

O papel da fragmentação e do efeito de borda na ocorrência e intensidade de incêndios florestais na Amazônia

Celso Henrique Leite Silva Junior ¹
Luiz Eduardo Oliveira e Cruz de Aragão ¹
Liana Oighenstein Anderson ²
Maria Isabel Sobral Escada ¹

¹Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE
Av. dos Astronautas, 1758 - 12227-010 - São José dos Campos - SP, Brasil
celso.junior@inpe.br, laragao@dsr.inpe.br, isabel@dpi.inpe.br

²Centro Nacional de Monitoramento e Alerta de Desastres Naturais – CEMADEN
Est. Dr. Altino Bondensan, 500 - 12247-016 - São José dos Campos - SP, Brasil
liana.anderson@cemaden.gov.br

Abstract. The Amazon region is home to half of the tropical forests. Historically, the occupation was limited by low soil fertility and distance of the great urban centers. Due to the expansion of timber industries, agriculture and livestock activities, deforestation has intensified significantly in the last decades. In this context, the present study has as main purposes to analyze the role of the fragmentation and edge effect in the occurrence and intensity of fires in forested areas in the Amazon. We used forest cover, heat active fires and FRP - Fire Radiative Power data. We performed landscape metrics; we made the correlation of the variables through linear regression, as well as test the significance of the FRP for different distances from the edges. We found that the fragmentation and edge effect strongly determine the occurrence of fires. Fire intensity was better related to fragmentation. We also identified that the fires are less intense only from the third kilometer from the edges in forest areas. About 95.31% and 98.33% of the fires occurred in the first kilometer from the edges in forest and deforested areas, respectively.

Keywords: efeito de borda, estado do Pará, floresta, MODIS, Collection 6, Amazon, fragmentation.

1. Introdução

A região amazônica abriga mais da metade das florestas tropicais remanescentes do mundo (Laurance e Vasconcelos, 2009). Historicamente, a ocupação humana nessas áreas era limitada pela baixa fertilidade dos solos e pela grande distância aos maiores centros urbanos, no entanto, nas últimas décadas, devido aos incentivos dados pelo governo para a colonização da região, que resultou na expansão das atividades ligadas à agricultura, pecuária e extração madeireira, que vem intensificando o desmatamento na região (Laurance e Vasconcelos, 2009). O desmatamento causa fragmentação e o aumento das bordas devido à redução da área florestal, resultando em efeitos negativos, como o aumento da suscetibilidade da floresta a ocorrência de queimadas (Aragão e Shimabukuro, 2010; Berenguer *et al.*, 2014). Além disso, mais recentemente, foi descoberto que perturbações antropogênicas como as queimadas, podem dobrar a perda da biodiversidade mediante o desmatamento de corte raso na Amazônia (Barlow *et al.*, 2016). Isto é relevante, pois além da perda de biodiversidade, o aumento do número de queimadas está associado ao aumento das emissões totais de carbono para a atmosfera, que tem sido associado às atuais mudanças climáticas (Solomon *et al.*, 2009).

Na Amazônia, além de estarem associadas às atividades de desmatamento, as queimadas são utilizadas como técnica de manejo em culturas e criação e manutenção de pasto para gado (Fearnside, 2005; Piromal *et al.*, 2008). A ocorrência dessas queimadas favorece a mortalidade de árvores, alterando a composição de espécies, estimulando a ocorrência de gramíneas e árvores mais adaptadas ao fogo, o que pode alterar a estrutura ecológica local (Veenendaal *et al.*, 2015). Além disso, o material particulado emitido para a atmosfera, altera

o regime da precipitação (Artaxo et al., 2014), causando também impacto significativo na qualidade do ar e problemas de saúde pública (Smith et al., 2014).

