

Alterações nos padrões espectrais e da paisagem devido ao impacto do fogo nas florestas dominadas por Bambu no Estado do Acre

Camila Valéria de Jesus Silva ¹

Natália Salazar Latorre ¹

Ricardo Dal'Agnol da Silva ¹

Irving Foster Brown ²

Luiz Eduardo Oliveira e Cruz de Aragão ¹

TREES (*Tropical Ecosystems and Environmental Sciences Laboratory*) ¹

¹Divisão de Sensoriamento Remoto – DSR

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE

Caixa Postal 515 – 12201-970 – São José dos Campos - SP, Brasil.

{camilas, laragao, silvard}@dsr.inpe.br

nataliasalazarlatorre@gmail.com

²Universidade Federal do Acre e Woods Hole Research Center

Distrito Industrial – CEP- 69920900 - Rio Branco, AC, Brasil

fbrown@whrc.org

Abstract. Forests in the south-west flank of the Amazon are known by persistent dominance of Bamboos. It is still not well understood how species of Bamboos interact with fire, but there is a strong suggestion that fire favours the spread and colonization of Bamboos species. On this work we aimed to compare burned and unburned forested areas dominated by Bamboo through an analysis of forest structure, spectral attributes and landscape pattern. Two areas, burned in 2010 and unburned, were sampled with 0.25ha inventory plots. Three plots were installed in each area, control (PC) and burned (PQ). We obtained the NIR band, EVI and NDVI indexes from a RapidEye image of 2012. The spectral attributes were statistically different between PQ and PC, with higher values for PC. The higher tree mortality in PQ area suggests lower amount of NIR reflection, possibly associated to the higher occurrence of tree crowns with no leaves. The Guido ToolBox software was used to estimate the proportions of Bamboo, Forest and bare tree crowns in each area, burned (Q) and non-burned (NQ). The proportion of bare crowns mixed with forest was found to be more frequent on Q, as the forest seems to be more heterogeneous. The NQ areas had greater proportion of non-mixed forest and Bamboo mixed with forest. The Contagion fragmentation metric showed lower values of fragmentation on NQ and higher values on Q. The results indicate that fire may have favoured the expansion of Bamboo in Q area leading to the higher fragmentation observed.

Palavras-chave: Vegetation indexes, fragmentation, burned forests, índice de vegetação, fragmentação, florestas queimadas.

1. Introdução

O aumento da vulnerabilidade da floresta Amazônica às mudanças climáticas está principalmente ligado ao aumento das queimadas durante a estação seca (Aragão *et al.*, 2008). Em geral as queimadas estão associadas aos desmatamentos, práticas de agricultura com uso de fogo e bordas de fragmentos de floresta. No caso de florestas como aquelas do sudoeste da Amazônia, existe ainda outro fator pelo qual as queimadas podem ocorrer com mais frequência, a extensa ocupação de Bambu. Nessa região, é estimado que 165.000 Km² de florestas possuem elevada densidade de duas espécies de Bambu, *Guadua sacocarpa* e *Guadua weberbaueri* (Smith e Nelson, 2010).

A expansão da ocupação do Bambu tem chamado atenção, porque suas características físicas aumentam a inflamabilidade das florestas. Com baixa resistência às secas os Bambus perdem suas folhas rapidamente após um período curto sem chuva, acumulando um grande volume de material inflamável (Smith e Nelson, 2010). O fogo seria um distúrbio relacionado

ao ciclo de vida do Bambu que favorece sua expansão e colonização no interior de clareiras abertas (Keeley e Bond, 1999).

As colônias de Bambu aumentam tanto o risco de queimadas quanto o de isolamento de manchas de floresta, já que ambos, fogo e grandes colônias de Bambus, causam mortalidade de árvores (Barlow *et al.*, 2012; McMichael *et al.*, 2013). Dessa forma, o estudo da expansão dos Bambus e sua relação com a ocorrência do fogo através do sensoriamento remoto pode ser realizado tanto em nível espectral quanto em nível de paisagem. Para isso é recomendado o uso dos índices de vegetação, que exploram especialmente as regiões do visível e do infravermelho próximo, onde a vegetação tem maior absorção e refletância, respectivamente (Ponzoni e Shimabukuro, 2010), assim como de métricas de composição (Riitters *et al.*, 2009) e fragmentação da paisagem (Vogt, 2014).

O objetivo desse trabalho foi realizar a comparação de áreas de floresta queimadas e não queimadas dominadas por Bambu por meio da análise da estrutura florestal, dos atributos espectrais e do padrão da paisagem.

