

# MÉTODO PARA ESTIMAR AS TAXAS DE EMISSÃO DE MATERIAL PARTICULADO E MONÓXIDO DE CARBONO A PARTIR DAS MEDIDAS DE ENERGIA RADIATIVA DO FOGO PROVENIENTES DO WFABBA/GOES

*A Method to Estimate the Particulate Matter and Carbon Monoxide Emission Rates from WFABBA/GOES Fire Radiative Energy Measurements*

**Gabriel Pereira<sup>1</sup>**  
**Elisabete Caria Moraes<sup>1</sup>**  
**Yosio Edemir Shimabukuro<sup>1</sup>**  
**Francielle da Silva Cardozo<sup>1</sup>**  
**Saulo Ribeiro de Freitas<sup>2</sup>**  
**Nelson Jesus Ferreira<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>**Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE**  
**Divisão de Sensoriamento Remoto - DSR**

Avenida dos Astronautas, 1758, Jardim da Granja, São José dos Campos, SP – Brasil. CEP: 12227-010  
gabriel@dsr.inpe.br  
bete@dsr.inpe.br  
yosio@dsr.inpe.br  
cardozo@dsr.inpe.br

<sup>2</sup>**Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE**  
**Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos - CPTEC**

Avenida dos Astronautas, 1758, Jardim da Granja, São José dos Campos, SP – Brasil. CEP: 12227-010  
nelson@cptec.inpe.br  
saulo.freitas@cptec.inpe.br

## RESUMO

O presente trabalho avalia o emprego da energia radiativa do fogo (ERF) para estimar as emissões de 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. Utilizaram-se os dados provenientes dos produtos MOD04/MYD04 e o produto derivado do satélite GOES denominado WFABBA (*Wildfire Automated Biomass Burning Algorithm*) para calcular os coeficientes de emissão baseados na ERF para o satélite GOES e para calcular o total de gases e aerossóis emitidos para a atmosfera. Com uma correlação entre os dados de fumaça e a ERF superior a 86%, originaram-se três coeficientes que permitem estimar a quantidade de gases liberados para a atmosfera. Para o período de 15/julho a 15/novembro/2002 liberou-se na forma de ERF para a América do Sul  $1,28 \times 10^8$  MW, com um total de  $7 \times 10^5$  kg  $\cdot$  s<sup>-1</sup> de  $\text{PM}_{2,5\mu\text{m}}$  e  $9,6 \times 10^6$  kg  $\cdot$  s<sup>-1</sup> de CO.

**Palavras chaves:** Queimadas, WFABBA/GOES, Emissão de Gases Traços e Aerossóis, Energia Radiativa do Fogo.

## ABSTRACT

The present work evaluates the use of fire radiative energy (FRE) to estimate the emissions of particulate matter with diameter less than 2.5  $\mu\text{m}$  ( $\text{PM}_{2,5\mu\text{m}}$ ) and carbon monoxide (CO) for the burning season in South America. The MOD04/MYD04 and WFABBA/GOES products were utilized to calculate the FRE-based smoke emission coefficients and the total amount of gases and aerosols emitted to the atmosphere. With a correlation between the smoke emission and the FRE greater than 86%, three new coefficients were made that allow to estimate the amount of gases released to the atmosphere. For the period of this study, 15/july to 15/november/2002, the total fire radiative energy released was  $1.28 \times 10^8$  MJ, with a total of  $7 \times 10^5$  kg of  $\text{PM}_{2,5\mu\text{m}}$  and  $9.6 \times 10^6$  kg of CO.

**Keywords:** Biomass Burning, WFABBA/GOES, Trace Gases and Aerosols Emissions, Fire Radiative Power.

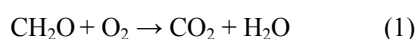
## 1. INTRODUÇÃO

Podem-se encontrar evidências de queimadas naturais desde a Era Paleozóica, no final do período Siluriano (415 milhões de anos atrás). Nesta época o aumento da concentração de oxigênio (O<sub>2</sub>) devido ao surgimento de plantas vasculares proporcionavam a incidência de queimadas, originadas principalmente por raios ou combustão espontânea. A partir de fósseis encontrados em sedimentos marinhos e terrestres, em hidrocarbonetos aromáticos cíclicos e em vegetações carbonizadas pôde-se constatar a presença de paleofogos intrínsecos às ações naturais na Era Mesozóica (GLASSPOOL *et al.*, 2004; FINKELSTEIN *et al.*, 2006; BERNER *et al.*, 2003; SCOTT, 2000; VENKATESAN & DAHL, 1989; KILLOPS & MASSOUD, 1992; FINKELSTEIN, 2004).

