

Derivação da taxa de emissão de fumaça através das medidas de energia radiativa do fogo do sensor MODIS/Terra: um estudo na Serra da Canastra

Gabriel Pereira¹
Saulo Ribeiro de Freitas²
Elisabete Caria Moraes¹
Nelson Jesus Ferreira¹

¹Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE
Caixa Postal 515 - 12245-970 - São José dos Campos - SP, Brasil.
{gabriel, bete, nelson}@itid.inpe.br

²Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE
Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos
Rodovia Presidente Dutra Km. 40 - 12630-000 - Cachoeira Paulista, SP, Brasil.
sfreitas@cptec.inpe.br

Abstract. The main objective of this work is to analyze the method proposed by Ichoku and Kaufman (2005) to obtain the smoke aerosol emission rates derived by fire radiative energy based smoke emission coefficient (C_c) with the smoke emission rates derived by the aerosol optical thickness. The images from Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) on Terra and Aqua platforms, Thematic Mapper (TM) on Landsat 5 satellite and CDD on China-Brazil Earth Resources Satellite (CBERS) satellite were used in this study. The results demonstrate a good approach of the data gotten by the calculus of smoke aerosol emission and the esteem smoke aerosol emission by fire radiative energy based smoke emission coefficient gotten due $3.96\mu\text{m}$ band 21 in MODIS. The greenhouse gases emission due to biomass burning were estimating in 9.1×10^{-7} kg/m²s of CO, 2.4×10^{-5} kg/m²s of CO₂ and 7.1×10^{-8} kg/m²s of Particulate Matter (PM).

Palavras-chave: Fire radiative energy, greenhouse gases emission, biomass burning, energia radiativa do fogo, emissão de gases do efeito estufa, queimadas.

1. Introdução

Anualmente as queimadas devastam grandes porções territoriais de florestas, campos e regiões agrícolas, consumindo uma grande quantidade de biomassa e liberando enormes quantidades de gases do efeito estufa. Estes fatores influenciam diretamente o clima e o meio ambiente, onde os principais fatores modificadores incluem os impactos da energia liberada pelo fogo, os gases traços emitidos para a atmosfera, alteração do albedo (Ichoku e Kaufman, 2005), assim como modificações no balanço radiativo da atmosfera e no ciclo hidrológico causadas pelos aerossóis (Andreae et al., 2004).

O impacto das queimadas nos ciclos biogeoquímicos e na biodiversidade, constitui-se numa grande preocupação mundial, estudos indicam que a ocorrência de grandes incêndios irá aumentar significativamente nas próximas décadas (IPCC, 2001). Esta problemática produz a busca de metodologias coerentes que visem estimar a quantidade de aerossóis e gases emitidos para a atmosfera, sem a necessidade de calcular a quantidade de biomassa queimada (Kaufman et al., 1998).

Os modelos atuais de estimativas de emissão de gases utilizam contadores de pixels de fogo, que podem variar em algumas ordens de grandeza para cada pixel. A metodologia proposta por Ichoku e Kaufman (2005) utiliza as medidas de energia radiativa do fogo, obtidas através de conversões matemáticas aplicadas à banda 21 ($3.96\mu\text{m}$) do sensor MODIS/Terra. Esta nova técnica demonstra um grande potencial para a aplicação em modelos ambientais, como o CATT-BRAMS (*Coupled Aerosol and Tracer Transport Model to the*

Brazilian developments on the Regional Atmospheric Modeling System), que tem suas saídas estimativas de emissões de queimadas disponibilizadas pelo Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (CPTEC/INPE, www.cptec.inpe.br/meio_ambiente).

