

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ANÁLISE E MODELAGEM DE SISTEMAS
AMBIENTAIS**

LUCAS RODRIGUES DE SOUSA SANTOS

**TRAJETÓRIAS FUTURAS DO FOGO FLORESTAL NO BIOMA AMAZÔNICO SOB
AS MUDANÇAS DO CLIMA**

**BELO HORIZONTE
MINAS GERAIS – BRASIL
2018**

LUCAS RODRIGUES DE SOUSA SANTOS

**TRAJETÓRIAS FUTURAS DO FOGO FLORESTAL NO BIOMA AMAZÔNICO SOB
AS MUDANÇAS DO CLIMA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós Graduação
em Análise e Modelagem de Sistemas Ambientais da
Universidade Federal de Minas Gerais como requisito
parcial para obtenção do título de *Magister Scientific*.

Orientador: Prof. Dr. Britaldo Silveira Soares Filho

Co-orientador: Dr. Ubirajara Oliveira

BELO HORIZONTE
MINAS GERAIS – BRASIL
2018

S237t Santos, Lucas Rodrigues de Sousa.
2018 Trajetórias futuras do fogo florestal no bioma amazônico sob as mudanças do clima [manuscrito] / Lucas Rodrigues de Sousa Santos. – 2018.
x,41 f., enc.: il. (principalmente color.)

Orientador: Britaldo Silveira Soares Filho.
Coorientador: Ubirajara Oliveira.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Minas Gerais, Departamento de Cartografia, 2018.
Bibliografia: f. 37-41.

1. Modelagem de dados – Aspectos ambientais – Teses. 2. Incêndios florestais – Teses. 3. Mudanças climáticas – Teses. 4. Amazônia – Teses. I. Soares Filho, Britaldo Silveira. II. Oliveira, Ubirajara de. III. Universidade Federal de Minas Gerais. Departamento de Cartografia. IV. Título.

CDU: 911.2:519.6(811)



FOLHA DE APROVAÇÃO

**TRAJETÓRIAS FUTURAS DO FOGO FLORESTAL NO BIOMA AMAZÔNICO SOB
AS MUDANÇAS DO CLIMA**


LUCAS RODRIGUES DE SOUSA SANTOS


Dissertação submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em ANÁLISE E MODELAGEM DE SISTEMAS AMBIENTAIS, como requisito para obtenção do grau de Mestre em ANÁLISE E MODELAGEM DE SISTEMAS AMBIENTAIS, área de concentração ANÁLISE E MODELAGEM DE SISTEMAS AMBIENTAIS.

Aprovada em 25 de janeiro de 2018, pela banca constituída pelos membros:


Prof. Britaldo Silveira Soares Filho - Orientador
UFMG


Prof. Ubirajara de Oliveira - Coorientador
UFMG


Profa. Maria Marcia Magela Machado
UFMG


Profa. Sonaira Souza da Silva
UFAC

Belo Horizonte, 25 de janeiro de 2018.

Lamento de Raça

(Emerson Maia)

O índio chorou, o branco chorou
 Todo mundo está chorando
 A Amazônia está queimando
Ai, ai, que dor Ai, ai, que horror
 O meu pé de sapopema
 Minha infância virou lenha
Ai, ai, que dor Ai, ai, que horror
Lá se vai a saracura correndo dessa quentura
 E não vai mais voltar
Lá se vai onça pintada fugindo dessa queimada
 E não vai mais voltar
Lá se vai a macacada junto com a passarada
 Para nunca mais, voltar
Para nunca mais, nunca mais voltar
 Virou deserto o meu torrão
 Meu rio secou, pra onde vou?
Eu vou convidar a minha tribo
 Pra brincar no Garantido
 Para o mundo declarar
 Nada de queimada ou derrubada
A vida agora é respeitada todo mundo vai cantar
 Vamos brincar de boi, tá Garantido
 Matar a mata, não é permitido

AGRADECIMENTOS

Primeiramente à minha família, especialmente à minha mãe, por todo o suporte e carinho nos momentos mais críticos.

À minha namorada, Raíza Salomão Precinoto, por todo apoio e companheirismo nas horas mais difíceis.

Ao meu amigo/irmão Arthur Ramom da Silva Amaro, pelas longas conversas.

A todos os colegas de curso. Foi um grande aprendizado estar com todos vocês.

Ao meu orientador, competente e dedicado, com o qual pude contar ao longo desses dois anos. Obrigado pelas oportunidades acadêmicas e profissionais.

À equipe do CSR, em especial os pesquisadores Evandro, Alexandre e Marcilla, pelas reflexões e discussões.

À Pamela, um pilar central na sustentação do curso de modelagem de sistemas ambientais.

BIOGRAFIA

Lucas Rodrigues de Sousa Santos, filho de Arlete Gonçalves de Sousa Santos e Rogerio Rodrigues de Sousa, nasceu em 08 de março de 1992, na cidade de Belo Horizonte.

Em março de 2011, iniciou o curso de Física pela Universidade Federal de Minas Gerais, localizada na cidade de Belo Horizonte-MG. Durante quatro anos, participou de atividades de iniciação científica na qualidade de bolsista. Em 2014, Realizou um intercambio na Universidade do Estado de Indiana por dois semestres. Graduou-se em Física no segundo semestre de 2015.

Em março de 2016, ingressou no Programa de Pós-Graduação em Análise e Modelagem de Sistemas Ambientais da Universidade Federal de Minas Gerais - UFMG, em nível de mestrado, submetendo-se à defesa de tese em 25 de Janeiro de 2018.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	vii
LISTA DE EQUAÇÕES.....	viii
LISTA DE TABELAS	viii
1 CONTEXTUALIZAÇÃO	3
2 INTRODUÇÃO	5
3 OBJETIVOS.....	7
4 MATERIAIS E MÉTODOS.....	8
4.1 Área de estudo.....	8
4.2 Visão geral dos modelos	9
4.2.1 Ignição	11
4.2.2 Calibração e validação	12
4.3 Espalhamento	14
4.3.1 Calibração e validação	15
4.4 CARLUC.....	18
4.4.1 Modelagem das secas históricas de 2005 e 2010	20
4.4.2 Calibração e validação	21
5 PROJEÇÃO DO CLIMA	23
6 PROJEÇÃO DO DESMATAMENTO (OTIMIZAGRO).....	29
7 RESULTADOS E DISCUSSÃO	31
8 CONCLUSÕES	35
9 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	37

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Área de estudo. Região meridional do bioma amazônico.	8
Figura 2: FISC - diagrama de Amazon contendo módulos Ignition, Spread e CARLUC. Distribuição: Hydro (hidrografia), uVPD (déficit de pressão de vapor do understory), W (Cargas de combustível), Wf (Wind factor), Nbf (Neighbor factor). CarLuc: Ckm (Fator Constante), Qe (Eficiência Quântica), Lr (Fator Constante), Fnr (constnte), NPP (Produtividade Primária Líquida), MetLL (Metabolic Leaf Litter), StrucLL (Lixo Estrutural), CWD (Detritos de madeira), StrucRL (Lixa de raízes estruturais), MetRL (Lixa de raízes metabólicas), LMC (teor de umidade da lote), W (Cargas de combustível), FSR (taxa de propagação do fogo).....	10
Figura 3: Calibração da ignição para o ano de 2003. Embora o modelo subestime a quantidade de hot-pixels na calibração, a correlação entre a dispersão apresenta boa significância para a calibração.	13
Figura 4: Validação da ignição de 2004 a 2010. Anos secos (2005, 2007 e 2010) dispersam a correlação para a validação, com 2009, 2008 e 2006 apresentando os melhores resultados.	13
Figura 5: Parâmetros ($\alpha = -6.39$ e $\beta = 4.08$) da regressão logística.	16
Figura 6: Validação da área queimada. Correlação de 89%.....	16
Figura 7: Distribuição espacial das áreas queimadas (Validação)	17
Figura 8: Secas históricas de 2005 e 2010 para o bioma Amazônico. Epicentros bem localizados a oeste (2005) e sudeste (2010).....	21
Figura 9: Validação CARLUC baseado em experimento de larga escala (Brando, Balch, Nepstad, Morton, Putz, Coe, Silvério, Macedo, Davidson, Nóbrega, et al. 2014)	22
Figura 10: Projeções de temperatura para o sul da Amazônia durante o mês de seleção para cada modelo CMIP5. Todos os modelos mostram aumento de temperatura. Embora existam diferenças entre os modelos climáticos, praticamente não existem nos cenários.	24
Figura 11: Projeção do déficit de pressão de vapor para (A) RCP 8.5 e (B) RCP 2.6.	25
Figura 12: Projeções de precipitação para o sul da Amazônia durante o mês mais seco para cada modelo CMIP5. Os modelos não mostram uma tendência clara. Embora existam diferenças entre os modelos climáticos, praticamente não há nenhum cenário entre cenários.....	27
Figura 13: Projeção dos MCWD para (A) RCP 8.5 e (B) RCP 2.6.....	28
Figura 14: Desmatamento anual por estado.	30

Figura 15: Projeção do desmatamento (OTIMIZAGRO). Concentração na porção sudeste do bioma.	31
Figura 16: Métricas do regime de incêndio para a Amazônia do Sul do Brasil entre 2002 e 2050. Painel A: área queimada por ano (primeiro eixo y, barras) e acumulado (segundo eixo dos eixos) de acordo com dois cenários de mudança climática (RCP 2.6 e RCP 2.6, linhas contínuas) e dois cenários de desmatamento (D: business-as-usual; N: não há novos desmatamentos, linhas tracejadas). Os gráficos de barras representam apenas os cenários RCP8.5D e RCP2.6D. Painel B: intensidade de incêndio representada por médias móveis de 5 anos (linhas contínuas) e valores anuais. Painel C: emissões anuais de carbono bruto dos incêndios florestais projetados. As linhas tracejadas representam as linhas de base do desmatamento para os períodos 2000-2005 (linha superior) e 2006-2010 (linha inferior). Painel D: emissões líquidas do desmatamento modelado (linha pontilhada) e incêndios florestais.	32
Figura 17: Projeção espacial dos padrões de queima. Deslocamento dos incêndios para a porção central da Amazônia.	34

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1: Diferença de temperatura entre séries projetadas (T_p) e históricas (T_h) dos modelos.....	26
Equação 2: Incremento da pressão de saturação $\Delta e_s(T)$ como função da temperatura.....	26
Equação 3: Déficit de pressão de vapor projetado em função da pressão de saturação observada e modelada (e_s e Δe_s). R_h max representa umidade relativa máxima.	26
Equação 4: Diferença de precipitação entre séries projetadas (T_p) e históricas (T_h) para os modelos.....	29
Equação 5: Déficit cumulativo de água máximo projetado como função da diferença de precipitação dos modelos. 'E' significa evapotranspiração e $Cwd(n-1)$ para o Déficit de Água Cumulativo do último mês.	29
Equação 6: Déficit cumulativo de água máximo futuro com base em 2010.	29

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Variáveis utilizadas na ignição.....	12
Tabela 2: Variables used on spread component	15
Tabela 3: Variáveis climáticas utilizadas no modelo Carluc.....	20

RESUMO

RODRIGUES, Lucas Rodrigues de Sousa Santos, M.Sc., Universidade Federal de Minas Gerais, janeiro de 2018. **Trajetórias futuras do fogo florestal no bioma Amazônico sob as mudanças do clima.** Orientador: Britaldo Soares-Filho. Coorientador: Ubirajara Oliveira.

As interações entre eventos climáticos extremos e mudanças no uso da terra podem exacerbar as emissões de carbono (C) provenientes dos incêndios florestais tropicais nas próximas décadas. Todavia, a maior parte das projeções climáticas ignora este distúrbio. Aqui, usamos um modelo ecossistêmico acoplado de fogo para mostrar que a secagem e o aquecimento regional já comprometidos na porção meridional do bioma Amazônico pode desencadear incêndios florestais mais extensos e severos, emitindo 2.9 PgC (bilhões de toneladas) para a atmosfera até 2050. A redução do desmatamento em nossas simulações sugere que as emissões relacionadas ao fogo podem ser reduzidas pela metade, em função da diminuição em área queimada, principalmente a propagação do fogo em florestas protegidas. Os esforços agressivos para eliminar as fontes de ignição e suprimir os incêndios florestais indesejados podem reduzir ainda mais as emissões, particularmente se as iniciativas globais para reduzir as emissões de gases de efeito estufa tenham sucesso na prevenção de ocorrências futuras de secas extensas e extensas da Amazônia.

Palavras-chave: FISC – Amazônia, incêndios florestais, mudanças climáticas.

ABSTRACT

RODRIGUES, Lucas Rodrigues de Sousa Santos, M.Sc., Universidade Federal de Minas Gerais, January, 2018. **Future forest fire trajectories of the Amazon Biome under climate change** . Adviser: Britaldo Soares-Filho. Co-adviser: Ubirajara Oliveira.

Interactions between extreme weather events and changes in land use can exacerbate carbon emissions (C) from tropical forest fires in the coming decades. However, most climate projections ignore this disturbance. Here, we use a coupled fire ecosystem model to show that regional drying and warming already committed on the southern Amazon biome can trigger more extensive and severe forest fires, emitting 2.9 PgC (billion tons) into the atmosphere by 2050. Reducing deforestation in our simulations suggests that fire-related emissions can be reduced by half, due to the decrease in burned area, mainly because of the spread of fire inside protected forests. Aggressive efforts to eliminate sources of ignition and suppress unwanted forest fires can further reduce emissions, particularly if global initiatives to reduce greenhouse gas emissions succeed in preventing future occurrences of extensive and extensive droughts in the Amazon.

Keywords: FISC – Amazon, forest fires, climate change.