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 anualmente, dos quais 80% ocorrem em regiões tropicais do globo (HAO & LIU, 1994). Na América do Sul as queimadas estão vinculadas essencialmente às atividades agropecuárias e ao desflorestamento, apresentando grande variabilidade temporal e espacial.

Segundo Andreae (1991) estima-se que aproximadamente 90% das queimadas atuais sejam de origem antropogênica. Atualmente as queimadas são frequentes em todas as regiões do mundo e liberam quantidades significativas de aerossóis e gases traços para a atmosfera (incluindo CO<sub>2</sub> – dióxido de carbono; CO – monóxido de carbono; CH<sub>4</sub> – metano; e outras espécies), influenciando nas características da superfície terrestre, do albedo, do balanço radiativo da atmosfera, dos ciclos hidrológicos, dos ciclos biogeoquímicos, das doenças respiratórias, do clima mundial, entre outros (ANDREAE & MERLET, 2001; MORAES *et al.*, 2004; ICHOKU & KAUFMAN, 2005; ANDREAE *et al.*, 2004; SILVA & SILVA, 2006).

A queima de biomassa vegetal viva e/ou morta, em condições ideais de completa combustão, produz CO<sub>2</sub> e vapor d'água, de acordo com a reação a seguir (LEVINE, 1994):



onde CH<sub>2</sub>O representa a composição média da biomassa vegetal. Entretanto, na maioria das vezes o processo de combustão é incompleto, sendo comum encontrar espécies como, por exemplo, CO, CH<sub>4</sub>, NO (monóxido de nitrogênio), NO<sub>2</sub> (dióxido de nitrogênio) e o cloreto de metil (CH<sub>3</sub>Cl) (BADARINATH *et al.*, 2004).

Alguns destes gases emitidos na queimada 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). Esta problemática induz à

busca de metodologias que visem estimar a quantidade de aerossóis e gases traços emitida para a atmosfera, sem a necessidade do cálculo da quantidade de biomassa queimada (KAUFMAN *et al.*, 1998a).

Diversos estudos foram realizados para se estimar os focos de queimadas e a intensidade das emissões destes gases (SETZER *et al.*, 1988; SETZER & PEREIRA, 1990; ANDREAE, 1991; KAUFMAN *et al.*, 1992; KAUFMAN *et al.*, 1998a; ARAÚJO *et al.*, 1999; BADARINATH *et al.*, 2004; ANDREAE *et al.*, 2004; ICHOKU & KAUFMAN, 2005; 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. O presente trabalho tem como objetivo principal gerar os coeficientes de emissão baseados na energia radiativa do fogo para o WFABBA/GOES, adotando a metodologia descrita por ICHOKU & KAUFMAN (2005) e calcular o total de PM<sub>2,5µm</sub> e CO emitido diariamente para atmosfera na América do Sul.

## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

### 2.1 Características da área de estudo

A América do Sul possui uma distinta e importante biodiversidade espacialmente distribuída em diversos ecossistemas naturais. Entretanto, este complexo sistema, à mercê das ações antropogênicas, é ameaçado constantemente pelo avanço do desmatamento, da agricultura e das queimadas antropogênicas. O maior país em extensão e economia é o Brasil, nele podemos encontrar seis grandes domínios paisagísticos que comportam um mostruário bastante complexo das principais paisagens e ecologias do mundo. 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 (AB'SABER, 1977).

A América do Sul, dada a sua localização espacial e sua grande extensão territorial, apresenta um diversificado padrão de circulação regional. É comum encontrar características regionais específicas com grande variedade de climas, ocasionadas pelos diferentes e complexos sistemas de circulação, como, por exemplo, massas de ar, correntes perturbadas (descontinuidades atmosféricas promovidas por frentes polares, linhas de instabilidades tropicais e ondas de leste) e a zona de convergência intertropical. Desta forma, é comum encontrar pelo continente Sul-Americano épocas chuvosas e secas. Na parte central da América do Sul, o período seco concentra-se nos meses de junho a setembro, período de máxima incidência de queimadas.

### 3. METODOLOGIA

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 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.*, 1998a; 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 4 $\mu$ m, 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 Equação 2 representa a ERF obtida através do sensor MODIS.