Eventos hidrológicos extremos e frequentes observados na região amazônica tem aumentado de forma significativa a ocorrência de queimadas (Aragão *et al.*, 2007; Marengo e Espinoza, 2016), favorecendo a ocorrência de fogo nas áreas de floresta, que contribui com as emissões de carbono para a atmosfera, imediatamente ou posteriormente com a morte e decomposição das árvores (Anderson et al., 2015; Carvalho Jr. et al., 2016).

Nesse contexto, o presente estudo tem como objetivo analisar o papel da fragmentação e do efeito de borda na ocorrência e intensidade das queimadas em áreas de floresta na Amazônia. Para isso, pretendemos responder às seguintes perguntas: (i) a fragmentação florestal e o efeito de borda influenciam na ocorrência e intensidade das queimadas em áreas de floresta? (ii) qual a influência da distância das bordas na ocorrência e intensidade das queimadas nas áreas de floresta e desmatada?

2. Materiais e Métodos

2.1 Área de Estudo

A área de estudo localiza-se na porção norte do município de Novo Progresso no estado do Pará (região sudoeste do estado) (Figura 1), com dimensões de 200 por 150 km, totalizando uma área total de 30.000 km² (3.000.000 de hectares). Para as análises foi considerada como unidade de paisagem 300 células de 10 por 10 km de dimensão (área de 100 km² ou 10.000 hectares).

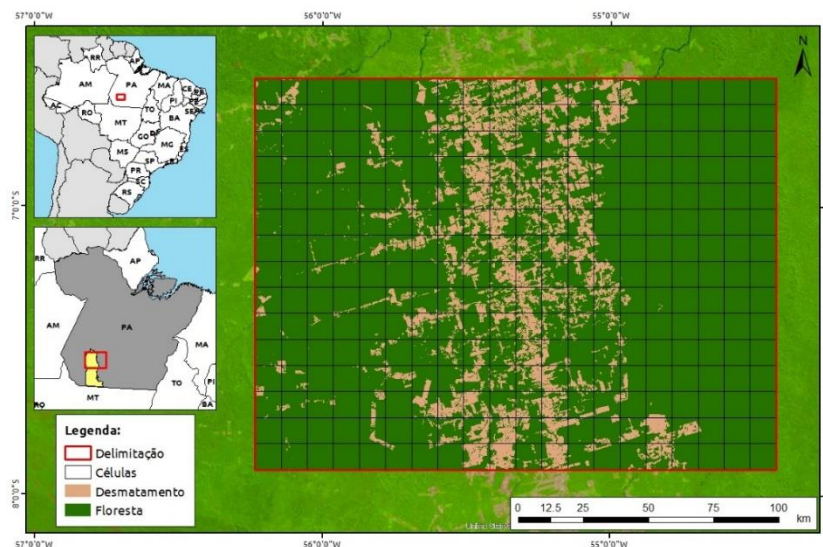


Figura 1. Mapa de localização da área de estudo.

Essa área é conhecida por ser uma fronteira de desmatamento com menos de 20 anos, semelhante a outras áreas na Amazônia, como o noroeste do Mato Grosso e sudeste do estado do Amazonas (Pereira *et al.*, 2010). A ocupação inicial dessa área está associada aos projetos de colonização governamentais e a constituição de infraestrutura rodoviária, principalmente da construção da BR-163 (Pinheiro, 2015). Nas décadas de 70 e 80 um fenômeno de colonização espontânea ocorreu na região, caracterizado pela ocupação de terras por pequenos produtores agrícolas com atividades predominantemente de subsistência ou por garimpeiros de ouro (Pinheiro, 2015). Um novo surto de ocupação ocorreu no final da década de 90 devido às expectativas de asfaltamento da BR-163, aumentando sobremaneira as taxas de desmatamento, que chegou a 740 km² em 2004. As áreas de floresta convertidas nessa região são destinadas principalmente a criação de gado (Pinheiro et al., 2016).