1 CONTEXTUALIZAÇÃO

A bacia Amazônica é, consistentemente, um componente vital no sistema climático global (Cox et al. 2004, Del Grosso et al. 2008, Nobre, Sellers, and Shukla 1991, Grace 2004). Devido à sua vasta extensão, quaisquer perturbações, sejam induzidas pelo clima ou pelo homem, podem causar mudanças significativas na ciclagem global do carbono (Aragao et al. 2014) e em sua estrutura ecossistêmica (Cochrane 2003b). Mesmo alterações em pequena escala na dinâmica ecológica das florestas da Amazônia podem causar *feedbacks* climáticos regionais e globais (Nobre, Sellers, and Shukla 1991, Cox et al. 2004), além de pontos de transbordo (*tipping points*) no sistema terrestre (Lenton et al. 2008, Lenton 2011) com implicações diretas para a sustentabilidade, biodiversidade e processos ecossistêmicos florestais (Cochrane and Barber 2009, Nepstad, Stickler, Filho, et al. 2008, Cochrane et al. 1999).

Uma perturbação significativa no equilíbrio dinâmico da Amazônia é o fogo (Cochrane 2003a, Nepstad et al. 1999, Alencar, Solórzano, and Nepstad 2004). O mesmo é um dos principais agentes ecológicos de distúrbios dos ecossistemas terrestres (Bowman et al. 2009, Thonicke et al. 2001) e seu impacto modela e estrutura a composição natural da paisagem (Chazdon 2003, Bond and Keeley 2005). Além de ser um componente inerente de vários tipos de vegetação, o fogo também representa uma ferramenta importante para a produtividade agrícola (Nepstad et al. 1999, Eva and Lambin 1998, Mouillot and Field 2005, Vayda 2006).

Desde a década de 1980, observa-se um aumento na ocorrência de eventos de queima devido ao avanço do desmatamento e conseqüente fragmentação da floresta, em conjunto com um maior número de fontes de ignição (Nepstad et al. (1999)). Somam-se a isso episódios de secas extremas mais frequentes que potencializam condições para incêndios florestais generalizados (Aragao et al. 2007, Brando, Balch, Nepstad, Morton, Putz, Coe, Silvério, Macedo, Davidson, and Nóbrega 2014, Alencar et al. 2015). Como exemplo, durante os eventos de El Niño de 1997-98, 30 a 40% da Amazônia brasileira (5,5 milhões de km²) tornaram-se inflamáveis e um total de 39.000 km² de florestas foram queimadas, liberando de 0,2 a 0,6 Pg de carbono para a atmosfera (Nepstad et al. 2004).

Apenas durante a seca do ano de 2007, aproximadamente 12% da floresta amazônica localizada no arco do desmatamento foi queimada (Brando, Balch, Nepstad, Morton, Putz, Coe, Silvério, Macedo, Davidson, and Nóbrega 2014) e, mesmo com as taxas declinantes de desmatamento a partir de 2004, as queimadas florestais têm aumentado, chegando a superar as áreas desmatadas em 2007 e 2010. Tendo em vista que as interações antrópicas e climáticas tornam incêndios florestais mais comuns na Amazônia (Nobre et al. 2016, Trumbore, Brando, and Hartmann 2015) fatores como a exploração madeireira, o desmatamento e o avanço das áreas de produção agropecuária (Ray, Nepstad, and Paulo 2005), associados a eventos extremos (e.g secas e inundações), podem fazer com que a Amazônia seja severamente impactada causando um processo acelerado de degradação por volta de 2030 (Soares-Filho et al. 2006).

É sob este intuito que o desenvolvimento de modelos computacionais para os estudos dos incêndios florestais na Amazônia é importante. A quantificação da degradação da floresta serve como ferramenta para a tomada de decisão em relação às políticas implementadas na região, como por exemplo, a relevância dos incêndios para as políticas do REDD+ (*Reducing Emissions from Deforestation and Forest Degradation plus*) (Aragão and Shimabukuro 2010). Modelos robustos que incorporem a sinergia entre a mudança do clima e a atividade humana ao longo das fronteiras, incluindo a relativa importância das anomalias para as emissões de carbono da Amazônia poderão salientar a lacuna entre as projeções sobre o futuro da floresta (Soares-Filho et al. 2012). Ressalta-se que o século XXI apresenta desafios únicos para a integridade das florestas Amazônicas, como a redução das emissões carbônicas e a minimização dos impactos humanos nas florestas em pé da Amazônia (Morton et al. 2013b).

2 INTRODUÇÃO

As emissões globais do carbono (C) podem levar as florestas amazônicas para um novo estado de baixa biomassa, alterando os regimes regionais de precipitação e temperatura (Nobre et al. 2016). Essa degradação da floresta induzida pelo clima tem o potencial de liberar grandes quantidades de carbono para a atmosfera e acelerar o aquecimento global (Nepstad, Stickler, Soares-Filho, et al. 2008, Davidson et al. 2012). Embora o sequestro de CO₂ das florestas possa compensar parcialmente a deterioração da mesma induzida pelo clima (Rammig et al. 2010), a maioria dos modelos que abordam esta questão não possui a representação de incêndios (Balch et al. 2015). Entretanto, os distúrbios causados pelos incêndios já estão desencadeando a mortalidade florestal em larga escala nas porções mais secas da bacia (Brando, Balch, Nepstad, Morton, Putz, Coe, Silvério, Macedo, Davidson, Nóbrega, et al. 2014, Chen et al. 2017) e, provavelmente se expandirá para áreas mais húmidas, dado as alterações no clima e a mudança do uso da terra (Le Page et al. 2017). Ignorar esta fonte potencialmente grande de emissões de gases de efeito estufa (GEE) para a atmosfera pode restringir nossa capacidade de mitigar efetivamente a mudança climática (Barlow et al. 2012). Uma melhor compreensão dos futuros regimes de fogo na Amazônia também poderia aumentar a capacidade do Brasil em prevenir incêndios florestais acidentais e seus impactos negativos sobre os serviços dos ecossistemas, o bem-estar socioeconômico e a biodiversidade (Nepstad, Stickler, Soares-Filho, et al. 2008).

O declínio nas taxas de desmatamento da Amazônia evitou a emissão de 4.2 Pg de CO₂ para a atmosfera entre 2006 e 2013 (Nepstad et al. 2014). Uma vez que os incêndios associados ao desmatamento frequentemente inflamam florestas próximas, as emissões de carbono dos incêndios florestais também eram esperadas a diminuir (Cochrane and Barber 2009). Entretanto, as interações entre atividades agrícolas, incêndios ilegais e eventos climáticos extremos intensificaram os regimes de incêndio da Amazônia (Aragão and Shimabukuro 2010, Morton et al. 2013a). Somente na década de 2000, aproximadamente 85 mil km² de florestas primárias queimaram na Amazônia, quando a fase quente da Oscilação Multidecadal Atlântica (AMO) desencadeou duas secas generalizadas (Morton et al. 2013a). Em 2015, a porção sudeste da bacia experimentou um aumento semelhante na atividade de fogo durante outro evento de seca,

desencadeada por aquecimentos anômalos do Pacífico tropical (El Niño) e do Atlântico Norte (Aragão et al. 2018). O forte controle climático sobre esses eventos de incêndios (Alencar et al. 2015) sugere que a inflamabilidade da floresta aumentará no futuro próximo, mesmo que as taxas de desmatamento diminuam (Le Page et al. 2017). A mudança do clima sobreposta às secas episódicas poderá promover eventos de seca mais freqüentes, intensos e extensos. Dirigir-se à degradação florestal em larga escala em função dos incêndios florestais na Amazônia é, portanto, crítico para quantificar futuras emissões globais de C (Nepstad, Stickler, Soares-Filho, et al. 2008).

Neste trabalho, utilizamos um modelo ecossistêmico de fogo acoplado para abordar a questão de como as mudanças climáticas e o desmatamento podem afetar as áreas queimadas (BA) e as emissões de C induzidas pelos incêndios na porção mais seca da Amazônia (representando 61% da Amazônia Legal Brasileira; Figura 1), onde os incêndios florestais são mais comuns e provavelmente ocorrerão no futuro próximo (Le Page et al. 2017, Bruno et al. 2017). Nosso modelo de fogo simula a ignição diária do fogo e o espalhamento do mesmo, em função de condições climáticas, cargas de combustível e características do terreno a uma resolução de 500 x 500 m (Silvestrini et al. 2011). O modelo ecossistêmico representa a dinâmica da floresta C (Hirsch et al. 2004) e as mudanças induzidas pela seca em cargas de combustível e secagem, um processo que está ausente na maioria dos modelos de ecossistemas. Além disto, o mesmo captura com precisão os padrões espaciais-temporais amplos de área queimada em toda a Amazônia meridional durante os anos de seca e não seca e o comportamento e severidade do fogo observados em uma experiência em larga escala (Brando, Balch, Nepstad, Morton, Putz, Coe, Silvério, Macedo, Davidson, Nóbrega, et al. 2014). Usamos esse modelo para executar simulações que representam dois cenários de desmatamento (business-as-usual (D) e sem desmatamento (N)); dois cenários de mudanças climáticas (baixas emissões: RCP2.6, emissões elevadas: RCP8.5); e sua combinação (RCP2.6D, RCP 8.5D, RCP2.6N, RCP 8.5N).

Este trabalho é requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Análise e Modelagem de Sistemas Ambientais, pelo Instituto de Geociências da Universidade Federal de Minas Gerais. Em concordância ao regulamento do Programa, optou-se pelo formato de artigo para a redação deste trabalho.

3 OBJETIVOS

3.1 Objetivo geral

Simular o comportamento futuro do fogo florestal de sub-bosque no bioma meridional Amazônico e quantificar os fluxos de carbono associados.

3.2. Objetivos específicos

- (1) Projetar as métricas climáticas de temperatura e precipitação do IPCC para 2050.
- (2) Gerar cenários dos futuros regimes de fogo sob as projeções climáticas do IPCC e calcular as emissões associadas à queima de biomassa.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Área de estudo

O estudo teve como foco a região meridional do bioma amazônico localizado entre as latitudes 10° e 15° sul e 50° e 70° oeste. A região agrupa seis estados: Acre, Amazonas, Rondônia, Mato Grosso, Pará e Tocantins, totalizando 1.077.708 km², o equivalente a 61% da Amazônia legal (Figura 1). A mesma situa-se ao longo do arco do desmatamento, onde a fronteira agrícola avança em direção à floresta e onde são registrados os maiores índices das queimadas antropogênicas da Amazônia. A extensão territorial do arco, de aproximadamente 500.000 km² de terras, decorre do sudeste do Pará em direção oeste, passando por Mato Grosso, Rondônia e Acre.



Figura 1: Área de estudo. Região meridional do bioma amazônico.

Decidiu-se trabalhar apenas na porção sul do bioma pelo fato da maior parte dos incêndios florestais ocorrem nesta região e pelo alto custo computacional para simular as áreas queimadas.

4.2 Visão geral dos modelos

Para abordar a questão de como o clima e a mudança do uso da terra podem afetar os futuros regimes de fogo na Amazônia, utilizamos um modelo acoplado ecossistêmico de fogo. Nosso modelo de fogo -- FISC (Silvestrini et al. 2011, Soares-Filho et al. 2012), recentemente expandido para a Amazônia Brasileira (FISC – Amazon), simula a ignição e o espalhamento do fogo mensal a uma resolução de 500m. O modelo ecossistêmico – CARLUC (Hirsch et al. 2004) simula a resposta da vegetação ao fogo e as alterações do clima em passo de tempo mensal.

