

Dinâmica dos incêndios florestais no Estado do Acre nas décadas de 90 e 00

Sonaira Souza da Silva¹
Ane A. C. Alencar¹
Elsa R. H. Mendoza¹
Foster Brown²

¹Instituto de Pesquisa Ambiental da Amazônia - IPAM
Rua Dourado, n 142 – 69.915-002 – Rio Branco - AC, Brasil
{sonaira, ane, elsa_mendoza} @ipam.org.br

² Woods Hole Research Center -WRHC
149 Woods Hole Road - Falmouth, MA EUA 02540-1644
fbrown@uol.com.br

Abstract. A floresta Amazônica esta perdendo sua característica de agir como barreira aos incêndios florestais. Esta vulnerabilidade aos incêndios tem sido estudado principalmente na região da Amazônia oriental onde as florestas estão mais fragmentadas, com mais alta taxa de ocupação e com gradiente de seca e impacto das mudanças climáticas mais sentido. Nós utilizamos o mapeamento anual para reconstruir o histórico de fogo da Amazônia Ocidental usando como exemplo a cena 002/67 do satélite Landsat que representa a órbita ponto mais antropizada do estado do Acre. Foi utilizado o Índice de Cicatriz de Fogo (Burn Scar Index – BSI) derivado das frações de Material Fotossintético, Não-Fotossintético e Solo gerados pelo software Claslite©, para mapear os incêndios florestais nos últimos 21 anos (1989-2010). Este histórico de cicatrizes anuais indica que somente 22% ou 3.482 km² das florestas Acreanas nesta região foi queimada ao longo dos anos. Estas florestas tiveram uma baixa frequência de fogo, sendo que 82% foi queimada somente uma vez, enquanto que 13% queimou duas vezes e o restante queimou até no máximo até 5 vezes neste período. A maioria destas áreas queimadas ocorreram em florestas abertas com bambu e em anos de forte El Niño (1992 e 1998) ou em anos de outros fenômenos climáticos como em 2005 e 2009. Estes resultados indicam que, como na Amazônia Oriental, as regiões mais antropizadas da Amazônia Ocidental também são sensíveis aos eventos climáticos de seca extrema, entretanto recentemente estas regiões tem tido aumento das áreas queimadas mesmo em anos de precipitação média normal. Isso indica uma mudança de peso na contribuição do desmatamento em detrimento dos efeitos do clima para a vulnerabilidade das florestas desta região ao fogo.

Palavras-chave: incêndios florestais, El Niño, Amazônia Ocidental, regime de fogo

1. Introdução

As florestas do bioma Amazônia são conhecidas por serem naturalmente resistentes a seca sazonal e aos incêndios florestais (Cochrane 2009). Entretanto, o aquecimento global e o acelerado ritmo do desmatamento e extração madeireira, que vem ocorrendo nas ultimas décadas na região, tem afetado a resistência das florestas da Amazônia a seca anual e ao fogo (Nepstad et al. 2001, Aragão et al. 2008). Esta relação entre os efeitos das mudanças climáticas e os processos antrópicos de uso da terra tem afetado as condições ambientais, o tipo e quantidade do material combustível e o aumento das fontes de ignição, que representam os três elementos essenciais para a ocorrência de fogo (Soares-Filho et al. 2012). A mudança na composição natural desses três elementos tem impactado o regime de fogo de algumas regiões da Amazônia criando um cenário de florestas degradadas e mais vulneráveis a novos incêndios (Cochrane and Barber 2009).

O processo de degradação florestal decorrente dos incêndios está ficando cada vez mais frequente nas florestas ao longo do arco de desmatamento e principalmente na Amazônia oriental (Alencar et al. 2011). Estas florestas têm passado, nas duas ultimas décadas, por um processo acelerado de empobrecimento oculto e fragmentação decorrentes da intensa ação antrópica pela exploração madeireira e conversão florestal para pecuária e cultivos agrícolas