Segundo Freitas et al. (2005) o começo e manutenção das queimadas dependem principalmente do tipo de biomassa, da localização geográfica, da temperatura do ar, da precipitação, da umidade e dos ventos. Ainda, estes conjuntos de fatores permitem 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 consumo de grandes quantidades de biomassa pelo fogo, fumaças e materiais particulados são emitidos para a atmosfera. Estima-se que 3.1×10^9 toneladas de carbono, presentes na vegetação, sejam expostos a queima, na qual 1.1×10^9 toneladas são emitidos para a atmosfera (Fearnside, 2000). Com isso, inúmeros estudos foram realizados por Badarinath et al. (2004), Hao et al. (2005) e Tripathi et al. (2005) para a caracterização dos aerossóis provenientes da queima de biomassa e a validação dos produtos de satélites que extraem a espessura óptica da atmosfera. Os resultados demonstraram-se satisfatórios permitindo, assim, o uso destes produtos no auxílio para o cálculo de emissões de gases.

Neste trabalho, pretende-se realizar um estudo preliminar da metodologia proposta por Ichoku e Kaufman (2005), para a região da Serra da Canastra pertencente ao Estado de Minas Gerais. Deve-se calcular a quantidade de gases emitidos para a atmosfera, derivando estes valores através da relação entre a taxa de emissão de fumaça e os valores de energia radiativa do fogo, extraídos através das informações obtidas pelo sensor MODIS/Terra.

2. Caracterização da Área de Estudo

A área de estudo localiza-se no Parque Nacional da Serra da Canastra, no município de São Roque de Minas, Minas Gerais (MG). O incêndio iniciou-se no dia 12 de setembro de 2006, e ainda no dia 14 do mesmo mês, havia 31 focos de incêndio (IBAMA) e uma área queimada de aproximadamente 19750 hectares, como mostra a **Figura 1**.

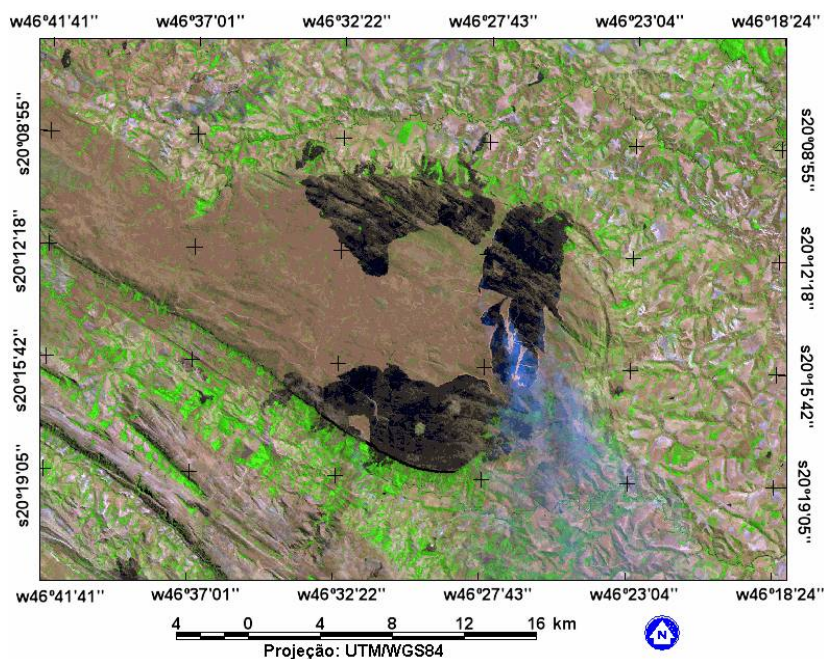


Figura 1 – Área de Estudo no Parque Nacional da Serra da Canastra (MG), imagem TM/Landsat 5 3B, 4G, 5R do dia 14.09.2006.

O parque possui uma área de aproximadamente 200 mil hectares, sendo composto principalmente por vegetação de Cerrado. Este bioma é caracterizado por formações vegetais que apresentam uma grande diversidade de espécies, variando desde campos limpos a florestas densas. Segundo MCE (2002) a vegetação de cerrado, dividida em campos (campos limpos e sujos), cerrado *stricto sensu* e cerradão, possuem densidade de biomassa de aproximadamente 7.2, 9.4 e 7.6 toneladas por hectares (t/ha), com uma eficiência de queima de 95%, 89% e 80%, respectivamente.