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

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

$$ERF = A_{sampler} \cdot \sigma \cdot \epsilon \cdot \sum A_n \cdot T_n^4 \quad (3)$$

$$ERF_{IVM} = [(A_{sampler} \cdot \sigma \cdot \epsilon / a \cdot \epsilon_{ivm}) * L_{IVM,f}] \quad (4)$$

na qual  $\sigma$  é a constante de Stefan-Boltzmann (5,67x10<sup>-8</sup> J.s<sup>-1</sup>.m<sup>-2</sup>.K<sup>-4</sup>),  $A_n$  é a área parcial do enésimo (n) componente termal no interior do pixel,  $T_n$  é a temperatura da enésima componente termal (K),  $\epsilon$  é a emissividade da superfície estudada.  $ERF_{IVM}$  representam a energia radiativa do fogo para o infravermelho médio,  $a$  é uma constante obtida por Wooster & Rothery (1997), que dependem do comprimento de onda e do intervalo térmico utilizado e  $L_{IVM,f}$  a radiância espectral do infravermelho médio para o pixel com anomalia térmica.

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 555 nm ( $AOT_{555nm}$ ) MOD04/MYD04-C005 com resolução de 10 km x 10 km são separados em *granules* (áreas) de 5° (2030 km por 2330 km) e disponibilizados gratuitamente pela LAADS (*Level 1 and Atmosphere Archive Distribution System*) em <<http://ladsweb.nascom.nasa.gov>> (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.

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).

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-píxel com o fogo, a quantidade de CO, o tipo de ecossistema, a fração de chamas, a temperatura no canal em 3,9µm e a temperatura no canal em 10,7µm. Os produtos de queimada WFABBA ainda não possuem um algoritmo para se estimar a energia radiativa do fogo, estuda-se a possibilidade de adotar a Equação 5 para o cálculo desta grandeza física (JAY HOFFMAN, Comunicação Pessoal, 2007):

$$ERF = A \cdot \sigma \cdot T_f^4 \quad (5)$$

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

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 & 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 Equação 6 abaixo mostra o procedimento para o cálculo dos coeficientes.

$$R_{sa} = \left\{ \frac{\left\{ \sum_{i=1}^{fogo} \left[ \left( \frac{AOT_{550nm}^f - AOT_{550nm}^b}{\beta_a + \beta_s} \right) \cdot A_p \right] \right\}}{\sum_{i=1}^{fogo} \left( \frac{\sqrt{A_p}}{\sqrt{u^2 + v^2}} \right)} \right\} \quad (6)$$

onde  $AOT_{550nm}^f$  e  $AOT_{550nm}^b$  representam a profundidade óptica do aerossol em 550nm do píxel 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 1665,7 metros de altitude, obtidas a partir do modelo BRAMS. Utilizou-se a mesmas regiões definidas Ichoku & Kaufman (2005), **Figura 1**, para o cálculo dos coeficientes.

#### 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os coeficientes de emissão baseados na ERF permitem calcular o total de PM<sub>2,5µm</sub> liberado para a atmosfera a partir da temperatura do fogo. Inicialmente esta metodologia foi desenvolvida por Ichoku & Kaufman (2005) para os produtos MOD14 e MYD14 das plataformas 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).

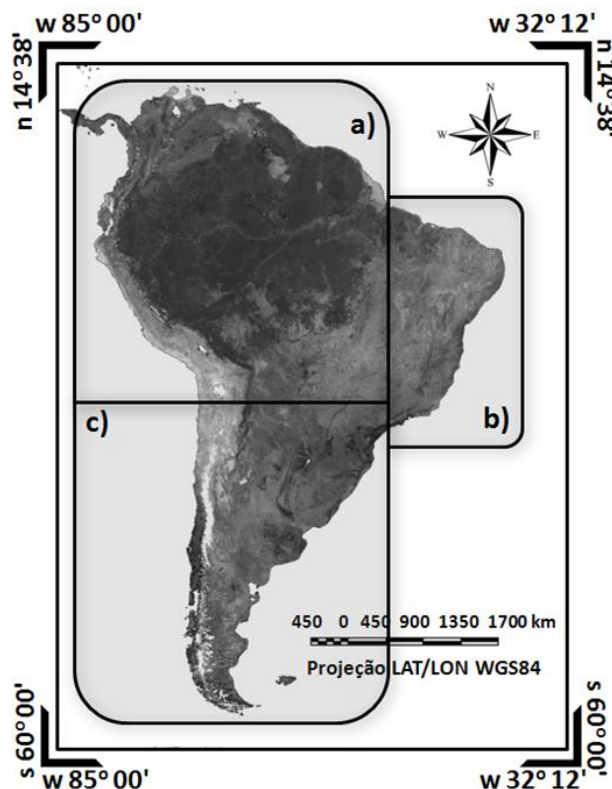


Fig. 1 - Localização da área de estudo e dos coeficientes de emissão baseados na ERF: Floresta Tropical e Cerrado (a), vegetação típica da caatinga (b) e Florestas Ombrófilas Densas e região de pradarias (c).