(Nepstad et al. 1999). A exploração madeireira, principalmente a convencional, muda a condição ambiental do interior da floresta afetando tanto a umidade do ar quanto a quantidade e qualidade do material combustível, que aumenta em decorrência do tipo de exploração (Ray et al. 2005). A fragmentação é diretamente associada ao efeito de borda que também influencia o microclima e estrutura da vegetação na borda dos fragmentos florestais deixando-os mais suscetíveis ao fogo (Cochrane and Laurance 2002). O desmatamento, agente da fragmentação florestal, também é a principal fonte de ignição dos incêndios florestais que juntamente com as queimadas para a limpeza de pastos e áreas agrícolas contribuem a ocorrência dos incêndios florestais (Aragão and Shimabukuro 2010). O resultado é um mosaico de florestas antropizadas pela fragmentação e pela extração madeireira, influenciando o clima local e a habilidade da floresta em resistir ao fogo que escapa das pastagens e áreas agrícolas (Nepstad et al. 2001, Davidson et al. 2012).

Além das atividades humanas, outros fatores como a seca e a estrutura da vegetação exercem uma importante contribuição para a ocorrência de fogo e abrangência dos incêndios florestais. Eventos de seca extrema, assim como a exploração madeireira, provocam a abertura do dossel reduzindo o Índice de Área Foliar (LAI), o que aumenta a quantidade de energia solar incidente, a mortalidade de árvores e o montante de material combustível (Ray et al. 2005, Nepstad et al. 2007, Brando et al. 2008). Enquanto que o tipo de estrutura da vegetação esta relacionada à capacidade da floresta em tolerar a seca e manter suas folhas durante este período. Florestas de transição e abertas são mais tolerantes a seca do que a floresta densa (Alencar et al. 2006). Entretanto, estas tipologias florestais mais tolerantes a seca tendem a ter incêndios florestais de maior abrangência quando o limiar anual de seca provocado por eventos de seca extrema são ultrapassados (Alencar et al. 2006). O El Niño é um dos principais eventos climáticos de seca extrema que historicamente tem sido relacionado o aumento do fogo na Amazônia oriental (Alencar et al. 2004, Van der Werf et al. 2004). Este fenômeno atingiu fortemente a região em 1992 e em 1998 representando os anos de El Niño mais fortes dos últimos 50 anos (Cobb et al. 2003). Em 2005, um outro fenômeno climático denominado de Oscilação do Atlântico Norte, atingiu a região gerando uma das secas mais extremas dos últimos 60 anos (Marengo et al. 2008). As mudanças climáticas globais tem influenciado diretamente a frequência destes eventos climáticos que afetam a Amazônia, provocando secas mais intensas, afetando o padrão de precipitação na região e aumentando a vulnerabilidade da floresta da região ao fogo (Cox et al. 2008, Zeng et al. 2008).

Apesar de alguns estudos terem revelado a relação entre eventos climáticos de seca extrema e incêndios florestais na Amazônia, a maioria destes estudos concentrou-se na Amazônia oriental (Haugaasen et al. 2003, Alencar et al. 2004, Morton et al. 2011). Poucos estudos tem documentado a extensão de incêndios florestais na Amazônia ocidental (Shimabukuro et al. 2009), que foi o centro de anomalias climáticas como as de 2005 e 2010 (Asner and Alencar 2010, Lewis et al. 2011), enquanto que nenhum tem investigado a variação temporal desses incêndios utilizando uma longa série temporal. Este estudo representa o primeiro a quantificar temporalmente a variação anual dos incêndios florestais em uma região na Amazônia Ocidental. Estes incêndios foram mapeados utilizando 21 anos de imagens anuais do satélite Landsat (1989-2010) do leste Acreano, representando uma das regiões mais desmatadas do estado. O histórico de cicatrizes de incêndios florestais mapeadas neste estudo será utilizado para identificar a relação entre a frequência de fogo e a extensão da área queimada, com os principais tipos de vegetação e a ocorrência de anomalias climáticas. Estes dados são de suma importância para entender a vulnerabilidade das florestas da Amazônia Ocidental a ocorrência de incêndios e identificar os indícios de mudança no regime de fogo desta região ainda pouco estudada no que diz respeito a este tema.

