

DETERMINAÇÃO DE ÁREAS QUEIMADAS E SEVERIDADE DE QUEIMA A PARTIR DA ANÁLISE DE AUTOCORRELAÇÃO ESPACIAL

Gabriel Bertani

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE, Av. dos Astronautas, 1758, 12.227-010 - São José dos Campos, SP, Brasil, gabrielb@dsr.inpe.br

Resumo. Os métodos usuais empregados nas estimativas de severidade de queima envolvem pesquisas em campo e geralmente possuem alto custo e pouca abrangência, além de ser necessária uma grande quantidade de tempo para realizar este tipo de estudo. A utilização das tecnologias de Sensoriamento Remoto em detrimento das técnicas usuais é capaz de minimizar essas dificuldades. Porém, os níveis de severidade de queima estimados via Sensoriamento Remoto costumam ser definidos de forma empírica, em intervalos relacionados apenas ao histograma dos valores de queima resultantes. Este estudo propôs uma abordagem para definição da severidade de queima baseada em parâmetros físicos, derivados do produto MOD14 *Fire and Thermal Anomalies*. As áreas queimadas foram determinadas através do produto MODIS MOD09A1 *Surface Reflectance*, a partir de dois métodos: índice de queima e autocorrelação espacial. As temperaturas médias de brilho nos canais 21/22 e 31 dos níveis de queima associadas a intensidade da queimada gerados pelo método de autocorrelação espacial apresentaram o melhor resultado, e mostrou ser uma abordagem eficiente para quantificar a severidade de queima obtida através do Sensoriamento Remoto.

Palavras-chave: Severidade de queima, sensoriamento remoto, autocorrelação espacial;

Abstract. The usual methods employed in fire severity estimates involve field surveys and generally have high cost and limited scope, and it is necessary a lot of time to carry out such studies. The use of Remote Sensing technologies in detriment of the usual techniques is capable to minimize such difficulties. However, fire severity levels estimated by Remote Sensing are usually defined empirically, based only at intervals related to the histogram values resulting from burns. This study proposed an approach to define fire severity based on physical parameters derived from the MOD14 *Fire and Thermal Anomalies* product. The burned areas were determined by the MODIS MOD09A1 *Surface Reflectance* product through two methods: burning index and spatial autocorrelation. The 21/22 and 31 channels brightness temperature of burn levels associated with the intervals generated by the spatial autocorrelation method presented the best result and is an efficient approach in quantifying the fire severity obtained by remote sensing.

Key-words: Burn severity, remote sensing, spatial autocorrelation.

1 INTRODUÇÃO

A remoção completa ou parcial da vegetação devido ao processo de queima é capaz de causar impactos sobre o funcionamento ecológico de diversos ecossistemas (Dwyer et al., 1999; Pausas, 2004). Embora esse processo seja parte do ciclo sucessional de diversos tipos

de vegetação, como no caso do Cerrado, que possui diversos tipos de espécies adaptados ao fogo, sua intensidade está relacionada a diversos processos de degradação, como a perda de nutrientes, compactação e erosão do solo, e diminuição da biodiversidade. Dessa forma, a severidade ou intensidade de queima corresponde a um fator indicativo dos possíveis efeitos do fogo sobre a cobertura vegetal e o solo.

Enquanto as estimativas de áreas e severidade de queima através de pesquisas em campo requerem uma quantidade considerável de tempo para serem realizadas, além de elevados custos e pouca abrangência, a utilização de imagens de Sensoriamento Remoto possibilita análises em amplas escalas, com cobertura periódica sobre os locais estudados. Devido à correlação negativa que ocorre entre as áreas queimadas com a vegetação, diversos estudos tem utilizado o Índice de Vegetação da Diferença Normalizada (NDVI, derivado do inglês *Normalized Difference Vegetation Index*) para determinar a severidade de queima (Chafer et al., 2004).

Além do NDVI, outros índices também já foram utilizados: *Simple Vegetation Index* (SVI) (), *Transformed Difference Vegetation Index* (TVI) , *Soil Adjusted Vegetation Index* (SAVI) . Apesar do grande número de índices utilizados, o *Normalized Burn Ratio* (NBR) tem se tornado o índice espectral padrão para estimar áreas queimadas e severidade de queima (Bisson et al., 2008; Epting et al., 2005; Key e Benson, 2005; Lopez-Garcia e Caselles, 1991). Esse índice é relacionado com o vigor e com a umidade da vegetação, e utiliza uma combinação de bandas nos espectros do infravermelho próximo (NIR) e do infravermelho de ondas curtas (SWIR).

Para estimar processos como perda de biomassa e carbono, relacionados com a intensidade com que ocorre um evento de queima, geralmente são utilizados limiares fixos para determinar a severidade de queima a partir dos índices gerados (Xiao et al., 2003). Esses métodos baseiam-se na definição de intervalos entre os valores mínimo e máximo do índice obtido, que determinam a severidade de queima conforme ocorre um aumento dos valores do índice. Porém, o número e a extensão desses intervalos são definidos sem a utilização de critérios baseados nas características do evento de queima. Além disso, os índices gerados não levam em consideração a correlação espacial existente entre os eventos de queima.

A ausência de autocorrelação espacial valida a hipótese de aleatoriedade espacial completa, onde a probabilidade de ocorrência de um evento em determinado ponto independe da probabilidade de ocorrência do mesmo evento em um outro ponto do espaço (Lanorte et al., 2011). Porém, nos eventos de queima existe a presença de autocorrelação espacial, o que invalida tal hipótese. A partir de uma vizinhança fixa para esse evento, é possível entender o quanto isso é modificado pela ocorrência de outros pontos do mesmo evento dentro dessa vizinhança.

Dessa forma, o presente estudo propõe uma abordagem para definição da severidade de queima baseada em parâmetros físicos, derivados do produto MOD14 *Fire and Thermal Anomalies*. Esses parâmetros são associados a determinados níveis de severidade de queima obtidos a partir de um índice de queima e de uma análise de autocorrelação espacial. As metodologias foram aplicadas sobre produtos MODIS MOD09A1 *Surface Reflectance*, enquanto os parâmetros físicos utilizados para analisar a severidade de queima foram obtidos através dos produtos MOD14 *Fire and Thermal Anomalies*.

