

Análise da Energia Radiativa do Fogo para o Pantanal

Gabriel Pereira ^{1,2}

Egídio Arai ¹

Francielle da Silva Cardozo ¹

Elisabete Caria Moraes ¹

Yosio Edemir Shimabukuro ¹

Saulo Ribeiro de Freitas ¹

¹Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE
Av. dos Astronautas, 1758 - Caixa Postal 515
12201-970 - São José dos Campos, SP, Brasil
{gabriel, egidio, cardozo, bete, yosio}@dsr.inpe.br; saulo.freitas@cptec.inpe.br

² Universidade de São Paulo – USP
Av. Prof. Lineu Prestes, 159 - Caixa Postal 26097
05513-970 - São Paulo, SP - Brasil
gabrielpereira@usp.br

Resumo: As queimadas naturais e antropogênicas podem ser consideradas como uma fonte expressiva de materiais particulados e gases traços para a atmosfera, possuindo destaque devido ao seu papel no forçamento radiativo global, ou seja, na alteração do balanço de energia do planeta. Desta forma, para avaliar o papel da queima de biomassa em diferentes escalas de atuação, é imprescindível estimar, espacialmente e temporalmente, a emissão de gases traços e aerossóis. Neste contexto, o presente trabalho tem como objetivo principal analisar a distribuição espacial da energia radiativa do fogo para o Bioma Pantanal a partir dos dados do satélite *Geostationary Operational Environmental Satellite* (GOES) e verificar as emissões de CO e material particulado com diâmetro menor que $2,5\mu\text{m}$ (PM₂₅) estimados pelo modelo de emissão *Brazilian Biomass Burning Emission Model* (3BEM) e modelados no CATT-BRAMS. Os resultados mostram que os valores de FRE, que estão intrinsicamente relacionados com o consumo de biomassa e com a emissão de gases traços e aerossóis carbonáceos, apresentaram uma alta variabilidade para o período de 1997 a 2011, apresentando os anos de 1999, 2001, 2002, 2005, 2007 e 2009 valores elevados de FRE, os quais superaram $0,25 \text{ MJ.m}^{-2}$, sugerindo que a energia liberada em uma área de $4 \times 10^8 \text{ m}^2$ equivale a aproximadamente 0,1 PJ. Entre os principais fatores que contribuem para esta variação, pode-se citar a distribuição mensal da precipitação, indicando que se ocorrer uma anomalia negativa na precipitação nos meses secos, a incidência de focos de queimada no Pantanal aumentará influenciando no total de energia liberada.

Palavras-chaves: energia radiativa do fogo, sensoriamento remoto, queimadas, Pantanal.

Abstract: The natural and anthropogenic fires may be considered as a major source of particulate matter and trace gases into the atmosphere, being fundamental due to its role in global radiative forcing, or, the change in the energy balance of the planet. Thus, to evaluate the role of biomass burning in different scales of action, it is essential to estimate the emission of trace gases and aerosols spatially and temporally. In this context, the objective of this paper is to analyze the spatial distribution of radiative energy fire for the Pantanal biome from the *Geostationary Operational Environmental Satellite* (GOES) satellite data and verify the emissions of CO and particulate matter with diameter less than 2.5µm (PM25) estimated by the *Brazilian Biomass Burning Emission Model* (3BEM) and modeled in CATT-BRAMS. The results show that the values of FRE, which are linked with the consumption of biomass and the emission of trace gases and carbonaceous aerosols, showed a high variability for the period 1997 to 2011, presenting high values for the years 1999, 2001, 2002, 2005, 2007 and 2009, which exceeded 0.25 MJ.m⁻², suggesting that the energy released in an area of 4x10⁸ m² is equivalent to approximately 0.1 PJ. Among the main factors that contribute to this variation, we can mention the monthly distribution of precipitation, indicating that anomalies in dry season occurs, the incidence of biomass burning in the Pantanal will increase influencing the total energy released and consequently the amount of emissions into atmosphere.

Key Words: fire radiative energy, remote sensing, biomass burning, Pantanal.

1. Introdução

As queimadas naturais e antropogênicas podem ser consideradas como uma fonte expressiva de materiais particulados e gases traços. Estas possuem destaque na comunidade científica devido ao seu papel no forçamento radiativo global, ou seja, na alteração do balanço de energia do planeta. De um modo geral, a queima completa de fisionomias vegetais ocasiona a emissão para a atmosfera de vapor d'água (H₂O) e dióxido de carbono (CO₂), de acordo com a reação a seguir (Levine, 1994):



em que CH₂O representa a composição média da biomassa vegetal. Entretanto, para que ocorra a combustão completa é necessário temperaturas elevadas, o que é dificilmente atingida. Desta forma, é comum encontrar outras espécies de gases formados pelas moléculas de carbono como, por exemplo, o monóxido de carbono (CO), o metano (CH₄) e partículas suspensas de carbono (C), além de hidrocarbonetos não metanos (NMHC). Além destes gases, no processo de combustão pode-se produzir o monóxido de nitrogênio (NO), o dióxido de nitrogênio (NO₂), o cloreto de metil (CH₃Cl), o dióxido de enxofre (SO₂), entre outras espécies (Burling et al., 2010).

