

Análise espaço-temporal da ocorrência de focos de calor e fragmentação florestal na Amazônia Brasileira

Laura Barbosa Vedovato¹
Egidio Arai¹
Liana Oighenstein Anderson²
Luiz Eduardo Oliveira e Cruz de Aragão^{1,3}

¹Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE
Caixa Postal 515 - 12227-010 - São José dos Campos - SP, Brasil
{laurabv, egidio, laragao}@dsr.inpe.br

²Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais – CEMADEN
CEP: 12630-000, Cachoeira Paulista, SP, Brasil

³College of Life and Environmental Sciences, University of Exeter, Exeter EX4 RJ, UK

Abstract. This work aimed carrying out a spatio-temporal analysis of the relationship between fire hot spots and fragmentation in the Brazilian Amazon from 2003 to 2014. We used fire hot spots data from the MCD14ML product of the MODIS sensor. Morphological Spatial Pattern Analysis (MSPA) methodology was used to calculate forest fragmentation metrics. This technique provides various landscape classes such core area, islet, loop, bridge, perforation, edge and branch. The loop, bridge and branch classes for having the same function of connecting different extremities were united into a single class called corridor. A correlation analysis per pixel (Pearson's Coefficient – R) was carried out over the time series to understand the relationship between fire hot spots and the fragmentation classes. The class of fragmentation that presented the largest number of significant cells correlated with the occurrence of hot spots was the corridor with 23.9% of all cells, followed by core area (16.7%), perforation (13%), edge (11.7%) and islet (5.1%). We conclude therefore that the classes most exposed to anthropic influences and of smaller sizes are the most susceptible to events of fire. The mitigation of deforestation and consequent forest fragmentation, and fire events is essential for the preservation and conservation of the Amazonian ecosystem.

Palavras-chave: Amazon, fragmentation, fire, Amazônia, fragmentação, focos de calor

1. Introdução

O uso e mudança da cobertura da terra muitas vezes é acompanhado da ocorrência do fogo, que facilita a derrubada de árvores e limpeza da área. Porém, o descontrole do fogo pode levar a perda de extensas áreas florestais, emitindo quantidades significativas de CO₂ para a atmosfera. Além disso, este processo torna a floresta cada vez mais susceptível a novos eventos de queimadas, sendo este o principal responsável pela secundarização florestal (Cochrane e Schulze, 1999; Barlow e Peres, 2008).

O contínuo aumento da degradação e destruição dos ecossistemas naturais se caracterizam como causas principais do declínio da biodiversidade global (Pereira et al., 2010; Rands et al., 2010; Barlow et al., 2016). Estes processos levam à fragmentação e divisão dos habitats em fragmentos menores e isolados que são separados por uma matriz de uso antrópico, sofrendo alterações na sua estrutura e função ecológica (Lindenmayer e Fischer, 2006). A fragmentação da floresta resulta em várias influências do efeito de borda, como alterações na incidência de luz, vento e umidade. Estas mudanças aumentam o ressecamento da floresta, afetando estruturalmente sua composição e consequentemente os fluxos de energia e biomassa, aumentando a predisposição da floresta ao fogo (Cochrane e Laurance, 2002; Harper et al., 2005; Laurance et al., 2011).

A influência da fragmentação da floresta na ocorrência de eventos de fogo vem sendo estudada há vários anos. Cochrane e Laurance (2002), já haviam estudado essa problemática para o período de 1984 a meados da década de 90, mostrando que os incêndios iniciados nas fronteiras de fragmentos florestais neste período chegaram até 2.400 metros para o interior da

floresta. O estudo de Armenteras et al. (2013) mostra que a Amazônia colombiana apresenta um efeito de borda em grande escala, mostrando que os efeitos abióticos interferem no aumento dos incêndios da região. A distância média em que foram detectados os efeitos de borda em relação aos incêndios são próximos a 2 km da borda para o interior. Esse valor corrobora com estudos realizados anteriormente em outras regiões da Amazônia, com cerca de 2 a 3 km (Cochrane e Laurance, 2002) e de 1 a 2,7 km (Briant et al., 2010). Os autores também pontuam que as áreas protegidas e as reservas indígenas são de grande valia para preservação e integridade da área.