1.1 Objetivo Geral

- Propor uma abordagem para definição da severidade de queima baseada em parâmetros físicos, derivados do produto MOD14 *Fire and Thermal Anomalies*;

1.2 Objetivos Específicos

- Comparar os resultados obtidos através de duas metodologias (apenas com um índice de queima e através da análise de autocorrelação espacial);
- Realizar uma análise quantitativa dos resultados;
- Analisar a relação da severidade de queima com variáveis físicas, com o objetivo de indicar qual delas é a mais apropriada para determinar a intensidade desse processo;

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Dados utilizados

No presente estudo foram utilizados dois tipos de dados de Sensoriamento Remoto: dois mosaicos compostos por seis cenas MODIS MOD09A1 *Surface Reflectance* cada, bandas 2 e 7, obtidas nas datas 04/06/2010 e 20/09/2010; um conjunto de pontos derivados do produto MOD14 *Fire and Thermal Anomalies*, correspondentes ao período entre 04/06/2010 e 20/09/2010. As cenas MODIS MOD09A1 representam uma grade com células (*pixels*) de 250 x 250m. O produto MOD14 *Fire and Thermal Anomalies* corresponde a um conjunto de pontos vetoriais (em formato *shapefile*) que possui três variáveis físicas como atributos, a saber: Energia Radiativa de Fogo e Temperatura média de brilho nos canais 21/22 e 31.

Área de estudo

A área de estudo compreende a região delimitada por um retângulo que envolve os limites do estado do Mato Grosso, como mostra a Figura 1. Nessa área ocorreram diversos eventos de queima entre 04/06/2010 e 20/09/2010, especialmente nos locais abrangidos pelo bioma

Cerrado. É muito comum a ocorrência de queimadas e focos de calor nesse estado, principalmente nessa época do ano (período de seca).

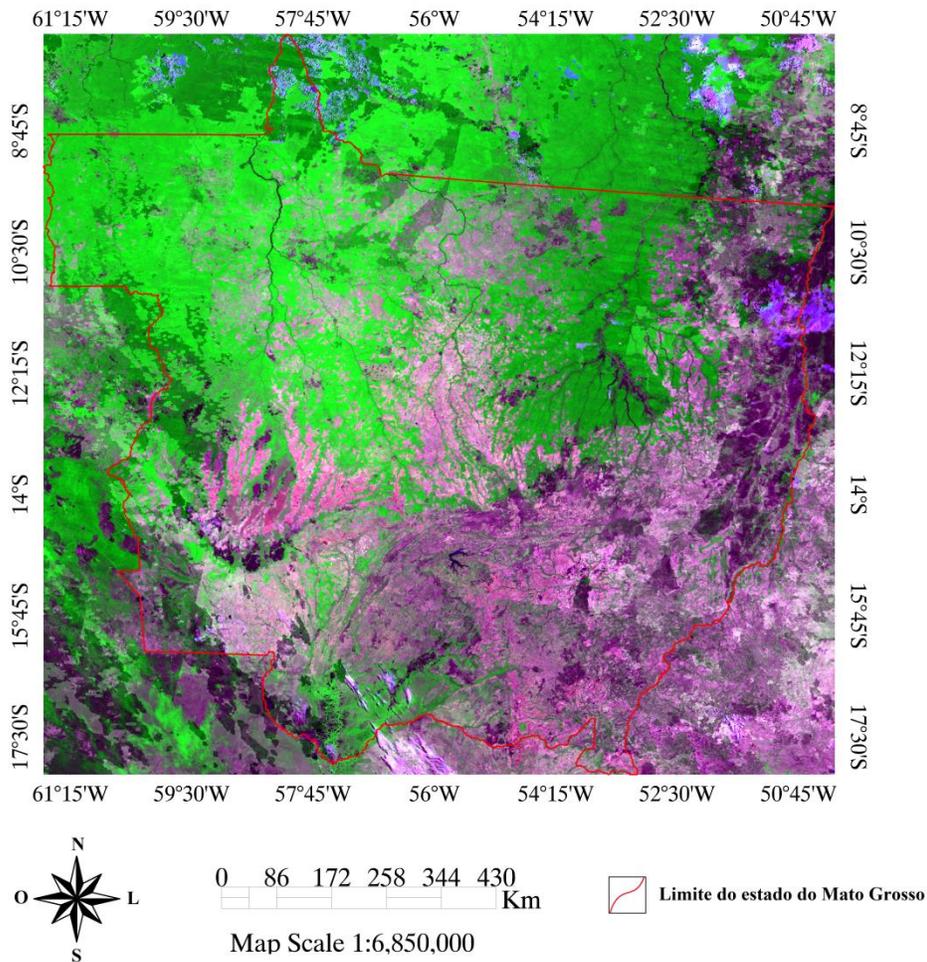


Figura 1. Área de estudo.

Etapas do trabalho

As etapas deste trabalho são resumidas no fluxograma da Figura 2. O processamento dos dados foi realizado nos programas ENVI 4.7 e na linguagem Python 2.7 - módulo ArcPy.