2. Metodologia de Trabalho

Este estudo foi realizado para a cena 002/67 do satélite Landsat TM5, localizado na Amazônia Sul Ocidental, no leste do Estado do Acre. Esta região é a mais antropizada do Acre, concentrando mais de 50% da população e 42% do desmatamento do estado, sendo ainda, cortada pela BR-364 e 317 (Figura 1).

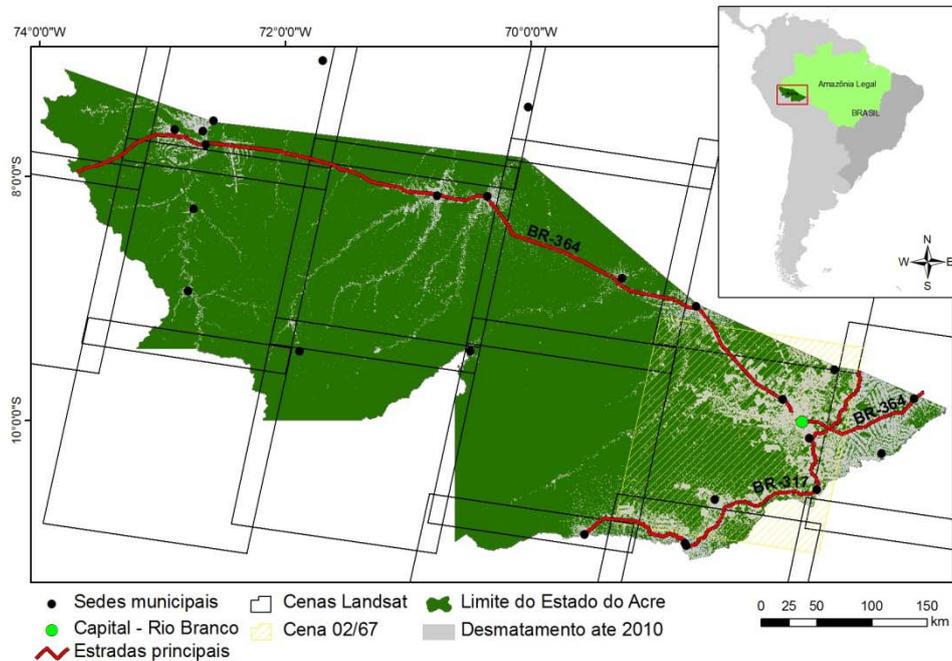


Figura 1. Localização da área de estudo (cena Landsat 002/67) em relação ao Estado do Acre.

Para esta análise foram utilizadas uma série temporal de 22 cenas cobrindo o período de 1989 a 2010. Para cada ano da série temporal foi selecionada uma imagem entre os meses de junho à agosto, na qual foram mapeadas as cicatrizes de incêndios florestais ocorridas no segundo semestre do ano anterior. Com o objetivo de mapear as áreas de cicatrizes de fogo somente na área de floresta, foi aplicada uma máscara de desmatamento referente a cada ano, separando as áreas de cobertura florestal das áreas desmatadas. Os dados de desmatamento utilizados foram cedidos pela Unidade Central de Geoprocessamento e Sensoriamento Remoto do Estado do Acre (UCEGEO).

Estas imagens foram processadas pelo software livre Claslite 3.0©, uma versão compacta do Carnegie Landsat Analysis System (CLAS), que utiliza o modelo de mistura espectral associado a uma robusta biblioteca espectral para gerar frações que representam os principais componentes biofísicos da vegetação existentes em um pixel (Asner et al. 2009). Neste software foi feita a correção atmosférica e a geração das imagens de reflectância e de cobertura fracional (fração de vegetação fotossintética - VF, vegetação não fotossintética - VNF e substrato de solo exposto - S).