Este trabalho tem como objetivo analisar a dependência espaço-temporal da ocorrência de focos de calor no bioma amazônico em relação a diferentes classes de fragmentação como área de borda, corredor, ilha, perfuração e também área core para a série temporal de 2003 a 2014.

2. Dados e metodologia

2.1 Área de estudo

A área de estudo corresponde ao bioma amazônico dentro da extensão da Amazônia Brasileira (Figura 1). Esta área equivale a 59% do território brasileiro (IPEA, 2008) com aproximadamente 5 milhões de km². A Amazônia Brasileira abrange os estados do Acre, Amapá, Amazonas, Pará, Rondônia, Roraima, Mato Grosso, e parte dos estados do Tocantins e Maranhão. Sua vegetação predominante é a floresta ombrófila densa (IBGE, 2004). Possui clima equatorial, quente e úmido, com temperatura média de 28°C. Possui chuvas abundantes, sendo a precipitação anual média de 2.000 mm, podendo ultrapassar os 3.000 mm na foz do rio Amazonas e no Amapá. O Amazonas é seu principal rio e deságua no Atlântico, lançando cerca de 175 milhões de litros d'água por segundo (MMA, 2015).



Figura 1. Localização da área de estudo. A linha preta grossa corresponde ao limite do bioma amazônico brasileiro e as linhas pretas finas aos limites dos países da América do Sul.

2.2 Focos de calor

Os dados de focos de calor ativos foram obtidos anualmente para a série temporal de 2003 a 2014 pelo programa *Fire Information for Resource Management System* - FIRMS gerenciado pela NASA. Os focos de calor do programa FIRMS são detectados pelo sensor MODIS que está a bordo dos satélites Terra e Aqua. Este sensor está em funcionamento desde 1999 a bordo do satélite Terra e desde 2002 a bordo do satélite Aqua, e em funcionamento até os dias atuais, abrangendo a série temporal deste trabalho. Possui resolução temporal de 1 a 2 dias, com horário de passagem no Equador às 10:30h (Terra) e 13:30h (Aqua). Este sensor possui 36 bandas que estão dispostas em função do comprimento de onda para a observação

das feições das propriedades das nuvens, dinâmica e propriedades da vegetação na cobertura terrestre, e temperatura da superfície dos oceanos (Salomonson e Toll, 1991).

O produto do sensor MODIS utilizado para as informações referentes aos focos de calor foi o MCD14ML. Este produto possui resolução espacial de 1 km e dados obtidos duas vezes ao dia (13:30h e 01:30h). Optou-se por usar os dados referentes somente ao satélite Aqua com horário de passagem às 13:30h. A detecção dos focos de calor é baseada na emissão destes alvos nos comprimentos de onda aproximadamente $4\mu\text{m}$ (bandas 20 a 23) e $11\mu\text{m}$ (bandas 31 e 32) (Piromal et al., 2008). São realizados testes para excluir alarmes típicos falsos como brilho de sol ou litorais (USGS, 2014).

2.3 Fragmentação florestal

Para a análise dos processos de fragmentação da floresta Amazônica utilizou-se a metodologia *Morphological Spatial Pattern Analysis* (MSPA) (Soille e Vogt, 2009) que foi inserida no software livre GUIDOS Toolbox (*Graphical User Interface for the Description of Image Objects and their Shapes*) desenvolvido pelo Centro de pesquisa *Joint Research Center* (Vogt, 2014). Esta metodologia se estrutura em uma sequência de operadores morfológicos matemáticos voltados para a descrição da geometria e da conectividade dos componentes da imagem. Esse método pode ser aplicado para qualquer resolução espacial. A imagem de entrada deve ser binária, classificada entre o objeto de interesse e a área complementar. A imagem de saída gerada pela MSPA (Figura 2) fornece várias classes da paisagem, que são:

- a) *Core*: área interna do primeiro plano, excluindo seu perímetro;
- b) *Ilha*: fragmentos disjuntos no primeiro plano e que são muito pequenos para ter área Core;
- c) *Corredor Interno*: conecta extremidades na mesma área Core;
- d) *Corredor Externo*: conecta extremidades de diferentes áreas Cores;
- e) *Perfuração*: perímetro interno do fragmento do primeiro plano;
- f) *Borda*: perímetro externo do fragmento do primeiro plano;
- g) *Apêndice Florestal*: conecta uma extremidade a borda, perfuração e corredores.