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 & Kaufman (2005) e visualizadas na **Figura 1**. As áreas correspondem a Floresta Tropical e Cerrado (a), vegetação típica da caatinga (b) e Florestas Ombrófilas Densas e região de pradarias (c).

As **Figuras 2, 3 e 4** 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<sup>-1</sup>, e o eixo y a emissão de aerossóis, em Kg.s<sup>-1</sup>. Para os três casos verificou-se que os coeficientes de correlação foram superiores a 86%.

Para a região de Floresta Tropical e Cerrado (**Figura 2**) obteve-se uma correlação de 86% e um coeficiente de determinação de 0,78. O valor do coeficiente de emissão baseado na ERF obtido foi de 0,03 kg.MJ<sup>-1</sup>. 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 (Equação 6).

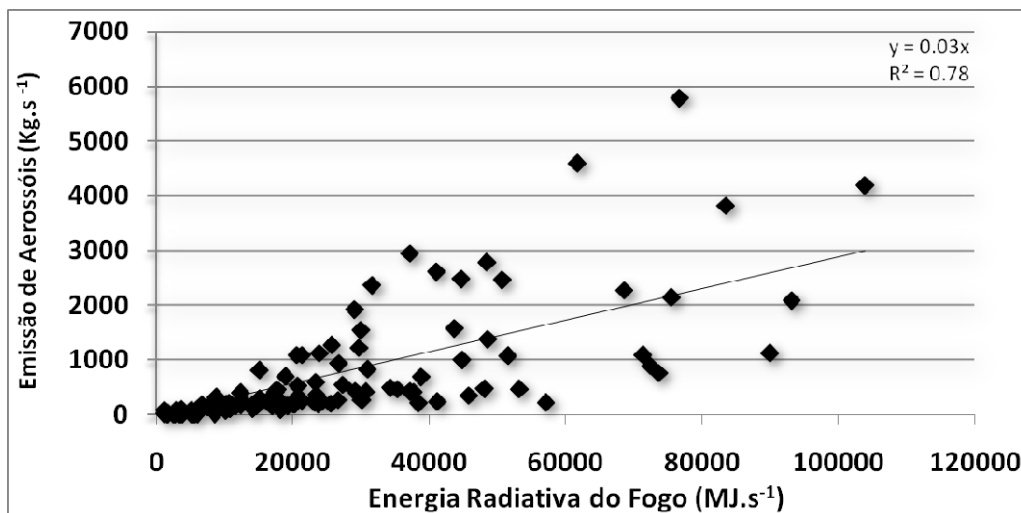


Fig. 2 - Coeficiente de emissão baseado na ERF para a Região Amazônica e Cerrado.