A identificação das cicatrizes de incêndios florestais foi possível devido a mudança nas características espectrais da floresta queimada no que diz respeito: ao aumento de cinza/carvão acima do solo, as alterações no teor de umidade e ao aumento na quantidade de biomassa morta (Alencar et al. 2011). Para realçar estas características, foi desenvolvida uma metodologia, adaptada a proposta por Alencar et al. (2011), que cria o Índice de Cicatriz de Incêndio (Burn Scar Index -BSI) a partir das imagens de cobertura fracional produzidas pelo Claslite 3.0 utilizando o software ENVI. Nesta adaptação, expressa na equação abaixo, a fração de solo foi somada as outras frações no dividendo ao invés de ser subtraída, como foi o

caso da fração de sombra no BSI desenvolvido por Alencar et al. (2011). Esta adaptação foi feita pois a versão 3.0 do Claslite não cria a fração de sombra como a versão do CLASBurn utilizada por Alencar et al. (2011).

$$BSI = (VF - VNF) + S / (VF + VNF + S)$$

Com base nas imagens BSI geradas pelo Claslite, foram analisados em todas as cenas os intervalos de valores que melhor representassem as cicatrizes de incêndios. Em seguida foi aplicada uma rotina de filtros para amenizar os efeitos da textura e geometria das áreas queimadas resultantes do fatiamento das imagens do BSI, diminuindo assim, a sensibilidade dessa classificação aos ruídos e facilitando o delineamento das cicatrizes. Para a validação dos mapas de cicatrizes de incêndios florestais foram utilizados pontos de GPS coletados em campo em outubro de 2005 (cedidos pelo pesquisador Foster Brown e IBAMA Acre). 90% dos pontos coletados e classificados em campo como área afetada por incêndios florestais (n=20), foram classificados como queimadas pelo BSI. Esta validação não necessariamente precisa ser feita para os outros anos, visto que as imagens de séries temporais são calibradas e processadas no Claslite de forma padronizada podendo ser comparadas entre si (Asner et al. 2009).

3. Resultados

O mapeamento das cicatrizes de incêndios florestais realizado entre 1989 e 2010 na porção oriental do estado do Acre revelou que 22% ou 3.482 km² da área de floresta da região foi afetada por incêndios florestais neste período. Desta área queimada somente 477 km² foram desmatados, representando 10% do desmatamento nesta cena neste período que foi de 4850 km². A imagem que mostrou uma maior área afetada pelo fogo foi a de 1992, indicando que o ano de 1991 teve cerca de 1.020 km² queimados, impactando 4,7% da área de floresta daquele ano (Tabela 1). Esta área três vezes maior que o desmatamento que acometeu esta cena naquele ano (300km²). Em 2006, observou-se maior proporção de área de floresta no período, atingindo em torno de 5,2%, e indicando que os incêndios que aconteceram no segundo semestre de 2005 atingiram a maior proporção da floresta em pé naquele ano. Os intervalos da BSI utilizados para o mapeamento das cicatrizes de incêndios florestais, esteve entre os valores de 33 à 70, semelhante ao identificado por Alencar (2011) na região do Pará (Tabela 1).

Os resultados indicam que, com exceção do período de El Niño de 1997-1999, existe uma relação, nas décadas de 80 e 90, entre os eventos de El Niño de forte intensidade e moderado (1986-1988 e 1990-1993) com a extensão da área afetada por incêndios florestais nessa região da Amazônia ocidental (Tabela 1; Figura 3). Entretanto, este padrão não foi identificado na década seguinte, quando grande parte da área queimada aconteceu em anos de El Niño considerado fraco (de 2004 a 2007) e moderado (2009-2010). Nesta década, ao contrário da anterior, foi observada uma quantidade significativa de área de floresta queimada em anos considerados como La Niña, ou anos úmidos (2000-2001 e 2008) (Tabela 1; Figura 3). Este aumento da área queimada mesmo em anos úmidos e de El Niño fraco sugerem que nesta região da Amazônia existem outros fenômenos climáticos controlando a susceptibilidade da floresta ao fogo e que as secas provocadas pelo El Niño nos últimos anos podem ser mais fortes na Amazônia Oriental do que na Ocidental. Um destes eventos climáticos que atingiram a Amazônia ocidental nesta última década foi a Oscilação do Atlântico Norte, que em 2005 gerou uma anomalia na temperatura, com prolongamento do período de estiagem na região leste no Estado do Acre nos anos de 2005, ano também identificado com maior área afetada por incêndios florestais na cena 002/67.

Tabela 1. Área afetada por incêndios florestais para cada ano da série temporal e intervalo de valores da imagem BSI utilizados para mapear as cicatrizes de incêndios.