2. Metodologia

2.1 Inventário Florestal

Foram selecionadas duas áreas de floresta primária: queimada em 2010 (PQ) e não queimada (PC). Em cada uma das áreas foram instaladas três parcelas de 10x250m. Foram medidos em julho de 2011 os DAP (diâmetro à altura do peito) de todos os indivíduos arbóreos com DAP acima de 10 cm vivos e mortos. As áreas amostradas estão localizadas no Estado do Acre, a sudeste do município de Rio Branco, dentro da Reserva Extrativista Chico Mendes (Figura 1).

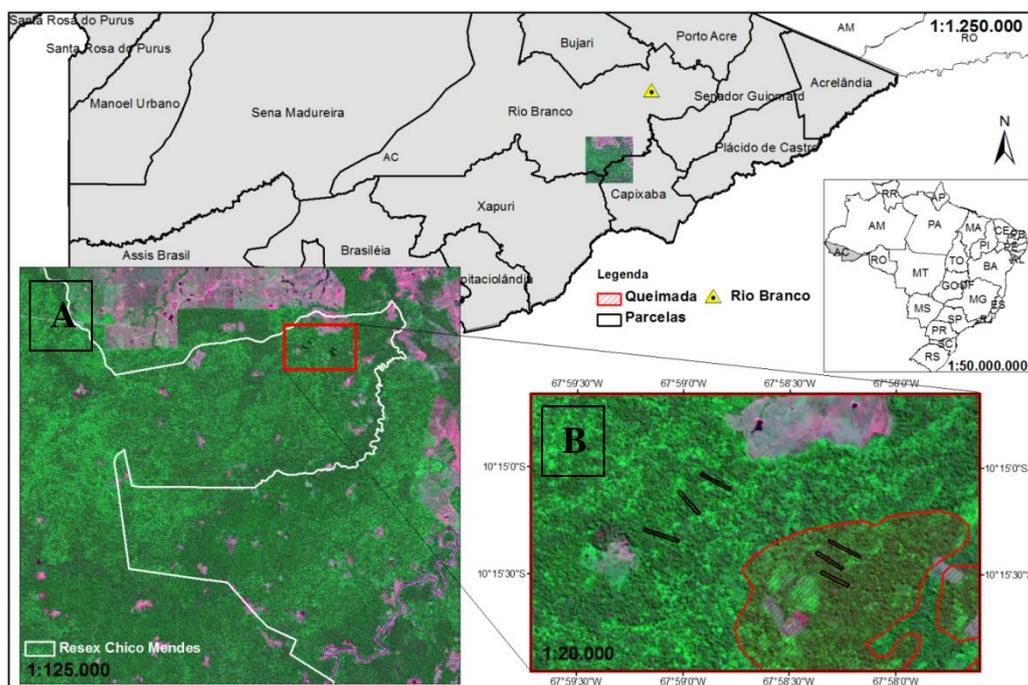


Figura 1. Localização da área de estudo no Estado do Acre, a sudeste do município de Rio Branco. A: Localização das parcelas dentro da Reserva Extrativista Chico Mendes. B: parcelas controle (PC) em uma área de floresta intacta e parcelas queimadas (PQ) sobrepostas ao polígono da queimada. Imagens RapidEye com composição RGB-352.

2.2 Dados espectrais RapidEye

Foi adquirida uma imagem RapidEye, de órbita ponto 19-343, do dia 10 de agosto de 2012, que foi corrigida para redução dos efeitos atmosféricos através do módulo FLAASH, que incorpora a modelo de transferência radiativa MODTRAN4 (Matthew *et al.*, 2000). A

correção atmosférica consiste na correção da radiância do sensor para reflectância de superfície.

A imagem foi adquirida por meio da plataforma de disponibilização de dados do INPE em acordo com o Ministério do Meio Ambiente (MMA). O sensor a bordo do RapidEye é do tipo multiespectral e faz a aquisição de imagens em 5 bandas: 1-azul (440-510 nm), 2-verde (520-590 nm), 3-vermelho (630-690 nm), 4-*red-edge* (690-730 nm), e 5-infravermelho-próximo (NIR; 760-880 nm)), com resolução espacial de 5m. O produto 3A, utilizado nesse estudo, é disponibilizado pelo fornecedor com correção geométrica (ortorretificação com GCPs e DEMs) e possui resolução radiométrica de 16 bits.