Na última década, o surgimento de novos satélites ambientais com alta repetitividade na aquisição de informações, proporcionou uma melhor cobertura espacial e temporal dos processos terrestres. Entretanto, grande parte dos estudos relacionados às queimadas utilizam dados de satélites com órbita polar que possuem restrições quanto à natureza do fenômeno analisado, que possui um ciclo diurno bem definido, e quanto à frequência de observações, indicando apenas uma pequena amostragem temporal destes focos. Desta forma, para avaliar o papel da queima de biomassa em diferentes escalas de atuação, é imprescindível estimar, espacialmente e temporalmente, a emissão de gases traços e aerossóis.

Embora os esforços para quantificar as emissões provenientes da queima de biomassa tenham aumentado consideravelmente nas últimas décadas, as incertezas nos dados de entrada e as distintas metodologias utilizadas ocasionam erros de até 50% nos valores estimados, Vermote et al. (2009). Entre as principais fontes de distorções podem-se citar

os erros nas estimativas de umidade do solo e no conteúdo de água no interior da planta, a área total queimada, os fatores de emissão para cada espécie e a generalização de diversos fatores para grandes áreas. Neste contexto, Kaufman et al. (1996), nos experimentos SCAR-C e SCAR-B (*Smoke, Cloud and Radiation, Califórnia/Brazil*, respectivamente), realizaram os primeiros estudos relacionando as queimadas, os produtos orbitais e a energia desprendida no processo de combustão.

A taxa na qual a energia, na forma de radiação eletromagnética, é emitida pelo fogo, ou a potência radiativa do fogo (do inglês *Fire Radiative Power*, FRP) liberada no processo de combustão, constitui-se em um indicador da quantidade de biomassa consumida ou mesmo da taxa de emissão de aerossóis e gases traços liberados para a atmosfera. Ainda, a integração temporal da FRP é denominada energia radiativa do fogo (do inglês *Fire Radiative Energy*, FRE). Consequentemente, ao se determinar a distribuição da temperatura no interior de um determinado *pixel*, pode-se calcular a FRP, integrada em todos os comprimentos de onda, pela equação 2:

$$FRP = \varepsilon \sigma \sum_{i=1}^n A_n T_n^4 \quad (2)$$

em que FRP representa a potência radiativa do fogo ($J.s^{-1}$), σ é a constante de Stefan-Boltzmann ($5,67 \times 10^{-8} J.s^{-1}.m^{-2}.K^{-4}$), A_n representa a área fracional (m^2) da enésima componente termal, T_n^4 é a temperatura (K) da enésima componente e ε representa a emissividade.

2. Objetivos

O presente trabalho tem como objetivo principal analisar a distribuição espacial da energia radiativa do fogo para o Bioma Pantanal a partir dos dados do satélite *Geostationary Operational Environmental Satellite* (GOES) e verificar as emissões de CO e material particulado com diâmetro menor que $2,5\mu m$ (PM25) estimados pelo modelo de emissão *Brazilian Biomass Burning Emission Model* (3BEM) e modelados no CATT-BRAMS Freitas et al. (2009).

3. Materiais e Métodos

3.1 Área de Estudo

A área de estudo deste trabalho compreende o Pantanal brasileiro (**Figura 1**), e localiza-se na região Centro-Oeste do Brasil abrangendo os Estados do Mato Grosso e Mato Grosso do Sul. Este Bioma caracteriza-se por apresentar uma das maiores planícies de sedimentação do globo sujeita a inundações anuais, que ocorrem nos meses chuvosos do verão, e de um período seco nos meses de inverno do Hemisfério Sul. A área de estudo localiza-se entre as coordenadas $59^{\circ}30'W$ e $22^{\circ}00'S$; e $55^{\circ}00'W$ e $15^{\circ}00'S$, com altitude média de 126 metros, porém, podem-se encontrar valores altimétricos de 24 metros na região sudoeste do bioma e superiores a 400 metros em suas extremidades, Pereira et al. (2010).