Ano da cicatriz de fogo	Data da Imagem	Intervalo de valores da imagem BSI	Cicatrizes de incêndios florestais (km ²)	% relação ao total de cicatrizes	Floresta (km ²)	% relação a floresta
1988	14/08/1989	43 a 63	890	20,4	22.396	4,0
1989	01/08/1990	39 a 59	59	1,4	22.161	0,3
1990	20/08/1991	-	0	-	-	-
1991	21/07/1992	39 a 68	1.020	23,4	21.685	4,7
1992	11/07/1994	35 a 63	4	0,1	21.528	0,0
1994	16/07/1996	37 a 65		1,1	21.334	0,2
1996	19/07/1997	34 a 62	49	0,3	20.649	0,1
1997	06/07/1998	35 a 62		0,3	20.464	0,1
1998	10/08/1999	38 a 62	13	0,6	20.216	0,1
1999	27/07/2000	33 a 60	14	0,1	20.004	0,0
2000	30/07/2001	34 a 61	27	0,8	19.793	0,2
2001	25/07/2002	42 a 66	6	2,1	19.479	0,5
2002	04/07/2003	40 a 64	34	0,2	19.047	0,0
2003	04/06/2004	37 a 63	93	0,1	18.780	0,0
2004	11/09/2005	35 a 60	7	9,7	18.242	2,3
2005	26/06/2006	38 a 70	4	21,5	18.178	5,2
2006	31/07/2007	40 a 66	424	5,0	17.971	1,2
2007	18/08/2008	36 a 64	936	3,6	17.859	0,9
2008	06/09/2009	38 a 56	218	0,1	17.775	0,0
2009	23/07/2010	36 a 64	157	9,2	17.546	2,3

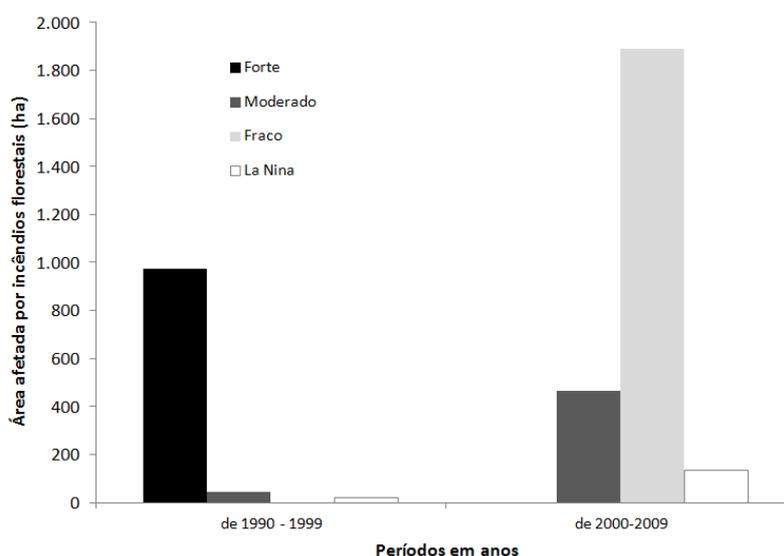


Figura 2. Somatório da área afetada por incêndios florestais por tipo de El Niño (Forte, Moderado e Fraco) nas décadas de 90 e 00.

No que diz respeito a frequência de incêndios e a sua relação com as principais tipologias florestais da região, as análises revelam que 82% da área de floresta queimadas só tiveram uma ocorrência de fogo no período analisado. A reincidência de fogo foi capturada em 18% da área florestal queimada, sendo que 13% só aconteceram duas vezes no período examinado. Os outros 6% ocorreram de 3 à 5 vezes entre 1988 e 2009 (Figura 3a). A reincidência dos

incêndios florestais de 2 a 5 vezes ocorreram principalmente na tipologia florestal com predominância de bambu (Figura 3b).