2.2 Base de Dados

2.2.1 Mapa de uso e cobertura da terra

O mapa de uso e cobertura do solo para o ano de 2014 foi obtido do site do Projeto de Monitoramento do Uso e Cobertura da Terra na Amazônia Brasileira - TerraClass (http://www.inpe.br/cra/projetos_pesquisas/dados_terraclass.php). Na elaboração desse mapeamento é utilizada uma combinação dos dados de desmatamento provenientes do PRODES (Projeto de Monitoramento da Floresta Amazônica Brasileira por Satélite) (INPE, 2016b) e dados de imagens orbitais dos satélites da série Landsat, MODIS e SPOT-5 (ALMEIDA *et al.*, 2016). O foco da classificação são as áreas de desmatamento acumulado até o ano anterior do ano do mapeamento. Para tal são utilizadas técnicas processamento digital de imagens e de classificação em ambiente computacional, além de interpretação visual, resultando em 12 classes de uso e cobertura da terra (ALMEIDA *et al.*, 2016). Esse mapeamento apresenta uma resolução espacial de 30 metros.

2.2.1 Focos de calor

Os dados de focos de calor para o ano de 2014 foram obtidos em base mensal (dados vetoriais em formato *shape file*) a partir do site FIRMS - *Fire Information for Resource Management System* (<https://earthdata.nasa.gov/earth-observation-data/near-real-time/firms>). Esses dados são derivados do produto de fogo ativo do MODIS (MCD14ML, Coleção 6), onde todos os focos estão ajustados para uma resolução espacial de 1 km.

Para gerar o produto mencionado, é utilizado um algoritmo contextual, onde são utilizadas as comparações entre as bandas do infravermelho médio e termal a imagens de referência (onde não ocorreram queimadas), em seguida, falsas detecções são rejeitadas pelo exame da temperatura de brilho em relação a pixels vizinhos (Giglio *et al.*, 2003).

Na coleção 6, aqui utilizada, foram implementadas melhorias no algoritmo em relação a coleção anterior, melhorando problemas como os de comissão e omissão, identificação de pequenas queimadas, além de uma nítida melhoria no desempenho global do produto (Giglio, Schroeder e Justice, 2016).

Na tabela de atributo dos dados de focos de calor é disponibilizado o valor do FRP (*Fire Radiative Power* ou Potência Radiativa do Fogo), esse é um indicador de intensidade da queimada. Esse valor está diretamente relacionado a quantidade de biomassa consumida durante a ocorrência de queimada, onde, quanto maior o valor de FRP, maior a quantidade de biomassa consumida pelo fogo (Mataveli *et al.*, 2015). Na coleção 6 foram implementadas melhorias para o cálculo do valor do FRP, para isso o algoritmo utilizado anteriormente foi modificado para o sugerido por Wooster *et al.* (2005).

2.3 Metodologia

2.3.1 Preparação dos dados

Os dados do mapa de uso e cobertura do solo foram reclassificados de maneira a agregar as classes originais em duas novas classes denominadas: Floresta e Área Desmatada. Na classe Floresta foram agrupadas as classes originais: Floresta, Vegetação Secundária, Não Floresta e Hidrografia. Na classe Área Desmatada: Agricultura Anual, Área Urbana, Desflorestamento 2014, Mineração, Mosaico de Ocupações, Outros, Pasto com Solo Exposto, Pasto Limpo, Pasto Sujo e Regeneração com Pasto.

A escolha por agregar áreas de Não Floresta (pequenos fragmentos na área de estudo) e Hidrografia na classe de floresta foi para evitar a inclusão de bordas naturais entre a floresta e essas classes nas análises.

2.3.2 Processamento dos dados

Utilizando a estrutura de célula, atribuímos para cada célula o total de focos em áreas de floresta e suas respectivas médias de FRP. Nas mesmas células calculamos as métricas de paisagem *TE* (*Total of Edge* - Total de Bordas) e *LPI* (*Largest Patch Index* - Índice do Maior Fragmento, aqui denominado IMF), derivadas do software Fragstats (McGarigal, 2015), utilizando o *plug-in* do LecoS (*Landscape Ecology Statistics*) (Jung, 2016), implementado no Quantum GIS (QGIS Development Team, 2016). Extraímos no mesmo *plug-in* as bordas formadas entre a interface floresta-áreas desmatadas.