O cálculo da fragmentação para cada classe está detalhado no trabalho de Soille e Vogt (2009).

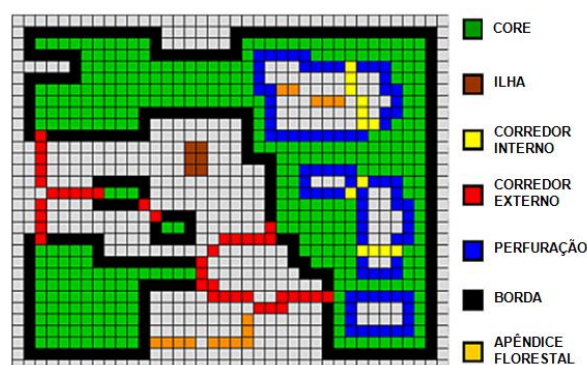


Figura 2. Representação das classes da métrica MSPA. Fonte: Adaptado de Vogt (2014).

Para o cômputo das classes de fragmentação é necessário estipular o valor de um parâmetro crítico que distingue estas classes, chamado de “largura da borda”. Este parâmetro define a distância entre a borda da floresta para seu interior e é estabelecido de acordo com a unidade mínima da imagem, o pixel. Neste estudo, o menor valor para o parâmetro é de 60m, que corresponde a resolução espacial da imagem de floresta binária utilizada para o cômputo da fragmentação. Porém, baseado em estudos prévios de fragmentação florestal (Vedovato,

2016) optou-se pela distância de 120m (que corresponde a 2 pixels) para a classificação da fragmentação.

2.3.1 Geração dos dados de floresta

Os dados anuais de floresta foram necessários para servir de entrada no cálculo da fragmentação. Para a elaboração destes, utilizaram-se os dados do projeto TerraClass, visto que estes dados já estão livres das interferências das nuvens. Utilizou-se deste acervo o mapeamento da classe “floresta” para os anos de 2008, 2010 e 2012. A partir destes dados disponibilizados e das imagens de desmatamento do PRODES, foi possível realizar uma álgebra de mapas para elaborar os dados de floresta dos anos indisponíveis. Os dados de floresta resultantes possuem resolução espacial de 60 metros, visto que tanto os dados do TerraClass quanto do PRODES são disponibilizados nesta resolução. O exemplo do cálculo está ilustrado na Figura 3.

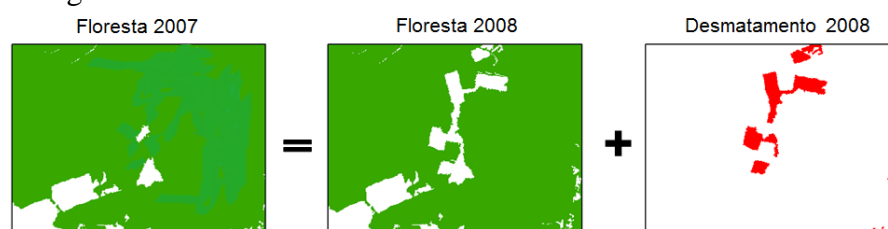


Figura 3. Geração de imagens de floresta em anos não disponíveis pelo TerraClass.

Como se pode visualizar o dado de floresta de 2007 foi elaborado somando-se o dado de floresta de 2008 com o desmatamento ocorrido em 2008. Esse mesmo procedimento foi aplicado para os demais anos permitindo aplicar as métricas de fragmentação para toda a série temporal de 2003 a 2014.

2.3.2 Extração das classes de fragmentação

A partir das imagens de floresta da série temporal de 2003 a 2014, foi possível processar a fragmentação pelo método MSPA, utilizando-se o parâmetro de 120m (2 pixels). O resultado deste processamento é um mapa para cada ano da série temporal, possuindo todas as classes de fragmentação. Para realizar as análises de correlação de cada classe de fragmentação com os focos de calor, foi necessário separar estas classes. Cada uma das classes de fragmentação é representada por valores associados com as bandas RGB da imagem, e a partir desses valores é possível separar as classes e salvá-las em arquivos distintos. Este procedimento foi executado pelo software de programação *Interactive Data Language* (IDL). As classes de corredor externo, corredor interno e apêndice florestal por possuírem a mesma função de conectar fragmentos (seja entre duas áreas Core, entre extremidades diferentes em uma mesma área Core ou conectar uma extremidade a Borda ou outros tipos de classe), foram unidas e transformadas em uma nova classe chamada “Corredor”.