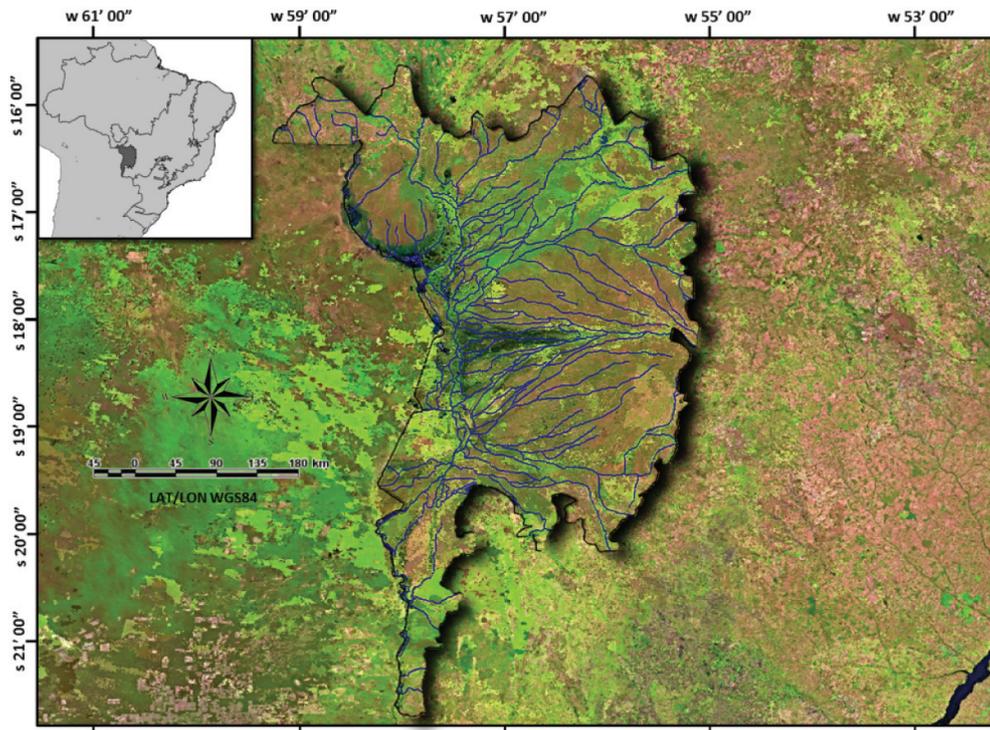


Figura 1. Localização da área de estudo, correspondente ao Bioma Pantanal, imagem do sensor Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) abordo do satélite TERRA, composição colorida 1B2G6R.

3.2 Focos de queimada do GOES

O sensor GOES *Imager* a bordo da constelação de satélites *Geostationary Operational Environmental Satellite* (GOES), cobre o espectro eletromagnético do visível até o infravermelho termal separados em 5 bandas. Atualmente a detecção dos focos de queimada utilizam as faixas espectrais centradas em 3,9 μm e 10,7 μm que possuem uma resolução espacial nominal de 2,3 km x 4,0 km, que varia de acordo com o ângulo de imageamento, que ocorre a cada 30 minutos, Xu et al. (2011). O *Wildfire Automated Biomass Burning Algorithm* (WFABBA) é um produto para detecção de anomalias termais baseado no satélite GOES. Os dados disponibilizados contém a hora da passagem do satélite, a longitude, a latitude, o ângulo de imageamento do satélite, o tamanho do *pixel*, a temperatura em 4 μm e 11 μm , a temperatura e a área do *subpixel* com fogo, a FRP, o tipo de ecossistema e a característica do *pixel* (saturado, com nuvem, alta confiabilidade, média confiabilidade e baixa confiabilidade). Desta forma, uma das vantagens do uso deste sensor é a alta frequência de observações, que permite a caracterização do ciclo de vida de um determinado foco. Porém, a principal desvantagem é que aproximadamente 5-10% dos focos detectados pelo sensor saturam, inviabilizando a estimativa de emissões por métodos diretos, Pereira et al. (2009).

3.3 Metodologia para a estimativa da energia radiativa do fogo

O produto WFABBA/GOES indica, junto com as coordenadas geográficas do *pixel* com anomalia termal, a característica do *pixel*. Consequentemente, é possível detectar se a extração da FRP foi realizada, se existiu uma saturação no sensor, ou mesmo se a

confiabilidade de determinado foco é alta, média ou baixa. Para integrar os dados da FRP provenientes do sensor GOES *Imager*/GOES, adotaram-se 7 etapas, como mostra o fluxograma da metodologia (**Figura 2**). A primeira etapa (I) consistiu na aquisição da base de dados do produto WFABBA/GOES para o período de 1997 a 2011, totalizando aproximadamente 821.000 observações para o Continente Americano, com resolução temporal de 2, 8, 15, 30 e 45 minutos.

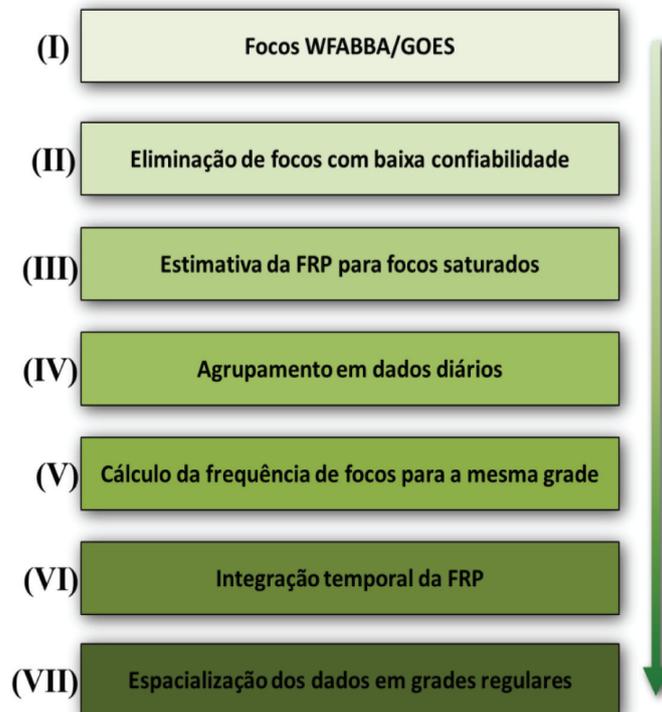


Figura 2. Fluxograma da metodologia.