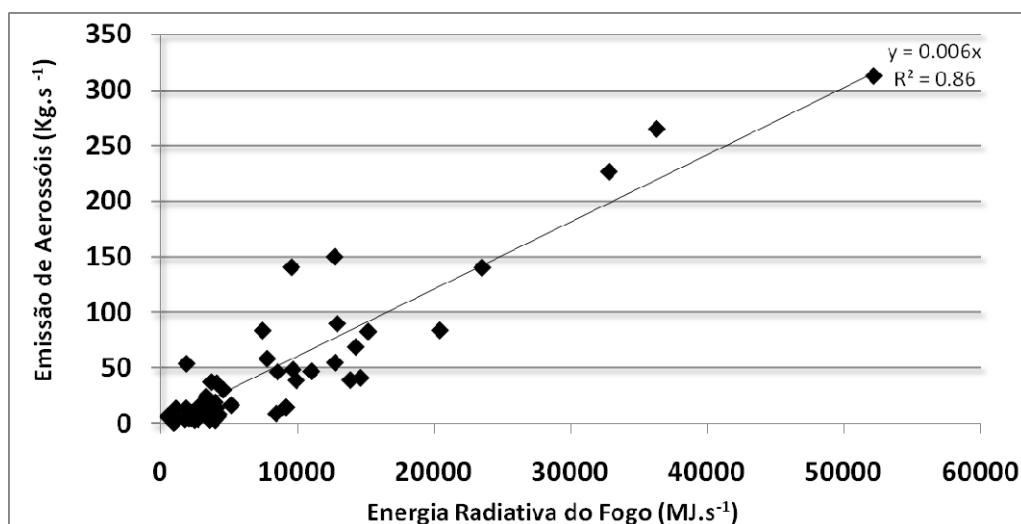


Fig. 3 - Coeficiente de emissão baseado na ERF para a Região Nordeste do Brasil.

Para a região típica de caatinga e nordeste brasileiro, entre outros biomas (**Figura 3**) 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  $\text{kg.MJ}^{-1}$ , referentes a 772 amostras agrupadas em 54 dias.

A **Figura 4** apresenta a análise realizada para a região da América do Sul abaixo de  $20^\circ$  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  $0,02 \text{ kg.MJ}^{-1}$ . 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  $AOT_{550nm}$  do produto MOD04/MYD04.

Os coeficientes descritos acima seguem a metodologia proposta por Ichoku & Kaufman (2005) para a estimativa da emissão de material particulado

com diâmetro menor que  $2,5 \mu\text{m}$ . Alguns estudos realizados por Jordan *et al.* (2008), Freeborn *et al.* (2008), Freitas *et al.* (2007), Longo *et al.* (2007), Kaufman *et al.* (1998a), Wooster *et al.* (2005), Kaufman *et al.* (1996), Freitas *et al.* (2005), Wooster *et al.* (2003), Wooster (2002) e Kaufman *et al.* (1992) permitem extrair informações da emissão de queimadas e da quantidade de biomassa consumida no processo de combustão. Os valores encontrados são semelhantes aos encontrados para outros satélites por estes autores.

Desta forma, 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  $\text{kg/MJ}$ . O produto deste coeficiente com a ERF, em MJ, resulta no total de biomassa liberada para a atmosfera, como mostra a Equação 7:

$$M_x = C_e * ERF \quad (7)$$

onde  $M_x$  representa a taxa de emissão de fumaça ( $\text{PM}_{2,5\mu\text{m}}$ ) calculada pelo satélite. A taxa de emissão de

fumaça quando multiplicada pelos fatores de emissão descritos por Andreae & Merlet (2001) permite a obtenção da taxa de emissão de diversos gases para a atmosfera. Andreae & Merlet (2001) reuniram uma completa revisão bibliográfica sobre emissões de

diferentes tipos de espécies vegetais submetidas a queimadas, estes fatores são aplicados para se obter o total da espécie emitida para a atmosfera durante o processo de combustão, como, por exemplo, CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, NO, NO<sub>2</sub>.

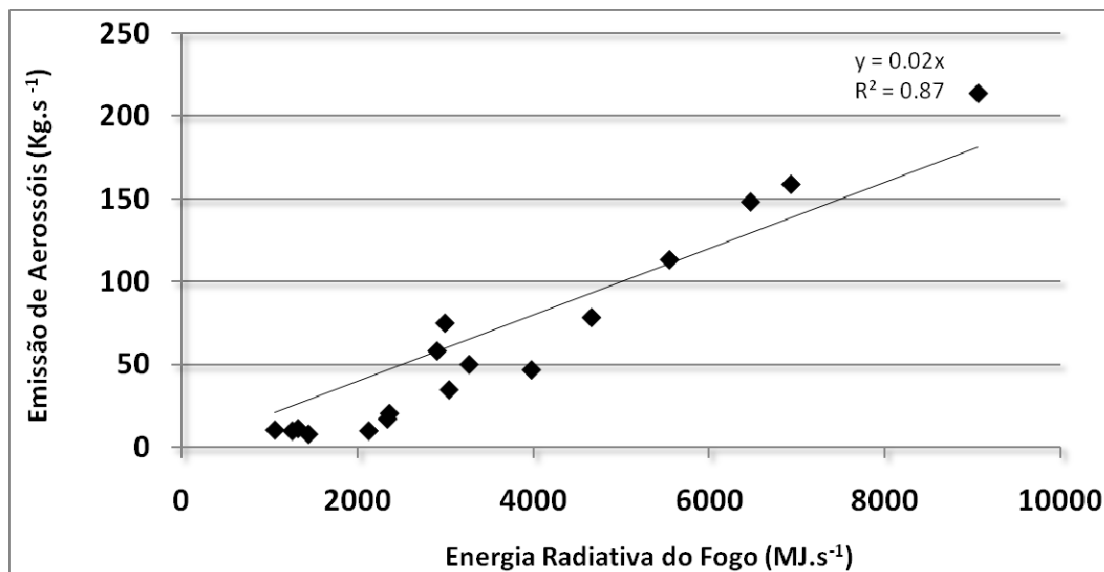


Fig. 4 - Coeficiente de emissão baseado na ERF para a Região da América do Sul abaixo de 20°.