A métrica *TE* foi dada pela somatória do comprimento de todas as bordas formadas entre a floresta e a área desmatada em cada célula considerada. Para o índice *LPI* calculamos a proporção do maior fragmento de floresta encontrado na célula em relação à sua área total. O *LPI* é considerado como um indicador de fragmentação e dominância do maior fragmento da paisagem (Liu *et al.*, 2016; Mesev, 2007). Pode ser interpretado da seguinte maneira: quanto mais próximo de 0%, significa que o menor fragmento da paisagem é cada vez menor, e quando se aproxima de 100% significa que tende a ter apenas um fragmento do tamanho total da paisagem (Vlek *et al.*, 2005).

2.3.3 Análises estatísticas

Para as análises de regressão linear foram escolhidas 30 células aleatórias e estratificadas, onde a cada 100 células em sequência foram sorteadas 10 células. Para verificar a existência de diferença significativa na intensidade das queimadas nas diferentes distâncias a partir de áreas de floresta, quanto em áreas desmatadas, utilizamos o teste de *Kruskal-Wallis*. Esse teste é equivalente a ANOVA (Análise de Variância), que compara três ou mais grupos para testar a hipótese de que eles possuam a mesma distribuição (Gibbons e Chakraborti, 2011). Os testes utilizados não pressupõem normalidade nos dados e também são pouco sensíveis a valores discrepantes (*outlier*). As análises de regressão e teste estatístico foram realizados no software R (R Core Team, 2016). Para isso, adotamos o nível de significância de 5% em todas as análises.

3. Resultados

Encontramos uma relação linear significativa entre a ocorrência de queimadas, nível de fragmentação (Figura 2A) e total de bordas (Figura 2B). Observamos que a ocorrência de queimadas tendeu a aumentar à medida que a fragmentação e a quantidade de bordas cresceu na paisagem. As queimadas foram explicadas em cerca de 86,4% e 78% pelo IMF e bordas respectivamente.

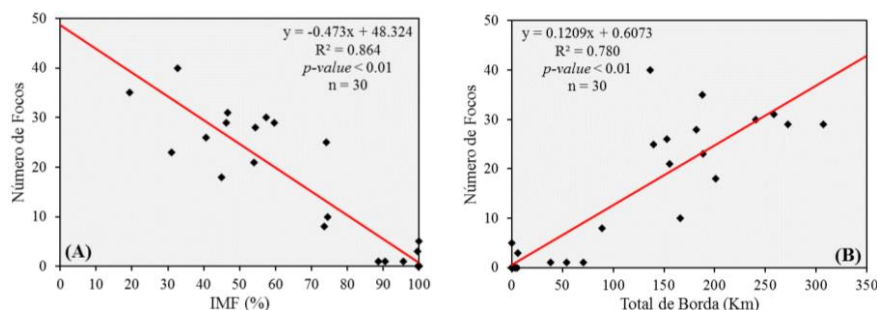


Figura 2. Regressão entre o total de focos por célula e o índice IMF (A), total de bordas (B).