As bandas em que há maior resposta da vegetação, absorção no *red-edge* e reflexão no NIR, foram retidas para análise comparativa entre PQ e PC. Além das bandas 4 e 5, foram obtidos os índices *Enhanced Vegetation Index* – EVI (Huete et al., 1997) e *Normalized Difference Vegetation Index* – NDVI (Rouse et al., 1973) (Equações 1 e 2).

$$NDVI = (\rho_{NIR} - \rho_V) / (\rho_{NIR} + \rho_V) \quad (1)$$

Onde: ρ_{NIR} é a reflectância no infravermelho próximo e ρ_V é a reflectância no vermelho

$$EVI = G (NIR - Vermelho) / (L + NIR + C1 \text{ vermelho} - C2 \text{ azul}) \quad (2)$$

Onde: L é o fator de ajuste para o solo; G é o fator de ganho e C1 e C2 os coeficientes de ajuste para efeito de aerossóis da atmosfera.

As amostras dos atributos espectrais compreenderam a área das parcelas delimitadas em campo. Entretanto devido ao erro do GPS de navegação de aproximadamente 5 m, as amostras foram delimitadas nas imagens em retângulos de 20m por 260m. Os valores foram extraídos através do software ENVI 4.8.

2.3 Análise da paisagem – Guidos Toolbox

O Guidos Toolbox (*Graphical User Interface for the Description of image Objects and their Shapes*) é um *software* gratuito que disponibiliza ferramentas para processamento de imagens que são baseadas em conceitos apenas de geometria (VOGT, 2014). Antes do processamento da imagem em questão pelo *software* Guidos, a mesma passou por uma classificação supervisionada do tipo SVM (*Support Vector Machine*). Foram selecionadas três classes espectralmente distintas de interesse: Floresta, Bambu e Copa seca. Os outros tipos de cobertura presentes na cena, como água, agricultura e solo exposto foram agrupados em uma classe como “*missing values*”.

Foram aplicadas duas análises: análise de padrão e análise de fragmentação. Para a análise de padrão foi selecionada a ferramenta LM (*Landscape Mosaic*) a qual requer como entrada uma imagem com três classes e uma classe opcional de “*missing values*”. A análise LM produz uma classificação tripolar local de acordo com a proporção relativa das três classes da janela de pixels que circunda cada pixel (Riitters et al., 2009). A operação de classificação foi realizada por uma janela móvel de 5x5 pixels (625m²).

Para a análise de fragmentação foram utilizadas três métricas: Entropia, Contágio e Complexidade. A Entropia descreve o grau de desordem de uma região da imagem. O Contágio é uma medida inversa à fragmentação que varia de 0 a 100. A Complexidade é uma medida que descreve a fragmentação através da complexidade dos objetos da imagem ou quantidade de informação contida (Vogt, 2014).

O cálculo dessas métricas requer uma imagem binária, com duas classes principais, *background* (1) e *foreground* (2), uma terceira classe opcional também é admitida como *missing values* (0). Nesse caso, a classe Bambu foi admitida como o *background* e a classe Floresta agregada à classe Copa seca como *foreground*. As outras coberturas já anteriormente classificadas como *missing values* permaneceram com o valor 0.

Os dois tipos de análises foram realizados com o objetivo de verificar o efeito do fogo em nível de paisagem. Na primeira análise, com a ferramenta LM, buscou-se entender as proporções de cada classe nas áreas queimadas (Q) e nas áreas não-queimadas (NQ). Na

segunda análise o objetivo também foi de realizar uma comparação entre as áreas Q e NQ, entretanto tomando como parâmetro o grau de fragmentação dado pela presença do Bambu, já que essa foi designada a classe *background*.

A seleção das amostras contou com uma classificação visual prévia das cicatrizes deixadas na floresta pela queimada de 2010 utilizando-se imagens Landsat (Projeto *Natural Environment Research Council* (NERC) - NE/1018123/1). Dentro da cena RapidEye foram selecionados polígonos de cicatriz de fogo cobertos totalmente, ou em sua maior parte, por floresta. Ao todo foram selecionados 34 polígonos da classe Q. Para a seleção das amostras da classe NQ, foi delineada uma faixa (*buffer*) de 115 metros por fora de uma faixa de 100 m com a finalidade de evitar o efeito de borda causado pelo fogo.