Na segunda etapa (II), foram eliminados os focos de queimada e anomalias termais com baixa confiabilidade. Entretanto, ao invés de remover os *pixels* saturados, que ocorrem quando o tamanho e temperatura do fogo superam a sensibilidade do sensor em captar a radiação eletromagnética, e ocasionar uma perda de eventos importantes da queima de biomassa, utilizou-se uma alternativa para a estimativa da FRP baseada no método da radiância no infravermelho médio (MIR). Esta metodologia é fundamentada na premissa que a radiância espectral ($M\lambda$) emitida na banda centrada em $3,9 \mu\text{m}$ é linearmente proporcional a FRP emitida:

$$FRP_{MIR} = \frac{Ag}{a} \sigma \int_{3.76}^{4.03} M(\lambda, T) d\lambda - M_b$$

$$M(\lambda, T) = \frac{c_1}{\lambda^5 (\exp(\frac{c_2}{\lambda T}) - 1)}$$
(3)

em que Ag representa a área do *pixel* proveniente do imageamento do sensor GOES *Imager*/GOES; a é a constante baseada na resposta espectral na banda referente ao MIR; $M\lambda$ representa a emitância radiante espectral; c_1 e c_2 são constantes ($3,74 \times 10^8 \text{ W.m}$

² e $1,44 \times 10^4 \mu\text{m.K}$, respectivamente); λ é o comprimento de onda (μm); T representa a temperatura (Kelvin) e M_b é a emitância radiante para o *background*, integrada nos comprimentos de onda da banda utilizada (110 MW).

A partir da determinação da FRP para todos os focos detectados pelo WFABBA/GOES, estes foram agrupados em dados diários (Etapa IV). A quinta etapa (V) consistiu no cálculo da frequência de focos para uma grade regularmente espaçada de 20 km ($0,1785^\circ$). Nesta, todos os focos ocorridos no dia foram agrupados e a evolução temporal da FRP foi armazenada. Com base nos valores de FRP e seus respectivos horários de ocorrência para determinada localização espacial, a FRE foi calculada pela seguinte fórmula:

$$FRE_{x,y} = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n (FRP_n + FRP_{n+1}) \cdot \Delta T \quad (4)$$

em que $FRE_{x,y}$ representa a localização geográfica (latitude e longitude) de determinado ponto da grade regular; ΔT o intervalo entre as observações de FRP; e n representa a enésima observação. A partir da integração dos dados, a FRE foi calculada em função do tamanho da grade, assumindo que a distribuição espacial observada em parte da grade regular é representativa para a sua totalidade (etapa VII).

3.3 Simulações no CCATT-BRAMS

O modelo *Coupled Chemistry-Aerosol-Tracer Transport Model Coupled to Brazilian Regional Atmospheric Modeling System* (CCATT-BRAMS), desenvolvido para simular a circulação atmosférica em várias escalas, baseia-se no modelo numérico de previsão do tempo BRAMS (Freitas et al., 2009). Neste modelo, 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 PM25 é calculada, sob a forma de equação de tendência, expressa pela seguinte equação (Freitas et al., 2009):

$$\frac{\partial \bar{s}}{\partial t} = \underbrace{\left(\frac{\partial \bar{s}}{\partial t} \right)_{3\text{-d}}}_{\text{I}} + \underbrace{\left(\frac{\partial \bar{s}}{\partial t} \right)_{\text{D.L.P}}}_{\text{II}} + \underbrace{\left(\frac{\partial \bar{s}}{\partial t} \right)_{\text{conv. prof}}}_{\text{III}} + \underbrace{\left(\frac{\partial \bar{s}}{\partial t} \right)_{\text{conv. rasa}}}_{\text{IV}} + \underbrace{\left(\frac{\partial \bar{s}}{\partial t} \right)_{\text{CO}}}_{\text{V}} + \underbrace{W_{\text{PM}_{2.5}}}_{\text{VI}} + \underbrace{R}_{\text{VII}} + \underbrace{Q_{\text{plume rise}}}_{\text{VIII}} \quad (5)$$

em que \bar{s} representa a taxa média de mistura do aerossol ou gás traço para a grade do modelo; o termo I é o transporte 3-d (advecção pelo vento); o termo II é o transporte turbulento na camada limite planetária; os termos III e IV estão relacionados com o transporte associado com a convecção profunda e rasa, respectivamente; o termo V está relacionado com o tempo de vida do CO na atmosfera; o termo VI está associado com a remoção convectiva úmida para o material particulado com diâmetro menor que $2,5 \mu\text{m}$; o termo VII refere-se à remoção seca genérica e/ou transformações químicas que ocorrem na atmosfera; e o termo VIII é a fonte de emissão associada com o processo de queima de biomassa, que inclui o mecanismo de levantamento de plumas denominado *Plume-rise*, Freitas et al. (2009).

4. Resultados e Discussão

A **Figura 3** exibe a distribuição espacial da FRE (em MJ.m^{-2}) para o período entre 1997 e 2011. Os valores de FRE estão intrinsecamente relacionados com o consumo de biomassa e com a emissão de gases traços e aerossóis carbonáceos. Para o período de 15 anos, percebe-se uma alta variabilidade nos valores de FRE, com destaque para os anos

de: 1999, 2001, 2002, 2005 e 2007. Nestes, os valores anuais de FRE podem superar $0,25 \text{ MJ.m}^{-2}$, e como os dados estão integrados em grades de 20 km , pode-se dizer que a energia liberada em uma área de $4 \times 10^8 \text{ m}^2$ equivale a aproximadamente $0,1 \text{ PJ}$. Recentemente, estimou-se que a energia liberada anualmente pelas queimadas na América do Sul encontra-se na faixa entre 200 e 500 PJ , com valores para o Bioma Amazônico (que compreende áreas com grande quantidade de biomassa vegetal) próximos a 1 PJ por ponto de grade.