Em relação à intensidade das queimadas, encontramos também uma relação linear significativa. Observamos que os valores médios de FRP aumentaram à medida que a fragmentação e a quantidade de bordas também aumentaram na paisagem. O FRP foi explicado em cerca de 70,4% e 50% pelo IMF e bordas, respectivamente

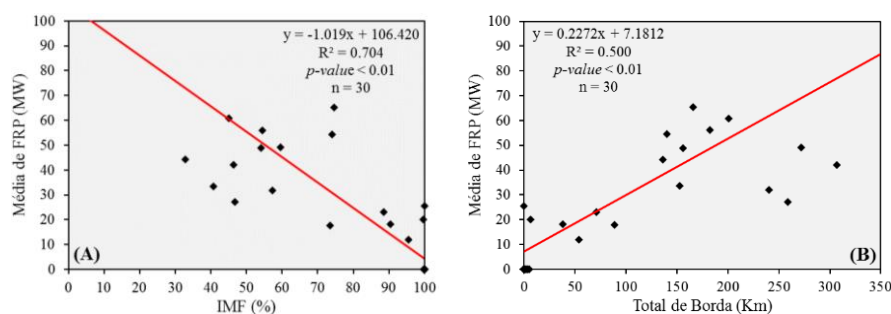


Figura 3. Regressão entre a média de FRP por célula e o índice IMF (A), total de bordas (B).

A maior parte das ocorrências de queimadas foram observadas no primeiro quilômetro a partir das bordas tanto nas áreas de floresta quanto nas áreas desmatadas, totalizando cerca de 95,31 e 98,33% respectivamente (Tabela 2).

Tabela 2. Total de focos por distância da borda.

| Classe | Distância da Borda | Total de Focos | % |
|----------------|--------------------|----------------|---------|
| Floresta | > 3 km | 10 | 0.617% |
| | 2 km | 66 | 4.069% |
| | 1 km | 1546 | 95.314% |
| Área Desmatada | 1 km | 2477 | 98.333% |
| | 2 km | 27 | 1.072% |
| | > 3 km | 15 | 0.595% |

O teste de *Kruskal-Wallis* ($KW=6,949$; $p\text{-value}=0,031$) não mostrou diferença significativa entre os valores de FRP observados nas diferentes distâncias a partir das bordas nas áreas de floresta (Figura 4A). Nas áreas desmatadas o teste de *Kruskal-Wallis* ($KW=1,275$; $p\text{-value}=0,528$) mostrou diferença significativa nos valores de FRP observados a partir do terceiro quilômetro (Figura 4B).

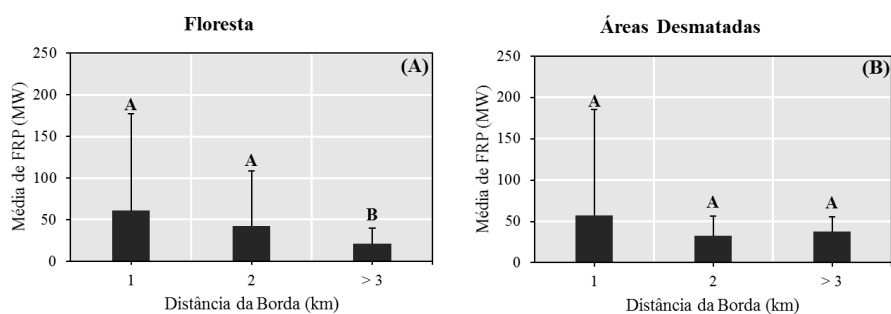


Figura 4. Média de FRP por distância da borda em floresta (A) e áreas desmatadas (B).

4. Discursão

O resultado aqui encontrado em relação ao papel da fragmentação e do efeito de borda na ocorrência das queimadas nas áreas de floresta corroboram com resultados anteriores obtidos para a Amazônia brasileira (Cochrane, 2001; Cochrane e Laurance, 2002), na Amazônia colombiana (Armenteras, González e Retana, 2013) e, mais recentemente, em escala regional no bioma amazônico brasileiro (Vedovato, 2016). O aumento das áreas com bordas facilita a entrada do fogo, e com a fragmentação, ocorrem mudanças significativas nas áreas de floresta, como a alteração do microclima, que torna a área de borda mais seca, quando comparada a áreas no interior dessa cobertura, o que aumenta a mortalidade de árvores (principalmente as de grande porte), levando ao aumento da suscetibilidade ao fogo devido a

uma maior produção de material inflamável e a quantidade reduzida de umidade (Berenguer *et al.*, 2014).