3. Materiais e Métodos

Para o cálculo da taxa de emissão de fumaça utilizaram-se os produtos temperatura da superfície (MOD11) e anomalia térmica/fogo (MOD14), nas datas 12/09/2006 a 16/09/2006. As imagens do TM/Landsat 5 e CCD/CBERS 2, de 14 de setembro de 2006 e 15 de setembro de 2006, respectivamente, foram utilizadas para a delimitação e cálculo da área queimada.

Para a extração dos valores de espessura óptica da camada em 550 nm (AOT_{550nm}), utilizaram-se os produtos de atmosfera MOD04 do sensor MODIS das plataformas Terra e Aqua. Estes valores foram obtidos através do programa *Hdf look for linux* e inseridos no cálculo da taxa de emissão de fumaça. Para o cálculo das componentes meridionais e zonais do vento utilizou-se os dados da reanálise do *National Centers for Environmental Prediction / National Center for Atmospheric Research* (NCEP/NCAR Reanalysis) em formato *network Common Data Form* (NetCDF), visualizados através do *Grid Analysis and Display System* (GRADS).

A metodologia para se derivar a taxa de emissão de fumaça proposta por Ichoku e Kaufman (2005), consiste em estimar, através da banda 21 do MODIS (1), a energia radiativa do fogo, empregando-a para calcular o total de aerossóis emitidos na queima (Kaufman et al., 1998).

$$R_{fre} = (4.34 \times 10^{-19}) * (T_{3.96\mu m}^8 - Tb_{3.96\mu m}^8) \quad (1)$$

Onde R_{fre} representa a energia radiativa do fogo no pixel (em megawatts); $T_{3.96\mu m}$ e $Tb_{3.96\mu m}$ correspondem à temperatura de brilho do pixel e do *background* em $3.96\mu m$, respectivamente.

Devido às características de tecnologia de aquisição, a matriz de dados bruta adquirida por um sensor orbital possui distorções nas dimensões dos elementos que constituirão a futura imagem. Essas distorções variam do centro à borda da matriz, sendo que os elementos mais próximos da borda matricial são resultantes da integração de radiância sobre uma área maior do terreno, se comparados às áreas dos elementos mais centralizados, próximos ao NADIR. No caso do produto MODIS AOT_{550nm} , essa matriz de dados brutos é reamostrada em dimensões homogêneas por um algoritmo especializado, construindo uma imagem formada por pixels de 10×10 km. Assim, a área real (A^{real}) de cada pixel pode ser calculada pela multiplicação de ΔS por ΔT (Ichoku e Kaufman, 2005).

$$\Delta S = R_e * S * \left(\frac{\cos \theta}{((R_e / r)^2 - \sin^2 \theta)^{1/2}} - 1 \right) \quad (2)$$

$$\Delta T = r * S * (\cos \theta - ((R_e / r)^2 - \sin^2 \theta)^{1/2}) \quad (3)$$

$$\theta_i = -\frac{1}{2}N * S + \frac{1}{2}S + (i - 1) * S \quad (4)$$

Onde R_e é igual ao radio da Terra (6378.137 km); h a altitude do sensor (750 km), r é a soma de $R_e + h$; $S = p/h$, onde 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 de pixels de cada linha na passagem do satélite.

O próximo passo é o calculo da densidade de aerossol da coluna (M_d), obtém-se este valor através da densidade de massa da fumaça (τ_{a550nm}), onde, para cada pixel contendo áreas queimadas, o valor de AOT_{550m} é extraído para o pixel central e para os 8 vizinhos mais próximos. Assim, o valor mínimo de AOT^b_{550nm} é assumido como o valor de *background* e o valor máximo estimado é denominado como AOT^f_{550nm} proveniente da queimada. Esse procedimento é necessário para se eliminar casos onde uma queimada na borda de um pixel tenha sua emissão representada no pixel adjacente (Ichoku e Kaufman, 2005).