A **Figura 5** mostra a ERF, em MW ou MJ/s, de 15/julho/2002 a 15/novembro/2002 para a América do Sul. Os valores diários de ERF correspondem ao somatório de todos os focos detectados pelo WFABBA/GOES a cada 30 minutos, referentes à resolução temporal do satélite em 2002. Nota-se que mesmo na época de intensas queimadas, que ocorrem principalmente nos meses de agosto e setembro, na série temporal constata-se algumas descontinuidades nos

dados. Relaciona-se este fato a presença de nuvens, provocadas pelos diversos sistemas meteorológicos que atuam na América do Sul. Desta forma, em alguns casos, a presença de nuvens e a falta de imageamento ocasionam baixos valores de ERF e, conseqüentemente, de PM<sub>2,5µm</sub> e de CO. Podem-se citar os dias 21/agosto/2002; 28/agosto/2002; 08/setembro/2002 e 05/novembro/2002 como exemplos da ausência de detecção de focos.

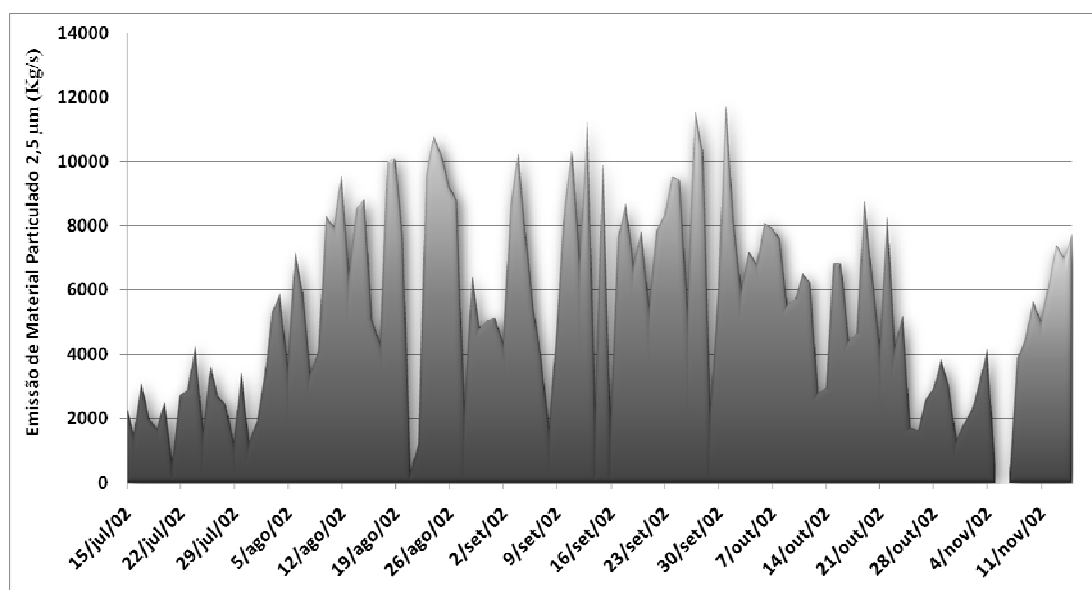


Fig. 5 - Energia Radiativa do Fogo liberada diariamente na América do Sul (15/julho/2002 a 15/novembro/2002).

A **Figura 6** mostra o gráfico da emissão diária de material particulado com diâmetro menor que 2,5µm para a América do Sul no período de 15/julho/2002 a

15/novembro/2002. No gráfico pode-se constatar que julho é o mês com a menor emissão de PM<sub>2,5µm</sub>, com valores entre 1.000 a 4.000 kg/s. As maiores emissões

ocorrem nos meses de agosto, setembro e outubro, época de intensas queimadas na região amazônica e no cerrado. Nestes meses a emissão total de  $PM_{2,5\mu m}$  pode chegar a aproximadamente 12.000 kg/s. O mês de novembro apresenta uma característica peculiar, visto que com o deslocamento das chuvas para a região amazônica e para o cerrado em meados de outubro, as queimadas deslocam-se para o extremo norte do Brasil, orientando-se no sentido ONO-ESE a 5° Sul, desta forma, o mês de novembro, em algumas ocasiões pode apresentar uma emissão superior a 7.000 kg/s.