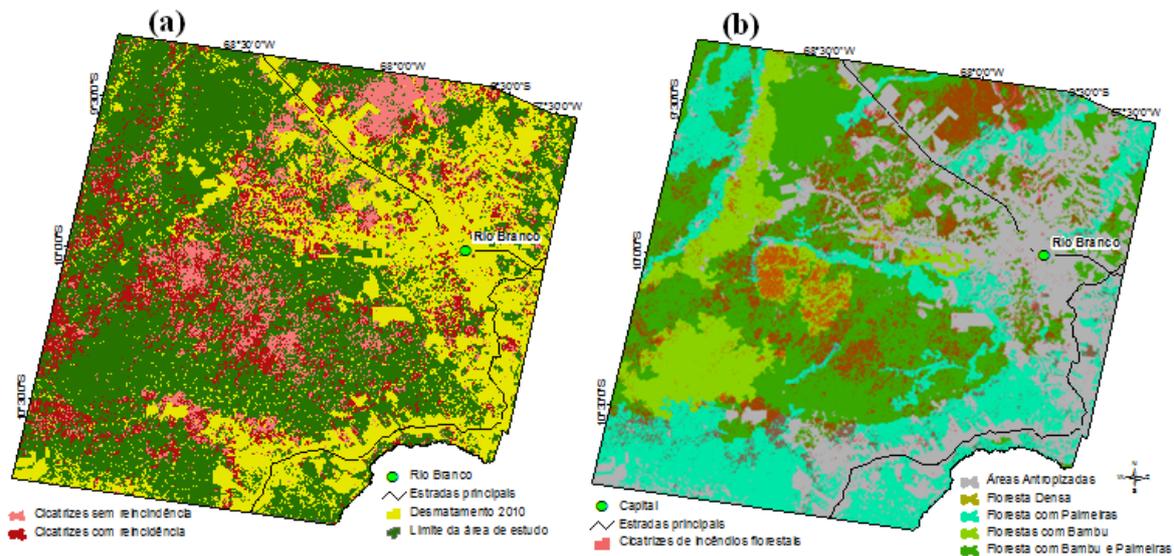


Figura 3.(a) Reincidência de incêndios florestais e (b) cicatrizes de incêndios florestais sobrepostas as principais tipologias florestais do Estado do Acre.

4. DISCUSSÃO

As florestas com maior pressão antrópica no estado do Acre tem sofrido com mais incêndios na última década, se comparada ao final de década de 80 e década 90, quando os anos de seca extrema foram associados com os intensos e moderados eventos de El Niño. Entretanto, na primeira década do século 21, as florestas da porção oriental do estado do Acre queimaram 10% a mais que na década anterior. Isso pode ser resultado dos anos consecutivos de eventos climáticos com anomalia de seca, mesmo que de baixa intensidade, que acometeu essa região. Estes anos seguidos de seca que iniciaram em 2004 e foram até 2007 podem ter gerado um déficit cumulativo de água no solo que não conseguiu ser suprido pelos períodos chuvosos dos anos seguintes (Asner and Alencar 2010). Neste período também houve um aumento de 21% da área desmatada e 31% das fontes de ignição, criando as condições ideais para a ocorrência de incêndios.

Os dados sugerem que apesar de somente 22% da floresta dessa região terem queimado nos últimos 21 anos, 13% queimaram até duas vezes neste período, indicando que o retorno de fogo que naturalmente é previsto para em média a cada 500 anos nesta região (Thonicke et al. 2001), aconteceu em um intervalo médio de 11 anos. Outro fator que pode estar influenciando a ocorrência de incêndios de maior abrangência mesmo em anos que não são muito secos na última década é o fato de grandes áreas serem ocupadas por tipologias florestais como a floresta de bambu e floresta aberta de palmeiras que são mais susceptíveis ao fogo e estão cada vez mais perto da frente de expansão do desmatamento na região.

Em suma, o regime de fogo está mudando no Acre e os grandes incêndios estão deixando de ser somente relacionados aos eventos de seca extrema. Na década atual 52% das áreas queimadas foram em anos de precipitação normal ou úmidos. Isso pode ser um reflexo não somente dos eventos de seca menos intensos porém consecutivos, mas também do aumento da fragmentação e do número de fontes de ignição e área desmatada entre as décadas de 90 e 00.

