

## Modelo probabilístico de espalhamento de fogo: Aplicação para a região do Xingu

Rafaella Almeida Silvestrini<sup>1</sup>  
Britaldo Silveira Soares Filho<sup>1</sup>  
Ane Auxiliadora Costa Alencar<sup>2</sup>  
Hermann Oliveira Rodrigues<sup>1</sup>  
Renato Martins Assunção<sup>1</sup>  
Elsa Mendonza<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Universidade Federal de Minas Gerais - UFMG  
Av. Antônio Carlos 6627, 31270-901, Belo Horizonte, MG, Brasil  
rafaufmg@yahoo.com.br, {britaldo, hermann}@csr.ufmg.br, assunção@est.ufmg.br

<sup>2</sup> Instituto de Pesquisa Ambiental da Amazônia - IPAM  
Av. Nazaré 669, 66035-170, Belém, Pará, Brasil  
ane@ipam.org.br, elsa\_mendoza@uol.com.br

**Abstract.** To the present, fire models developed for the Amazon region rely solely on the occurrence of hot pixels. However, this approach may underestimate fire events, since understory fires are usually not detected by low-resolution thermal imagery. In this work we have developed a spatially explicit simulation model of fire propagation using a cellular automata probabilistic approach implemented on Dinamica EGO platform. This model was developed for the Xingu headwaters in the State of Mato Grosso. The ignitions sources are represented here by hot pixels obtained from NOAA-12 night satellite. The probability for fire to spread is a function of distance to ignition sources, terrain features - such as river channels and topography -, land use, and climatic conditions including Vapor Pressure Deficit and wind prevailing direction. Spatial fitness attained 50% within a window size of 10 km and the fire frequency matched a hundred percent with the observed number of fire events. In a next phase this model will be coupled to a carbon flux model in order to simulate future fire regimes under climate and deforestation scenarios aiming to determine forest resilience thresholds and thereby predict the Amazon ecosystem tipping point.

**Palavras-chave:** understory fires, hot pixels, cellular automata, weights of evidence, Dinâmica EGO, fogo de sub-bosque, focos de calor, autômato celular, pesos de evidência, Dinâmica EGO.

### 1. Introdução

O fogo, principalmente incêndios de sub-bosque, é uma crescente causa de empobrecimento da floresta Amazônica. Estima-se que durante o período El-Niño de 1997-1998, aproximadamente 40.000 km<sup>2</sup> da floresta foram atingidos pelo fogo de sub-bosque, emitindo entre 0,024 a 0,165 Pg de carbono na atmosfera (Alencar et al., 2006), números que tendem a crescer devido ao aumento da frequência de eventos de secas severas no futuro (Cox et al., 2004). Além de alterar a composição da atmosfera, o fogo modifica a estrutura e a diversidade da floresta (Cochrane, 2003), danos que podem ser irreversíveis perante a recorrência do fogo (Nepstad, 2007).

O fogo sempre foi utilizado por moradores locais da Amazônia como uma ferramenta necessária para a manutenção da agricultura e pecuária uma vez que eles conheciam a capacidade da floresta em extingui-lo caso ele escapasse da sua intenção inicial (Nepstad et al., 1999b). Contudo, atualmente, a susceptibilidade da floresta ao fogo tem sido intensificada pela crescente ação do homem (Goldammer et al., 1990), induzindo a fragmentação da floresta e conseqüentemente condições climáticas mais secas, provenientes das áreas desmatadas vizinhas, em seu interior (Kapos et al., 1993; Gascon et al., 2000). Entretanto, a flamabilidade apenas resulta em fogo mediante a presença de uma fonte de ignição, fornecidas em abundância pelas atividades agrícolas (Alencar et al., 2004).

Por comumente se originarem em áreas abertas – como pastagens, áreas de agricultura ou regiões desmatadas – as fontes de ignição dos incêndios de sub-bosque são geralmente captadas pelos satélites de monitoramento, como focos de calor, e disponibilizados gratuitamente na internet (INPE, 2006), ao contrário do fogo que corre abaixo do dossel, dificilmente detectado por estes satélites (Nepstad et al., 1999b). A obtenção de dados de incêndio de sub-bosque fica então condicionada à interpretação de imagens de satélites, obtidas logo após o incêndio florestal, haja vista que as cicatrizes de fogo são rapidamente apagadas nas imagens e frequentemente confundidas com desmatamento (Nepstad et al., 1999a). Portanto, devido à maior dificuldade de se obter dados de incêndio de sub-bosque, os modelos de fogo desenvolvidos para a Amazônia (Cardoso et al., 2003; Nepstad et al., 2004; Sismanoglu e Setzer, 2005; Silvestrini et al., submetido) abordam apenas a ocorrência de focos de calor, como obtido pelos produtos de sensoriamento remoto termal, e não a extensão real das áreas incendiadas.