A **Figura 7** mostra o gráfico da emissão diária de monóxido de carbono para a América do Sul no período de 15/julho/2002 a 15/novembro/2002. A emissão diária de CO é obtida a partir dos fatores de emissão propostos por Andreae & Merlet (2001), para três grandes regiões da América do Sul, assim como descrito na Figura 1. Os meses de agosto, setembro e

outubro correspondem ao período de máxima emissão de CO; nestes meses os valores podem superar os 160.000 kg/s. Na emissão de CO, destacam-se os dias: 25/agosto/2002; 04/setembro/2002; 12/setembro/2002; 29/setembro/2002 e 01/outubro/2002, onde os valores de CO liberados para a atmosfera ultrapassam 140.000 kg/s.

Para o período de 15/julho/2002 a 15/novembro/2002 liberou-se na forma de ERF para a América do Sul  $1,28 \times 10^8$  MW. A energia liberada na forma de radiação representa o consumo de uma quantidade muito grande de biomassa vegetal, que provoca impactos profundos no balanço de radiação, nos ciclos biogeoquímicos e no clima mundial. Desta forma, o total de  $PM_{2,5\mu m}$  e CO liberados para a atmosfera foram de aproximadamente  $7 \times 10^5$  kg/s e  $9,6 \times 10^6$  kg/s.

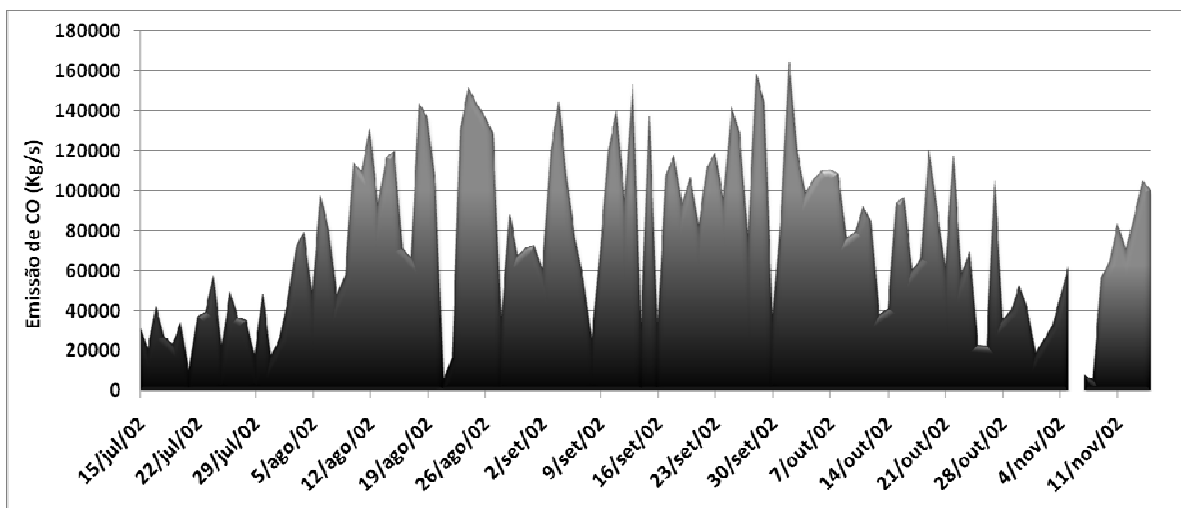


Fig. 6 - Emissão diária de  $PM_{2,5\mu m}$  (kg/s) para a América do Sul (15/julho/2002 a 15/novembro/2002).