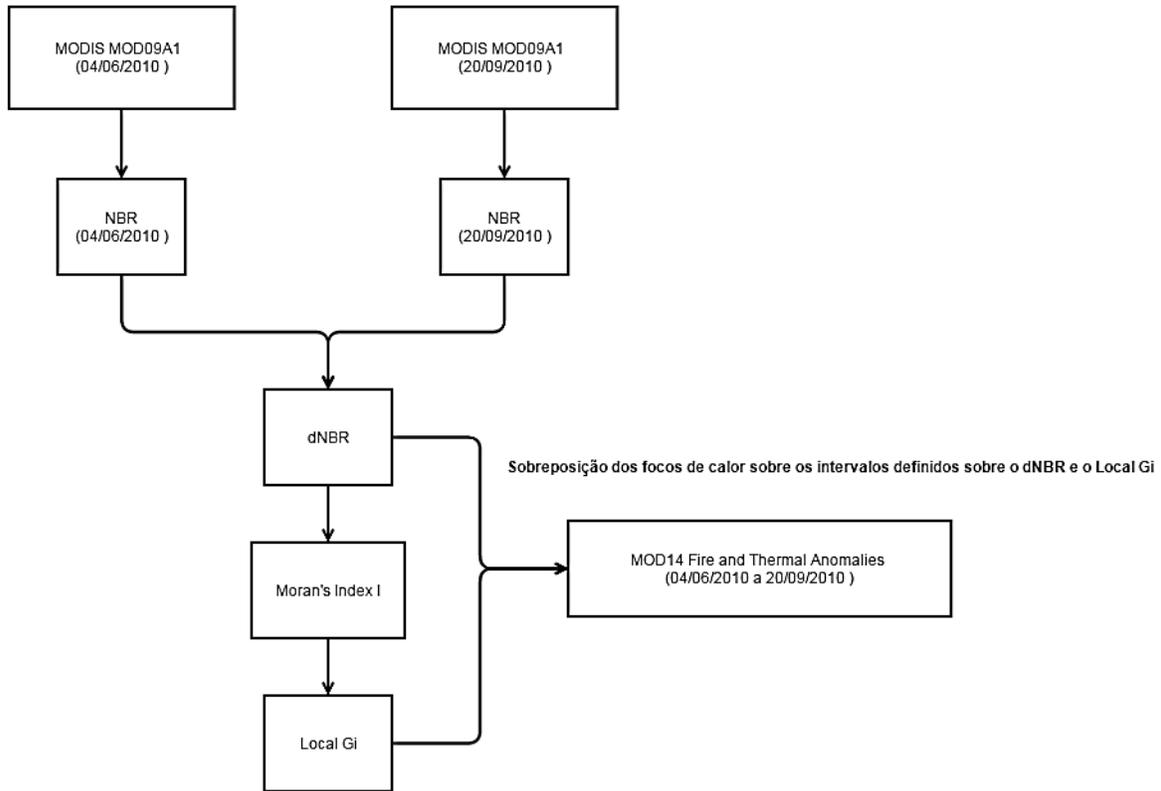


Figura 2. Fluxograma representativo das etapas aplicadas no presente estudo.

1) Obtenção dos índices de severidade da queima (NBR e dNBR)

Após um evento de queima, o comportamento espectral da vegetação é modificado devido ao consumo de biomassa, redução da transpiração, aumento da temperatura da superfície e presença de resíduos da biomassa queimada. Tais alterações podem ser analisadas a partir de duas faixas espectrais, a saber: infravermelho (NIR) e infravermelho de ondas curtas (SWIR). Dessa forma, foi utilizado o índice *Normalized Difference Vegetation Index* (NBR, Equação 1) nas duas datas (04/06/2010 e 20/09/2010) para determinar a intensidade de queima que ocorre em uma determinada área:

$$NBR = \frac{NIR - SWIR}{NIR + SWIR} \quad \text{Eq. 1}$$

Onde o NIR refere-se à banda 2 e o SWIR corresponde à banda 7 do produto MODIS MOD09A1 *Surface Reflectance*.

Para determinar as diferenças nas cenas antes e após o evento de queima foi realizada a subtração do índice NBR gerado na data pré-queima (04/06/2010) pelo índice NBR gerado na data pós-queima (20/09/2010). A diferença (dNBR) entre os dois índices gerados é mostrada na fórmula:

$$dNBR = NBR_{junho} - NBR_{setembro} \quad \text{Eq. 2}$$

2) Aplicação do Moran's index I

Posteriormente o índice de Moran I foi aplicado sobre o dNBR. O Moran's index I é um dos principais indicadores globais de autocorrelação, os quais mensuram o quanto o conjunto de dados é autocorrelacionado através da região de estudo. A aplicação do Moran's index I foi realizada em todas as direções, e o objetivo desta etapa foi obter a distância de contiguidade (Lag Distance) que maximiza e captura a autocorrelação da melhor maneira. Foram testadas distâncias de 2, 4, 6, 8 e 10 pixels. A fórmula do Moran's index I é mostrada a seguir (Equação 3):

$$I = \frac{N \sum_i \sum_j W_{ij} (X_i - \bar{X})(X_j - \bar{X})}{(\sum_i \sum_j W_{ij}) \sum_i (X_i - \bar{X})^2} \quad \text{Eq. 2}$$

Onde:

N = número total de pixels (dNBR);

X_i, X_j = intensidades nos pontos i e j (valor dNBR) ;

\bar{X} é o valor médio;

W_{ij} é um elemento da matriz de ponderação (neste trabalho foi utilizado o método "Inverse Distance", onde os pesos variam em uma relação inversa à distância entre os eventos).

A figura 3 mostra o correlograma do Moran's Index I calculado para diferentes distâncias. A distância de 2 pixels foi a que capturou a autocorrelação da melhor maneira, e portanto foi utilizada no cálculo do Getis order local G_i .

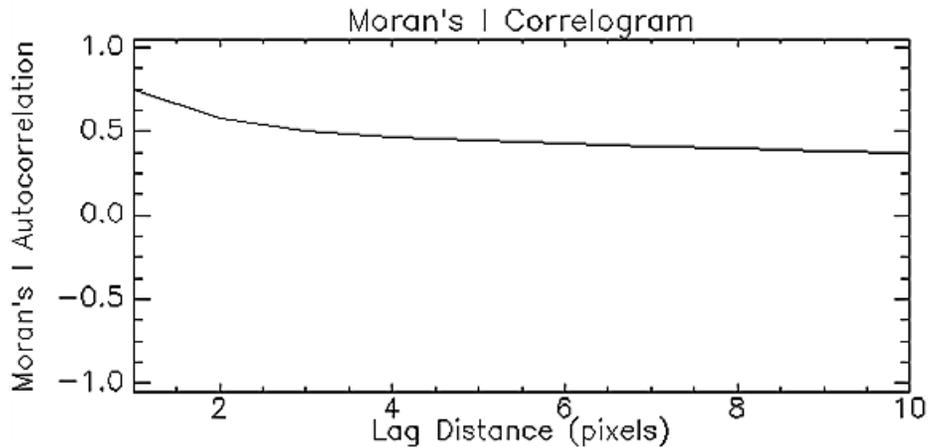


Figura 3. Cálculo do Moran's Index I para diferentes distâncias.

