e relatórios de acompanhamento de projetos, atividades e convênios.

Publicações Didáticas (PUD)

Incluem apostilas, notas de aula e manuais didáticos.

Publicações Seriadas

São os seriados técnico-científicos: boletins, periódicos, anuários e anais de eventos (simpósios e congressos). Constam destas publicações o Internacional Standard Serial Number (ISSN), que é um código único e definitivo para identificação de títulos de seriados.

Programas de Computador (PDC)

São a seqüência de instruções ou códigos, expressos em uma linguagem de programação compilada ou interpretada, a ser executada por um computador para alcançar um determinado objetivo. São aceitos tanto programas fonte quanto executáveis.

Pré-publicações (PRE)

Todos os artigos publicados em periódicos, anais e como capítulos de livros.