3. Resultados e Discussão

3.1 Estrutura florestal

Os dados de inventário florestal, através da distribuição diamétrica (Figura 2), mostraram que as áreas PQ e PC são estruturalmente similares quando analisamos a distribuição diamétrica das árvores vivas. Contudo, estas áreas diferem em relação à distribuição diamétrica das árvores mortas. Essa diferença é observada principalmente nas menores classes, de I a III, apontando maior mortalidade das árvores de menor DAP nas áreas de PQ devido à queimada de sub-bosque. Dessa forma analisando a distribuição das árvores vivas é possível inferir que houve um maior recrutamento de árvores na área de PQ. Barlow et al. (2012) encontraram as mesmas mudanças na estrutura de florestas queimadas comparadas às florestas não queimadas.

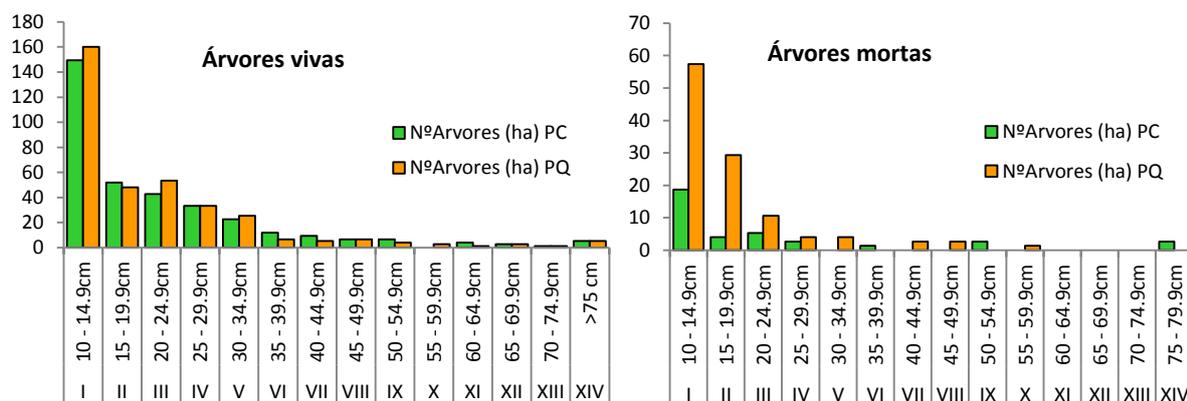


Figura 2. Distribuição diamétrica das parcelas PC e PQ em classes de 5 cm de DAP, das árvores vivas (à esquerda), e árvores mortas (à direita), inventariadas em 2011.

3.2 Avaliação espectral

Para cada uma das parcelas, controle (PC) e queimada (PQ), os valores dos atributos espectrais extraídos da imagem RapidEye foram analisados com o propósito de identificar de que forma se dá a diferença espectral entre as áreas e quais atributos mostram maior sensibilidade ao impacto do fogo na floresta (Figura 3).

Dentre as bandas espectrais, a banda 5 (Infravermelho próximo – NIR) mostrou maior sensibilidade às mudanças estruturais da floresta. Apesar de esperado, a banda 4 (*Red-edge*) não apresentou sensibilidade as alterações observadas no dossel florestas das parcelas na área PQ.

Não foi constatada distribuição normal, tão pouco homogeneidade de variâncias para as amostras. Dessa forma foi optado pela análise das distribuições dos valores e teste de mediana (Mann e Whitney, 1947), já que a mediana é um melhor descritor nesses casos de não

normalidade dos dados. Os valores de mediana das parcelas PQ e PC mostraram diferenças estatísticas significativas.