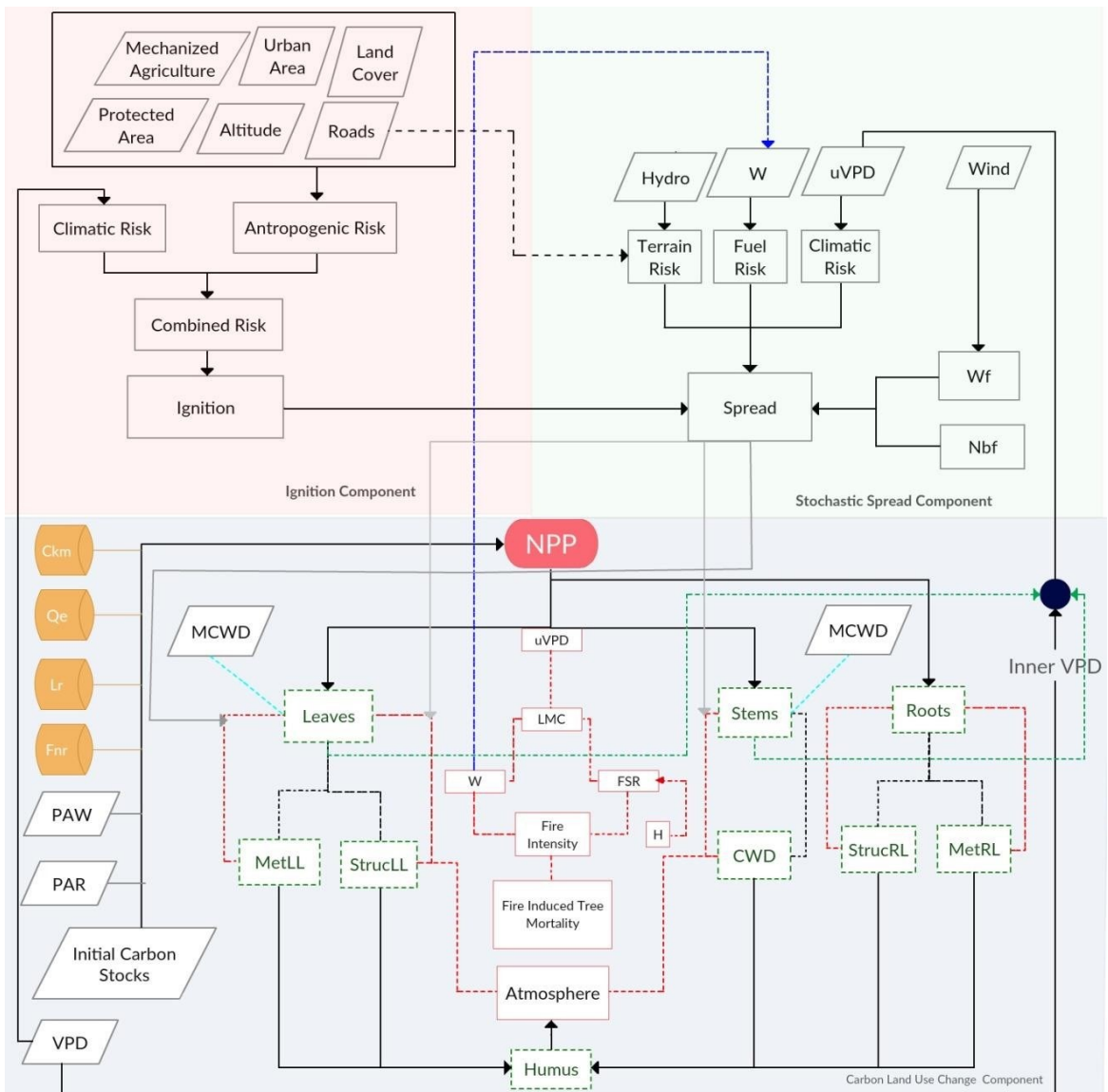


Figura 2: FISC - diagrama de Amazon contendo módulos Ignition, Spread e CARLUC. Distribuição: Hydro (hidrografia), uVPD (déficit de pressão de vapor do understory), W (Cargas de combustível), Wf (Wind factor), Nbf (Neighbor factor). Carluc: Ckm (Fator Constante), Qe (Eficiência Quântica), Lr (Fator Constante), Fnr (constnte), NPP (Produtividade Primária Líquida), MetLL (Metabolic Leaf Litter), StrucLL (Lixo Estrutural), CWD (Detritos de madeira), StrucRL (Lixa de raízes estruturais), MetRL (Lixa de raízes metabólicas), LMC (teor de humidade da lote), W (Cargas de combustível), FSR (taxa de propagação do fogo).

4.2.1 Ignição

O módulo de ignição é dividido em dois processos principais: (i) estimativa da probabilidade de ocorrência dos focos de calor (hot-pixels) a < 4km da borda florestal (ii) e simulação dos focos baseado nesta probabilidade. A ignição combina mapas anuais de uso da terra do programa PRODES/INPE e mapas mensais de clima (fonte em tabela. 1) para estimar a probabilidade de ocorrência do fogo (e.g., fontes de ignição). Inicialmente, mapas de probabilidade antropogênica, baseado em um conjunto de variáveis espaciais estáticas são obtidos empregando-se pesos de evidencia – um algoritmo Bayesiano comumente utilizado em análises espaciais (Bonham-Carter 1994, Soares-Filho et al. 2004). Em seguida, mapas mensais da probabilidade de ignição em função do clima são calculados através de regressões logísticas mensais nos dados de déficit de pressão de vapor (variável explanatória), tendo como variável dependente os mapas de foco de calor derivados do satélite NOAA – 12 noite (Silvestrini et al. 2011)). Procede-se criando um mapa único de probabilidade através da fusão dos dois mapas probabilísticos (Silvestrini et al. 2011).

O processo de simulação ocorre em função da densidade de probabilidade f das fontes de calor mapeadas nas células do mapa de probabilidade. A simulação é contida em um loop, na qual a cada iteração um número aleatório p é selecionado, onde $p \sim f$. Usa-se um número y , dado como input no modelo para determinar a geração de um foco de calor apenas para valores v que ocorram entre $|y - p|$ e $|y + p|$. Ainda dentro do loop, as células do mapa de probabilidade adjacente à fonte de ignição têm seus valores ajustados por um índice de Moran mensal como em versões prévias do FISC (Soares-Filho et al. 2012). O mapa resultante de ignição superestima a quantidade de focos de calor observados pelo nosso satélite de referência, assim adicionamos um fator de ‘limpeza’ ao final do loop de simulação para reduzir a quantidade de focos de calor (Soares-Filho et al. 2012). Para cada foco de calor um número p' , uniformemente distribuído entre 0 e 1 é selecionado, onde o foco simulado é mantido se e somente se p' é maior que θ , onde θ é um parâmetro de input do modelo.

Variavel	Fonte	Link
Land cover	PRODES (INPE)	http://www.obt.inpe.br/OBT/assuntos/programas/amazonia/prodes
Roads	Landsat	http://pnlt.imagem.govfed.opendata.arcgis.com/
Urban área	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE	http://downloads.ibge.gov.br/downloads_geociencias.htm
Altitude	SRTM	http://www.relevobr.cnpem.embrapa.br/download/
Mechanized agriculture	CSR/UFMG	---
Vapor Pressure deficit	NCEP/NCAR	Temperature: http://www.cru.uea.ac.uk/cru/data/hrg/ Humidity: https://www.esrl.noaa.gov/psd/data/gridded/data.ncep.reanalysis2.pressure.html

Tabela 1: Variáveis utilizadas na ignição.

4.2.2 Calibração e validação

A calibração da componente de ignição baseia-se em (i) regressões logísticas mensais dos dados climáticos, (ii) na função probabilística de densidade mencionada previamente e (iii) de parâmetros de ajuste α , γ e θ (Fig. 3). Os coeficientes das regressões são estimados a partir da amostragem dos mapas de déficit de pressão de vapor. A amostragem consiste em tomar metade da amostra em regiões de VPD onde não há focos de calor e metade onde há. A tabela com a amostragem é utilizada para realizar a GLM no software R. Utilizam-se então os mapas de probabilidade única para o ano de 2003 para se extrair uma função de densidade beta que se mostrou melhor se ajustar aos dados. Finalmente, os parâmetros iniciais α , γ e θ foram baseados em estudos anteriores (Silvestrini et al. 2011) todavia foram ajustados para a atual área de estudo. A validação é baseada na comparação mensal dos focos simulados e observados (NOAA-12 noite) para o ano de 2003 (Figura 4).

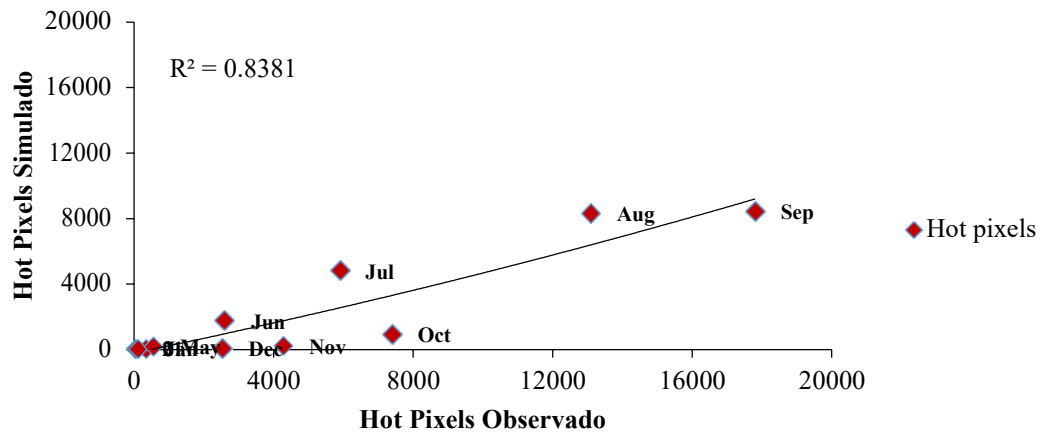


Figura 3: Calibração da ignição para o ano de 2003. Embora o modelo subestime a quantidade de hot-pixels na calibração, a correlação entre a dispersão apresenta boa significância para a calibração.

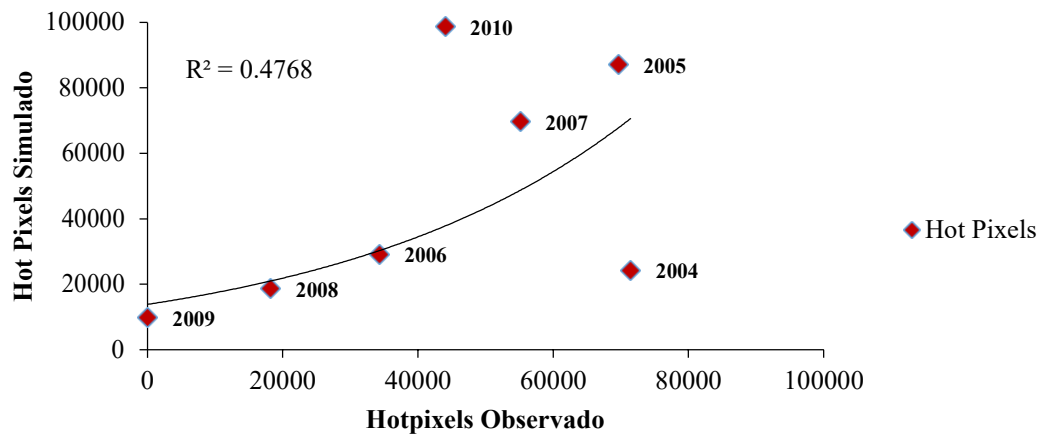


Figura 4: Validação da ignição de 2004 a 2010. Anos secos (2005, 2007 e 2010) dispersam a correlação para a validação, com 2009, 2008 e 2006 apresentando os melhores resultados.

4.3 Espalhamento

Similar ao modulo de ignição, o espalhamento possui duas fases principais: (i) estimacão da probabilidade de espalhamento e (ii) simulacão baseado nos mapas de probabilidade. Desta vez o mapa de probabilidade é gerado através da fusão de três componentes principais, a saber: mapa de combustível, terreno (e.g., declividade, obstáculos e diferentes usos da terra) e condições microclimáticas (e.g., Déficit de Pressão de Vapor). Para descrição mais detalhada, consultar (Alencar, Nepstad, and Diaz 2006, Silvestrini et al. 2011, Soares-Filho et al. 2012).

Os mapas de probabilidade de espalhamento em função do clima são novamente obtidos em função de uma regressão logística na variável explanatória – déficit de pressão de vapor interno ao dossel (calculado pelo submodelo CARLUC [A ser visto nas próximas secções]). Como variável dependente usam-se mapas anuais de cicatrizes de fogo de sub-bosque para a Amazônia brasileira (Morton et al. 2013a). Para estimar a probabilidade de terreno, mapas estáticos do uso da terra são utilizados juntamente a mapas de fricção – sendo hidrografia e declividade os principais fatores, para criar um mapa de custo. Este mapa reflete o esforço do fogo em se propagar a partir da fonte de ignição (Soares-Filho, Rodrigues, and Costa 2009). Aplica-se uma transformação linear no mapa de custo para obter-se a probabilidade de espalhamento em função do terreno. A disponibilidade de combustíveis é o terceiro componente probabilístico para o espalhamento. Este é calculado pelo submodelo CARLUC e será detalhado na secção três da dissertação (Secção 3). Similar a componente de focos de calor, o espalhamento também utiliza uma média ponderada para combinar a probabilidade dos três mapas previamente descritos.

A fase de simulacão ocorre através da técnica de autômato celular. Este método permite modelares sistemas dinâmicos espaciais que operam em tempo discreto de tempo, onde o estado futuro da variável depende de sua vizinhança. A cada iteração do modelo FISC – Amazon, todas as células vizinhas perante as células registradas como foco de calor, tem sua probabilidade ajustada em função da intensidade e direção do vento, este método é acumulativo é ocorre em todos os vizinhos. Após o ajuste do mapa de probabilidade, estima-se a função de densidade de probabilidade, similar ao método na ignição. A única diferença é que o fogo se espalha apenas para células que estão a uma célula de distancia de onde o fogo ocorre. Este processo repete-se por 30 vezes (Silvestrini et al. 2011).

Variable	Source	Link
Land cover	PRODES (INPE)	http://www.obt.inpe.br/OBT/assuntos/programas/amazonia/prodes
Wind	Landsat	https://www.esrl.noaa.gov/psd/data/gridded/data.ncep.reanalysis2.pressure.html
Hidrography	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE	http://downloads.ibge.gov.br/downloads_geociencias.htm
Terrain	SRTM	http://www.relevobr.cnpm.embrapa.br/download/
uVPD	NCEP/NCAR	https://www.esrl.noaa.gov/psd/data/gridded/data.ncep.reanalysis.html

Tabela 2: Variables used on spread component.

4.3.1 Calibração e validação

A calibração do espalhamento do fogo consiste de duas fases principais: (i) encontrar os parâmetros ótimos da regressão nos dados de clima e (ii) definir a função de densidade de probabilidade do fogo para se espalhar. Uma vez que o passo de tempo do modelo FISC – Amazon é mensal, e os mapas observados de cicatrizes anuais ajustam-se os parâmetros para o mês mais representativo em nossa simulação, que é Setembro. Para obter os parâmetros da regressão, utilizam-se mapas de clima (Déficit de pressão de vapor) de 2003 e observações das cicatrizes de sub-bosque na Amazônia brasileira (Morton et al. 2013a).