5. Conclusões

Os incêndios florestais na Amazonia ocidental estão ficando mais frequente seguindo o padrão da Amazônia oriental. Entretanto as florestas da Amazônia Ocidental parecem ser menos susceptível aos eventos isolados de El Niño intensos e moderados, se comparadas as florestas do outro extremo da Amazônia que queimaram muito em todos os anos de intensos El Niño (Alencar et al. 2011). Este resultado indica que o regime de fogo no Acre não está sendo totalmente controlado pela intensidade do El Niño, mas também por outros eventos climáticos, acelerada ação antrópica e aumento das fontes de ignição. As implicações do aumento de fogo em paisagens como as do Acre incluem a vulnerabilidade da floresta a novos incêndios, a perda da biodiversidade, da fauna, dos produtos florestais madeireiros e não madeireiros e o aumento de doenças respiratórias. Estas perdas ecológicas, econômicas e sociais podem aumentar a pobreza na região atrapalhar o desenvolvimento sustentável que é a principal bandeira do governo deste estado.

Agradecimentos

A UCEGEO/Governo do Estado do Acre pelo fornecimento das imagens de satélite LandSat TM5 para a série histórica de 1988 a 2010. Ao Laboratório de Ecologia Global do Carnegie Institute por disponibilizar as licenças do software Claslite V. 3.0.

Referências Bibliográficas

- Alencar, A., G. P. Asner, D. E. Knapp, and D. J. Zarin. 2011. Temporal variability of forest fires in eastern Amazon. *Ecological Application* **21**:2397-2412.
- Alencar, A., D. Nepstad, and M. C. Vera Diaz. 2006. Forest understory fire in the Brazilian Amazon in ENSO and non-ENSO Years: area burned and committed carbon emissions. *Earth Interactions* **10**:1-17.
- Alencar, A., L. Solorzano, and D. Nepstad. 2004. Modeling Forest Understory Fires in an Eastern Amazonian Landscape. *Ecological Applications* **14**:S139-S149.
- Aragão, L. E. O. C., Y. Malhi, N. Barbier, A. Lima, Y. E. Shimabukuro, L. O. Anderson, and S. Saatchi. 2008. Interactions between rainfall, deforestation and fires during recent years in the Brazilian Amazonia. *Phil. Trans. R. Soc.* **363**:1779-1785.
- Aragão, L. E. O. C., and Y. E. Shimabukuro. 2010. The incidence of fire in Amazonian Forests with implications for REDD. *Science* **328**:1275-1278.
- Asner, G. P., and A. Alencar. 2010. Drought impacts on the Amazon forest: the remote sensing perspective. *New Phytologist* **187**:569-578.
- Asner, G. P., D. E. Knapp, A. Balaji, and G. Páez-Acosta. 2009. Automated mapping of tropical deforestation and forest degradation: CLASlite. *Journal of Applied Remote Sensing* **3**:1-24.
- Brando, P. M., D. C. Nepstad, E. A. Davidson, S. E. Trumbore, D. Ray, and P. Camargo. 2008. Drought effects on litterfall, wood production and belowground carbon cycling in an Amazon forest: results of a throughfall reduction experiment. *Phil. Trans. R. Soc.* **363**:1839-1848.
- Cobb, K. M., C. D. Charles, H. Cheng, and R. L. Edwards. 2003. El Niño/Southern Oscillation and tropical Pacific climate during the last millennium. *Nature* **424**:271-276.
- Cochrane, M. 2009. *Tropical fire ecology: climate change, land use and ecosystem dynamics*. Springer, New York, NY.
- Cochrane, M., and W. F. Laurance. 2002. Fire as a large-scale edge effect in Amazonia forests. *Journal of Tropical Ecology* **18**:311-325.