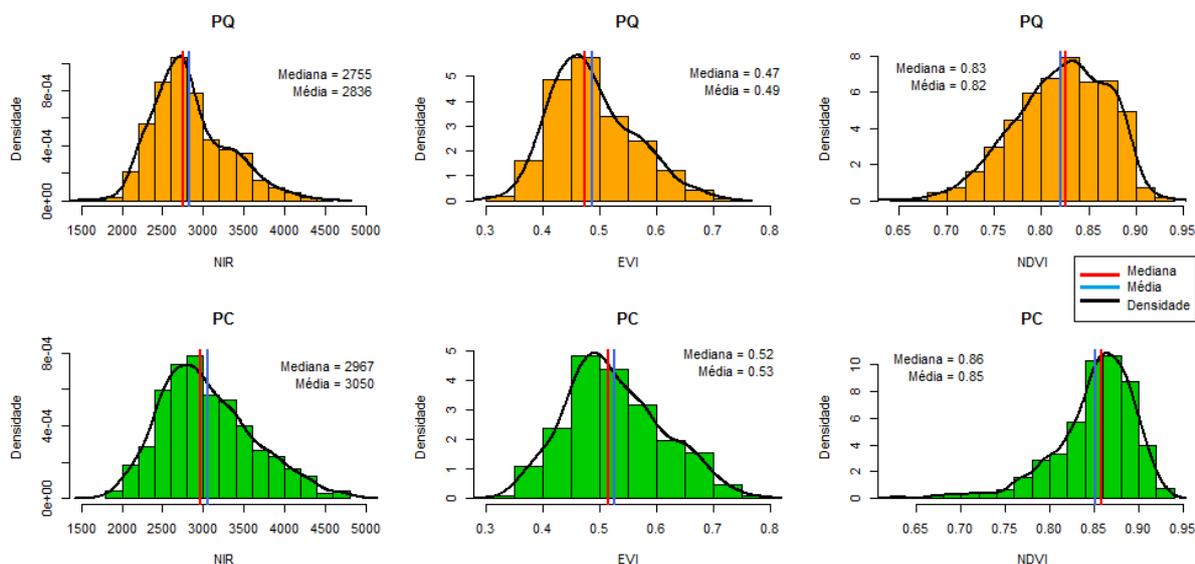


Figura 3. Atributos espectrais (NIR, EVI e NDVI) extraídos da imagem RapidEye referentes às parcelas queimadas (PQ) e controles (PC) analisados por meio de estatística descritiva. A linha preta representa a curva de densidade, e os valores de média e mediana estão representados nas cores vermelho e azul respectivamente.

Para os três atributos observou-se que as PCs têm valores de mediana maiores que as PQs. Um maior valor de mediana indica a concentração de valores para o lado direito do eixo. Isso demonstra a influência de um maior retroespalhamento do NIR, e consequente aumento dos valores dos índices de vegetação, na floresta não queimada. Em florestas de dossel mais complexo, como em PC, as reflexões múltiplas podem ser responsáveis pelos maiores níveis de NIR, incluindo o efeito aditivo da alta reflectância no NIR do Bambu e de copas saudias.

No caso das PQs o maior número de árvores mortas sem folhas na copa pode ter diminuído a reflectância no NIR e elevado a reflectância no visível. A menor complexidade do dossel florestal em PQ comparadas às áreas de PC pode também ser responsável pela menor reflectância no NIR. De acordo com Smith e Nelson (2010), no estágio maduro do ciclo de vida do Bambu, as florestas ficam com padrão espectral semelhante ao de florestas secundárias. Considerando a dominância local dos Bambus pela sobreposição do dossel arbóreo (McMichael *et al.*, 2013), a combinação entre Bambus e copas saudias, assim como Bambus e copas secas será determinante no valor observado de NIR nas áreas analisadas.

3.3 Padrão da paisagem

Na comparação do padrão da paisagem das áreas queimadas (Q) com as áreas não queimadas (NQ), foi avaliada toda a cena através de unidades amostrais, que se basearam nos polígonos das cicatrizes e nas amostras delineadas como *buffer* fora dos limites dos polígonos, como descrito na metodologia. Através da classificação tripolar foram obtidas as proporções de cada uma das 19 classes do sistema LM como um resultado da composição da paisagem. O sistema LM foi adaptado para as classes de interesse do presente estudo, Floresta, Bambu e Copa seca (Figura 4). Uma letra maiúscula significa uma proporção de 60 a 100% de uma das três classes na vizinhança de um pixel, e a letra minúscula significa uma proporção de 10 a 60%. Duas letras maiúsculas representam 100% da vizinhança de um pixel composta por aquela classe em questão (Riitters *et al.*, 2009).