2.4 Reamostragem dos dados para análises estatísticas

Visando a redução do tempo de processamento e viabilidade das análises estatísticas, as imagens de fragmentação geradas e de focos de calor foram reescaladas para a resolução espacial de 0,25°.

Para o cálculo dos focos de calor, foram quantificados o número de focos em cada célula de 0,25°. Já para o cálculo das imagens de fragmentação, utilizou-se a função *Pixel Aggregator* inserida no software IDL, pela qual foi possível transformar as áreas (km²) das referentes classes de fragmentação em porcentagem dentro de cada célula de 0,25°.

2.5 Análises

Para o entendimento da relação dos focos de calor com as distintas classes de fragmentação na série temporal em estudo realizou-se uma análise de correlação por pixel, a qual utiliza o coeficiente de Pearson (R) que varia de -1 a 1, indicando a força da relação entre as variáveis, sendo que o R próximo a -1 indica uma relação inversa, valores de R próximos a 0 indicam pouco relacionamento entre as variáveis e valores de R próximos a 1 indicam uma relação direta entre as variáveis. Essa análise foi realizada pixel a pixel ao longo da série temporal, gerando mapas finais com valores indicando o grau de correlação entre os focos de calor e cada classe de fragmentação analisada. A Figura 4 exemplifica o processo para a análise entre os focos de calor e a classe de borda. Este mesmo processo foi realizado entre os focos de calor e as demais classes de fragmentação (variáveis independentes).

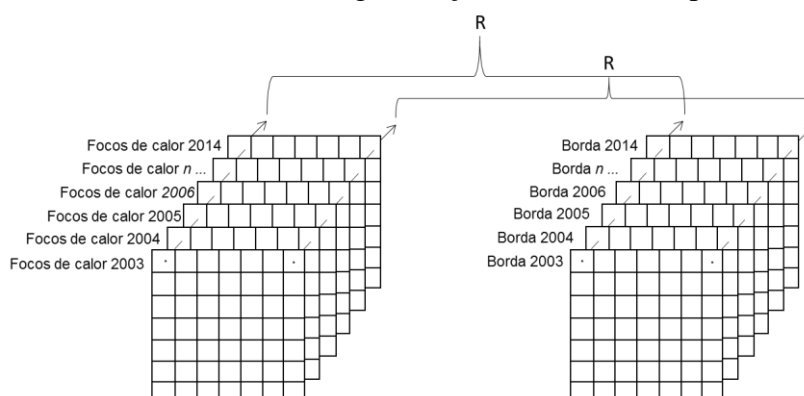


Figura 4. Esquema da análise de correlação espaço-temporal entre focos de calor e borda florestal.

O cálculo do coeficiente de Pearson (R) é realizado pela Equação 1.

$$R = \frac{\sum(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum(x_i - \bar{x})^2 \sum(y_i - \bar{y})^2}} \quad (1)$$

Onde, x_i é o valor da variável independente, \bar{x} , a média da variável independente, y_i , o valor da variável dependente e \bar{y} a média da variável dependente, sendo que a variável dependente é sempre representada pelos focos de calor.

3. Resultados e Discussão

As figuras 5 a 9 correspondem a correlação temporal por pixel dos focos de calor com as classes de fragmentação analisadas. O gráfico a esquerda de cada figura mostra a frequência das células em diferentes níveis de significância ($p < 0,001$; $p < 0,01$; $p < 0,05$; $p < 0,1$) para a correlação dos focos de calor com as classes de fragmentação, sendo em tons verdes correlações negativas e em tons vermelhos correlações positivas entre os focos de calor e as classes de fragmentação.