- Cochrane, M. A., and C. P. Barber. 2009. Climate change, human land use and future fires in the Amazon. *Global Change Biology* **15**:601-612.
- Cox, P. M., P. P. Harris, C. Huntingford, R. A. Betts, M. Collins, C. D. Jones, T. E. Jupp, J. A. Marengo, and C. A. Nobre. 2008. Increasing risk of Amazonian drought due to decreasing aerosol pollution. *Nature* **453**:212-216.
- Davidson, E. a., A. C. de Araújo, P. Artaxo, J. K. Balch, I. F. Brown, M. M. Bustamante, M. T. Coe, R. DeFries, M. Keller, M. Longo, J. W. Munger, W. Schroeder, B. Soares Filho, C. Souza Jr, and S. C. Wofsy. 2012. The Amazon basin in transition. *Nature* **481**:321-328.
- Haugaasen, T., J. Barlow, and C. A. Peres. 2003. Surface wildfires in central Amazonia: short-term impact on forest structure and carbon loss. *Forest Ecology and Management* **179**:321-331.
- Lewis, S. L., P. M. Brando, O. L. Phillips, G. M. F. van der Heijden, and D. Nepstad. 2011. The 2010 Amazon drought. *Science* **331**:554.
- Marengo, J. A., C. A. Nobre, J. Tomasella, M. D. Oyama, G. S. Oliveira, R. Oliveira, H. Camargo, L. M. Alves, and I. F. Brown. 2008. The Drought of Amazonia in 2005. *Journal of Climate* **21**.
- Morton, D. C., R. S. DeFries, J. Nagol, C. M. Souza, E. S. Kasischke, G. C. Hurtt, and R. Dubayah. 2011. Mapping canopy damage from understory fires in Amazon forests using annual time series of Landsat and MODIS data. *Remote Sensing of Environment* **115**:1706-1720.
- Nepstad, D., G. Carvalho, A. C. Barros, A. Alencar, J. P. Capobianco, J. Bishop, P. Moutinho, P. Lefebvre, U. L. Silva Jr, and E. Prins. 2001. Road paving, fire regime feedbacks, and the future of Amazon forests. *Forest Ecology and Management* **154**:395-407.
- Nepstad, D. C., I. M. Tohver, D. Ray, P. Moutinho, and G. Cardinot. 2007. Mortality of large trees and lianas following experimental drought in an Amazon forest. *Ecology* **88**:2259-2269.
- Nepstad, D. C., A. Veríssimo, A. Alencar, C. Nobre, E. Lima, P. Lefebvre, P. Schlesinger, C. Potter, P. Moutinho, E. Mendonza, M. Cochrane, and V. Brooks. 1999. Large Scale impoverishment of Amazonian Forests by Logging and Fire. *Nature* **398**:505-508.
- Ray, D., D. Nepstad, and P. Moutinho. 2005. Micrometeorological and canopy controls of fire susceptibility in forested Amazon landscape. *Ecological Applications* **15**:1664-1678.
- Shimabukuro, Y. E., V. Duarte, E. Arai, R. M. Freitas, A. Lima, D. M. Valeriano, I. F. Brown, and M. L. R. Maldonado. 2009. Fraction images derived from Terra Modis data for mapping burnt areas in Brazilian Amazonia. *Int. J. Remote Sensing* **30**:1537-1546.
- Soares-Filho, B. S., R. Silvestrini, D. Nepstad, P. M. Brando, H. Rodrigues, A. Alencar, M. T. Coe, C. Locks, L. Lima, L. Hissa, and C. Stickler. 2012. Forest fragmentation, climate change and understory fire regimes on the Amazonian landscapes of the Xingu headwaters. *Landscape Ecology*.
- Thonicke, K., S. Venevsky, S. Sitch, and W. Cramer. 2001. The role of fire disturbance for global vegetation dynamics: coupling fire into a Dynamic Global Vegetation Model. *Global Ecology & Biogeography* **10**:661-677.
- Van der Werf, G. R., J. T. Randerson, J. Collatz, L. Giglio, P. S. Kasibhatla, A. F. Arellano Jr., S. C. Olsen, and E. S. Kasischke. 2004. Continental-Scale Partitioning of Fire Emissions During the 1997 to 2001 El Niño/La Niña Period. *Science* **303**:73-76.
- Zeng, N., J. Yoon, J. Marengo, A. Subramaniam, C. A. Nobre, A. Mariotti, and J. D. Neelin. 2008. Causes and impacts of the 2005 Amazon drought. *Environmental Research Letters* **3**:1-9.