Na Figura abaixo, percebe-se uma acentuada dinâmica na distribuição e intensidade dos focos de queimada no Bioma Pantanal durante o período analisado. Porém, é comum encontrar anos com características semelhantes, como, por exemplo, 1998, 2000, 2003, 2006, 2008 e 2010, que apresentam valores baixos de FRE. Entre os principais fatores que contribuem para a variação na distribuição anual da FRE pode-se citar a distribuição mensal da precipitação no ano. Desta forma, se nos meses secos ocorrer uma anomalia negativa na precipitação, a incidência de focos de queimada no Pantanal aumentará influenciando no total de energia liberada.

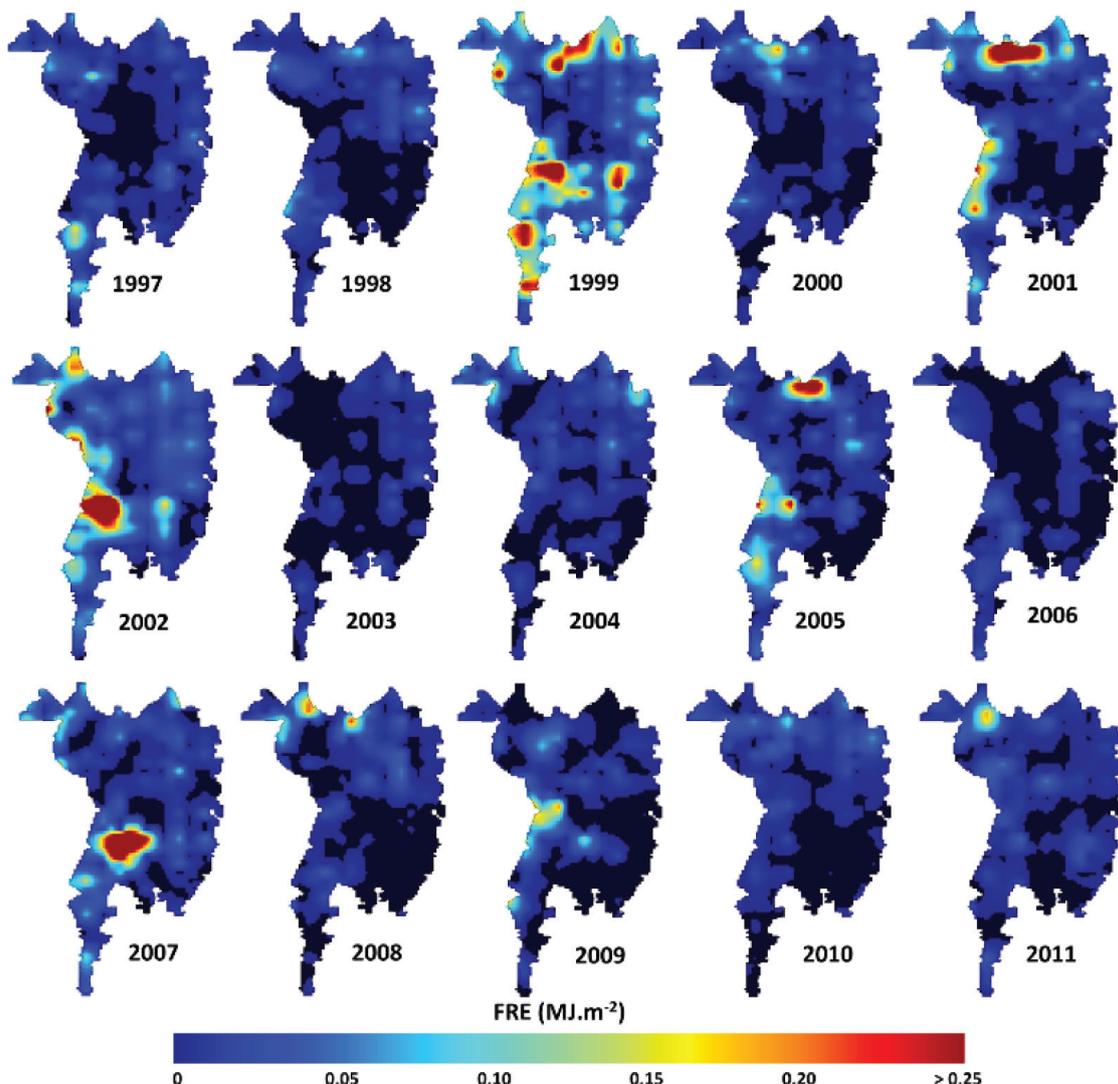


Figura 3. Distribuição espacial da FRE (em MJ.m^{-2}) no Bioma Pantanal para o período compreendido entre 1997 e 2011.