3) Aplicação do Getis-Ord Local Gi:

Após a aplicação do *Moran's index I*, a distância de contiguidade obtida - 2 pixels (500 m) foi utilizada no Getis-Ord Local Gi (Getis and Ord, 1994; Illian et al., 2008), um indicador local de autocorrelação espacial. Esse tipo de indicador permite a identificação de agrupamentos de pixels, a partir da mensuração do quanto suas características são homogêneas, dentro de uma vizinhança fixa (obtida pelo *Moran's index I*). Um maior valor resultante desse índice significa que há correlação positiva para os valores com maior intensidade (maior valor do dNBR), enquanto valores baixos determinam correlação positiva para os valores de baixa intensidade (menores valores de dNBR). A fórmula do Getis-Ord Local Gi é mostrada a seguir:

$$Gi(d) = \frac{\sum_{i=1}^n Wi(d)XiXi \sum_{i=1}^n Wi(d)}{s(i) \sqrt{\frac{[(N-1) \sum_{i=1}^n Wi(d) - (\sum_{i=1}^n Wi(d))^2]}{N-2}}} \quad \text{Eq. 4}$$

$Wi(d)$ = peso que varia de acordo com a distância

4) Determinação dos intervalos de severidade de queima

A partir das imagens dNBR e Getis-Ord Local Gi foram determinados 13 intervalos em cada uma, que correspondem a níveis crescentes de intensidade de queima. Cada intervalo possui extensão similar em cada imagem, e foram definidos a partir de padrões analisados e nos histogramas das imagens. As figuras 4 e 5 mostram os intervalos determinados e o respectivo nível de severidade de queima correspondente para as duas imagens.

5) Sobreposição dos intervalos de cada imagem sobre os dados de focos de calor

Os intervalos atribuídos às duas imagens foram vetorizados e sobrepostos aos pontos do produto MOD14 *Fire and Thermal Anomalies*. Assim, foram obtidas as variáveis físicas (Energia Radiativa de Fogo e Temperatura média de brilho nos canais 21/22 e 31) representativas de cada intervalo. O número de focos de calor contido em cada intervalo é mostrado nos histogramas das figuras 4 e 5.

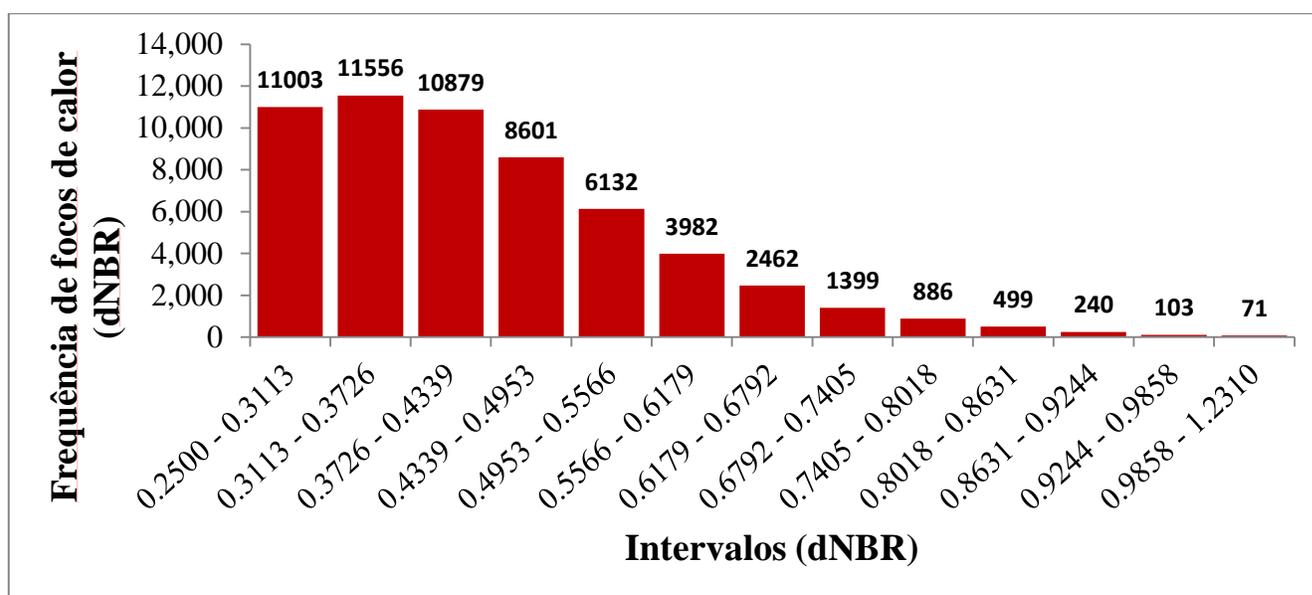


Figura 4. Histograma representativo do número de foco de calor por intervalo do dNBR.

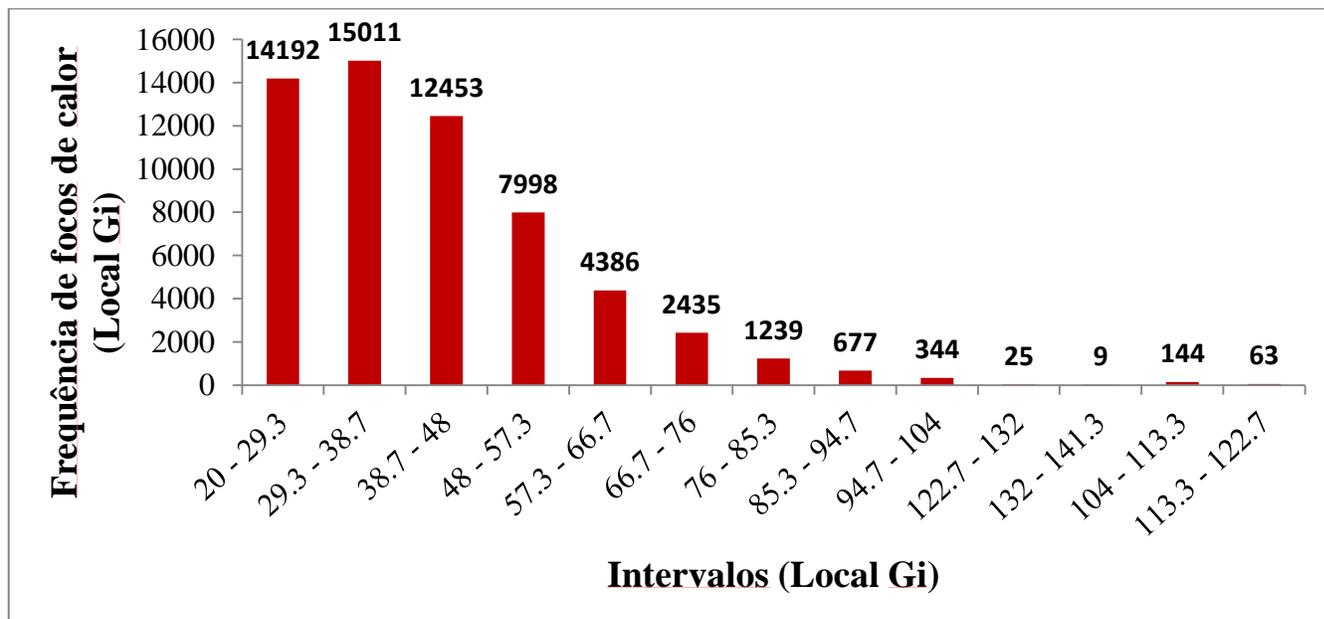


Figura 5. Histograma representativo do número de foco de calor por intervalo do Local Gi.