O modelo apresentado aqui visa simular o processo de propagação do fogo a partir de uma fonte de ignição, utilizando-se abordagem probabilística e autômato celular. A fonte de ignição é dada pela ocorrência de um foco de calor, que pode ser tanto observada como também simulada (Silvestrini et al., submetido). A partir daí o fogo pode-se propagar caso as condições ambientais, climáticas e biofísicas, sejam favoráveis. A calibração do modelo baseou-se em focos de calor do satélite NOAA-12 noite e cicatrizes de incêndios de sub-bosque mapeadas através de imagens LandSat de 2005. Os resultados foram validados comparando-se a área simulada com a observada em termos de extensão e frequência e localização dos eventos de fogo.

## **2. Materiais e Métodos**

Modelos de fogo são constituídos basicamente por três componentes: ignição, espalhamento e extinção. Os focos de calor representam os centros de ignição, enquanto a área atingida pelo fogo na floresta se faz representar pelas cicatrizes. O mapeamento destas áreas, bem como da cobertura florestal, se realizou por meio de interpretação de imagens LandSat TM e ETM+, sendo verificada por meio de entrevistas com moradores locais, conforme metodologia explicitada em Alencar et al. (2004). O mosaico de 9 cenas LandSat obtidas entre 3 de julho a 20 de agosto de 2005 mostram os incêndios ocorridos provavelmente neste ano até o mês de agosto, porém a data exata de cada uma das manchas é desconhecida. A área de estudo, bem como as cicatrizes, pode ser visualizada na Figura 1. A fim de verificar se há dependência espacial entre os focos de calor e as cicatrizes, ou seja, se os focos poderiam dar indicação das fontes de ignição ao processo de espalhamento de fogo, utilizou-se a função K-12 de Ripley (Bailey e Gatrell, 1995), uma técnica estatística que avalia o grau de dependência espacial entre dois tipos de eventos pontuais, e seus envelopes de confiança. Para o cálculo dessa função, as cicatrizes, constituídas de dados de área, foram representadas pelos seus centróides.

Detectada a dependência espacial positiva entre focos e cicatrizes, o modelo simula, em um passo de tempo mensal e resolução espacial de 320 metros, o espalhamento do fogo a partir de um foco de calor ocorrido no interior da floresta ou a uma distância máxima de 4 km dela. O fogo é propagado de maneira estocástica para célula vizinha caso a probabilidade de espalhamento seja alta o suficiente. O mapa de probabilidade de espalhamento é uma fusão de dois mapas: um referente à distância custo, que combina variáveis biofísicas para medir o esforço feito pelo fogo em se espalhar, e outro relacionado às condições climáticas no interior da floresta. Quando se inicia o espalhamento, o mapa de probabilidade é ajustado de acordo com a direção do vento e o número de células vizinhas em estado fogo em relação a que está sendo analisada naquele momento pelo autômato celular, implementado sobre a plataforma do

Dinamica EGO ([www.csr.ufmg.br/dinamica](http://www.csr.ufmg.br/dinamica)). Cada uma dessas etapas será descrita mais detalhadamente nas subseções seguintes.