Quanto ao efeito da fragmentação na intensidade das queimadas, sua relação com as áreas queimadas foi consideravelmente maior se comparado ao efeito das bordas. Isso ocorre, pois nas áreas mais fragmentadas, existe uma maior mortalidade de árvores, o que aumenta a quantidade de biomassa disponível elevando, assim, a intensidade dessas queimadas (Berenguer *et al.*, 2014).

Nossos resultados sugerem que a fragmentação tem maior correlação com o indicador de intensidade de queimadas, quando comparado com as medidas de bordas utilizadas. No resultado encontrado por Armenteras, González e Retana (2013) na região da Amazônia Colombiana, uma análise similar mostrou que o efeito tanto da fragmentação, quanto das bordas, são correlacionados com o indicador de intensidade das queimadas.

A análise do padrão de ocorrência das queimadas, considerando a distância da borda, evidencia um claro efeito de borda, pois a maioria das queimadas (95%) ocorreram no primeiro quilômetro a partir da borda. Nas áreas de florestas isso ocorre devido a influência da luz, vento e temperatura nas regiões próxima às bordas (Broadbent *et al.*, 2008), que causa o aumento do dessecamento da vegetação devido a redução da umidade, alterando a estrutura e composição da floresta (Harper *et al.*, 2005). Como consequência, ocorre a alteração dos fluxos de energia e biomassa, aumentando a quantidade de combustível disponível (biomassa morta), aumentando a suscetibilidade da floresta ao fogo (Laurance *et al.*, 2011).

Além disso, na Amazônia as queimadas que ocorrem na borda das florestas são resultado também do escape do fogo usado para o manejo de pastos em áreas adjacentes (Cano-Crespo *et al.*, 2015). A distância mais significativa do efeito de borda aqui identificado (até 2 km) é compatível com os resultados encontrados por Cochrane e Laurance (2002) em outras áreas da Amazônia brasileira (2-3 km).

Nas áreas desmatadas, a possível explicação para a ocorrência da grande maioria das queimadas nos dois primeiros quilômetros, é o uso intensivo do fogo na preparação de áreas desmatadas mais recentes para a conversão em pasto (Cano-Crespo *et al.*, 2015), visto que, as áreas de floresta recentemente convertidas na área de estudo são destinadas principalmente para a criação de gado (Pinheiro *et al.*, 2016).

5. Considerações Finais

A fragmentação e bordas determinaram fortemente a ocorrência de queimadas em áreas de floresta. No entanto, somente a fragmentação se apresentou como determinante na intensidade dessas queimadas.

Nossos resultados confirmaram o papel do efeito de borda na ocorrência das queimadas. A intensidade das queimadas considerando a distância da borda das áreas desmatadas, não apresentou diferenças significativas. No entanto, nas áreas de floresta a intensidade das queimadas tende a ser mais intensa próxima das bordas, diminuindo a partir do terceiro quilômetro de distância.

Os resultados destacam a necessidade da manutenção de áreas contínuas de florestas para reduzir a suscetibilidade da floresta ao fogo. Esse é um elemento importante quando se pensa em formas de reduzir emissões de carbono para a atmosfera, que contribuem para os processos de mudanças climáticas.

A adoção de aceiros pode evitar o escape do fogo proveniente de novas áreas desmatadas ou do manejo de áreas agrícolas ou de pecuária, são formas de evitar a propagação do fogo. Essa é uma técnica que deve ser amplamente utilizada e incentivada por parte dos órgãos ambientais.

5. Agradecimentos

C.H.L.S.J. agradece à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - CAPES pela concessão da bolsa no Mestrado em Sensoriamento Remoto do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE.

L.E.O.C.A. agradece ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) (processos 304425/2013-3 e 458022/2013-6).

