

# Modelagem das estimativas dos fluxos de gases traços e de aerossóis liberados na queima de biomassa por Sensoriamento Remoto

Gabriel Pereira<sup>1</sup>  
Nelson Jesus Ferreira<sup>1</sup>  
Elisabete Caria Moraes<sup>1</sup>  
Saulo Ribeiro de Freitas<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE  
Caixa Postal 515 - 12245-970 - São José dos Campos - SP, Brasil  
{gabriel, bete}@dsr.inpe.br; {nelson, saulo.freitas}@cptec.inpe.br

**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  $\mu\text{m}$ ) 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 methods that use the FRE to estimate the emission of gases and aerosols were modeled using CCATT-BRAMS (Coupled Chemistry-Aerosol-Tracer Transport model coupled to Brazilian Regional Atmospheric Modeling System) and evaluated via data obtained from field experiments in the LBA SMOCC/RaCCI. The application of the methods to estimate the emission of  $\text{PM}_{2,5\mu\text{m}}$  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  $\text{PM}_{2,5\mu\text{m}}$  data and coefficient of determination of 0.72 and correlation of 85% for the CO data.

**Palavras-chave:** remote sensing, image processing, geology, sensoriamento remoto, processamento de imagens, geologia.

## 1. Introdução

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 e 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 e 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 das populações situadas próximas as áreas de incidência de queimadas.

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). A queima de biomassa vegetal viva e/ou morta, em condições ideais de completa combustão, produz dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) e vapor d'água ( $\text{H}_2\text{O}$ ), de acordo com a reação a seguir (Levine, 1994):



onde CH<sub>2</sub>O representa a composição média da biomassa vegetal. Porém, o processo de combustão geralmente não é completo, sendo comum encontrar, além do CO<sub>2</sub>, outras espécies de gases, como por exemplo, o monóxido de carbono (CO), o metano (CH<sub>4</sub>), o monóxido de nitrogênio (NO), o dióxido de nitrogênio (NO<sub>2</sub>) e o cloreto de metil (CH<sub>3</sub>Cl) (Badarinath et al., 2004). As queimadas são fontes de gases do efeito estufa (CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>), 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 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 (PM<sub>2,5</sub>) para o período de queimadas de 2002 na América do Sul, e modelar estas emissões no CCATT-BRAMS.

## 2. Materiais e Métodos

### 2.1 Energia Radiativa do Fogo

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, 1998a, 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) representa a ERF obtida através do sensor MODIS.

$$ERF = [4, 3 \times 10^{-19} \cdot (T_{f4\mu m}^8 - T_{b4\mu m}^8)] * A_{sampl} \quad (2)$$

onde  $A_{sampl}$  representa o tamanho da área do pixel (km<sup>2</sup>). Pode-se ainda obter a ERF a partir de outras formulações, como exemplificado abaixo:

$$ERF = A_{sampl} \cdot \epsilon \cdot \sigma \cdot \sum_{i=1}^n A p_n \cdot T_n^4 \quad (3)$$

onde  $\sigma$  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  $\epsilon$  é a emissividade da superfície estudada.

### 2.2 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 da 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 (4):

$$M_x = C_e \cdot ERF \quad (4)$$

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.

Desta forma, Ichoku e Kaufman (2005) obtiveram o  $C_e$  para três diferentes regiões da América do Sul, como mostra a Figura 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.

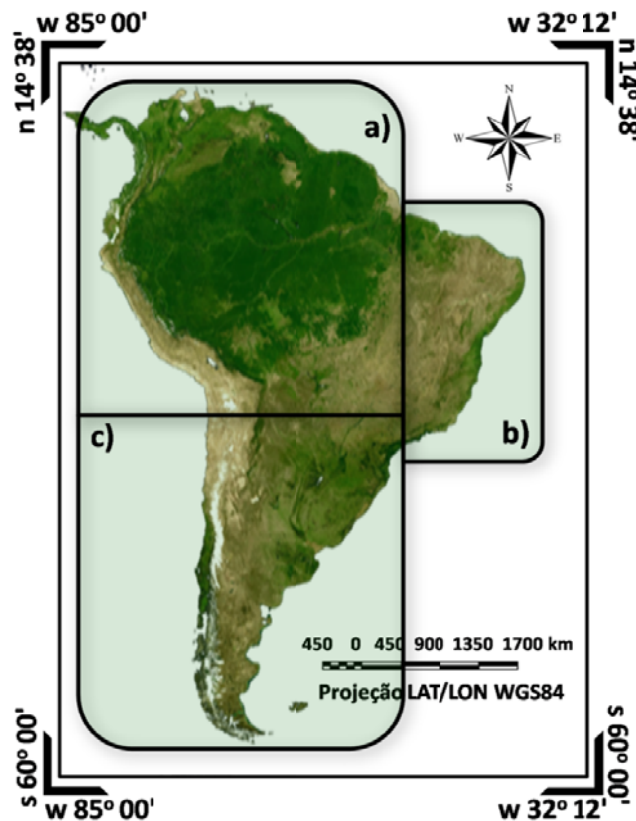


Figura 1 – Localização da área de estudo e coeficientes de emissão baseados na ERF