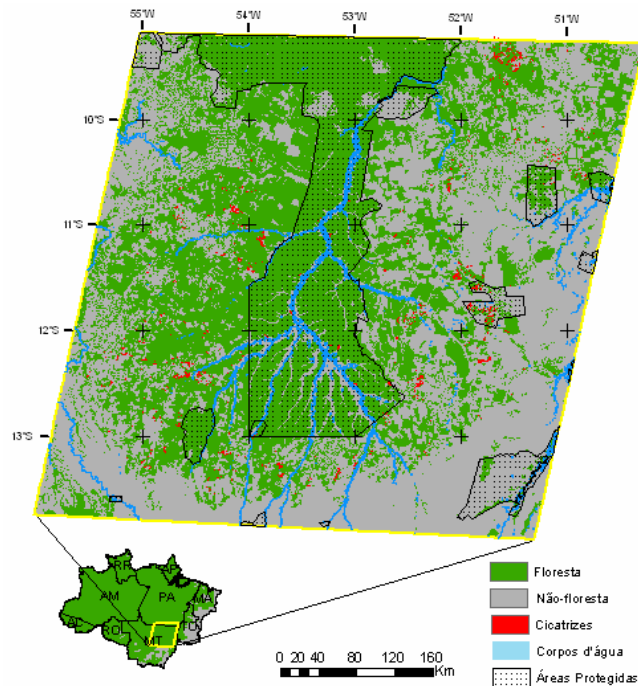


Figura 1: Área de Estudo e cicatrizes de incêndio de sub-bosque observadas em 2005.

## 2.1 Probabilidade referente à distância custo

A probabilidade calculada neste estágio reflete o esforço feito pelo fogo para se propagar a partir de um foco de calor até a célula  $i$ , de maneira que quanto maior o valor de probabilidade maior a facilidade para o fogo atingir a célula. Este mapa de probabilidade tem como variável explicativa a distância custo, a qual integra fatores que podem auxiliar ou desfavorecer o espalhamento, como sentido da encosta, corpos d'água e se a célula está no interior da floresta ou em área desmatada. A distância custo é obtida acumulando os valores de fricção de cada uma das células até o foco de calor mais próximo, sendo o mapa de fricção resultado da aplicação do seguinte algoritmo:

1. Calcula a distância de cada célula até o foco de calor mais próximo;
2. Para cada célula  $i$ :
  - 2.1. Considera janela de vizinhança de 3 x 3 células;
  - 2.2. Escolhe a célula vizinha cuja distância ao foco é a menor. A célula de menor distância é escolhida porque o espalhamento será iniciado a partir de um foco de calor;
  - 2.3. Se a altitude da célula  $i$  é menor que a da célula escolhida em (2.2), então o peso é igual a 2, caso contrário corresponde a 0,5. Desta maneira, o espalhamento é favorecido no sentido morro acima.
  - 2.4. Se a célula  $i$  faz parte da rede hidrográfica, então é somado 0,5 à fricção obtida em (2.3), dificultando o espalhamento perante a existência de água;
  - 2.5. Se a célula  $i$  encontra-se no interior da floresta, acrescenta-se 0,5 ao mapa obtido em (2.4), indicando maior facilidade de propagação fora da floresta, onde as condições climáticas são mais favoráveis.

Nesses cálculos foram considerados os focos de calor de agosto, mês com maior número de focos. Dado o mapa de distância custo, a probabilidade é estimada aplicando-o ao método de pesos de evidência (Bonham-Carter, 1994), escolhido por ser uma técnica de estatística

Bayesiana, não paramétrica, portanto mais adequada à modelagem de dados espaciais. Apesar de o modelo apresentar resolução mensal, o mapa de probabilidade dado a distância-custo é calculado anualmente, uma vez que as variáveis envolvidas em seu cálculo não variam significativamente ao longo de um ano. Dados de hidrografia foram fornecidos pela secretaria do Meio Ambiente do Mato Grosso e o mapa de declividade obtido através de imagens SRTM.

## 2.2 Probabilidade relacionada ao clima no interior da floresta

A chance de espalhamento do fogo devido condições climáticas é estimada a partir de uma analogia entre estudos de campo e condições climáticas. Devido à inexistência de dados climáticos no interior da floresta amazônica, foram utilizados valores de déficit de pressão de vapor no interior da floresta, denominado VPD interno, simulados pelo CARLUC – CARbon and Land-Use Change - (Hirsch et al., 2004), modelo que simula o fluxo de carbono entre os componentes da floresta e da floresta para a atmosfera. Ray et al. (2005), analisando florestas no estado do Pará, mostram que o espalhamento do fogo tende a ser inibido quando o VPD interno encontra-se inferior a 0,8; contudo, como a área de estudo do presente trabalho se encontra em uma floresta de transição, com condições climáticas mais secas, espera-se um limiar de VPD interno superior a 0,8. Este limiar foi obtido através da comparação entre os valores de VPD interno das células de cicatrizes com aquelas que não apresentaram fogo, a qual sugeriu que a propagação é favorecida por VPD interno acima de 1,52, pois a maioria das cicatrizes mostrou VPD interno superior a este valor nos meses mais secos (junho a agosto).