A classe de borda (Figura 5) apresentou poucas células correlacionadas positivamente com os focos de calor, sendo que as com significância de $p < 0,1$ correspondem a 11,7% do total de células. Já a classe corredor (Figura 6) possui uma concentração de células positivamente correlacionadas com os focos de calor nos estados do Mato Grosso, Rondônia e no nordeste do Pará. Estas células positivamente correlacionadas e com significância de $p < 0,1$ correspondem a 23,9% do total de células. Na classe de fragmentação referentes a ilha (Figura 7) a maioria das células significativas ($p < 0,1$) apresentam correlação negativa com os focos de calor correspondendo a 19,5% do total de células, já as células significativas positivamente correlacionadas correspondem a 5,1%. A classe referente a perfuração (Figura 8) apresentou a maioria de suas células significativas ($p < 0,1$) positivamente correlacionadas

com os focos de calor, possuindo um total de 13% de suas células. Já na classe core (Figura 9) as células significativas ($p < 0,1$) positivamente correlacionadas representam 16,7% do total de células.

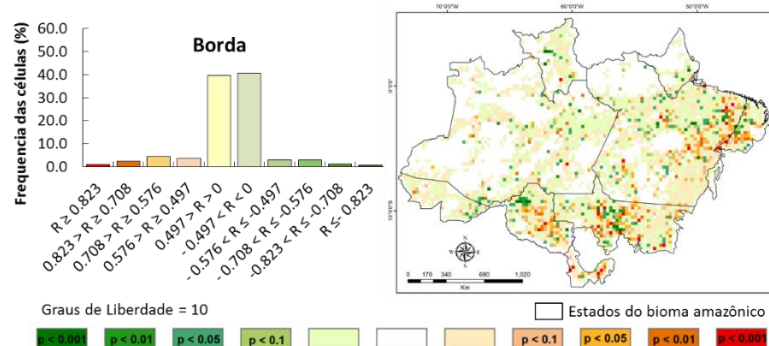


Figura 5. Correlação temporal por pixel dos focos de calor com classe de fragmentação borda.

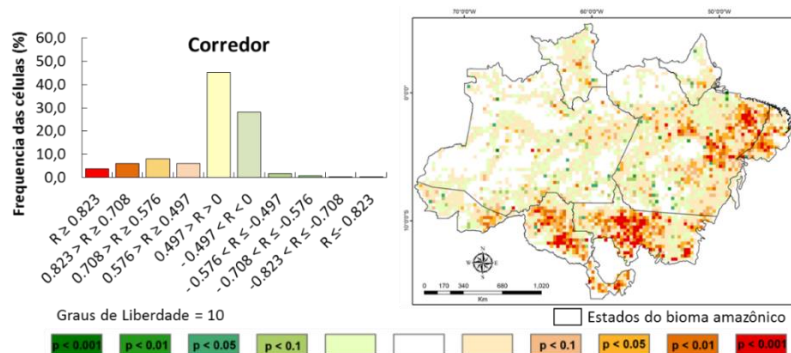


Figura 6. Correlação temporal por pixel dos focos de calor com classe de fragmentação corredor.

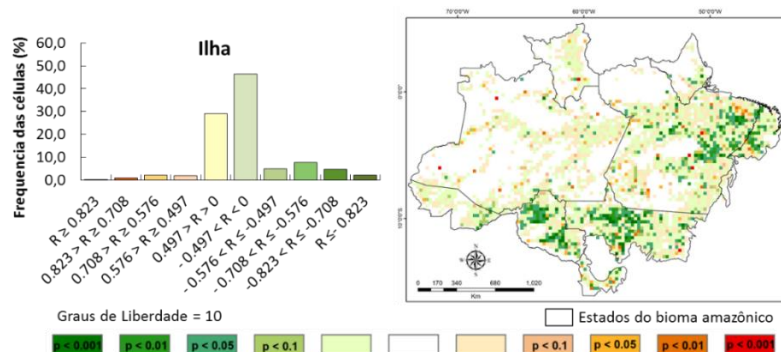


Figura 7. Correlação temporal por pixel dos focos de calor com classe de fragmentação ilha.