Para obter os parâmetros de regressão, utilizamos dados de déficit de pressão de vapor interno para o ano de 2003 (calculados a partir de CARLUC, seção 3) e observações de cicatrizes de fogo. O déficit de pressão de vapor interno é usado como variável explicativa e as cicatrizes de fogo como variáveis dependentes. A amostragem da regressão seleciona o valor arbitrário de 400 pontos onde metade consiste de uVPD em áreas queimadas e metade fora delas. 400 é uma boa quantidade de células para a análise em questão. Os parâmetros de regressão foram calculados usando a função glm do software estatístico R. A densidade de probabilidade foi calculada extraindo, a partir do mapa de probabilidade combinado de setembro de 2003, todos os pontos de

cicatrices de fogo do mapa área queimada observada. Em seguida, uma distribuição beta - usada para sua flexibilidade e suporte limitado, foi ajustada nos pontos amostrados. O software R foi usado durante este processo. Por fim, a validação desta componente baseia-se na comparação das métricas de área queimada, distribuição espacial e tamanho de cicatrizes entre 2002 – 2010.

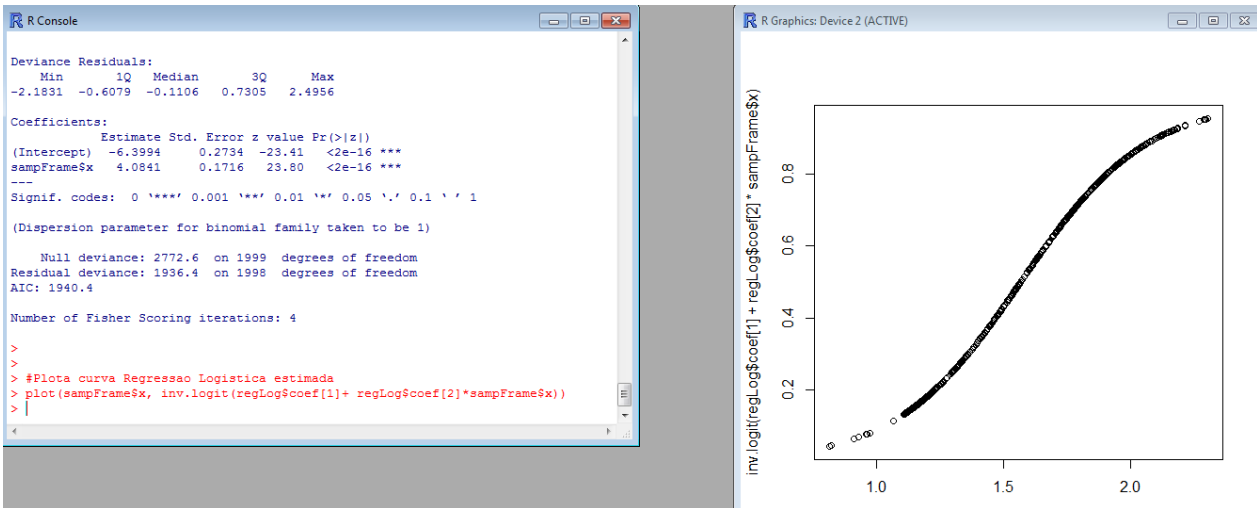


Figura 5: Parâmetros ($\alpha = -6.39$ e $\beta = 4.08$) da regressão logística.

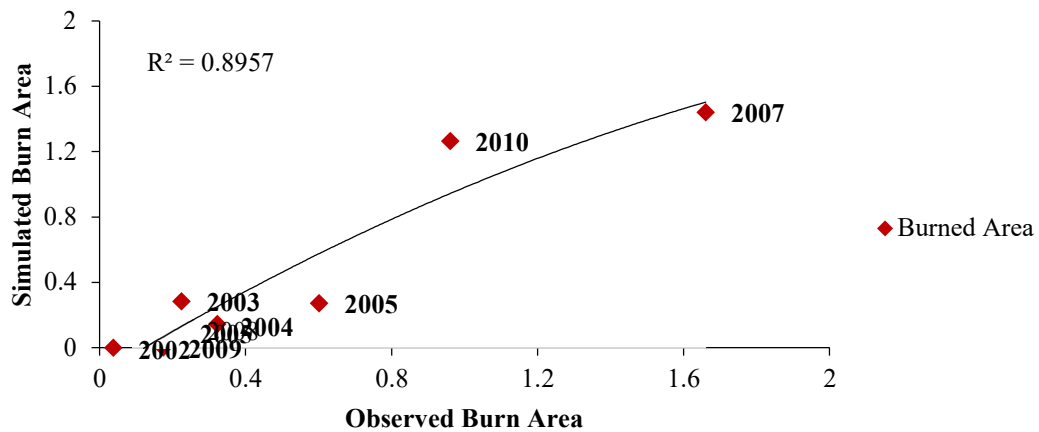


Figura 6: Validação da área queimada. Correlação de 89%.

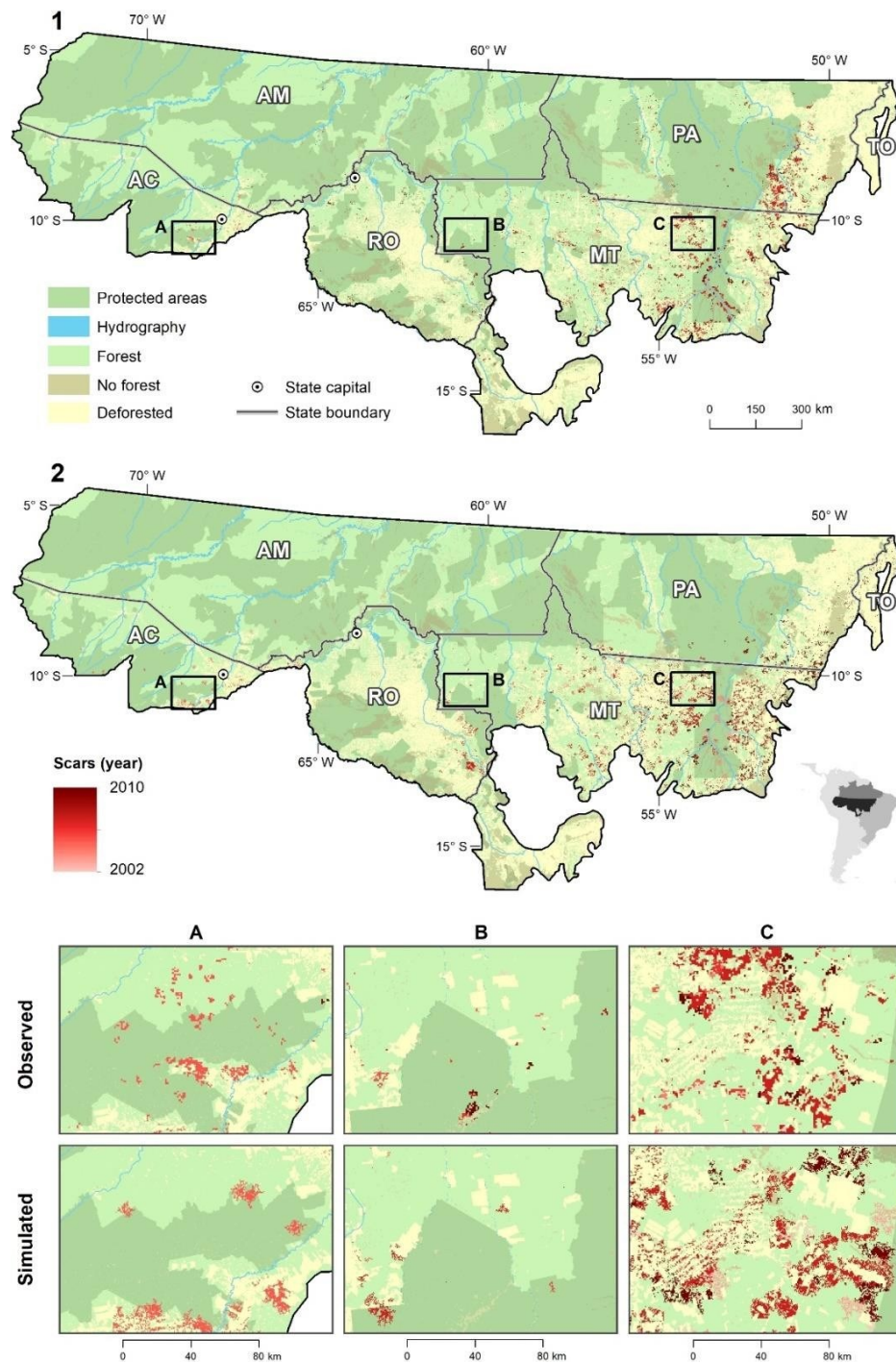


Figura 7: Distribuição espacial das áreas queimadas (Validação).

4.4 CARLUC

Resumidamente, o CARLUC (Carbon and Land Use Change) é um modelo de ciclo de carbono baseado em processo, que empresta sua estrutura básica do modelo de 3 PG - um modelo dinâmico de vegetação bem conhecido de Landsberg e colegas (Landsberg e Waring, 1997). O CARLUC é acoplado ao FISC - Amazon para fornecer as condições de microclima (por exemplo, VPD do understory) e a disponibilidade de cargas de combustível para o fogo, além de quantificar os fluxos de carbono entre a floresta e a atmosfera. O modelo é parametrizado usando dados de um experimento de exclusão de chuva que representa uma pequena área na Floresta Nacional do Tapajós (Brando 2010). O CARLUC possui um conjunto de cinco insumos de dados climáticos: déficit de pressão de vapor (VPD); estimado a partir da temperatura e da humidade da relatividade da Unidade de Pesquisa Climática (temperatura máxima) e reanálise NCEP / NCAR2, respectivamente. Radiação ativa fotossintética (PAR), derivada do produto satélite do GOES-9 (Nepstad et al., 2004). Água disponível para plantas (PAW); estimado a partir da diferença entre a capacidade de campo do solo (SWfc) e o ponto de marchitamento (SWpwp) (Brando 2010). Temperatura (Temp) estimada a partir do conjunto de dados NCEP / NCAR Reanalysis2 (TEMP) (Bruno et al., 2017).

O clima interage com vegetação através de uma série de equações diferenciais (Hirsch et al. 2004) que descrevem o fluxo de carbono dentro da floresta. O conjunto florestal é baseado em treze estoques de carbono (Cpools) que representam o carbono por unidade de área (em metros quadrados) em folhas, caules, raízes, detritos lenhosos grossos, húmus, folha na liteira metabólica, folha na liteira estrutural, raiz na liteira metabólica, raiz na liteira estrutural e quatro estratos de produtos de madeira que correspondem à madeira registrada que decai na atmosfera a taxas de ordem de magnitude de 1, 10, 100 e 1000. O carbono em cada um dos treze Cpools é igual ao carbono adicionado ao como resultado da produtividade primária líquida (Hirsch et al. 2004) ou da decomposição de outros estratos, menos o carbono removido deste estrato como resultado do decaimento natural e eventos episódicos, como fogo, exploração madeireira e conversão / abandono de culturas e pastagens. Os distúrbios de incêndio no CARLUC causam a redistribuição dos estoques de carbono do ecossistema, acarretando na combustão do caule das árvores criando carvão inerte e enviando uma grande fração de madeira viva para detritos

lenhosos, que é queimada novamente (recorrência), convertida em carvão ou deixada para se decompor. Uma pequena fração de madeira é passada para um estoque de produtos de madeira que se deteriora ao longo do tempo.

O crescimento das árvores no CARLUC é estabelecido pela produtividade primária da rede florestal (NPP) (Hirsch et al. 2004). A NPP baseia-se nas características da vegetação como eficiência quântica (qe), eficiência de uso de carbono (fnr) e área foliar específica (sla), bem como sobre as variáveis climáticas anteriormente citadas (Brando 2010). À medida que o índice de área foliar aumenta, o NPP satura de acordo com a função de extinção de luz derivada da lei de Beer (termo exponencial na eq. 1) (Brando 2010). A alocação de NPP para folhas, hastes e raízes é representada como uma função de um fator de água do solo (fSW) e do fator de déficit de pressão de vapor (fVPD) (Brando 2010). A mortalidade de árvores é modelada como dependente da disponibilidade de água do solo: como PAW declina para $\leq 40\%$, a fração de biomassa viva declina exponencialmente com PAW (Brando 2010). Quanto ao 3- PG, o CARLUC foi projetado para integrar fenômenos baseados em processos com relações empíricas derivadas de experiências de campo (Brando 2010).

Variable	Source	Link
PAW (Plant Available Water)		--
PAR (Photosynthetic active radiation)	GOES – 9 Satellite	https://www.esrl.noaa.gov/psd/data/gridded/data.ncep.reanalysis2.pressure.html
TEMP (Temperature)	NCEP/NCAR	https://www.esrl.noaa.gov/psd/data/gridded/data.ncep.reanalysis.html
Precipitation	TRMM/NASA	http://mirador.gsfc.nasa.gov/cgi-bin/mirador/granlist.pl?page=1&dataSet=TRMM_3B43&version=7&allversion=7&keyword=TRMM&pointLocation=(-90,-180),(90,180)&location=(-90,-180),(90,180)&searchType=Location&event=&startTime=1997-01-01&endTime=2016-10-14%2023:59:59&search=&CGISESSID=20419fb27470271f313237b93232a9a5&nr=223&temporalres=1%20month&prodpg=http://disc.gsfc.nasa.gov/datacollection/TRMM_3B43_V7.html&longname=TRMM%20(TMPA/3B43)%20Rainfall%20Estimate%20L3%201%20month%200.25%20degree%20x%200.25%20degree%20V7&granulePresentation=ungrouped'
VPD (Vapor Pressure Deficit)	NCEP/NCAR Reanalysis2 + CRU	https://www.esrl.noaa.gov/psd/data/gridded/data.ncep.reanalysis.html http://www.cru.uea.ac.uk/data

Tabela 3: Variáveis climáticas utilizadas no modelo Carluc.