A adoção apenas deste limiar na decisão do espalhamento do fogo acarretaria uma função de risco de propagação discreta, enquanto se sabe que quanto mais seco maior a probabilidade de fogo. Por esse motivo optou-se por criar uma função contínua de risco, seguindo uma distribuição logística (Figura 2), estimada através de uma amostra dos valores de VPD interno e das cicatrizes observados. Esta função é aplicada mensalmente nos mapas de VPD interno.

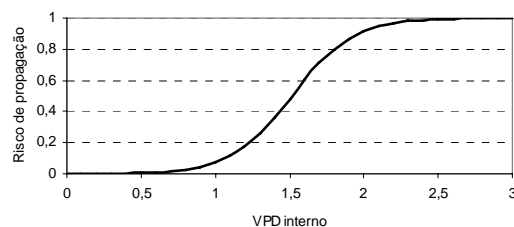


Figura 2: Risco de propagação do fogo dado o VPD interno.

## 2.3 Simulação do mecanismo de propagação do fogo

Essa fase utiliza as duas probabilidades descritas anteriormente, juntamente aos dados de campos de vento e o número de vizinhos com fogo à célula sob análise, para simular, estocasticamente em frequência mensal, a propagação do fogo. Os mapas de direção do vento foram fornecidos pelo CPTEC-INPE e constituem-se das médias mensais das componentes zonal e meridional observadas em 2005.

Inicialmente, para cada mês, multiplica-se a probabilidade referente à distância custo pelo risco dado pelo VPD interno, se a célula encontra-se no interior da floresta e caso esteja em área desmatada, considera-se apenas a probabilidade referente à distância custo. A partir deste ponto, tendo como mapa de fogo inicial o mapa de focos de calor, inicia-se a propagação, restrita a 30 repetições, cada uma com os seguintes passos: (1) a probabilidade é multiplicada por um fator de acordo com a direção do vento, que varia de 1,05 se o vento favorece a propagação, a 0,8 caso o vento esteja em sentido contrário ao da propagação em análise naquele instante; (2) a probabilidade é multiplicada por outro fator, que varia de 1, se a célula

não possui nenhum vizinho com fogo, a 1,1 se a célula apresenta os 8 vizinhos com fogo. Para evitar que as probabilidades ajustadas por esses fatores ultrapassem 1 ao longo das repetições, trunca-se esta probabilidade em 0,99; (3) verifica-se se o fogo irá se espalhar ou não para a célula vizinha através do sorteio: se o valor da probabilidade é superior a um número aleatório proveniente da distribuição Beta(3;0,9), uma distribuição caudal esquerda, então o fogo passa para a célula vizinha, caso contrário o espalhamento não ocorre. Escolheu-se esta distribuição devido ao histograma dos valores de probabilidade inicial (sem ajuste do vento e da vizinhança) das células em que foi observado fogo de sub-bosque ter apresentado distribuição semelhante à Beta(3;0,9).

A calibração foi feita de maneira que a soma das cicatrizes simuladas mensalmente passe a corresponder, tanto em relação à distribuição espacial quanto em termo de quantidade de células, às cicatrizes observadas. O número de repetições, 30, – superior a 23, número necessário para chegar-se a convergência das áreas queimadas no mês com maior número de focos de calor – foi adotado de maneira a permitir que o fogo se extinga por si mesmo, quando a probabilidade de espalhamento torna-se baixa o suficiente para ser rejeitada pelo teste aleatório.

Depois de efetuada a calibração, o modelo de espalhamento é acoplado ao modelo de ignição (Silvestrini et al., submetido), ou aos focos de calor observados. Os resultados discutidos a seguir utilizam os focos de calor simulados.

### 3. Resultados e Discussão

Considerando a distância-custo, a probabilidade de espalhamento (Figura 3) é superior nas bordas e diminui à medida que se adentra a floresta, em conformidade com estudos anteriores, que relacionam fogo de sub-bosque e características da paisagem (Cochrane e Laurance, 2002; Alencar et al., 2004).