O total de FRE liberado pelas queimadas para o período de 1997 a 2011 pode ser visualizado na **Figura 4**. Entre as áreas que possuem os maiores valores de FRE destacam-se o município de Corumbá-MS, Porto Murtinho-MS, Cáceres-MT, Poconé-MS e Barão do Melgaço-MT. Nestes municípios, em 15 anos, as queimadas emitiram entre 3 e 7,5 MJ.m⁻². De um modo geral, as queimadas estão localizadas na porção Norte/Noroeste do Bioma e na porção Centro-Sul, com algumas áreas ao longo do leque do Rio Taquari. Entre os principais usos que compõem as áreas com grande incidência de queimadas, destacam-se: a) áreas de pecuária e agricultura nas regiões noroeste e norte do Bioma; b) regiões de formações pioneiras e savana estépica na porção centro-oeste; c) áreas de savana na porção central do Bioma; e d) áreas de pecuária/agricultura no extremo sul.

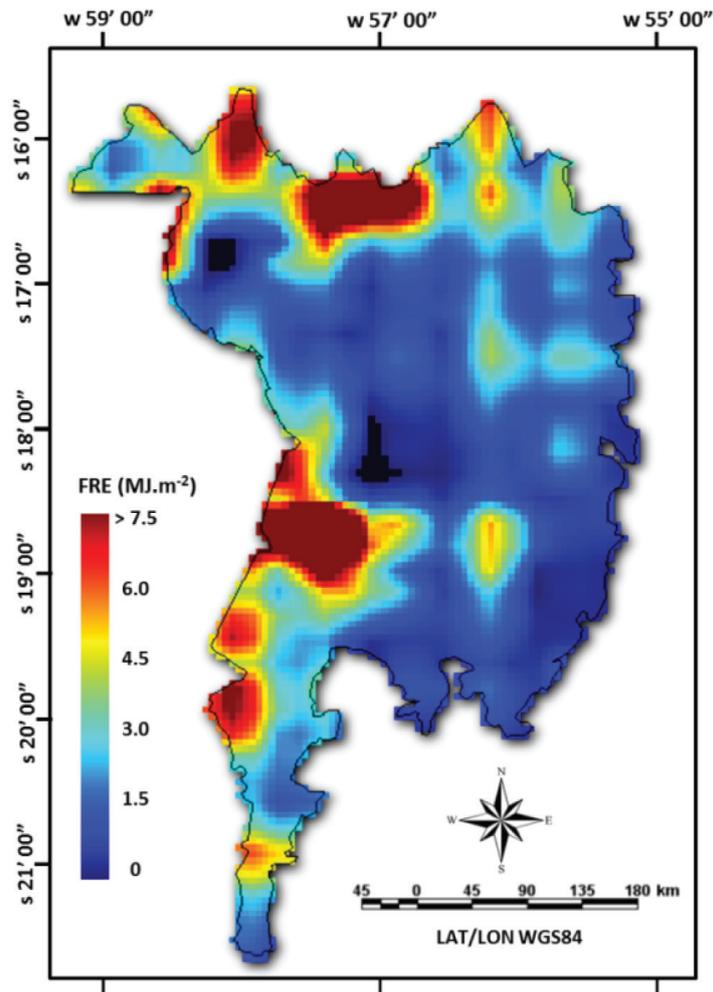


Figura 4. Total de FRE (em MJ.m⁻²) no Bioma Pantanal para o período de 1997 a 2011.

A **Figura 5** mostra um exemplo da integração temporal dos dados de FRP para duas queimadas ocorridas no ano de 2002. A **Figura 5a** mostra uma imagem do sensor *Enhanced Thematic Mapper Plus* (ETM+) do Landsat 7 para a data de 02/06/2002, anterior à queimada. A **Figura 5b** mostra a imagem do sensor ETM+/Landsat 7 para a data de 27/08/2002, em que é possível visualizar as cicatrizes de queimada em tons de roxo/preto. Após a análise da série temporal de focos de queimada, constatou-se que a mesma ocorreu em 23/08/2002. Nas **Figuras 5c** e **5d**, é possível verificar a evolução temporal do ponto 1 (P1) e do ponto 2 (p2), nos gráficos, o eixo y representa a FRP (MJ.s⁻¹) e o eixo x a hora e minutos (hh:mm) no horário UTC (-3h). Percebe-se que embora as queimadas

ocorram em regiões próximas, estas apresentam ciclos distintos. A queimada no P1 teve início por volta das 15:15 (ou 12:15 hora local – LT), com valores de FRP próximos a 200 MJ.s⁻¹, a mesma alcança seu ápice por volta das 16:45 UTC, com aproximadamente 700 MJ.s⁻¹, a partir desta hora, a intensidade do fogo decai gradativamente, sendo que a última informação coletada pelo sensor GOES *Imager*/GOES ocorre as 21:15 UTC (18:15 LT).