Portanto, para Chi et al. (2002), as relações entre a densidade de massa da fumaça emitida na queima da biomassa e a eficiência mássica de extinção (β_e), composta pela soma dos coeficientes mássicos de absorção (β_a) e espalhamento (β_s), representa a M_d em m^2/gr (5).

$$M_d = (AOT^f_{550nm} - AOT^b_{550nm}) / (\beta_a + \beta_s) \quad (5)$$

Segundo Kaufman et al. (1998) dependendo do tamanho da queimada e da sua intensidade, a emissão dos materiais pode alcançar altitudes que variam de metros a quilômetros. Dada à resolução espacial nominal do produto MOD11 (1x1 km), estima-se que a injeção de gases seja de no mínimo 500 metros. Para este estudo foi adotada a altura média global de 1500 metros. Assim, para o cálculo do tempo (T_p) necessário para limpar os gases emitidos do pixel (6), utilizou-se as componentes meridionais (u) e zonais (v) do vento em 850 milibares (mb).

$$T_p = \left(\frac{\sqrt{\Delta S * \Delta T}}{\sqrt{u^2 + v^2}} \right) \quad (6)$$

Com essas informações pode-se, finalmente, obter a taxa de emissão de fumaça por unidade de tempo (R_{sa}) em quilogramas por segundo (kg/s). A R_{sa} é obtida através do somatório das variáveis calculadas anteriormente, onde N_{af} representa o total de pixels de aerossol que contém áreas que estão sendo queimadas e N_{aa} são os pixels que possuem informações sobre a camada de espessura óptica desta área, como descrito na fórmula (7).

$$R_{sa} = \frac{\left\{ \left[\left(\sum_{i=1}^{N_{aa}} (M_d)_i \right) / N_{aa} \right] * \left[\sum_{i=1}^{N_{af}} (\Delta S * \Delta T)_i \right] \right\}}{\left[\sum_{i=1}^{N_{aa}} (T_p)_i / N_{aa} \right]} \quad (7)$$

A metodologia acima descrita foi empregada por Ichoku e Kaufman (2005) para os dados do MODIS de 2002 em diferentes regiões do globo. Esta análise permitiu a derivação, através da correlação entre a R_{sa} e R_{fre} , do coeficiente de emissão de fumaça baseado na energia radiativa do fogo (C_e) em quilogramas por megajoule (kg/MJ). Este novo coeficiente é um excelente parâmetro para o cálculo de emissões de gases do efeito estufa através do

sensoriamento remoto, permitindo a obtenção dos dados de emissão quase que em tempo real. Para a América do Sul foram propostos três coeficientes, separados principalmente de acordo com o tipo de vegetação predominante: Região de Cerrado (0.048), Região de Floresta Tropical (0.063) e Região da América do Sul abaixo de 20° (0.061). Pode-se, então, obter os valores de R_{sa} através da seguinte fórmula:

$$R_{sa} = \left(\sum_{i=1}^n R_{fre} \right) * C_e \quad (8)$$

Para o cálculo total das emissões de CO₂, CO em função do Material Particulado (PM) utilizaram-se os fatores de emissão dados por Andreae e Merlet (2001). Deste modo, através dos coeficientes de conversão de cada gás, pode-se estimar a quantidade de gases emitidos para a atmosfera em decorrência da queimada no Parque Nacional da Serra da Canastra (MG).

4. Resultados e Discussão

Foram encontrados aproximadamente 46 pixels com focos de queimada na Serra da Canastra entre os dias 12/09/2006 e 18/09/2006, destes pixels obteve-se a energia radiativa do fogo (**Figura 2**). Para a extração dos pixels assinalados como áreas queimadas, os dados provenientes dos produtos MOD14 e MOD11 das plataformas Terra e Aqua foram submetidos a uma inspeção, a fim de detectar focos que poderiam representar possíveis erros de inclusão, ao final deste processo alguns valores foram descartados, principalmente por representar solo exposto. Após a análise dos dados foram detectados 6 focos no dia 12/09/2006; 20 focos no dia 13/09/2006; 11 focos no dia 14/09/2006; apenas 1 foco¹ no dia 15/09/2006 e 7 focos no dia 16/09/2006.