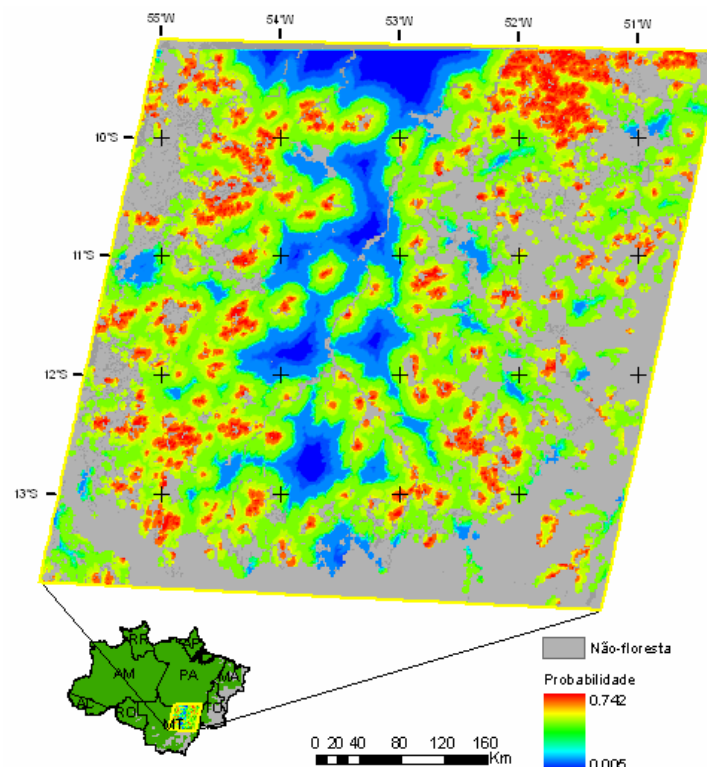


Figura 3: Probabilidade de espalhamento devido ao custo acumulado.

A probabilidade climática é integrada ao mapa de probabilidade do custo acumulado mensalmente, e a partir deste ponto os mapas de probabilidade se alteram em função de fatores relacionados à direção do vento e ao número de células vizinhas em estado fogo. O resultado da aplicação desses mapas dinâmicos no autômato celular é apresentado na Figura 4, a qual mostra a fusão das manchas de espalhamento obtidas em cada um dos meses. A quantidade de células de cicatrizes simuladas é 1% maior que a quantidade das manchas observadas. A distribuição temporal da quantidade de cicatrizes de sub-bosque simuladas mensalmente seguiu o padrão esperado para a região: aumento da área queimada nos meses mais secos, entre maio e agosto. Este resultado deve-se não apenas à pequena quantidade de focos de calor simulados no início do ano, mas também ao efeito da probabilidade de espalhamento nestes meses, pois se observou que os poucos focos ocorridos não se propagaram devido à baixa probabilidade de espalhamento, condicionada principalmente pelo clima, mais úmido nos primeiros meses do ano.

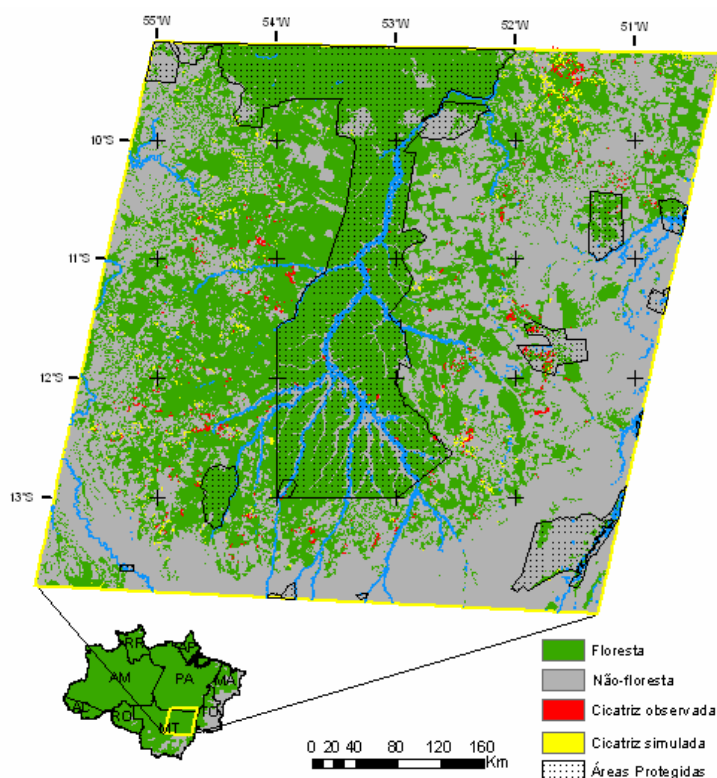


Figura 4: Áreas atingidas pelo fogo simuladas e observadas

A Figura 4 mostra que as áreas simuladas e observadas tendem a se concentrar nas mesmas regiões, próximas às áreas desmatadas. A concordância espacial entre cicatrizes simuladas e observadas foi testada através do método Fuzzy (Soares-Filho et al., 2008), que calcula a porcentagem de acerto considerando diferentes tamanhos de janela. No gráfico da Figura 5, é mostrado que em uma janela de aproximadamente 10 x 10 km, 50% das células simuladas coincidem com as observadas.