4.4.1 Modelagem das secas históricas de 2005 e 2010:

O modelo CARLUC quantifica a resposta da vegetação em eventos extremos de seca com base no Máximo Déficit Hídrico Acumulado (MCWD) do ano. O MCWD é uma função das medidas de precipitação (Tabela 3) e é estimado para um ano (12 meses a partir de janeiro até dezembro) e para períodos de referência idênticos (ou seja, 2000-2009, excluindo 2005), seguindo o script 1.

Script 1: Cálculo do déficit de água. Os Déficits Mensais de Água (WDs) são calculados como função da precipitação e evapotranspiração ($\sim 3,33$ mm dia¹). Esse valor é baseado em medidas empíricas e estimativas modeladas que mostram como o dossel úmido da Amazônia transpira cerca de 100 mm por mês (5-7). O Déficit anual acumulado de água foi obtido como o valor mais negativo de WDs no ano. As secas de 2005 e 2010 (Figura xx) foram mapeadas através dos dados de precipitação do TRMM-NASA.

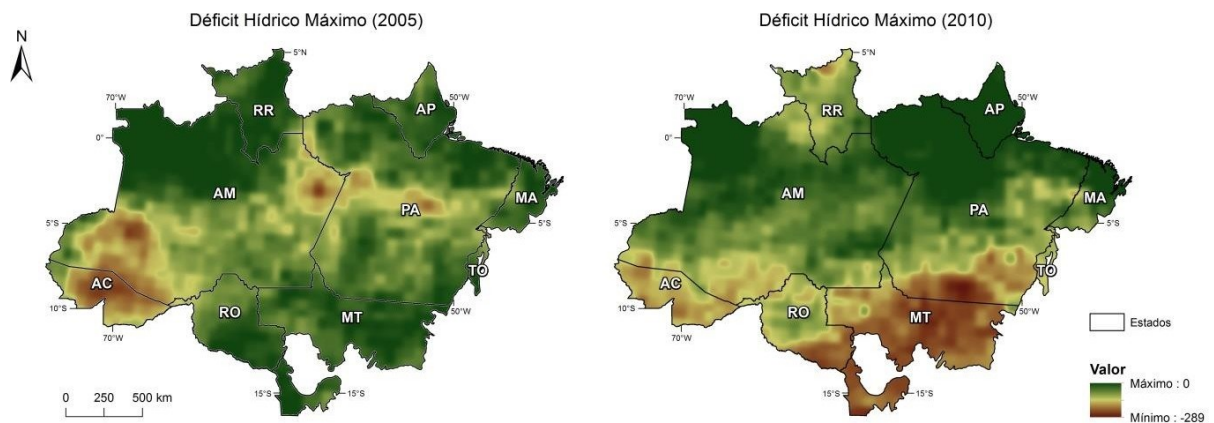


Figura 8: Secas históricas de 2005 e 2010 para o bioma Amazônico. Epicentros bem localizados a oeste (2005) e sudeste (2010).

4.4.2 Calibração e validação

A parametrização do CARLUC é baseada em um experimento de exclusão de precipitação em uma área pequena na Floresta Nacional do Tapajós (8). Sua calibração segue medidas de propriedades do fogo, como intensidade do fogo, disponibilidade de carga de combustível e taxa de propagação do fogo, a partir de um grande estudo empírico realizado na fazenda Tanguro (Brando, Balch, Nepstad, Morton, Putz, Coe, Silvério, Macedo, Davidson, and Nóbrega 2014). Devido à falta de dados observados, o modelo é calibrado com base em medições de 2007 e validado para o ano de 2004 (ano de não ocorrência de seca) e 2007 (ano de ocorrência de extrema seca (Figura 9)). No entanto, o déficit de pressão de vapor foi validado para uma série de tempo maior (de: 2004 para: 2010) (Figura 10) devido à disponibilidade de dados.

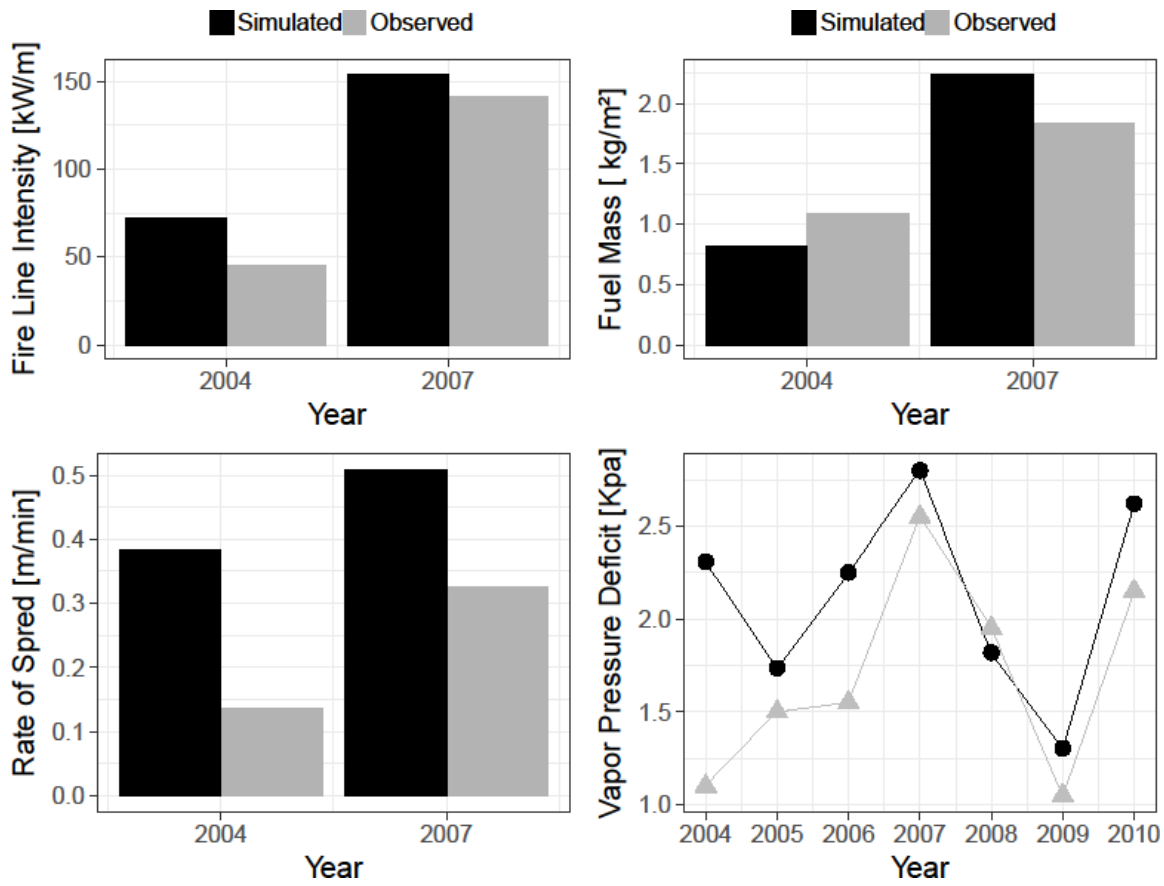


Figura 9: Validação CARLUC baseado em experimento de larga escala (Brando, Balch, Nepstad, Morton, Putz, Coe, Silvério, Macedo, Davidson, Nóbrega, et al. 2014)

As seções 5 e 6 descrevem as projeções de dados climáticos (VPD e MCWD) e desmatamento, usados para simular futuros regimes de fogo.

5 PROJEÇÃO DO CLIMA

Para simular a dinâmica do fogo sob a mudança climática, realizamos cinco experimentos numéricos com cenários climáticos futuros. Em cada experimento, comparamos os impactos do clima em função de dois níveis diferentes de aquecimento global em meados do século (2050), os cenários RCP 2.6 e RCP 8.5. O RCP 2.6 é o cenário de baixas emissões e assume uma redução extrema no uso de combustíveis fósseis e rápida implementação de energias renováveis (12), enquanto o RCP 8.5 é o caso comercial, como de costume/habitual, com base em uma economia de intensidade de combustível fóssil, consistente com o presente uso e contabilização de aumentos demográficos globais projetados. Simulamos o regime de incêndio sob: (a) Mudança climática 8.5 e Desmatamento (8.5 D); (b) Alterações climáticas 2.6 e Desmatamento (2.6 D); (c) Mudança climática 8,5 (8,5 DF); (d) Mudança climática 2,6 (2,6 DF); e (e) apenas Desmatamento (D). Onde D = Desmatamento e DF = Desmatamento Livre. Os impactos das mudanças climáticas sobre a Amazônia foram baseados em projeções de temperatura e precipitação de modelos de circulação globais do Projeto de Intercomparação de Modelos Acoplados Fase 5 (CMIP5). Entre os 35 modelos climáticos disponíveis neste projeto, investigamos três padrões históricos de temperatura que foram melhorados e estações de precipitação para Amazônia: Hadgem2-es (13), Miroc-esm (14) e Mri-cgcm3 (15). Os dados de temperatura observados foram coletados do banco de dados CRU (Climate Research Unit) e os dados de precipitação do conjunto de dados da NASA (TRMM/3B42), conforme mencionado anteriormente.

A temperatura projetada (Figura 10) foi utilizada para estimar o futuro déficit de pressão de vapor (Figura 11). Para fazer isso, corrigimos o desajuste entre as projeções climáticas modeladas e o clima observado na Amazônia, dividindo as séries temporais históricas (de 1950 a 2005) de temperatura dos modelos e os dados projetados (de 2006 a 2050) para estimar a taxa de mudança de temperatura (ΔT) com base em sua média histórica através da equação 1. Depois disso, estimamos a pressão de saturação modelada, como uma função de ΔT seguindo a equação

2 (uma maneira padrão de estimar a pressão de saturação). Por último, projetamos o déficit de pressão de vapor adicionando os Δ s modelados à pressão de saturação observada baseado na equação 3.

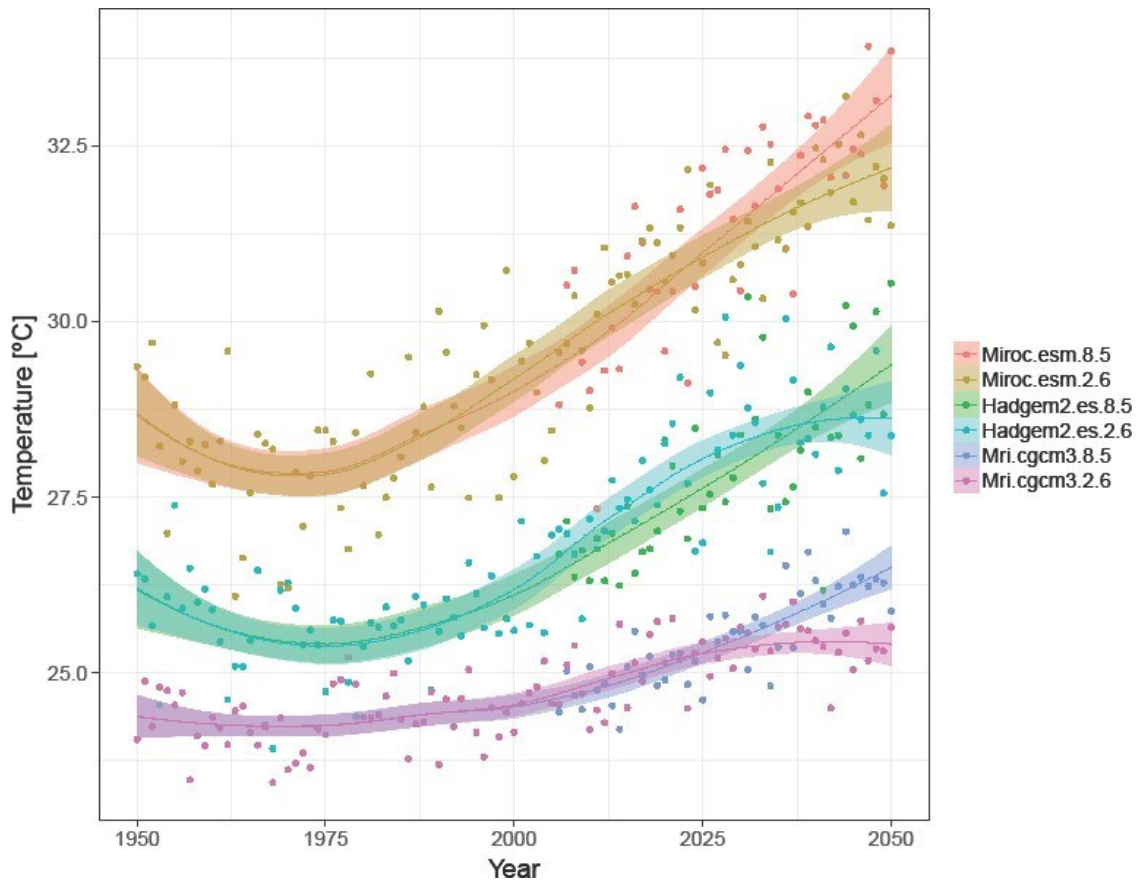


Figura 10: Projeções de temperatura para o sul da Amazônia durante o mês de seleção para cada modelo CMIP5. Todos os modelos mostram aumento de temperatura. Embora existam diferenças entre os modelos climáticos, praticamente não existem nos cenários.