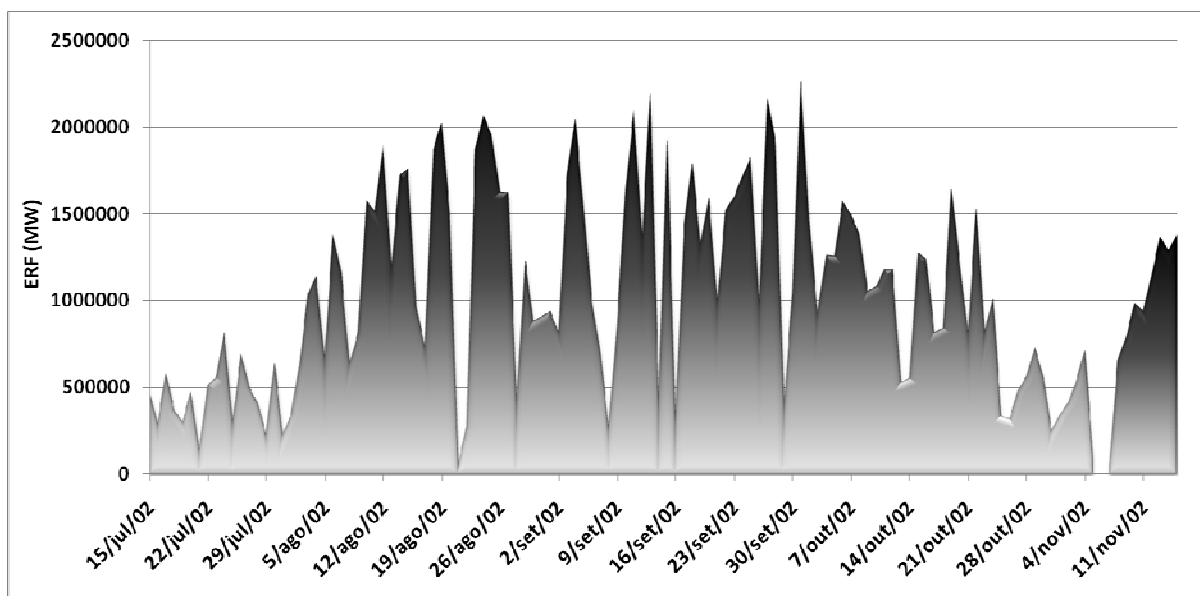


Fig. 7 - Emissão diária de CO (kg/s) para a América do Sul (15/julho/2002 a 15/novembro/2002).

## 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

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. 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 ambientais em tempo quase-real.

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

## 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.<sup>a</sup>, 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.
- 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.
- FINKELSTEIN, D. B. Thoughts on fires. **Palaios**, n. 19, p. 111-112, 2004.
- 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.
- 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.; DIAS, P. I. 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.
- 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.



- 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.
- GLASSPOOL, I. J.; EDWARDS, D.; AXE, L. Charcoal in the Silurian as evidence of the earliest wildfires, **Eology**, n. 32, p. 381-383, 2004.
- HAO, W. M.; LIU, M. H. Spatial and temporal distribution of tropical biomass burning. **Global Biogeochem. Cycles**, vol. 8, pp. 495-503, 1994.
- 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.
- 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.
- JORDAN, N. S.; ICHOKU, C.; HOFF, R. M. Estimating smoke emissions over the US Southern Great Plains using MODIS fire radiative power and aerosol observations. **Atmospheric Environment**, n. 42, p. 2007-2022, 2008.
- 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**, MA: MIT Press, p. 685-696, 1996.
- KAUFMAN, Y. J.; 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.
- KAUFMAN, Y. J.; JUSTICE, C. O.; FLYNN, L. P.; KENDALL, E. M. P.; GIGLIO, L.; WARD, D. E.; MENZEL, W. P.; SETZER, A. W. Potential global fire monitoring from EOS-MODIS, **Journal of Geophysical Research**, v. 103, n. 24, p. 32215-32238, 1998a.
- 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.
- 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](http://asd-www.larc.nasa.gov/biomass_burn/biomass.html). Acesso em 24/01/2007.
- 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.
- 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.
- SCOTT, A. C. The pre-Quaternary history of fire, **Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeocol.**, n. 164, p. 281-329, 2000.
- SETZER, A. W.; PEREIRA, M. C. P; ALMEIDA, S. O. Relatório de atividades do projeto IBDF-INPE "SEQUE"-Ano 1987. São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 1988. (INPE-4534-RPE/565).
- SETZER, A. W.; PEREIRA, M. C. P. Relatório do projeto SEQUE para 1988 – Sensoriamento Remoto das queimadas, **INPE**, Inter. Rep., in press, 1990.
- SILVA, A. S. da; SILVA, M. C. da. Prática de queimadas e as implicações sociais e ambientais na cidade de Araguaina-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.

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.

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.