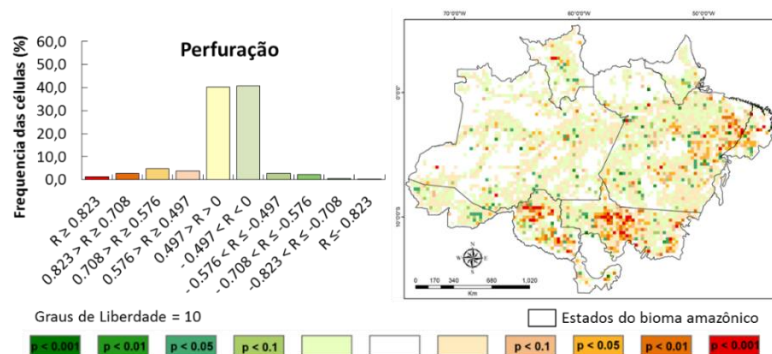


Figura 8. Correlação temporal por pixel dos focos de calor com classe de fragmentação perfuração.

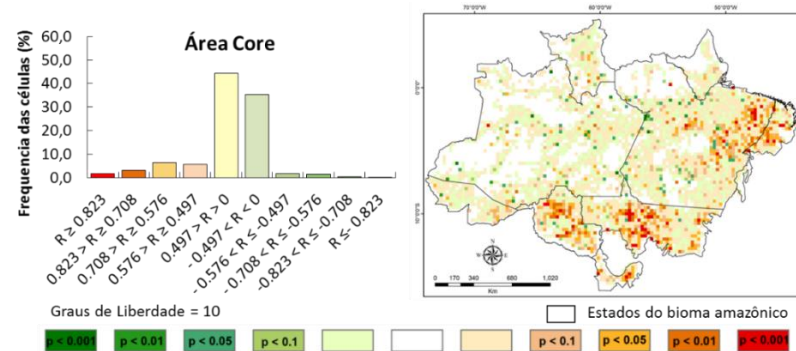


Figura 9. Correlação temporal por pixel dos focos de calor com classe de fragmentação core.

É possível perceber que as células significativas tanto positivas quanto negativas sempre se localizam nas mesmas regiões que compreendem os estados do Mato Grosso, Rondônia e nordeste do Maranhão. Essas são áreas que possuem florestas muito fragmentadas, seguidas de um histórico processo de desmatamento e degradação. A classe que apresentou a maior quantidade de células significativas positivamente correlacionadas com os focos de calor foi corredor (23,9%), seguida pelas classes core (16,7%), perfuração (13%), borda (11,7%) e ilha (5,1%).

Os corredores florestais acabam se tornando mais susceptíveis a ocorrência de fogo pois seu entorno fica exposto a influências antrópicas. A classe core também apresentou alta correlação com os focos de calor pois o parâmetro utilizado (120m) corresponde a fragmentos florestais de pequenas dimensões que são mais susceptíveis aos efeitos de borda e consequente eventos de fogo. As perfurações florestais correspondem a áreas de clareiras abertas, muitas vezes para extração seletiva de madeiras, início de aberturas de áreas para plantio, que por sua vez utilizam o fogo para manejo, explicando as correlações positivas entre o fogo e esta classe. A classe de borda apresentou menos células significativas positivamente correlacionadas do que a classe de corredor. Pode-se inferir que esta classe possui menos correlação com os focos de calor, pois ela possui menos áreas expostas as influências antrópicas quando comparada aos corredores, já que somente um de seus lados fica exposto a incursão do fogo. Já a classe de ilha apresentou a maior quantidade de suas células significativas negativamente correlacionadas com os focos de calor. Esta tendência ocorreu nos mesmos locais citados com alta incidência de fragmentação. Pode-se inferir que estas correlações significativas negativas estão ocorrendo, devido à maior susceptibilidade desta classe ao desmatamento ao longo do tempo, desaparecendo durante a série temporal e não permitindo correlações significativas positivas com os focos de calor, e consequentemente apresentando células significativas negativas.

4. Conclusões

O crescente número de focos de calor na Amazônia Brasileira está correlacionado com aumento da fragmentação florestal. Entre as classes de fragmentação analisadas a classe de corredor apresentou o maior número de células significativas positivamente correlacionadas com os focos de calor (23,9%). É possível concluir que as classes que possuem maior exposição a influências antrópicas e de menores tamanhos são as mais susceptíveis aos eventos de focos de calor. A mitigação do desmatamento e consequente fragmentação florestal, e de eventos de queimadas é imprescindível para a preservação e conservação do ecossistema amazônico.