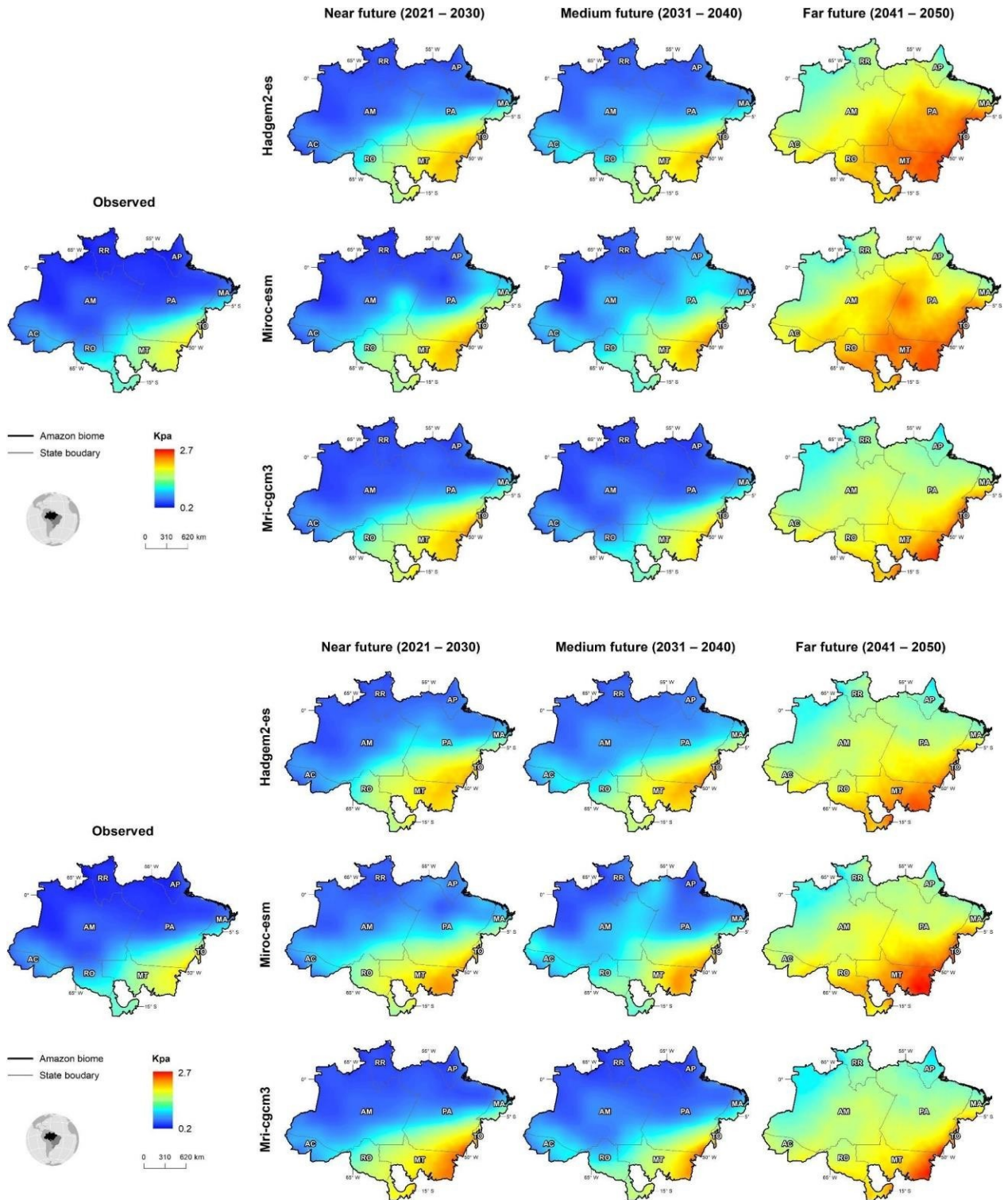


Figura 11: Projeção do déficit de pressão de vapor para (A) RCP 8.5 e (B) RCP 2.6.

Equação 1: Diferença de temperatura entre séries projetadas (T_p) e históricas (T_h) dos modelos.

$$(\rightarrow)$$

Equação 2: Incremento da pressão de saturação $\Delta e_s(T)$ como função da temperatura.

$$(\rightarrow)$$

Equação 3: Déficit de pressão de vapor projetado em função da pressão de saturação observada e modelada (e_s e Δe_s). R_{hmax} representa umidade relativa máxima.

A precipitação futura dos modelos CMIP5 (Figura 12) foi utilizada para projetar os déficits cumulativos de água (CWDs) (Figura 13). Primeiro, uma taxa de mudança para a precipitação modelada é estimada através da diferença entre as séries temporais projetadas e históricas (equação 4), então os déficits cumulativos de água são estimados com base na equação 5. Em segundo lugar, calculamos as CWD futuras com base na variação da taxa de precipitação sobre o CWD cíclico estimado para a Amazônia durante a década de 2000. A razão pela qual nós projetamos déficits cumulativos de água dessa maneira é porque os padrões de precipitação futuros do IPCC não possuem a representação das secas. Finalmente, os MCWDs foram projetados com base nos MCWD de (2005 e 2010) (equação 6).

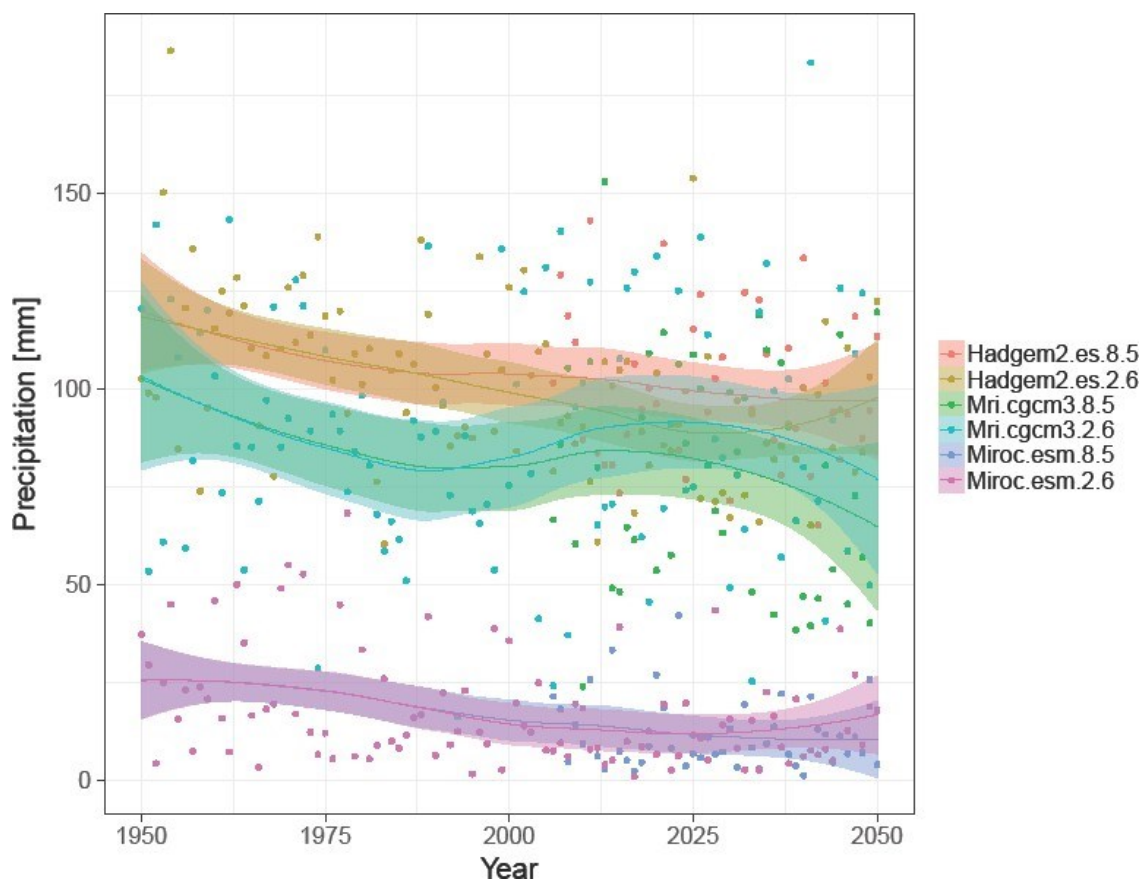


Figura 12: Projeções de precipitação para o sul da Amazônia durante o mês mais seco para cada modelo CMIP5. Os modelos não mostram uma tendência clara. Embora existam diferenças entre os modelos climáticos, praticamente não há nenhum cenário entre cenários.

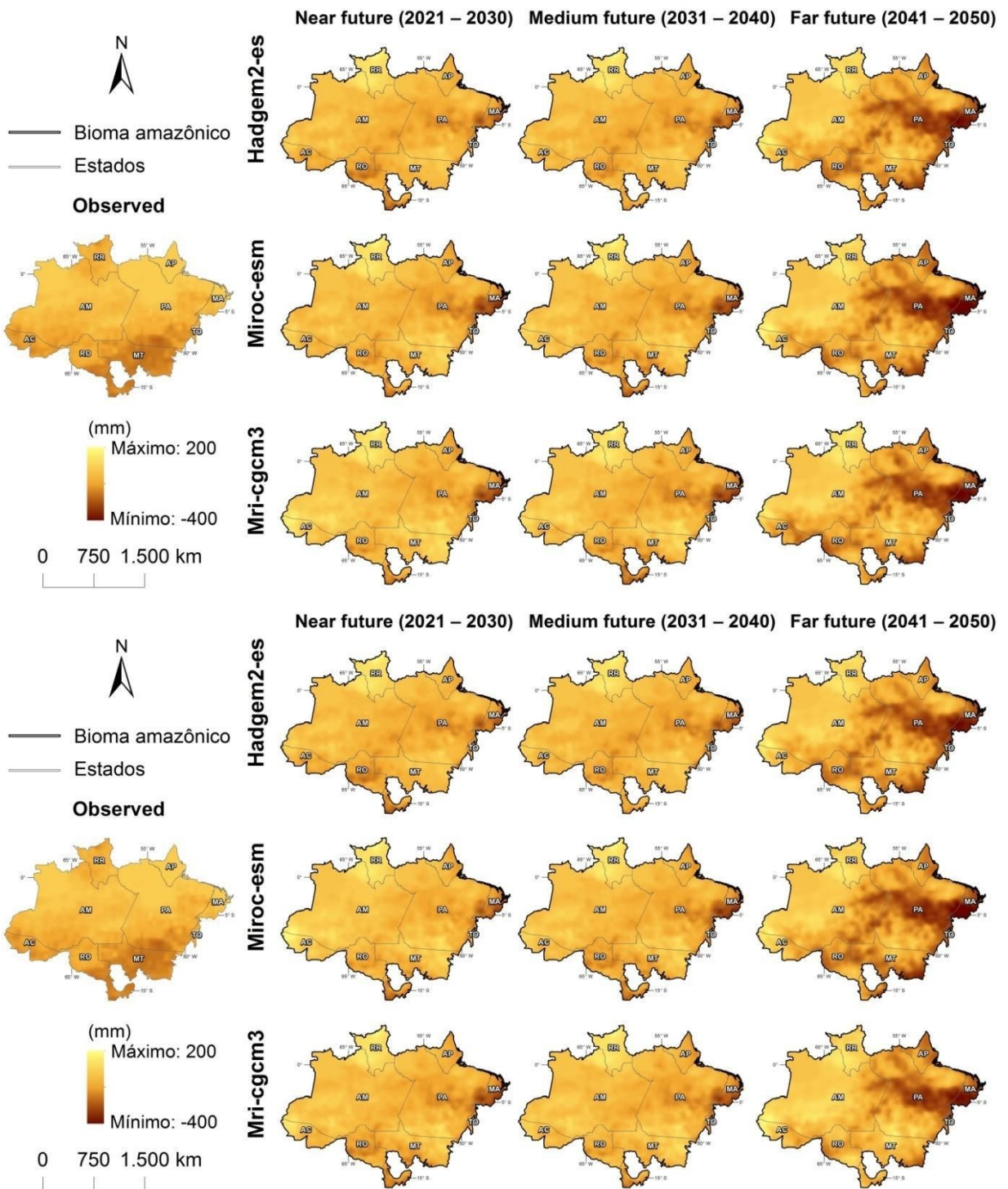


Figura 13: Projeção dos MCWD para (A) RCP 8.5 e (B) RCP 2.6.

Equação 4: Diferença de precipitação entre séries projetadas (T_p) e históricas (T_h) para os modelos.

Equação 5: Déficit cumulativo de água máximo projetado como função da diferença de precipitação dos modelos. 'E' significa evapotranspiração e $Cwd(n-1)$ para o Déficit de Água Cumulativo do último mês.

Equação 6: Déficit cumulativo de água máximo futuro com base em 2010.

6 PROJEÇÃO DO DESMATAMENTO (OTIMIZAGRO)

OTIMIZAGRO é um modelo de abrangência nacional e espacialmente explícito que simula o uso do solo, a mudança de uso da terra, a silvicultura, o desmatamento, o crescimento e as emissões de carbono associadas sob vários cenários de demanda de terra agrícola e políticas de desmatamento para o Brasil (18). O modelo simula nove culturas anuais (ou seja, soja, cana-de-açúcar, milho, algodão, trigo, feijão, arroz, mandioca e tabaco), incluindo o cultivo único e duplo; cinco culturas perenes (por exemplo, café arábico, café robusta, laranjas, bananas e cacau) e florestas plantadas. A estrutura do modelo, desenvolvida na plataforma Dinamica EGO (19), está estruturada em quatro níveis espaciais: (i) biomas do Brasil, (ii) micro-regiões do IBGE, (iii) municípios brasileiros e (iv) uma grade raster de 25 ha de resolução espacial. A demanda futura de culturas e desmatamento, e as taxas de rebrota são exógenas ao modelo. As taxas anuais projetadas de desmatamento (Figura 14) consistem em médias de 2009-2014 para a economia da

região Amazônica (INPE 2015), Cerrado e Mata Atlântica (SOS Mata Atlântica) e de 2008-2013 para os outros biomas. A distribuição espacial do desmatamento (Figura 15) é uma função de determinantes espaciais, como distâncias para estradas e áreas previamente desmatadas.