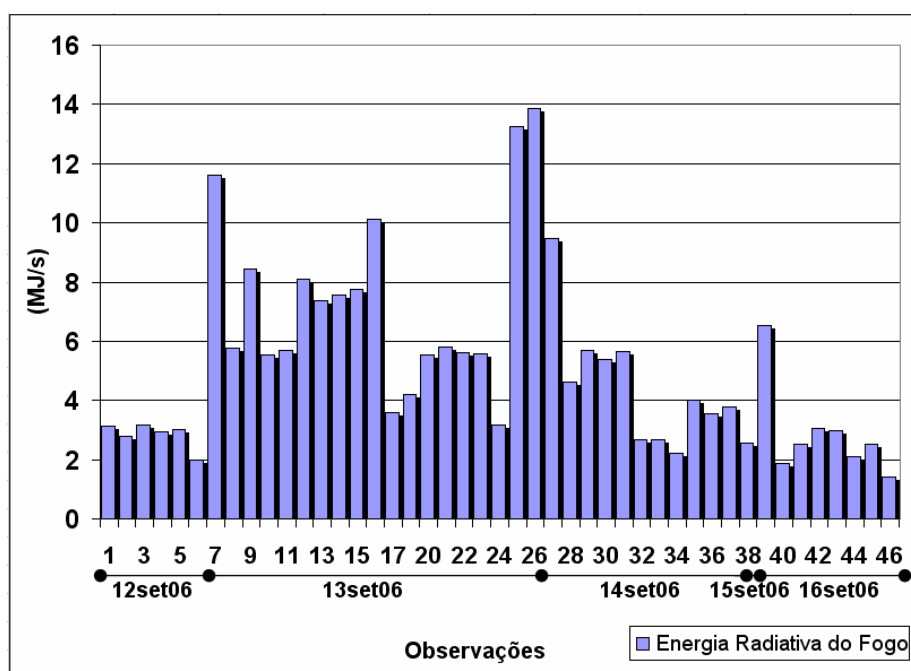


Figura 2 – Energia Radiativa do Fogo (FRE) das observações feitas a partir do dia 12/09/2006 até 18/09/2006.

¹ No dia 15 de setembro de 2006, para a região da Serra da Canastra, o produto MOD11 possuía pouquíssimas informações, porém, o produto MOD14 indicava a presença de pixels com anomalia térmica, possivelmente caracterizando a continuação da queimada ocorrida naquela região.

Observa-se que os dias 13 e 14 de setembro de 2006 apresentaram os maiores valores de liberação de energia radiativa do fogo, com valores de até 13.85 MJ/s. Nestes dias a temperatura da área em combustão chegava a aproximadamente 50°C, enquanto que a temperatura de *background* variava entre 30 e 33°C. Já nos dias 15 e 16 de setembro de 2006 estes valores diminuíram, possivelmente devido à diminuição na intensidade da queimada e na redução da área em combustão, assim, pelas características de imageamento e da heterogeneidade do pixel, o valor de temperatura pode ter seus valores diminuídos pela integração do sinal.

Os valores de R_{sa} e R_{sa} estimada obtidos através das fórmulas 7 e 8 demonstram que o método proposto por Ichoku e Kaufman (2005) apresenta boas aproximações do valor da taxa de emissão de fumaça. Além disso, o emprego do coeficiente C_e permite o cálculo da emissão dos gases do efeito estufa liberados na queimada, mesmo que os dados de espessura óptica da camada em 550 nm não estejam disponíveis para a região de estudo.