6. Referências

Almeida, C. A. de et al. High spatial resolution land use and land cover mapping of the Brazilian Legal Amazon in 2008 using Landsat-5/TM and MODIS data. **Acta Amazonica**, v. 46, n. 3, p. 291–302, set. 2016.

Anderson, L. O. et al. Disentangling the contribution of multiple land covers to fire-mediated carbon emissions in Amazonia during the 2010 drought. **Global Biogeochemical Cycles**, v. 29, n. 10, p. 1739–1753, out. 2015.

Aragão, L. E. O. C. et al. Spatial patterns and fire response of recent Amazonian droughts. **Geophysical Research Letters**, v. 34, n. 7, p. L07701, 3 abr. 2007.

Aragão, L. E. O. C.; Shimabukuro, Y. E. The incidence of fire in Amazonian forests with implications for REDD. **Science (New York, N.Y.)**, v. 328, n. June, p. 1275–1278, 4 jun. 2010.

Arima, E. Y. et al. Explaining the fragmentation in the Brazilian Amazonian forest. **Journal of Land Use Science**, n. April, p. 1–21, 27 abr. 2015.

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, mar. 2013.

Artaxo, P. et al. Perspectivas de pesquisas na relação entre clima e o o funcionamento da Floresta Amazônica. **Ciência & Cultura**, v. 66, n. 3, p. 41–46, 2014.

Barlow, J. et al. Anthropogenic disturbance in tropical forests can double biodiversity loss from deforestation. **Nature**, v. 535, n. 7610, p. 144–147, 29 jun. 2016.

Berenguer, E. et al. A large-scale field assessment of carbon stocks in human-modified tropical forests. **Global Change Biology**, v. 20, n. 12, p. 3713–3726, dez. 2014.

Broadbent, E. et al. Forest fragmentation and edge effects from deforestation and selective logging in the Brazilian Amazon. **Biological Conservation**, v. 141, n. 7, p. 1745–1757, jul. 2008.

Cano-Crespo, A. et al. Forest edge burning in the Brazilian Amazon promoted by escaping fires from managed pastures. **Journal of Geophysical Research: Biogeosciences**, v. 120, n. 10, p. 2095–2107, out. 2015.

Carvalho Jr., J. A. et al. CO₂ and CO emission rates from three forest fire controlled experiments in Western Amazonia. **Atmospheric Environment**, v. 135, p. 73–83, 2016.

Cochrane, M. A. Synergistic interactions between habitat fragmentation and fire in evergreen tropical forests. **Conservation Biology**, v. 15, n. 6, p. 1515–1521, 2001.

Cochrane, M. A.; Laurance, W. F. Fire as a large-scale edge effect in Amazonian forests. **Journal of Tropical Ecology**, v. 18, n. 3, p. 311–325, 26 maio 2002.

Fearnside, P. M. Deforestation in Brazilian Amazonia: History, Rates, and Consequences. **Conservation Biology**, v. 19, n. 3, p. 680–688, jun. 2005.

Gibbons, J. D.; Chakraborti, S. Nonparametric Statistical Inference. In: **International Encyclopedia of Statistical Science**. Berlin, Heidelberg, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2011. p. 977–979.

Giglio, L. et al. An Enhanced Contextual Fire Detection Algorithm for MODIS. **Remote Sensing of Environment**, v. 87, n. 2–3, p. 273–282, out. 2003.

Giglio, L.; Schroeder, S. W.; Justice, C. O. The collection 6 MODIS active fire detection algorithm and fire products. **Remote Sensing of Environment**, v. 178, p. 31–41, 2016.

Harper, K. A. et al. Edge Influence on Forest Structure and Composition in Fragmented Landscapes. **Conservation Biology**, v. 19, n. 3, p. 768–782, jun. 2005.

Ichoku, C. et al. Global characterization of biomass-burning patterns using satellite measurements of fire radiative energy. **Remote Sensing of Environment**, v. 112, n. 6, p. 2950–2962, 2008.