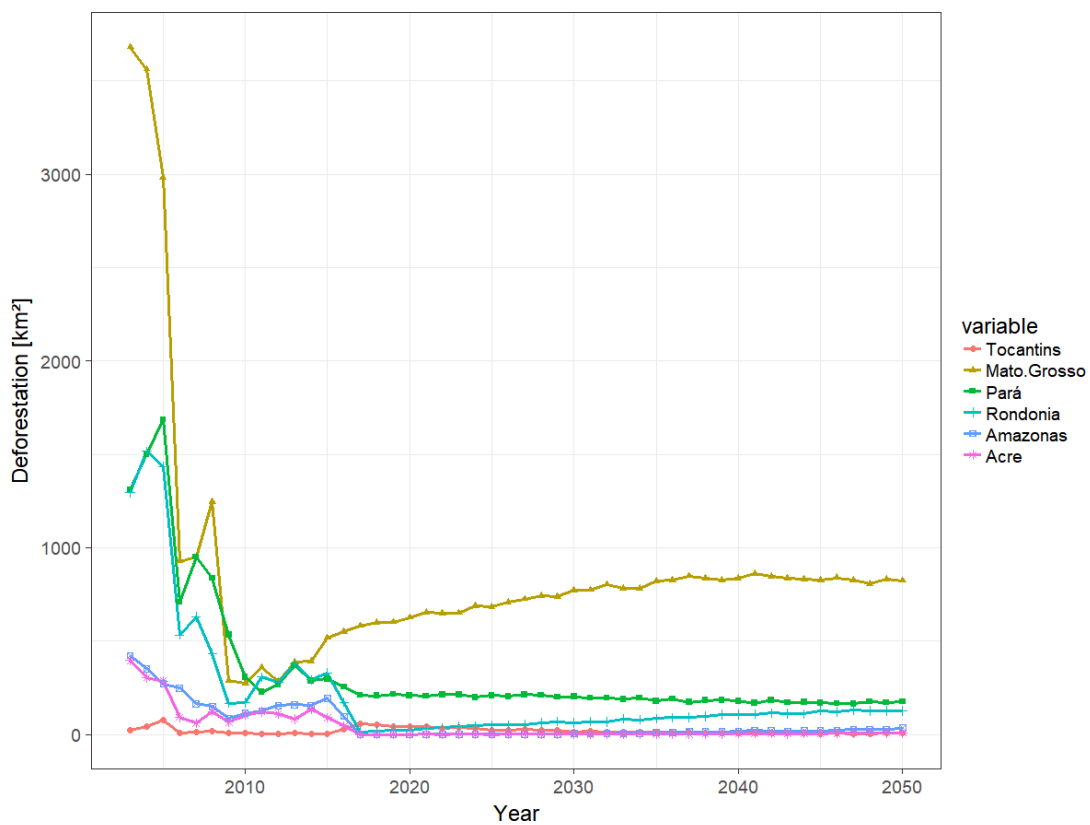


Figura 14: Desmatamento anual por estado.

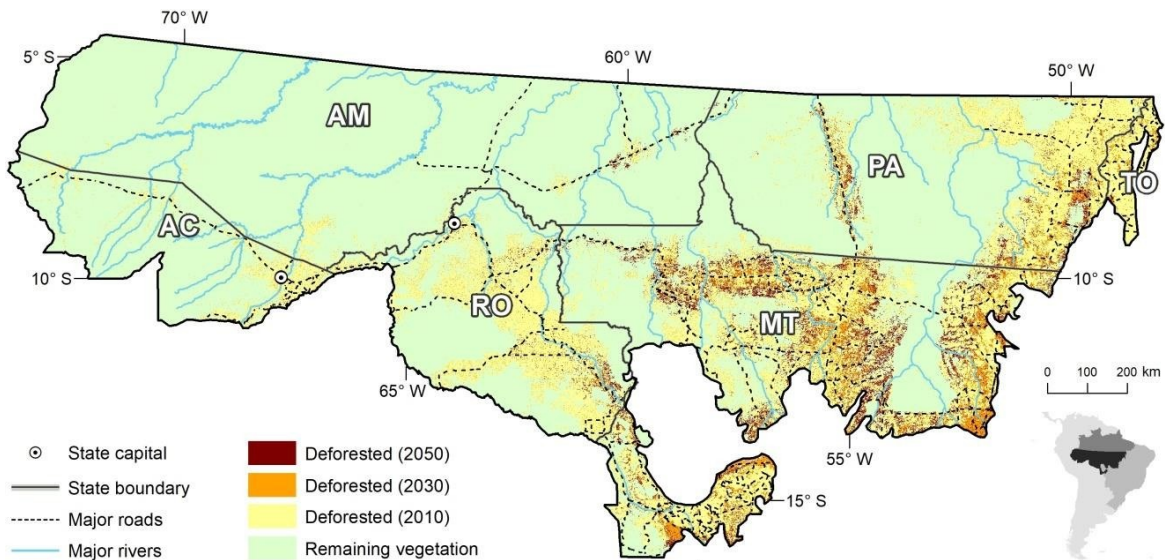


Figura 15: Projeção do desmatamento (OTIMIZAGRO). Concentração na porção sudeste do bioma.

7 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nossas simulações apontam para a intensificação dos futuros regimes dos incêndios florestais no sul da Amazônia em resposta às mudanças climáticas (Figura 16). Em comparação com os anos 2000, os incêndios florestais são projetados para queimar áreas maiores, queimar mais combustíveis, liberar mais energia e emitir mais carbono para a atmosfera nas próximas décadas. Sob um cenário de altas emissões globais de GEE e sem novos desmatamentos (RCP8.5N) projetamos aumentos de 80% em área queimada (BA) e 189% nas emissões de carbono induzidas pelo fogo em 2050 em comparação com os anos 2000. No total, esses incêndios florestais terão um potencial para emitir 2.9 PgC para a atmosfera entre 2011 e 2050 (Fig. 5). A redução as emissões globais de GEE devido as estratégias de mitigação do clima (RCP2.6N) reduziu a intensidade do fogo (Figura 16).

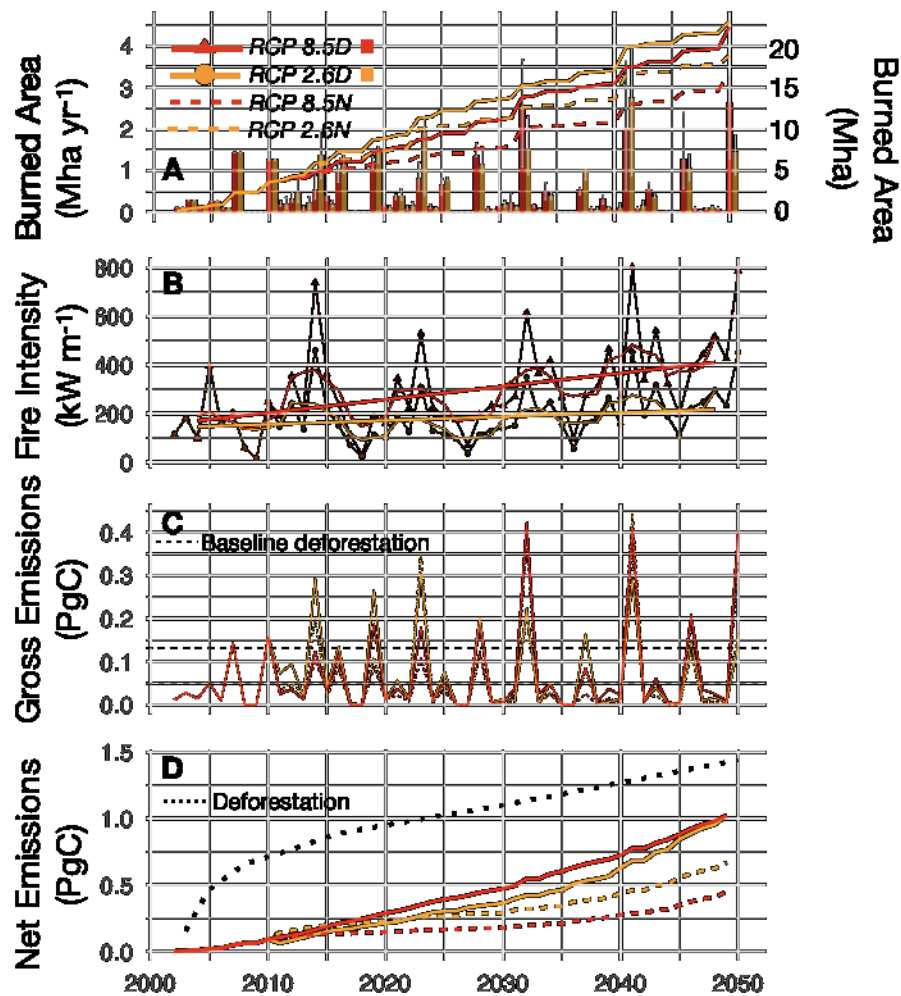


Figura 16: Métricas do regime de incêndio para a Amazônia do Sul do Brasil entre 2002 e 2050. Painel A: área queimada por ano (primeiro eixo y, barras) e acumulada (segundo eixo dos eixos) de acordo com dois cenários de mudança climática (RCP 2.6 e RCP 2.6, linhas contínuas) e dois cenários de desmatamento (D: business-as-usual; N: não há novos desmatamentos, linhas tracejadas). Os gráficos de barras representam apenas os cenários RCP8.5D e RCP2.6D. Painel B: intensidade de incêndio representada por médias móveis de 5 anos (linhas contínuas) e valores anuais. Painel C: emissões anuais de carbono bruto dos incêndios florestais projetados. As linhas tracejadas representam as linhas de base do desmatamento para os períodos 2000-2005 (linha superior) e 2006-2010 (linha inferior). Painel D: emissões líquidas do desmatamento modelado (linha pontilhada) e incêndios florestais.

Uma vez que o aquecimento regional ocorreu anteriormente em RCP2.6D do que em RCP8.5N e em regiões mais secas, a área queimada e as emissões de carbono induzidas pelo fogo realmente aumentaram. No geral, é provável que as futuras condições climáticas a seco e quente não só desencadeiam incêndios de alta intensidade, como também retardem a recuperação pós-fogo dos estoques de carbono. Como resultado, mais emissões de carbono de futuros incêndios florestais podem permanecer na atmosfera em vez de serem assimilados de volta às florestas (20). Por exemplo, assumindo taxas médias de recuperação de biomassa, as emissões líquidas de carbono (por exemplo, emissões menos recuperação) desses incêndios podem chegar a 0,45 PgC até 2050. No entanto, nossa recuperação simulada pós-fogo pode ser otimista, dado que vários estressores faltam em nossa as simulações poderiam diminuir a acumulação de biomassa (p. ex., infestação de lianas, depleção de nutrientes, eventos causados por tumores, entre outros).

À medida que o desmatamento interage com as mudanças climáticas, projetamos que a quantidade e a geografia dos incêndios florestais da Amazônia mudarão dramaticamente. Embora a área de floresta reduza em 5% de 2010-2050 sob o cenário tendencial, estimamos que a BA possa aumentar em 33% (RCP 8.5D) e 21% (RCP 2.6D) em resposta ao desmatamento, particularmente em função do aumento das bordas florestais (Figura 17).

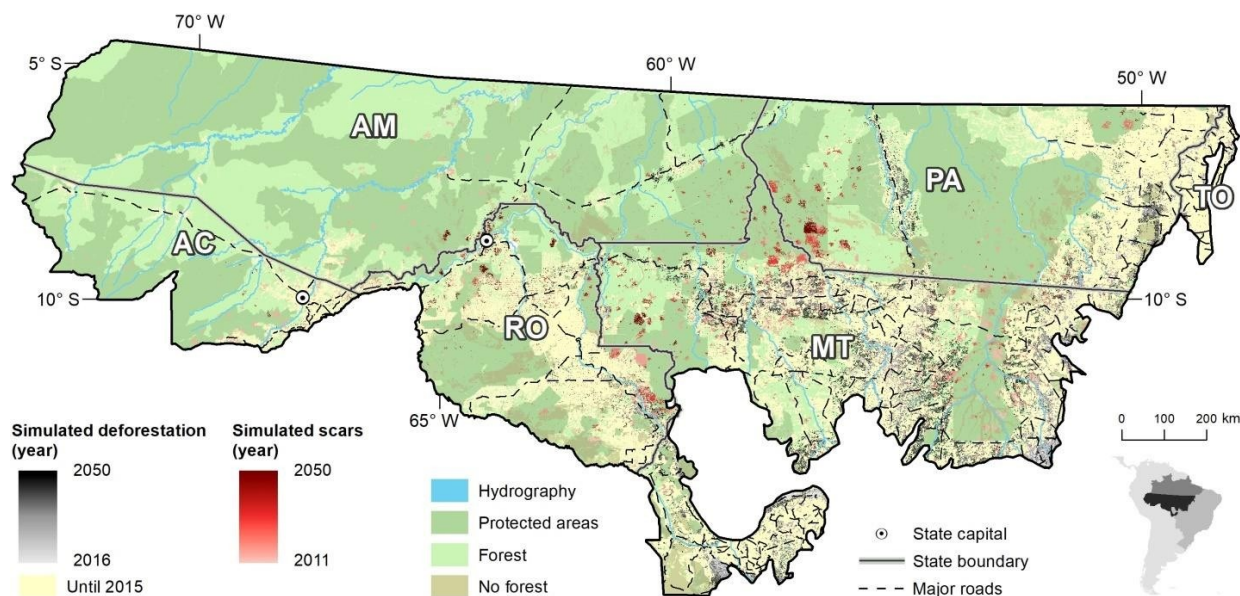


Figura 17: Projeção espacial dos padrões de queima. Deslocamento dos incêndios para a porção central da Amazônia.