O valor total calculado de R_{sa} para os dias 12, 13, 15, 16 de setembro de 2006 foi de 10.75 kg/s, não foi possível obter os valores de AOT_{550nm} para o dia o dia 14 de setembro de 2006 impedindo o cálculo da variável. O valor total estimado de R_{sa} através da fórmula proposta por Ichoku e Kaufman (2005) para o mesmo período foi de 11.80 kg/s, muito semelhante ao calculado. Assim, aplicando a metodologia para o dia em que não havia informações suficientes para o cálculo de R_{sa} , obtém-se o valor total de 13.95 kg/s.

A **Figura 3** mostra os valores de R_{sa} estimados para todos os dias estudados. As maiores emissões de fumaça ocorreram nos dias 13 e 14 de setembro, com valores que chegam a aproximadamente 0.67 kg/s. O gráfico representa o total de fumaça que está sendo emitido pela queimada num determinado pixel. Assim, os 6 focos de queimada no dia 12, 13, 14, 15 e 16 de setembro de 2006 emitiram para a atmosfera, respectivamente, 0.82 kg/s, 7.10 kg/s, 2.05 kg/s, 3.13 kg/s e 0.80 kg/s.

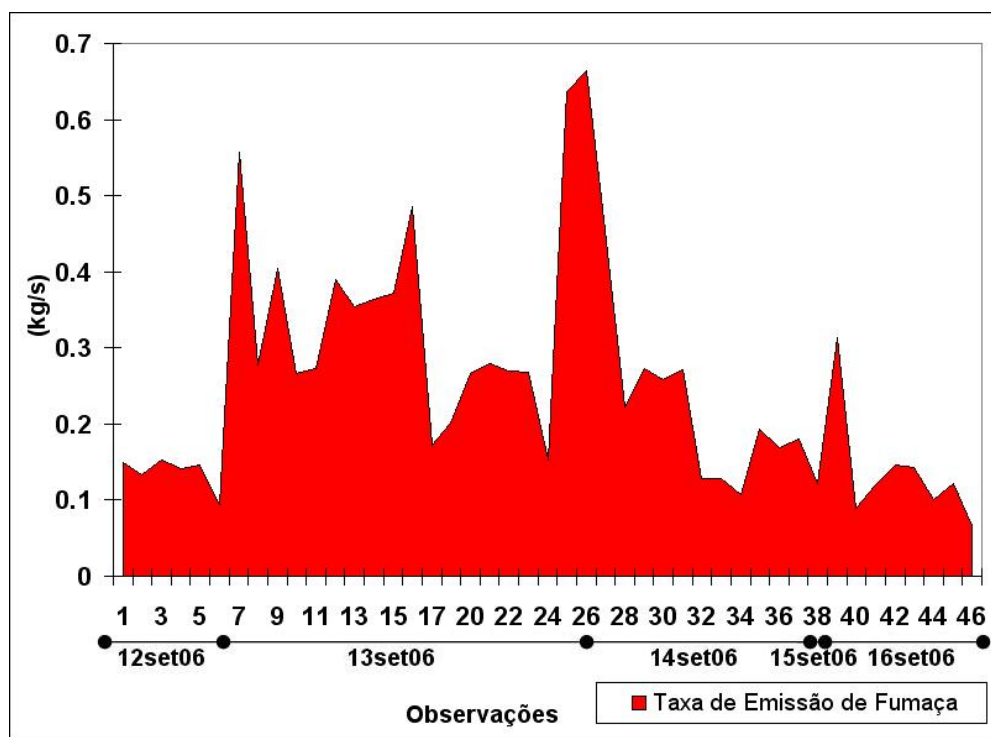


Figura 3 – Taxa de Emissão de Fumaça (R_{sa}) entre os dias 12/09/2006 e 18/09/2006, para a região da Serra da Canastra.

Com as estimativas da área queimada (19750 ha) e da emissão de fumaça para o Parque Nacional da Serra da Canastra, pode-se calcular o total de CO₂, CO e outros gases emitidos para a atmosfera através dos fatores de emissão compilados por Andreae e Merlet (2001), como mostra a **Tabela 1**.

Tabela 1 – Total de CO₂, CO e Material Particulado emitido para a atmosfera.