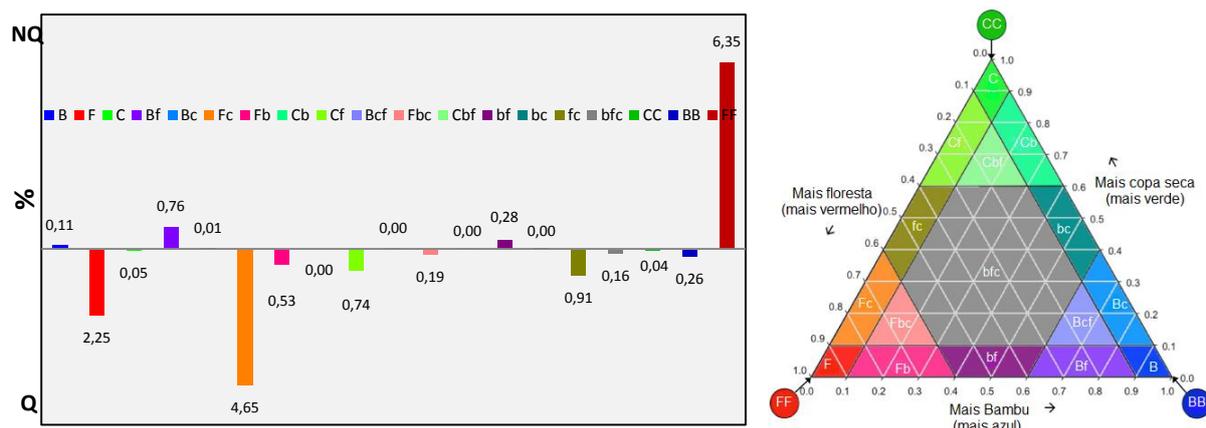


Figura 4. Adaptação da classificação tripolar *Landscape Mosaic* (LM) Guido Toolbox (Vogt, 2014), para o plano Bambu (B ou b) Floresta (F ou f) Copa seca (C ou c). À direita, as proporções de floresta, Bambu e copa seca de cada classe do sistema tripolar. À esquerda, a diferença de proporção (%) das 19 classes entre as áreas NQ e Q.

Se destacarmos as classes em que se deram as maiores diferenças entre as áreas veremos que NQ apresentou maiores proporções de Bf e FF, enquanto Q apresentou maiores proporções de F, Fc e fc. Sendo assim, os resultados para as áreas Q demonstraram que existe uma maior mistura de copas sem folha com a floresta. Este resultado corrobora o que foi encontrado na análise espectral das parcelas PQ e PC, onde foi indicada a influência da presença de copas mortas no aumento da reflectância do visível e redução do NIR em PQ. Já a maior proporção de pixels de FF e Bf em NQ sustenta a hipótese de que a maior reflectância no NIR nas PC é resultante do efeito aditivo da combinação Bambu, copas saudáveis no retroespalhamento deste comprimento de onda.

3.4 Métricas de fragmentação

Das métricas utilizadas para avaliar o grau de fragmentação de Q e NQ, o Contágio foi a que melhor descreveu a diferença entre as áreas. Considerando que esta é uma métrica do grau de aglomeração dos objetos da imagem, a fragmentação é definida como o complemento do contágio (1-contágio) (Vogt, 2014). Sendo assim, a região de uma imagem com valor alto de contágio possui baixo valor de fragmentação. Tal fato pode ser percebido na área queimada quando comparada à área não queimada (Figura 5).

Aqui também os valores de mediana foram estatisticamente comparados e apresentaram diferença significativa ($p < 0,05$). Um menor valor de mediana na área NQ indica maior concentração dos valores de fragmentação do lado esquerdo da distribuição. Ou seja, aparentemente há menor fragmentação das áreas NQ do que nas áreas Q ocasionada pela presença de Bambu. Este resultado subsidia uma hipótese de retroalimentação do sistema onde o Bambu aumenta a vulnerabilidade das florestas ao fogo (Smith e Nelson, 2010) e posteriormente se beneficia deste impacto para dominar a área (Keeley e Bond, 1999).

O ciclo de vida do Bambu tende a seguir o ciclo do fogo (Keeley e Bond, 1999). Além disso, através de imagens Landsat, Smith e Nelson (2010) observaram manchas de colônias de Bambu mortas apresentando bordas com formatos arredondados como as de cicatrizes de fogo. Estes autores também verificaram que uma área de floresta dominada por Bambu leva de dois a três anos para retornar a área basal antes do fogo. Esta última constatação está de acordo com a janela de tempo de nosso estudo, que analisou manchas queimadas em 2010 com imagem de 2012.