INPE - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. **PRODES - Monitoramento da floresta amazônica brasileira por satélite**. Disponível em: <<http://www.obt.inpe.br/prodes/>>. Acesso em: 10 fev. 2016.

Jung, M. LecoS - A python plugin for automated landscape ecology analysis. **Ecological Informatics**, v. 31, p. 18–21, jan. 2016.

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.

Laurance, W. F.; Vasconcelos, H. L. Consequências ecológicas da fragmentação florestal na Amazônia. **Oecologia brasiliensis**, v. 13, n. 3, p. 434–451, set. 2009.

Lima, A. et al. Land use and land cover changes determine the spatial relationship between fire and deforestation in the Brazilian Amazon. **Applied Geography**, v. 34, p. 239–246, maio 2012.

Liu, Y.-M. et al. **Civil Engineering and Urban Planning IV**. Beijing: CRC Press, 2016.

Marengo, J. A.; Espinoza, J. C. Extreme seasonal droughts and floods in Amazonia: causes, trends and impacts. **International Journal of Climatology**, v. 36, n. 3, p. 1033–1050, mar. 2016.

Mataveli, G. A. V. et al. Relationship between the viewing angle and the Fire Radiative Power estimation. **Boletim de Ciências Geodésicas**, v. 21, n. 2, p. 371–388, jun. 2015.

McGarigal, K. **Fragstats Help**. Disponível em: <<http://www.umass.edu/landeco/research/fragstats/documents/fragstats.help.4.2.pdf>>. Acesso em: 21 abr. 2015.

Mesev, V. **Integration of GIS and SensingRemote**. [s.l.] Wiley, 2007.

Pereira, D. et al. **Fatos florestais da Amazônia 2010**. Belém: Imazon, 2010.

Pinheiro, T. F. **Padrões e trajetórias de degradação florestal em fronteiras madeireiras da Amazônia**. São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE, 2015.

Pinheiro, T. F. et al. Forest Degradation Associated with Logging Frontier Expansion in the Amazon: The BR-163 Region in Southwestern Pará, Brazil. **Earth Interactions**, v. 20, n. 17, p. 1–26, jul. 2016.

Piromal, R. A. S. et al. Utilização de dados MODIS para a detecção de queimadas na Amazônia. **Acta Amazonica**, v. 38, n. 1, p. 77–84, 2008.

QGIS Development Team. **QGIS Geographic Information System**. Disponível em: <<http://qgis.osgeo.org>>. Acesso em: 22 jun. 2016.

R Core Team. **R: A language and environment for statistical computing**. Disponível em: <<https://www.r-project.org/>>. Acesso em: 1 jan. 2016.

Smith, L. T. et al. Drought impacts on children's respiratory health in the Brazilian Amazon. **Scientific reports**, v. 4, p. 3726, jan. 2014.

Solomon, S. et al. Irreversible climate change due to carbon dioxide emissions. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America**, v. 106, n. 6, p. 1704–9, 2009.

Vedovato, L. B. **Análise espaço-temporal do desacoplamento dos padrões de fogo e desmatamento na Amazônia**. São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE, 2016.

Veenendaal, E. M. et al. Structural, physiognomic and above-ground biomass variation in savanna–forest transition zones on three continents – how different are co-occurring savanna and forest formations? **Biogeosciences**, v. 12, n. 10, p. 2927–2951, 21 maio 2015.

Vlek, P. L. G. et al. **Ecology and Development Series No. 31**. Disponível em: <http://www.zef.de/fileadmin/webfiles/downloads/zefc_ecology_development/ecol_dev_31_text.pdf>. Acesso em: 10 jun. 2016.

Wooster, M. J. et al. Retrieval of biomass combustion rates and totals from fire radiative power observations: FRP derivation and calibration relationships between biomass consumption and fire radiative energy release. **Journal of Geophysical Research**, v. 110, n. D24, p. D24311, 2005.