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.

$$R_{sa} = \left\{ \frac{\left\{ \sum_{i=1}^{fogo} \left[ \frac{(AOT_{550nm}^f - AOT_{550nm}^b)}{(\beta_a + \beta_s)} \right] * A_p \right\}}{\sum_{i=1}^{fogo} \left( \frac{\sqrt{A_p}}{\sqrt{u^2 + v^2}} \right)} \right\} \quad (5)$$

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;  $\beta_a$  e  $\beta_s$  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.

### 2.3 Materiais Utilizados

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  $5^\circ$  (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 e Tanré, 1998).

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).

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 $\mu$ m e outra localizada no canal em 10,7 $\mu$ m (Prins et al., 1998).

### 2.4 O 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. 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, 2007).

O CCATT, modelo de transporte Euleriano 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<sub>2,5µm</sub> é calculada, sob a forma de equação de tendência, expressa pela seguinte equação (Freitas et al., 2005):

$$\frac{\partial s}{\partial t} = \left(\frac{\partial s}{\partial t}\right)_{adv} + \left(\frac{\partial s}{\partial t}\right)_{PBL\ turb} + \left(\frac{\partial s}{\partial t}\right)_{Conv. Rasa} + \left(\frac{\partial s}{\partial t}\right)_{Conv. Prof.} + W_{PM2,5\mu m} + R + Q \quad (6)$$

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<sub>2,5µm</sub> 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 20.180 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 CPTEC denominado GAMRAMST062, para as datas de 15/Jul/2002 a 31/Ago/2002; e 01/Set/2002 a 16/Nov/2002, respectivamente.

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<sub>2,5µm</sub> 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).

### 3. Resultados e Discussão

A Figura 2 mostra o mapa do total de PM<sub>2,5µm</sub> 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 e Kaufman, 2005) e dos dados do GOES. Neste método os maiores valores de PM<sub>2,5µm</sub> 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<sub>2,5µm</sub> excederam 37.000 µg.m<sup>-3</sup>.

O uso da ERF e dos coeficientes de emissão para estimar o PM<sub>2,5µm</sub> 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.