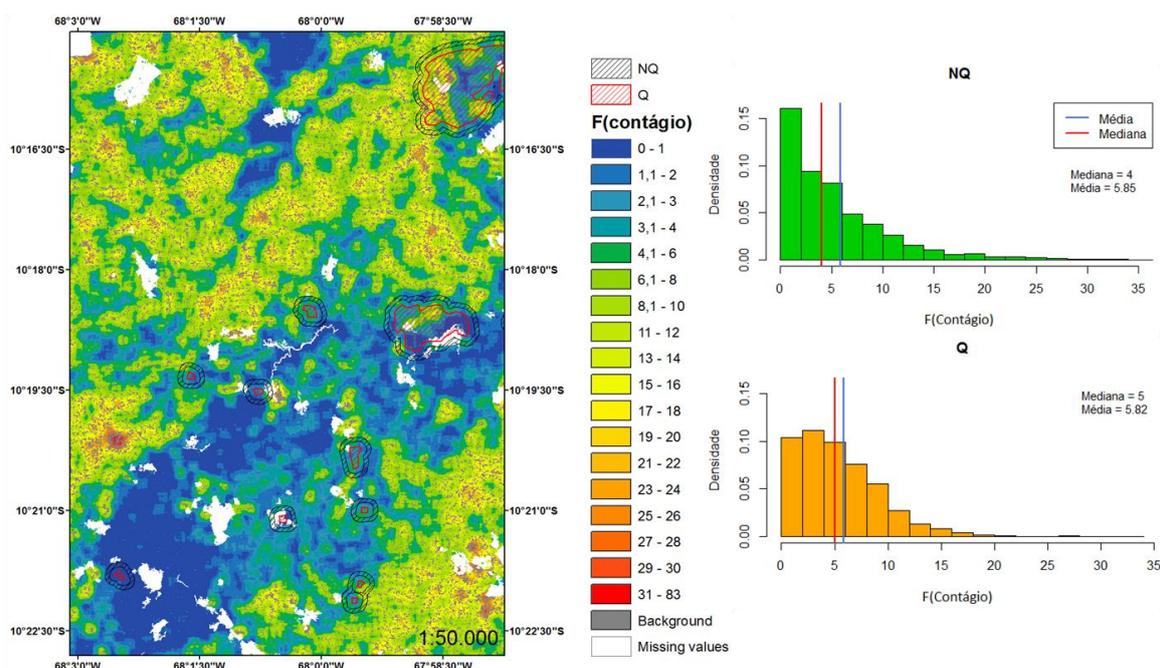


Figura 5. À esquerda: mapa da Fragmentação em função do Contágio de uma porção da área de estudo, com os limites das amostras de NQ e Q. À direita: distribuição de valores da Fragmentação em função do Contágio para as áreas Q e NQ.

Os resultados sugerem que os povoamentos de Bambu se regeneraram após o fogo fragmentando a floresta com mais intensidade. Entretanto, os efeitos em longo prazo do fogo na expansão do Bambu e na estrutura da floresta precisam ser avaliados através do monitoramento contínuo dessa área. Estudos relatam que as florestas do sudoeste da Amazônia dominadas por Bambu possuem maior resiliência ao fogo do que florestas dominadas por Bambu do leste e centro da Amazônia (Barlow *et al.*, 2012). Todavia, considerando um cenário de secas, a alta inflamabilidade das florestas de Bambu e o favorecimento de espécies do Bambu pelo fogo (Nelson e Irmão, 1998; Smith e Nelson, 2010; Barlow *et al.*, 2012; McMichael *et al.*, 2013) deve-se encorajar a continuidade de estudos como este.

4. Conclusões e recomendações

Os resultados indicaram que apesar do impacto do fogo na estrutura das árvores vivas não ser evidente um ano após a queima, há mais árvores mortas na área queimada. Seria, portanto, necessário avaliar a taxa *turnover* e o tempo de residência da biomassa nessa área para que se compreenda melhor o impacto local do fogo na ciclagem do carbono em florestas dominadas por Bambu.

Os dados espectrais provenientes da imagem RapidEye mostraram resultados satisfatórios na diferenciação das áreas queimadas e não queimadas. A aquisição de imagens futuras para a continuidade das análises sobre o mesmo local é desejável para a investigação das mudanças espectrais ao longo do tempo.

Seria recomendável ainda tirar maior proveito da resolução espacial das imagens RapidEye para aprimorar os resultados da classificação. A união dos atributos espectrais com atributos referentes à textura e ao formato dos objetos pode gerar melhores resultados sobre o nível de fragmentação da floresta e a expansão do Bambu.

Embora tenha sido constatada maior fragmentação da floresta pelo Bambu na área queimada, é fundamental a continuidade do monitoramento em campo e por dados de sensores remotos para que se compreenda a relação do fogo com a expansão do Bambu e as possíveis alterações na estrutura da floresta no Acre.

Por fim, pôde-se concluir que a análise do padrão da paisagem por meio de métricas de fragmentação e composição disponibilizadas pelo software Guido ToolBox foi bem sucedida, e é recomendada para aplicação futura de dados históricos.