Área Queimada (m ²)	Taxa de emissão total de MP (kg/m ² .s)	Fator de Emissão (g[espécie]/kg[biomassa queimada])		Emissão (kg/m ² . s)
1.975x10 ⁸	7.1x10 ⁻⁸	CO ₂	1664	2.40x10 ⁻⁵
		CO	63	9.1x10 ⁻⁷
		MP	4.9	7.1x10 ⁻⁸

5. Considerações Finais

O método proposto por Ichoku e Kaufman (2005) se mostrou muito eficiente na estimativa da emissão de fumaça através da energia radiativa do fogo, obtida através dos dados do sensor MODIS de ambas as plataformas Terra e Aqua. A estimativa desta variável através de imagens de satélite é de fundamental importância para a modelagem do tempo e clima, e pode alimentar modelos como o Catt-Brams, rodado diariamente pelo CPTEC/INPE.

A quantização das emissões dos gases do efeito estufa provenientes da queimada é necessária para inventários anuais. No Brasil as queimadas estão vinculadas essencialmente às atividades agropecuárias, apresentando grande variabilidade temporal e espacial. Estes gases afetam consideravelmente o clima mundial, inferindo modificações no ciclo hidrológico, biogeoquímico, contribuindo, assim, para a modificação do clima local, regional e global (Freitas et al., 2005).

As estimativas da taxa de emissão de fumaça apresentam, segundo os autores, superestimações de até 50%. Entre as principais causas estão as incertezas que cercam o Sensoriamento Remoto e os parâmetros utilizados, como por exemplo, os coeficientes mássicos de absorção e espalhamento. Porém, as incertezas e superestimações obtidas são comparáveis às incertezas dos métodos tradicionais de cálculo de emissão dos gases. Assim, esta metodologia, através de melhorias nas parametrizações, demonstra grande aplicabilidade na modelagem dos gases emitidos e alimentação de modelos.

Agradecimentos

Nós agradecemos ao Dr. Yosio Edemir Shimabukuro pela colaboração e ajuda prestada.

Referências

- Andreae, M. O., P. Merlet, Emission of trace gases and aerosols from biomass burning, *Global Biogeochem. Cycles*, 15(4), 955-966, 10.1029/2000GB001382, 2001. Andreae, M., Rosenfeld, D., Artaxo, P., Costa, A., Frank, G., Longo, K. M., and Silva Dias, M A. F.: Smoking rain clouds over the Amazon, *Science*, 303, 1342-1345, 2004.
- Badarinath, K. V. S.; Latha, K. M., Chand, T.R. K.; Gupta, P. K.; Ghosh, 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.; Singh, G.. Characterization of aerosols from biomass burning – a case study from Mizoram (Northeast), India. *Chemosphere*, v. 54, p. 167-175, 2004.
- Chin, M.; Ginoux, P.; Kinne, S.; Torres, O.; Holben, B. N.; Duncan, B. N.; Martin, R. V.; Logan, J. A.; Higurashi, A; Nakajima, T. Tropospheric aerosol optical thickness from GOCART model and comparisons with satellite and sun photometer measurements. *J. Atmos. Sci.*, v. 59, p. 461-483, 2002.

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.; 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.

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.

IBAMA. **Instituto Brasileiro de Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis**. Disponível em: <<http://www.ibama.gov.br/>>. Acesso em 28/10/2006.

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.

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, **Cambridge Univ. Press**: New York, 2001.

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, 1998.

MCE. First Brazilian Inventory of anthropogenic greenhouse gas emissions background reports. **Ministry of Science and Technology**, 2002. Disponível em: <http://ftp.mct.gov.br/Clima/comunic_old/pdf/queimac_i.pdf>. Acesso em 01/09/2006.

NCEP/NCAR Reanalysis. **National Centers for Environmental Prediction / National Center for Atmospheric Research**. Disponível em: <<http://www.cdc.noaa.gov/cdc/reanalysis/reanalysis.shtml>>. Acesso em 15/10/2006.

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.