6) Relação entre a severidade de queima e as variáveis físicas do produto MOD14 *Fire and Thermal Anomalies*

Foram extraídos os valores médios de cada variável física do produto MOD14 *Fire and Thermal Anomalies* para cada intervalo obtido nas duas imagens. Esses valores médios foram associados a treze variáveis categóricas (de 1 a 13) em cada imagem, com o objetivo de representar a severidade de queima. Posteriormente, foi realizada uma regressão linear simples, com o objetivo de avaliar a relação que cada uma das variáveis físicas possui com os níveis de severidade de queima estabelecidos.

3 RESULTADOS

Os mapas gerados pelo dNBR e pelo Local Gi são mostrados na Figura 6. A área total queimada estimada pelo dNBR foi igual a 20.258.999 ha, enquanto a área total estimada de queima pelo Local Gi foi igual a 16.122.757 ha.

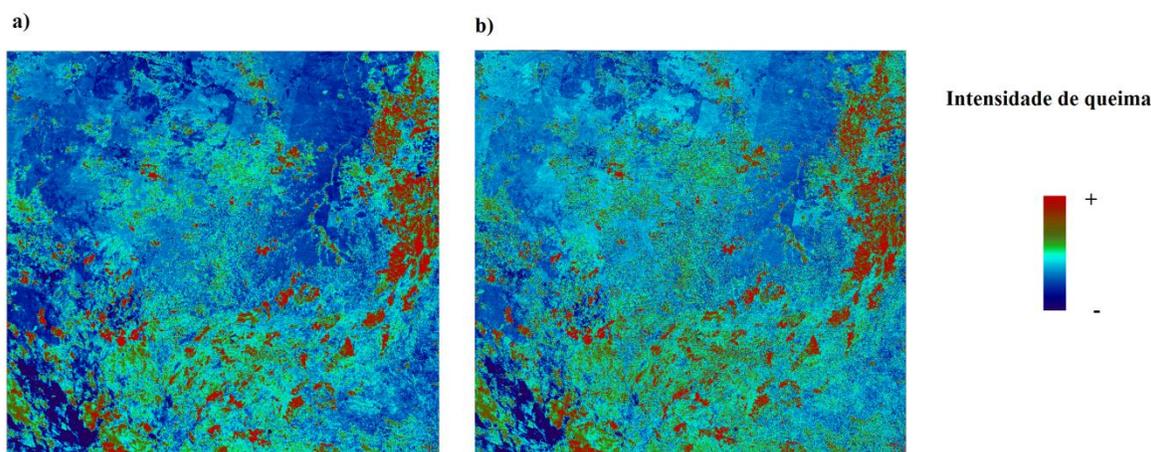


Figura 6. a) Mapa de intensidade de queima para o Local Gi. b) Mapa de intensidade de queima para o dNBR.

A relação entre a energia radiativa de fogo e os níveis de severidade de queima definidos tanto para o dNBR quanto para o Local Gi apresentaram bons resultados. As Figuras 7 e 8 mostram as curvas representativas dos valores médios de energia radiativa de fogo para os intervalos definidos no dNBR e no Local Gi, respectivamente. No dNBR, observa-se que os valores médios de temperatura radiativa de fogo para o intervalo 0.9244 – 0.9858 são maiores que o do maior nível de severidade de queima (0.9858 – 1.2310). Isso pode ter ocorrido porque esses dois intervalos não são significativamente diferenciados por essa variável ou porque a amostragem dos focos de calor não foi suficiente para indicar a relação entre o nível de severidade de queima e essa variável.

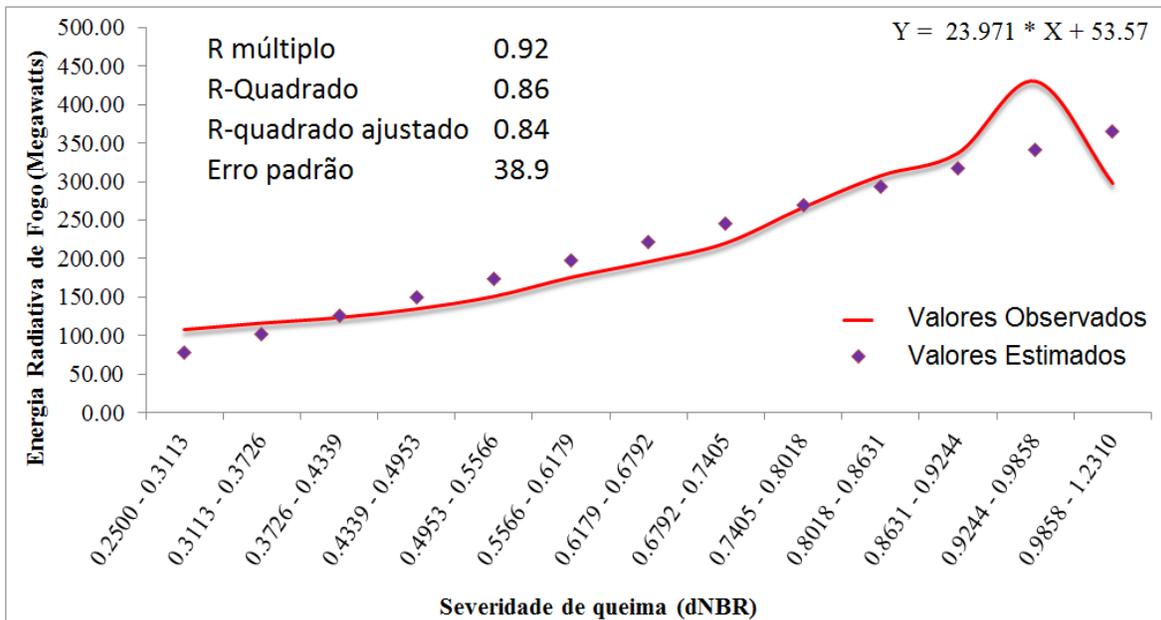


Figura 7. Curva representativa dos valores médios de energia radiativa de fogo para os intervalos definidos no dNBR, além dos valores estimados, da equação de regressão e das estatísticas obtidas.