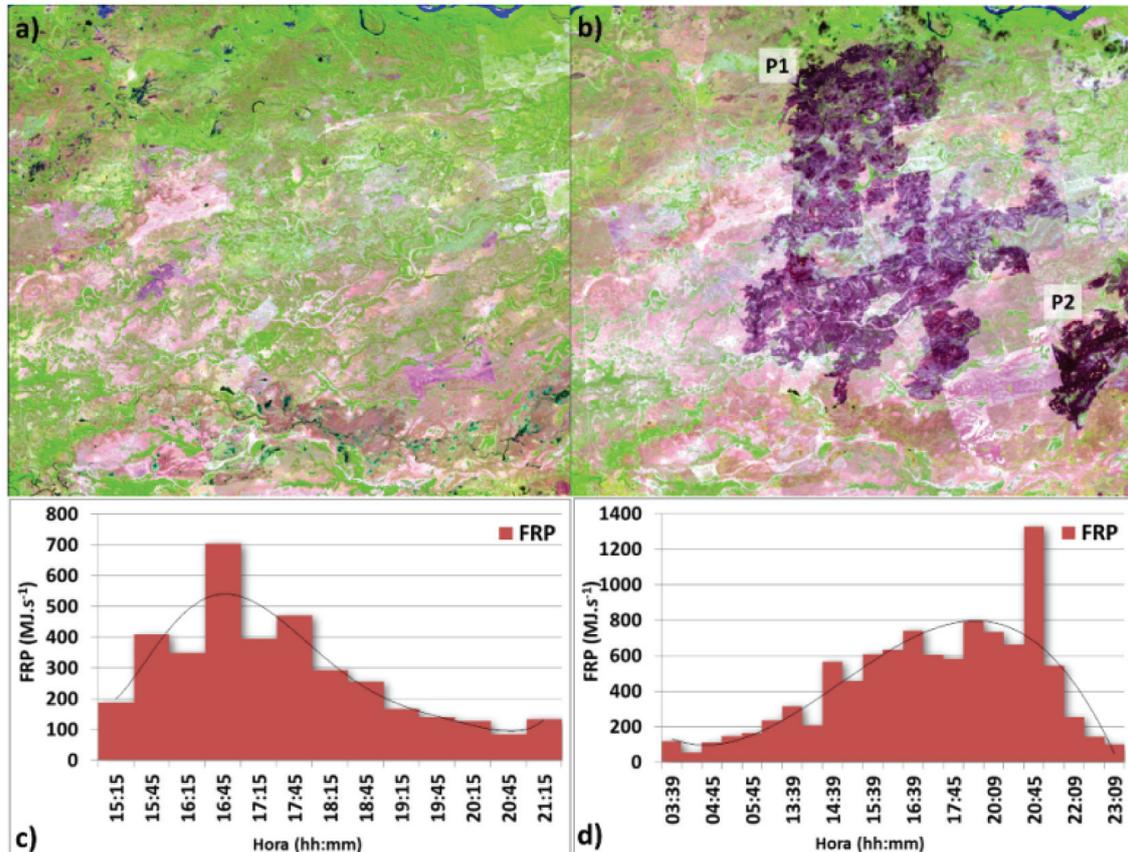


Figura 5. a) Imagem do ETM+/Landsat 7, composição falsa-cor 3B4G5R, para 02/06/2002; b) Imagem do ETM+/Landsat 7, composição falsa-cor 3B4G5R, para 27/08/2002; c) Gráfico da FRP para o ponto 1 para o dia 02/06/2002; e d) Gráfico da FRP para o ponto 2 para o dia 23/08/2002.

Diferentemente do P1, a queimada que ocorreu no P2 iniciou o processo de combustão por volta das 03:39 UTC, aumentando gradativamente ao longo do dia. Por volta das 20:45 UTC, a mesma alcançou um pico de aproximadamente 1300 MJ.s⁻¹, e analisando a regressão, percebe-se que este valor encontra-se muito acima dos demais, indicando uma possível superestimativa da FRP ou mesmo um aumento na intensidade do fogo (relacionado com a disponibilidade de biomassa para a queima). Após aproximadamente 2 horas, o processo de combustão é finalizado (23:09 UTC).

A **Figura 6** mostra a simulação da concentração de CO e PM_{2.5} no modelo ambiental CCATT-BRAMS para o dia 23/08/2002. Na simulação, percebe-se que na região do Bioma Pantanal ocorreram duas grandes queimadas, uma localizada na porção Sudoeste do Bioma e outra localizada na região Oeste (P1 e P2 da **Figura 5**). Ressalta-se que devido ao tamanho da grade na simulação (50 km), a localização da queimada encontra-se deslocada em um *pixel*, ocorrendo próximo à borda do Bioma. Para a queimada analisada acima, as concentrações de CO foram de aproximadamente 550 partes por bilhão (ppb), esta concentração de CO é classificada pela organização mundial da saúde (OMS) como

moderado a ruim. As concentrações de PM_{2.5} foram de aproximadamente 30 µg.m⁻³, considerado como aceitável/boa.