Agradecimentos: A primeira autora e L.E.O.C.A. agradece ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) (processos 300504/2016-0, 304425/2013-3 e 458022/2013-6).

Referências bibliográficas

- Armenteras, D.; González, T. M.; Retana, J. Forest fragmentation and edge influence on fire occurrence and intensity under different management types in Amazon forests. **Biological Conservation**, v. 159, p. 73–79, 2013.
- Barlow, J.; Lennox, G. D.; Ferreira J. et al. Anthropogenic disturbance in tropical forest can double biodiversity loss from deforestation. **Nature**, v. 535, p. 144–147, 2016.
- Barlow, J.; Peres, C. A. Fire-mediated dieback and compositional cascade in an Amazonian forest. **Philosophical Transactions of the Royal Society of London**, v. 363, p. 1787–1794, 2008.
- Briant, G.; Gond, V.; Laurance, S. G. W. Habitat fragmentation and the desiccation of forest canopies: A case study from eastern Amazonia. **Biological Conservation**, v. 143, p. 2763–2769, 2010.
- Cochrane, M. A.; Laurance, W. F. Fire as a large-scale edge effect in Amazonian forests. **Journal of Tropical Ecology**, v. 18, p. 311–325, 2002.
- Cochrane, T. T.; Schulze, M. D. Fire as a recurrent event in tropical forests of the eastern Amazon: effects on forest structure, biomass, and species composition. **Biotropica**, v. 31, p. 2–16, 1999.
- Harper, K. A.; Macdonald, S. E.; Burton, P. J.; et al. Edge influence on forest structure and composition in fragmented landscapes. **Conservation Biology**, v. 19, n. 3, p. 768–782, 2005.
- Laurance, W. F. et al. The fate of Amazonian forest fragments: A 32-year investigation. **Biological Conservation**, v. 144, n. 1, p. 56–67, 2011.
- Lindenmayer, D. B.; Fischer, J. **Habitat fragmentation and landscape change: an ecological and conservation synthesis**. Washington, DC: Island Press, 2006.
- Pereira, H. M.; Leadley, P.W.; Proença, V. et al. Scenarios for global biodiversity in the 21st century. **Science**, v. 330, p.1496–1501, 2010.
- Rands, M. R. W.; Adams, W. M.; Bennun, L. et al. Biodiversity conservation: Challenges beyond 2010. **Science**, v. 329, p.1298–1303, 2010.
- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatísticas (IBGE). **Mapa de Biomas do Brasil**. 2004.
- Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (IPEA). **O que é? Amazônia Legal**. Desafios do Desenvolvimento, Ano 5. ed. 44. 08 de jun. de 2008.
- Ministério do Meio Ambiente (MMA). **Amazônia**. Brasília, 2015.
- Salomonson, V. V.; Toll, D. L. Execution phase (C/D) spectral band characteristics of the EOS moderate resolution imaging spectrometer-Nadir (Modis-N) facility instrument. **Adv. Space Res**, v.11, n. 3, p. 231–236, 1991.
- Piromal, R. A. S.; Rivera-Lombardi, R. J.; Shimabukuro, Y. E.; Formaggio, A. R.; Krug, T. Utilização de dados MODIS para a detecção de queimadas na Amazônia. **Acta Amazonica**, v. 38, n. 1, p. 77–84, 2008.
- United States Geological Survey (USGS). **Thermal anomalies & fire 5-Min L2 Swath 1km**. 2014.
- Soille, P.; Vogt, P. Morphological segmentation of binary patterns. **Pattern Recognition Letters**, v.30, p. 456–459, 2009.
- Vedovato, L. B. **Análise espaço-temporal do desacoplamento dos padrões de fogo e desmatamento na Amazônia**. 2016. 97 p. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos. 2016. Disponível em: <<http://mtc-m21b.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/mtc-m21b/2016/03.22.23.21/doc/publicacao.pdf>>.
- Vogt, P. Guidos toolbox (graphical user interface for the description of image objects and their shapes): **Digital image analysis software collection**. 2014.