Agradecimentos

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq- Processo: 458022/2013-6) pela concessão da bolsa DTI para a primeira autora. Ao Dr. Peter Vogt da Instituição Européia JRC (*Joint Research Centre*) pelo auxílio no uso do software Guido ToolBox. L.E.O.C.A. agradece ao CNPq pela bolsa de produtividade processo 304425/2013-3 e ao MCTI/CNPq/FNDCT – Ação Transversal - nº 68/2013 – Programa de Grande Escala da Biosfera-Atmosfera na Amazônia – LBA processo 458022/2013-6 e ao Programa Ciência sem Fronteiras (CNPq). Os autores do grupo TREES são: Izaías Brasil da Silva (UFAC), Bruno Simionato Castro (ICV), Lucas Souza Silva (WWF), Jomar Marques da Silva Junior (UENF) e Letícia Kirsten (INPE).

Referências Bibliográficas

- Aragão, L. E. O. C.; Malhi, Y.; Barbier, N.; Lima, A.; Shimabukuro, Y.; Anderson, L.; Saatchi, S. Interactions between rainfall, deforestation and fires during recent years in the Brazilian Amazonia. **Philosophical transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological sciences**, v. 363, n. 1498, p. 1779–85, 2008.
- Barlow, J.; Silveira, J. M.; Mestre, L. A M.; Andrade, R. B.; Camacho D'andrea, G.; Louzada, J.; Vaz-De-Mello, F. Z.; Numata, I.; Lacau, S.; Cochrane, M. A. Wildfires in bamboo-dominated Amazonian forest: impacts on above-ground biomass and biodiversity. **PloS one**, v. 7, n. 3, p. 11, 2012.
- Huete, A. R. et al. A Comparison of Vegetation Indices over a Global Set of TM Images for EOS-MODIS. **Remote Sens. Environ**, n. 59, p.440 - 451, 1997
- Keeley, J. E.; Bond, W. J. Mast Flowering and Semelparity in Bamboos : The Bamboo Fire Cycle Hypothesis. **The American Naturalist**, v. 154, n. 3, p. 383–391, 1999.
- Mann, H. B.; Whitney, D. R. On a test of whether one of two random variables is stochastically larger than the other. **The Annals of Mathematical Statistics**, v. 18, n. 1, p. 50–60, 1947.
- Matthew, M. W.; Adler-Golden, S. M.; Berk, A.; Richtsmeier, S. C.; Robert, Y.; Bernsteina, L. S.; Acharyaa, P. K.; Anderson, G. P.; Feldeb, G. W.; Michael, P.; Ratkowskib, A.; Burke, H.; Kaiserd, R. D.; Millerd, D. P. Status of atmospheric correction using a MODTRAN4-based algorithm. **Proceedings of SPIE**, v. 4049, p. 199–207, 2000.
- McMichael, C. H.; Bush, M. B.; Silman, M. R.; Piperno, D. R.; Raczka, M.; Lobato, L. C.; Zimmerman, M.; Hagen, S.; Palace, M. Historical fire and bamboo dynamics in western Amazonia. **Journal of Biogeography**, v. 40, n. 2, p. 299–309, 2013.
- Nelson, B. W.; Irmão, M. N. Fire penetration in standing Amazon forests B. In: IX Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Santos, Brasil: INPE, 1998. p. 1471–1482
- Ponzoni, F. J.; Shimabukuro, Y. E. **Sensoriamento Remoto no Estudo da Vegetação**. São José dos Campos: Parêntese, 2010.
- Riitters, K. H.; Wickham, J. D.; Wade, T. G. An indicator of forest dynamics using a shifting landscape mosaic. **Ecological Indicators**, v. 9, n. 1, p. 107–117, 2009.
- Rouse J. W.; Haas Jr, R. H.; Schell J. A. and D. W. Deering, “Monitoring vegetation systems in the Gre at Plains with ERTS”, Third ERTS Symposium , NASA SP-351 I, 309–317, 1973.
- Smith, M.; Nelson, B. W. Fire favours expansion of bamboo-dominated forests in the south-west Amazon. **Journal of Tropical Ecology**, v. 27, n. 01, p. 59–64, 2010.
- Vogt, P. **GuidosToolbox (Graphical User Interface for the Description of image Objects and their Shapes)**. . Ispra (VA), Italy: Joint Research Centre (JRC) - Institute for Environment and Sustainability (IES). Disponível em: <<http://forest.jrc.ec.europa.eu/download/software/>>. , 2014