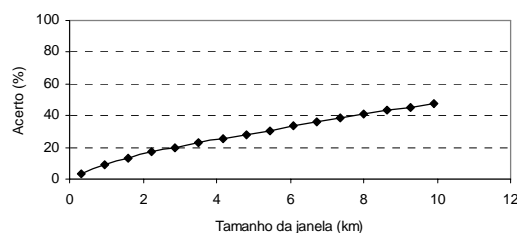


Figura 5: Similaridade entre cicatrizes observadas e simuladas.

Em próximas versões, seria desejável a obtenção de dados de incêndio de sub-bosque com resolução temporal mensal, pois permitiria calibração e validação dos resultados mais refinada. Melhorias adicionais seriam observadas também ao incorporar o efeito do fogo na quantidade de combustível e no clima local, fatores que levam a modificações na intensidade e no intervalo de recorrência do fogo (Balch et al., 2008). A incorporação destes fatores será realizada na próxima versão através do acoplamento do modelo de fogo ao CARLUC (Hirsch et al., 2004), o qual modifica as condições climáticas e a quantidade e alocação da biomassa após a ocorrência do fogo, exploração madeireira seletiva e desmatamento.

#### 4. Conclusões

Este artigo apresenta a primeira versão da metodologia do espalhamento de fogo, parte integrante de um modelo pioneiro na Amazônia ao considerar todas as fases de um incêndio: ignição, propagação e extinção.

O modelo de espalhamento, juntamente às fontes de ignição previamente simuladas, mostrou que a abordagem probabilística adotada neste trabalho – através das variáveis distância a uma fonte de ignição, declividade, condições climáticas no interior da floresta, presença de corpos d'água e floresta densa – é capaz de fornecer estimativas satisfatórias da quantidade e localização da área queimada, apesar da necessidade de incorporar o efeito do fogo na probabilidade no espaço de tempo seguinte. A área atingida pelo fogo foi 1% superior que a observada e considerando a distribuição espacial das manchas, observou-se 50% de acerto em uma janela de 10 x 10 km.

Simulações de cenários futuros para a Amazônia (Soares-Filho et al., 2006) não consideram o fogo como um dos distúrbios responsáveis pela degradação da floresta devido à inexistência de modelos de fogo. Futuramente, a integração do modelo apresentado neste trabalho ao CARLUC permitirá a simulação de cenários futuros para a região do Xingu, incluindo as perturbações pelo fogo em conjunto com desmatamento e exploração madeireira.

#### Agradecimentos

Somos gratos ao Instituto de Pesquisa Ambiental da Amazônia (IPAM), projeto Large-Scale Biosphere Atmosphere Experiment (LBA-ECO) e ao CNPq pelo financiamento desta pesquisa. Agradecemos também ao Dr. Saulo Freitas, que forneceu os dados de campos de vento, e Daniel Nepstad pelo incentivo.

#### Referências Bibliográficas

- Alencar, A.; Nepstad, D.C.; Diaz, M.C.V. Forest understory fire in the Brazilian Amazon in ENSO and non-ENSO years: Area burned and committed carbon emissions. **Earth Interactions**, v. 10, n. 6, p. 1-16, 2006.
- Alencar A.; Solorzano, L.A., Nepstad, D.C. Modeling forest understory fires in an eastern Amazonian landscape. **Ecological Applications**, v. 14, n. 4, p. S139–S149, 2004.
- Bailey, T.; Gatrell, A. **Interactive Spatial Data Analysis**, Harlow: Longman, 1995, 413 p.
- Balch, J.K.; Nepstad, D.C.; Brando, P.M.; Curran, L.C.; Portela, O.; de Carvalho Jr, O.; e Lefebvre. P. Negative fire feedback in a transitional forest of Southeastern Amazonia. **Global Change Biology**, v. 14, p. 1-12, 2008.
- Bonham-Carter, G 1994. **Geographic information systems for geoscientists: modelling with GIS**. New York, Pergamon, 398 p.
- Cardoso, M.F.; Hurtt C.G.; Moore, B.; Nobre, C.A.; Prins, E.M. Projecting future fire activity in Amazonia. **Global Change Biology**, v. 9, p. 656 – 669, 2003.
- Cochrane, M.A. Fire Science for rainforests. **Nature**, v. 421, p. 913-919, 2003.