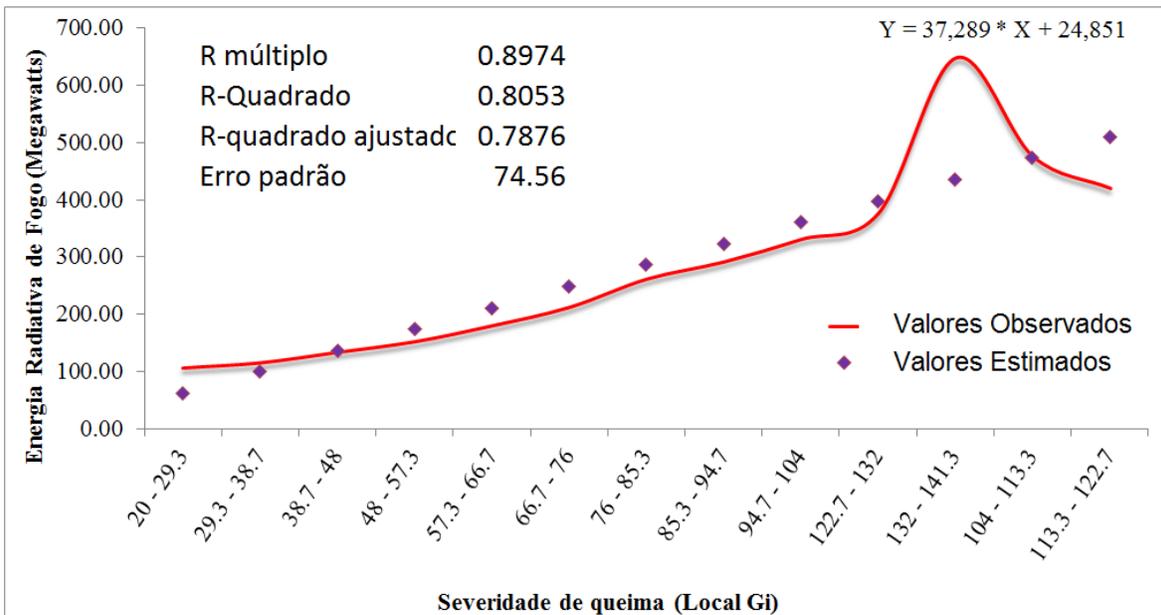


Figura 8. Curva representativa dos valores médios de energia radiativa de fogo para os intervalos definidos no Local Gi, além dos valores estimados, da equação de regressão e das estatísticas obtidas.

A temperatura média de brilho nos canais 21/22 também apresentou resultados adequados (figuras 9 e 10), especialmente no Local Gi, onde o R-múltiplo chegou a 0,95. Embora esse

valor não tenha sido o maior entre todas as análises, os valores da curva apresentaram o mesmo padrão de crescimento conforme o aumento da variável. Assim como em todas as análises relacionadas com o dNBR, os valores dessa variável foram subestimados no maior nível de severidade de queima (0.9858 – 1.2310).

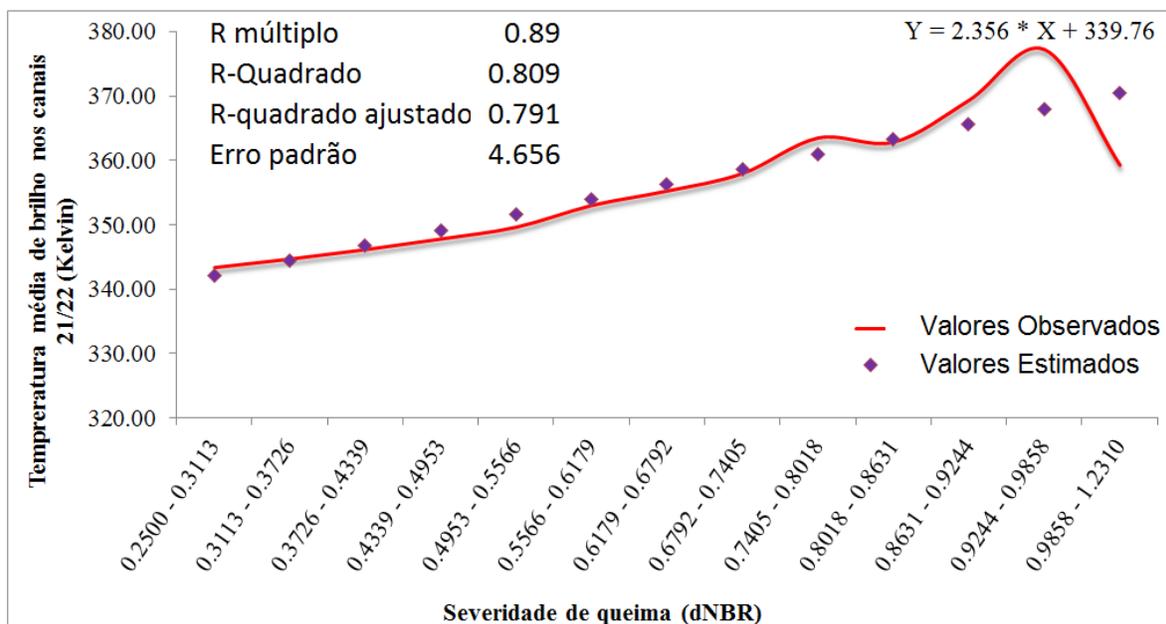


Figura 9. Curva representativa dos valores médios de temperatura de brilho nos canais 21/22 para os intervalos definidos no dNBR, além dos valores estimados, da equação de regressão e das estatísticas obtidas.