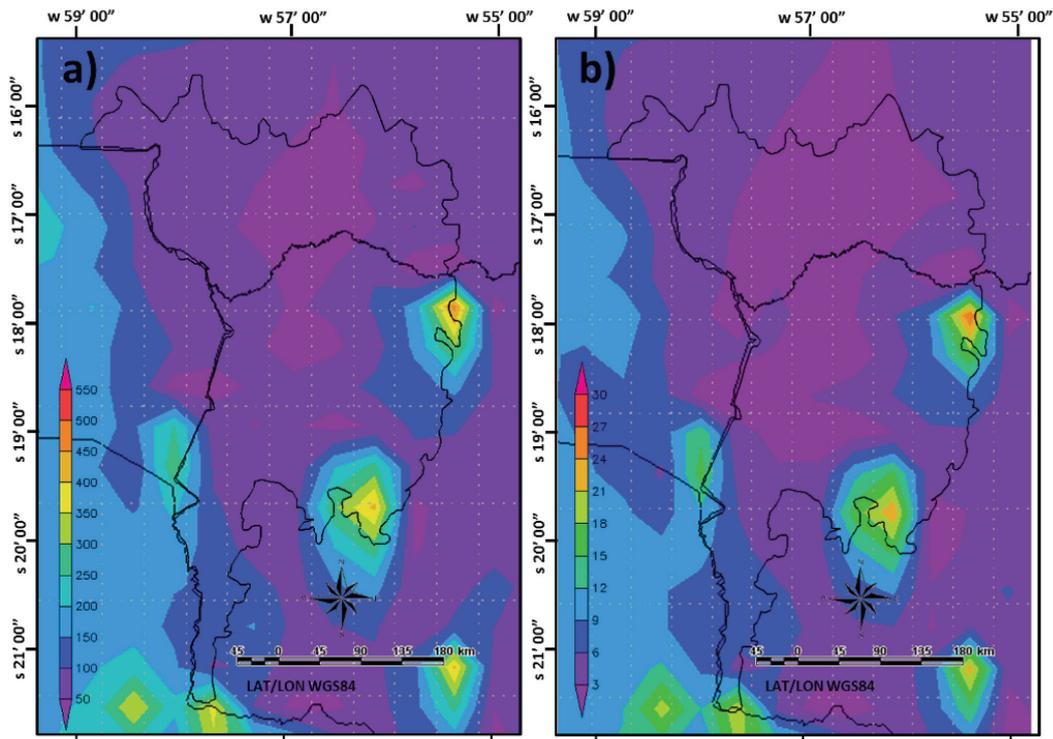


Figura 6. Estimativa da emissão de CO (em ppb) (a) PM_{2.5} (em µg.m⁻³) (b) pelo modelo CCATT-BRAMS para o dia 23/08/2002.

5. Conclusões e Sugestões

Pode-se concluir que a estimativa da energia liberada no processo de combustão de biomassa vegetal constitui-se em um importante indicador da intensidade das queimadas. A partir da evolução temporal da FRP, pode-se verificar o comportamento do fogo e determinar sua emissão. Para o Bioma Pantanal, as queimadas mais intensas ou mais frequentes estão localizadas na porção Norte/Noroeste do Bioma e na porção Centro-Sul, com algumas áreas ao longo do leque do Rio Taquari, piorando a qualidade do ar na região pantaneira, que já sofre com o transporte vindo da Amazônia.

6. Agradecimentos

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) pelo apoio (2010/07083-0, 2010/17437-4, 2011/08000-4 e 2011/12057-1).

7. Referências

- Burling, I. R.; Yokelson, R. J.; Griffith, D. W. T.; Johnson, T. J.; Veres, P.; Roberts, J. M.; Warneke, C.; Urbanski, S. P.; Reardon, J.; Weise, D. R.; Hao, W. M.; De Gouw, J. Laboratory measurements of trace gas emissions from biomass burning of fuel types from the Southeastern and Southwestern United States. *Atmos. Chem. Phys. Discuss.*, v. 10, p. 16425-16473, 2010.
- Freitas, S. R.; Longo, K. M.; Silva Dias, M. A. F.; Chatfield, R.; Silva Dias, P.; Artaxo, P.; Andreae, M. O.; Grell, G.; Rodrigues, L. F.; 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.*, v. 9, p. 2843-2861, 2009.
- Kaufman, Y. J.; Remer, L.; Ottmar, R.; Ward, D.; Rong-R, L.; Kleidman, R.; Fraser, R.; Flynn, L.;

Mcdougal, 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.

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.

Pereira, G.; Freitas, S. R.; Moraes, E. C.; Jesus, N. F.; Shimabukuro, Y. E.; Rao, V. B.; Longo, K. M. Estimating trace gas and aerosol emissions over South America: Relationship between fire radiative energy released and aerosol optical depth observations. **Atmospheric Environment**, v. 43, n. 40, p. 6388-6397. doi: 10.1016/j.atmosenv.2009.09.013, 2009.

Pereira, G.; Silva, M. E. S.; Moraes, E. C.; Shimabukuro, Y. E.; Cardozo, F. S.; Silva, F. B.; Arai, E. Impactos climáticos das áreas alagadas no Bioma Pantanal. In: 3º Simpósio de Geotecnologias no Pantanal, 2010, Cáceres - MT. **Anais ...**, p. 190-199, 2010.

Vermote, E.; Ellicott, E.; Dubovik, O.; Lapyonok, T.; Chin, M.; Giglio, L.; Roberts, G. J. An approach to estimate global biomass burning emissions of organic and black carbon from MODIS *Fire Radiative Power*. **Journal of Geophysical Research**, v. 114, n. D18, 2009.

Xu, W.; Wooster, M.; Roberts, G.; Freeborn, P. New GOES *Imager* algorithms for cloud and active fire detection and *Fire Radiative Power* assessment across North, South and Central America. **Remote Sensing of Environment**, v. 114, n. 9, p. 1876-1895, 2010.