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

Cox, P.M.; Betts, R.A.; Collins, M.; Harris, P.P.; Huntingford, C.; Jones, C.D.; Amazonian forest dieback under climate-carbon cycle projections for the 21st century. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 78, p. 137-156, 2004.

Goldammer, J. G. Fire in the Tropical Biota. Berlin: Springer, 1990.

Hirsch, A.I.; Little, W.S.; Houghton, R. A.; Scott, N.A.; White, J. D. The net carbon flux due to deforestation and forest re-growth in the Brazilian Amazon: analysis using a process-based model. **Global Change Biology**, v. 10, p. 908 – 924, 2004.

Inpe. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. Monitoramento de queimadas. Disponível em <<http://www.cptec.inpe.br/queimadas>> Acesso em 22 Novembro.2006.

Kapos, V.; Ganade, G.; Matsui, E.; Victoria, R.L.. d13C as and indicator of edge effects in tropical rainforest reserves. *Journal of Ecology*, v. 81, p. 425-432, 1993

Nepstad, D. The Amazon's Vicious Cycles. Drought and fire in the greenhouse. Ecological and climatic tipping points of the world's largest tropical rainforest and practical preventative measures. World Wildlife Fund. In: United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC) Conference of the Parties (COP), Dezembro, 2007, Bali, Indonesia. Disponível em: <[http://www.whrc.org/resources/published\\_literature/pdf/NepstadWWF.07.pdf](http://www.whrc.org/resources/published_literature/pdf/NepstadWWF.07.pdf)>. Acesso em 20 jun. 2008.

Nepstad, D.C.; Lefebvre, P.; Silva, U.L.; Tomasella, J.; Schlesinger, P.; Solórzano, L.; Moutinho, P.; Ray, D.; e Guerreira Benito, J. Amazon drought and its implications for Forest flammability and tree growth: a basin wide analysis. **Global Change Biology**, v. 10, p. 1–14, 2004.

Nepstad, D.C.; Veríssimo, A.; Alencar, A.; Nobre, C.; Lima, E.; Lefebvre, P.; Schlesinger, P.; Potter, C.; Moutinho, P.; Mendoza, E.; Cochrane, M.; e Brooks, V. Large-scale impoverishment of Amazonian forests by logging and fire. **Nature**, v. 398, p. 505-508, 1999a.

Nepstad, D. C.; Moreira, A. G.; Alencar, A. Flames in the rain forest: Origins, impacts and alternatives to Amazonian Fire. Brasília: Editora Universidade de Brasília, 1999b. 140 p.

Ray, D.; Nepstad D. C.; Moutinho, P. Micrometeorological and Canopy Controls of fire susceptibility in an East-Central Amazon Landscape. *Ecological Applications*, v. 15, n. 5, p. 1664-1678, 2005.

Sismanoglu R.A., Setzer A.W. Risco de fogo da vegetação na América do Sul: comparação de três versões na estiagem de 2004. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto (SBSR), 12., 2005, Goiânia. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2005. Artigos, p. 3349-3355. CD-ROM, On-line. ISBN 85-17-00018-8. Disponível em: <<http://marte.dpi.inpe.br/col/ltid.inpe.br/sbsr/2004/11.22.09.33/doc/3349.pdf>> Acesso em: 20 out. 2007.

Soares-Filho, B.S., Rodrigues, H.O., Falieri, A., Costa, W.L. Dinâmica EGO Tutorial. 2008 <<http://www.csr.ufmg.br/dinamica>>

Soares-Filho, B.S.; Nepstad, D.C.; Curran, L.M.; Cerqueira1, G.C.; Garcia, R.A.; Ramos, C.A.; Voll, E.; McDonald, A.; Lefebvre, P.; e Schlesinger. P. Modelling conservation in the Amazon basin. **Nature**, v. 440, n. 7083, p.520-523, 2006.