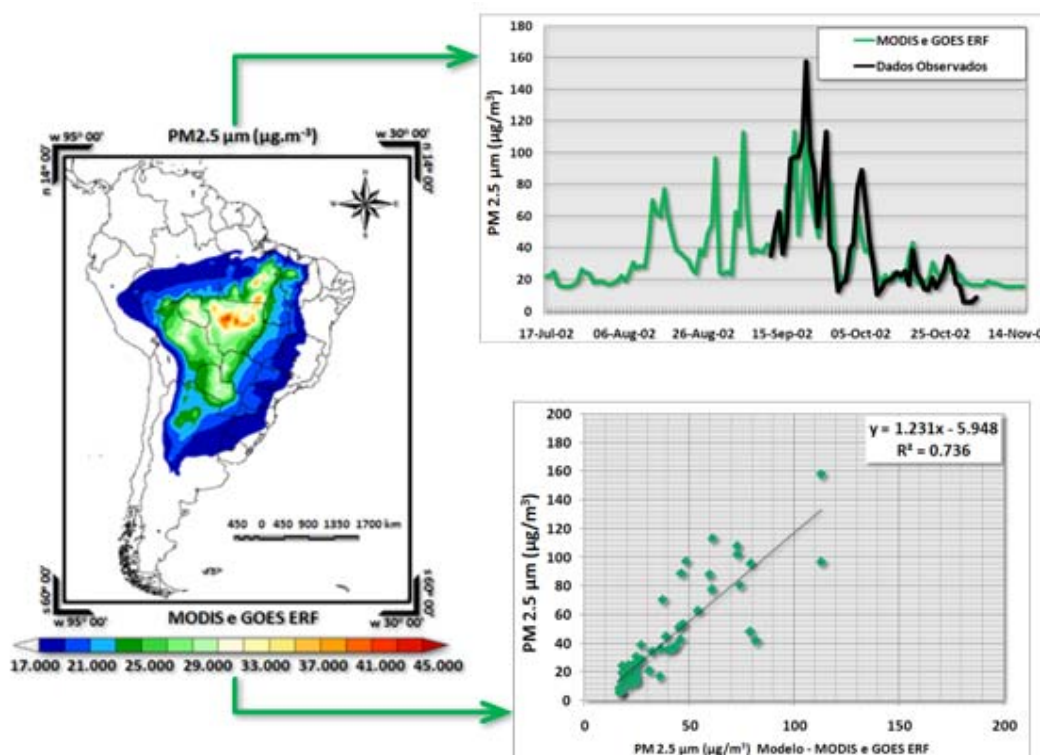


Figura 2 – Mapa da emissão total de  $PM_{2,5\mu m}$  ( $\mu g.m^{-3}$ ) para o período de 15/Jul/2002 a 15/Nov/2002

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 e Kaufman, 2005) e para os dados do GOES, como mostra a Figura 3. 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.

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.

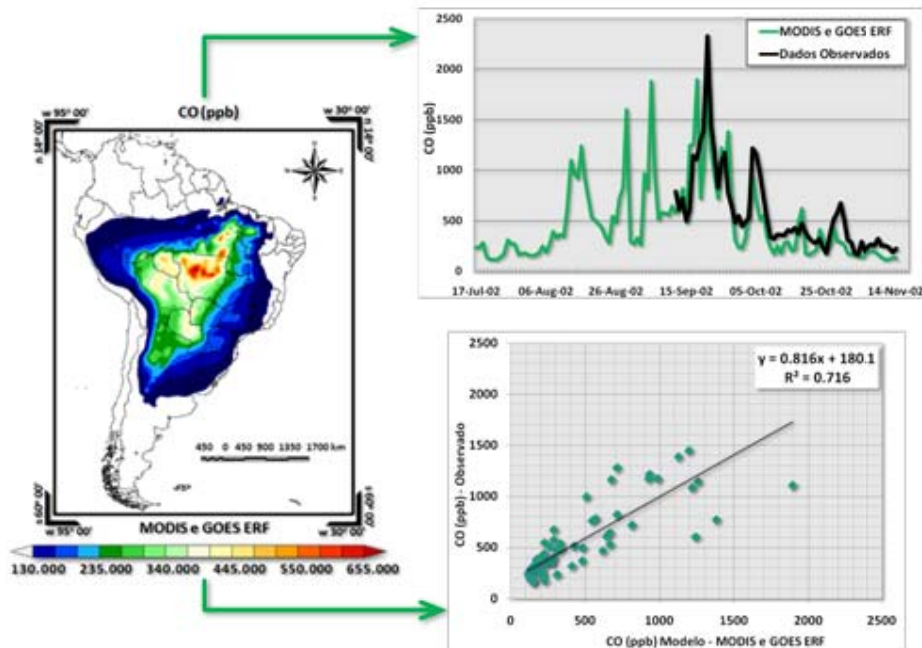


Figura 3 – Mapa da emissão total de CO (ppb) para o período de 15/Jul/2002 a 15/Nov/2002.

#### 4. Considerações Finais

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 ( $\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$ ) e a energia radiativa do fogo ( $\text{MJ}\cdot\text{s}^{-1}$ ), originaram-se três coeficientes para os dados provenientes do satélite GOES. Estes coeficientes permitem estimar a partir da ERF a quantidade de  $\text{PM}_{2,5\mu\text{m}}$  liberada para a atmosfera a partir de três grandes biomas. 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  $\text{PM}_{2,5\mu\text{m}}$  e 0,72 e 85% para os dados de CO. Entre as principais vantagens deste método pode-se citar a independência de uma base de dados de carbono disponível para a queima e uma melhor estimativa das emissões nas regiões entre as latitudes 20° S e 45° S.

#### Referências Bibliográficas

Logo na introdução aparece um Andreae (1991) que não ta aqui.

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.

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.

- 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.
- 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.
- 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<sub>x</sub> and O<sub>3</sub>. **Journal of Geophysical Research**, v. 105, n. D5, p. 6633-6653, 2000.
- 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.
- 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.; Mcdougal, D.; Shalton, 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.
- 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](http://modis.gsfc.nasa.gov/data/atbd/atbd_mod02.pdf). Acesso em: 20/11/2007.
- 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](http://asd-www.larc.nasa.gov/biomass_burn/biomass.html). Acesso em 24/01/2007.
- 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.
- 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.
- 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.