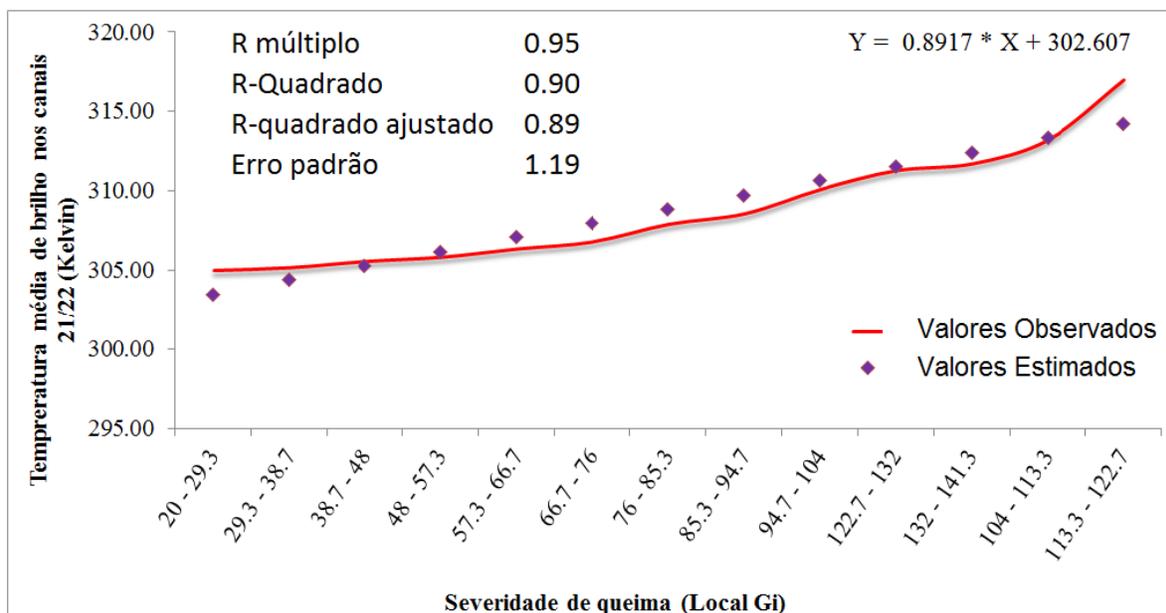


Figura 10. Curva representativa dos valores médios de temperatura de brilho nos canais 21/22 para os intervalos definidos no Local Gi, além dos valores estimados, da equação de regressão e das estatísticas obtidas.

A Figura 11 mostra a curva representativa dos valores médios da temperatura de brilho no canal 31 para cada intervalo do dNBR, além dos valores estimados pela regressão. A relação entre essa variável e os níveis de severidade de queima obtidos pelo dNBR apresentou valores de R-quadrado, múltiplo e ajustado – baixos, quando comparados com os demais resultados. A análise da curva mostra que os oito primeiros intervalos são praticamente indistinguíveis a partir da temperatura média de brilho no canal 31, além de subestimar a maior intensidade de queima (intervalo 0.9858 – 1.2310).

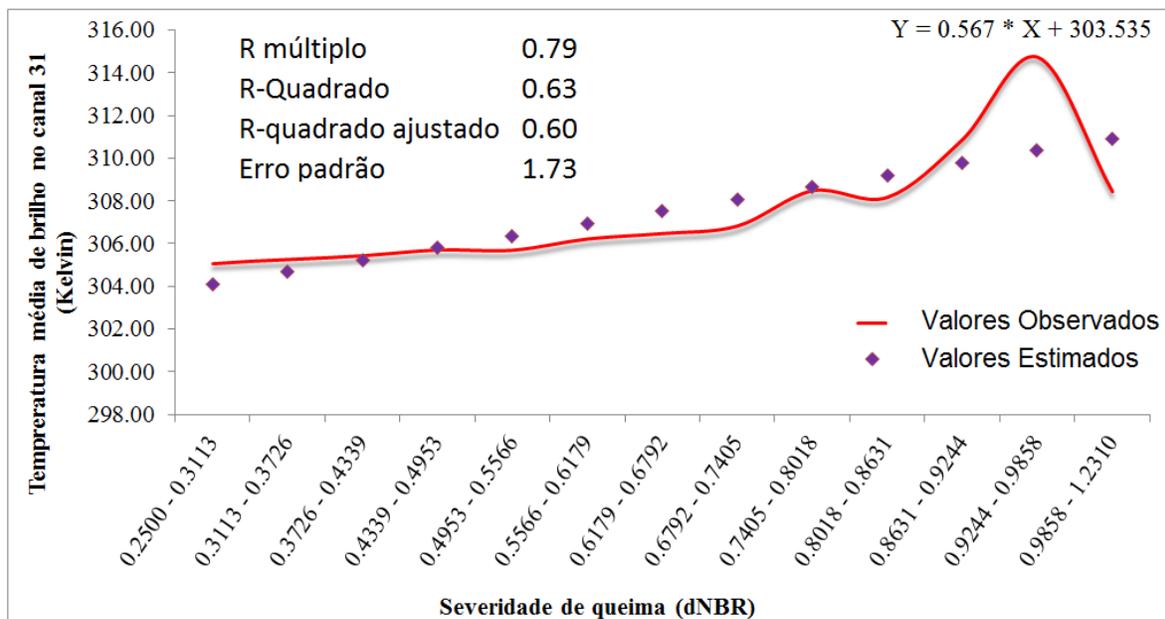


Figura 11. Curva representativa dos valores médios de temperatura de brilho no canal 31 para os intervalos definidos no Local Gi, além dos valores estimados, da equação de regressão e das estatísticas obtidas.

Quando relacionada ao Local Gi, a temperatura de brilho no canal 31 apresentou grande correlação com os níveis de queima definidos. Essa relação apresentou um R- Quadrado ajustado igual a 0,97, sendo o melhor resultado obtido. Através da Figura 12, é possível observar que a curva dos valores médios para cada intervalo possui uma tendência de crescimento conforme a temperatura média aumenta, embora os valores relacionados ao intervalo 132 – 141.3 tenham sido superestimados. Isso pode ter ocorrido devido à baixa frequência de focos de calor esse intervalo, como mostrado na Figura 5.

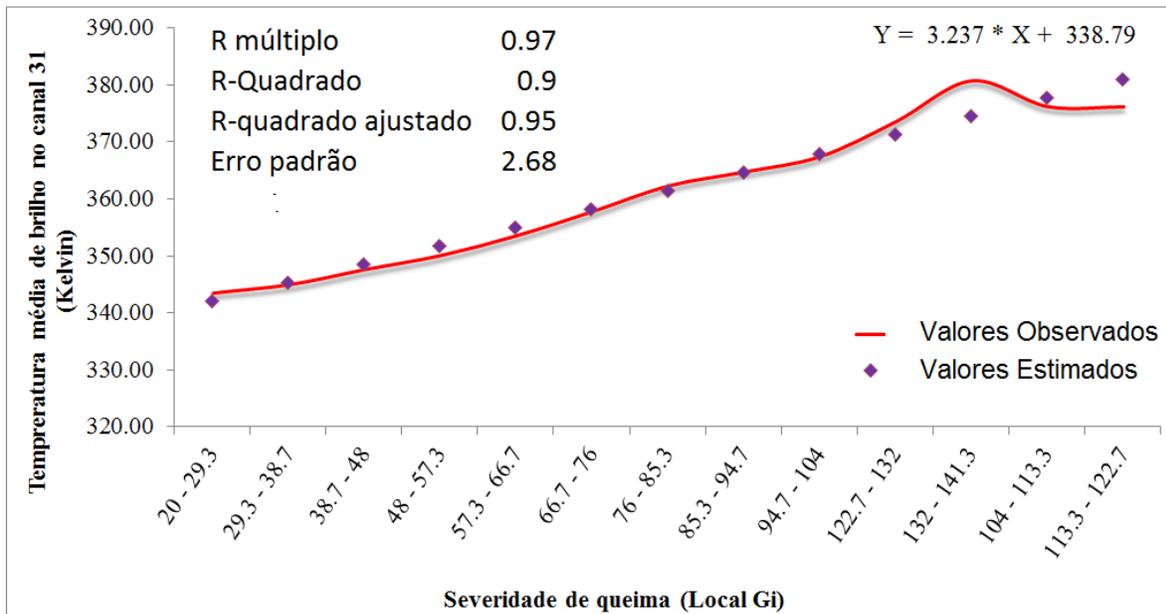


Figura 12. Curva representativa dos valores médios de temperatura de brilho no canal 31 para os intervalos definidos no dNBR, além dos valores estimados, da equação de regressão e das estatísticas obtidas.

Os valores das variáveis físicas obtidos para o maior índice de severidade de queima no dNBR (0.9858 – 1.2310) podem ser explicados por superestimativas da intensidade de queima nas bordas de áreas queimadas por parte desse índice. A Figura 13 ilustra esse fator. Em um mesmo ponto, a severidade de queima determinada pelo Local Gi se enquadra no menor nível de queima estimado, enquanto no dNBR fica situada no maior nível de severidade. A temperatura média de brilho nos canais 21/22 para esse ponto é de 326,7 Kelvin, enquanto que no canal 31 é de 295,7. Já a energia radiativa de fogo é igual a 77,6 Megawatts.

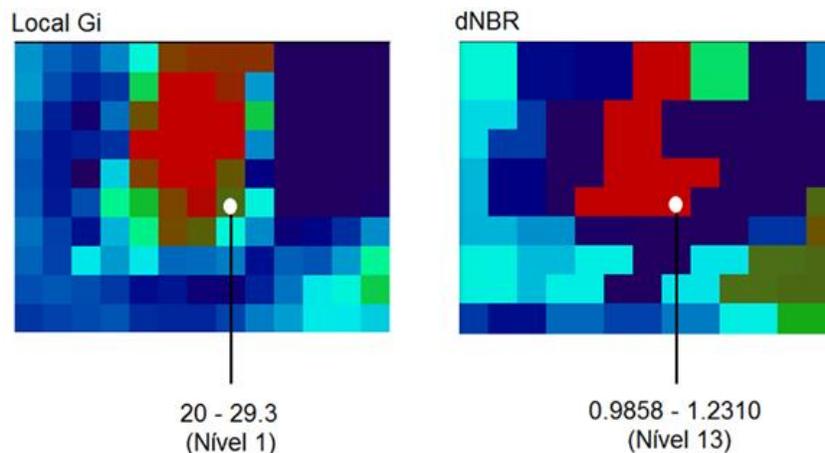


Figura 13. Respostas das duas abordagens sobre um mesmo ponto.

Os resultados apresentados complementam o estudo realizado por Lanorte et al. (2011), onde foram comparadas as duas metodologias (por índice e por autocorrelação espacial) apenas através de análises qualitativas. O estudo de Lanorte et al. (2011) também obteve resultados melhores a partir da abordagem por autocorrelação espacial. Além disso, o presente estudo mostrou que os resultados podem variar dependendo da variável física que é relacionada com a severidade de queima. A energia radiativa de fogo, por exemplo, apresentou resultados melhores quando foi relacionada ao índice dNBR.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

1. Os níveis de queima determinados apenas pelos índices espectrais foram superestimados nas áreas de bordas;
2. As duas abordagens apresentaram bons resultados na determinação dos níveis de queima;
3. As Temperaturas médias de brilho nos canais 21/22 e 31 dos níveis de queima gerados pelo método de autocorrelação espacial apresentaram o melhor resultado e mostrou ser uma abordagem eficiente na validação da severidade de queima obtida através do Sensoriamento Remoto;
4. Quanto maior é a severidade de queima maiores tendem a ser as temperaturas de fogo.
5. É recomendável que sejam feitas análises *in situ*, para validação das incertezas.

REFERÊNCIAS

- Bisson, M., Fornaciai, A., Coli, A., Mazzarini, F., & Pareschi, M. (2008). The Vegetation Resilience After Fire (VRAF) index: Development, implementation and an illustration from central Italy. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 10, 312–329
- Chafer, C., Noonan, M., & Macnaught, E. (2004). The post-fire measurement of fire severity and intensity in the Christmas 2001 Sydney wildfires. *International Journal of Wildland Fire*, 13, 227–240.

- Dwyer, E., Perreira, J., Grégoire, J., & DaCamara, C. (1999). Characterization of the spatiotemporal patterns of global fire activity using satellite imagery for the period April 1992 to March 1993. *Journal of Biogeography*, 27, 57–69.
- Getis, A., Ord, J.K. (1994). The analysis of spatial association by use of distance statistics. *Geographical Analysis*. 24, 189–206.
- Illian, J., Penttinen, A., Stoyan, H., Stoyan, D. (2008). *Statistical Analysis and Modelling of Spatial Point Patterns*. Wiley.
- Lanorte, A., Danese, M. , Lasaponara, R. , Murgante, B. (2011). *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. 20, 42–51.
- Pausas, J. (2004). Changes in fire and climate in the eastern Iberian peninsula (Mediterranean Basin). *Climatic Change*, 63, 337–350.
- Xiao, X., Braswell, B., Zhang, Q., Boles, S., Frohking, S., Moore III, B. (2003). Sensitivity of vegetation indices to atmospheric aerosols: continental-scale observations in Northern Asia. *Remote Sensing Environment* 84, 385–392.