Os incêndios florestais também podem queimar paisagens sem desmatamento devido o acúmulo de combustível e secagem induzidos pela seca. Embora as áreas protegidas e as terras indígenas sejam projetadas para deter a maioria do desmatamento, por exemplo, elas podem abrigar incêndios maiores devido aos efeitos combinados de altas cargas de combustível, secura e continuidade. Por outro lado, projetamos uma redução em BA em paisagens altamente desmatadas devido à falta de continuidade de combustível criada por estradas e campos abertos (Figura 17). Isso ajuda a explicar por que o BA total é projetado para aumentar dentro de florestas protegidas (de 27% para 42%), enquanto diminui para fora deles (de 73% para 58%). Em resposta às interações entre o desmatamento e as mudanças climáticas, a porção sudoeste da Bacia Amazônica terá o potencial para se tornar o epicentro da atividade de incêndio florestal. Os incêndios florestais também podem se expandir para a porção noroeste da Bacia (Fig. 6), onde atualmente são raros por causa do clima úmido (Morton et al. 2013a). No total, as emissões brutas de carbono desses incêndios florestais podem chegar a 2,9 PgC entre 2011 e 2050. Supondo que não há restrições importantes na recuperação florestal, estimamos que as emissões líquidas de carbono desses incêndios florestais possam atingir 1.0 PgC até 2050. Se as taxas de recuperação diminuir drasticamente, as emissões de carbono induzidas podem superar as emissões relacionadas ao desmatamento em meados de 2030 (Fig. 5), um processo que já está em andamento (Aragão et al. 2018). Parar o desmatamento poderia reduzir substancialmente as emissões de incêndios florestais para ambos os cenários climáticos, especialmente para o RCP8.5 (redução de aproximadamente, 50%).

De acordo com observações recentes (Alencar et al. 2011), as secas controlaram a maioria dos padrões espaciais-temporais de BA e as emissões de carbono induzidas pelo fogo em nossas simulações, com o aquecimento regional projetado desempenhando um papel importante, mas secundário. Dois grandes pressupostos permitiram que nosso modelo de ecossistema de fogo representasse esses padrões. Primeiro, o acúmulo de combustível induzido pela seca e a secagem em nosso modelo mudaram em 2005 (Lewis et al. 2011), quando uma seca severa causou aumento da mortalidade de árvores amazônicas (Marengo et al. 2011). Esta suposição é

susceptível de se manter no futuro próximo, mas a modelagem das mudanças induzidas pela seca na dinâmica do combustível sob as mudanças climáticas extremas no futuro distante provavelmente exigirá a representação de processos fisiológicos, como a falha hidráulica da planta e a inanição de carbono (Rowland et al. 2015). Até à data, o desenvolvimento e a aplicação de tais modelos para sistemas tropicais foram prejudicados pela nossa má compreensão de como os períodos secos prolongados afetam a fenologia dos copos e a mortalidade das árvores (Rowland et al. 2015, McDowell et al. 2013). Em segundo lugar, assumimos que a frequência de seca durante a década de 2000 será a representação dos futuros regimes de seca, exceto que sua intensidade e extensão mudaram de acordo com futuras projeções climáticas. Esta suposição implica que, nas próximas décadas, o AMO permanecerá em uma fase quente, como foi durante a década de 2000 (Marengo et al. 2011). Em geral, melhorar as projeções futuras dos regimes de incêndio da Amazônia certamente exigirá uma melhor compreensão dos controles sobre a dinâmica do combustível durante períodos prolongados. Isto também implica que as projeções climáticas representam melhor as conexões de telecomunicações entre futuras emissões de gases de efeito estufa, mudanças nas anomalias da temperatura da superfície do mar e padrões de precipitação da Amazônia.

8 CONCLUSÕES

A intensificação dos regimes de fogo projetados para ambos os cenários climáticos destaca a necessidade de reduzir a probabilidade de incêndio na Amazônia. Evitar o desmatamento pode reduzir substancialmente às emissões de carbono induzidas pelo fogo, embora não seja suficiente para compensar os aumentos associados às mudanças climáticas. Uma transição de sistemas agrícolas dependentes do fogo para sistemas livres de fogo reduziria as fontes de ignição e, em última análise, os incêndios florestais (Nepstad et al. 2001), como já foi observado em algumas regiões tropicais (Andela et al. 2017). Enquanto os incêndios agrícolas representam uma importante ferramenta de gestão para agricultores e povos indígenas, entre outros (Morello et al. 2017), a probabilidade de esses incêndios inflamarem florestas se tornará

muito maior em um clima em mudança. As técnicas de gerenciamento de incêndio devem ser empregadas em regiões de forte dependência socioeconômica dos sistemas de corte e queima para minimizar o risco de incêndios agrícolas escaparem para as florestas vizinhas. As operações de comando e controle contra incêndios agrícolas ilegais são outra ferramenta importante para prevenir incêndios e podem complementar iniciativas que incentivem práticas agrícolas livres de fogo (Andela et al. 2017). Além disso, uma grande rede de brigadas de bombeiros bem treinadas e equipadas poderia aumentar a capacidade do Brasil de suprimir os incêndios indesejados. Sistemas de previsão do tempo especializado e modelos de comportamento contra o fogo encaminham eficazmente os esforços de supressão de fogo em muitos países, meses antes do início das estações de fogo (Morello et al. 2017) e poderiam ser facilmente implementadas no Brasil (Chen et al. 2011). Finalmente, as áreas protegidas e as reservas indígenas historicamente impediram os incêndios florestais (Nepstad et al. 2006), mas podem se tornar muito mais inflamáveis decorrentes das mudanças climáticas. O fortalecimento da governança florestal perto dessas áreas pode reduzir a probabilidade de incêndios florestais que prejudiquem as florestas e seus serviços (por exemplo, estabilização climática (Silvério et al. 2015)).

9 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Uncategorized References

- Alencar, Ane A, Paulo M Brando, Gregory P Asner, and Francis E Putz. 2015. "Landscape fragmentation, severe drought, and the new Amazon forest fire regime." *Ecological applications* 25 (6):1493-1505.
- Alencar, Ane AC, Luis A Solórzano, and Daniel C Nepstad. 2004. "Modeling forest understory fires in an eastern Amazonian landscape." *Ecological Applications* 14 (sp4):139-149.
- Alencar, Ane, Gregory P Asner, David Knapp, and Daniel Zarin. 2011. "Temporal variability of forest fires in eastern Amazonia." *Ecological Applications* 21 (7):2397-2412.
- Alencar, Ane, Daniel Nepstad, and Mariadel Carmen 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 (6):1-17. doi: 10.1175/ei150.1.
- Andela, Niels, DC Morton, Louis Giglio, Yang Chen, GR van der Werf, PS Kasibhatla, RS DeFries, GJ Collatz, S Hantson, and Silvia Kloster. 2017. "A human-driven decline in global burned area." *Science* 356 (6345):1356-1362.
- Aragão, Luiz E. O. C., Liana O. Anderson, Marisa G. Fonseca, Thais M. Rosan, Laura B. Vedovato, Fabien H. Wagner, Camila V. J. Silva, Celso H. L. Silva Junior, Egidio Arai, Ana P. Aguiar, Jos Barlow, Erika Berenguer, Merritt N. Deeter, Lucas G. Domingues, Luciana Gatti, Manuel Gloor, Yadvinder Malhi, Jose A. Marengo, John B. Miller, Oliver L. Phillips, and Sassan Saatchi. 2018. "21st Century drought-related fires counteract the decline of Amazon deforestation carbon emissions." *Nature Communications* 9 (1):536. doi: 10.1038/s41467-017-02771-y.
- Aragão, Luiz E. O. C., and Yosio E. Shimabukuro. 2010. "The Incidence of Fire in Amazonian Forests with Implications for REDD." *Science* 328 (5983):1275-1278. doi: 10.1126/science.1186925.
- Aragao, Luiz Eduardo OC, Yadvinder Malhi, Rosa Maria Roman-Cuesta, Sassan Saatchi, Liana O Anderson, and Yosio Edemir Shimabukuro. 2007. "Spatial patterns and fire response of recent Amazonian droughts." *Geophysical Research Letters* 34 (7).
- Aragao, Luiz EOC, Benjamin Poulter, Jos B Barlow, Liana O Anderson, Yadvinder Malhi, Sassan Saatchi, Oliver L Phillips, and Emanuel Gloor. 2014. "Environmental change and the carbon balance of Amazonian forests." *Biological Reviews* 89 (4):913-931.
- Balch, Jennifer K, Paulo M Brando, Daniel C Nepstad, Michael T Coe, Divino Silvério, Tara J Massad, Eric A Davidson, Paul Lefebvre, Claudinei Oliveira-Santos, and Wanderley Rocha. 2015. "The susceptibility of southeastern Amazon forests to fire: insights from a large-scale burn experiment." *Bioscience* 65 (9):893-905.
- Barlow, Jos, Toby A Gardner, Alexander C Lees, Luke Parry, and Carlos A Peres. 2012. "How pristine are tropical forests? An ecological perspective on the pre-Columbian human footprint in Amazonia and implications for contemporary conservation." *Biological Conservation* 151 (1):45-49.
- Bond, William J., and Jon E. Keeley. 2005. "Fire as a global 'herbivore': the ecology and evolution of flammable ecosystems." *Trends in Ecology & Evolution* 20 (7):387-394. doi: <https://doi.org/10.1016/j.tree.2005.04.025>.
- Bonham-Carter, G. F. 1994. "Geographic information systems for geoscientists-Modeling with GIS." *Computer methods in the geoscientists* 13:398.
- Bowman, David M. J. S., Jennifer K. Balch, Paulo Artaxo, William J. Bond, Jean M. Carlson, Mark A. Cochrane, Carla M. D'Antonio, Ruth S. DeFries, John C. Doyle, Sandy P. Harrison, Fay H. Johnston, Jon E. Keeley, Meg A. Krawchuk, Christian A. Kull, J. Brad Marston, Max A. Moritz, I. Colin Prentice, Christopher I. Roos, Andrew C. Scott, Thomas W. Swetnam, Guido R. van der

- Werf, and Stephen J. Pyne. 2009. "Fire in the Earth System." *Science* 324 (5926):481-484. doi: 10.1126/science.1163886.
- Brando, Paulo Monteiro. 2010. *Effects of episodic droughts and fire on the carbon cycle of amazonian vegetation: Field research and modeling of a near-term forest dieback*: University of Florida.
- Brando, Paulo Monteiro, Jennifer K Balch, Daniel C Nepstad, Douglas C Morton, Francis E Putz, Michael T Coe, Divino Silvério, Marcia N Macedo, Eric A Davidson, and Caroline C Nóbrega. 2014. "Abrupt increases in Amazonian tree mortality due to drought–fire interactions." *Proceedings of the National Academy of Sciences* 111 (17):6347-6352.
- Brando, Paulo Monteiro, Jennifer K. Balch, Daniel C. Nepstad, Douglas C. Morton, Francis E. Putz, Michael T. Coe, Divino Silvério, Marcia N. Macedo, Eric A. Davidson, Caroline C. Nóbrega, Ane Alencar, and Britaldo S. Soares-Filho. 2014. "Abrupt increases in Amazonian tree mortality due to drought–fire interactions." *Proceedings of the National Academy of Sciences* 111 (17):6347-6352. doi: 10.1073/pnas.1305499111.
- Bruno, L. De Faria, M. Brando Paulo, N. Macedo Marcia, K. Panday Prajjwal, S. Soares-Filho Britaldo, and T. Coe Michael. 2017. "Erratum: Current and future patterns of fire-induced forest degradation in Amazonia (2017 Environ. Res. Lett. 9 [<https://doi.org/10.1088/1748-9326/aa69ce>] 095005 [<https://doi.org/10.1088/1748-9326/aa69ce>])." *Environmental Research Letters* 12 (11):119601.
- Chazdon, Robin L. 2003. "Tropical forest recovery: legacies of human impact and natural disturbances." *Perspectives in Plant Ecology, Evolution and Systematics* 6 (1):51-71. doi: <https://doi.org/10.1078/1433-8319-00042>.
- Chen, Yang, Douglas C Morton, Niels Andela, Guido R Van Der Werf, Louis Giglio, and James T Randerson. 2017. "A pan-tropical cascade of fire driven by El Niño/Southern Oscillation." *Nature Climate Change* 7 (12):906.
- Chen, Yang, James T Randerson, Douglas C Morton, Ruth S DeFries, G James Collatz, Prasad S Kasibhatla, Louis Giglio, Yufang Jin, and Miriam E Marlier. 2011. "Forecasting fire season severity in South America using sea surface temperature anomalies." *Science* 334 (6057):787-791.
- Cochrane, Mark A. 2003a. "Fire science for rainforests." *Nature* 421 (6926):913.
- Cochrane, Mark A, and Christopher P Barber. 2009. "Climate change, human land use and future fires in the Amazon." *Global Change Biology* 15 (3):601-612.
- Cochrane, Mark A. 2003b. "Fire science for rainforests." *Nature* 421:913. doi: 10.1038/nature01437.
- Cochrane, Mark A., Ane Alencar, Mark D. Schulze, Carlos M. Souza, Daniel C. Nepstad, Paul Lefebvre, and Eric A. Davidson. 1999. "Positive Feedbacks in the Fire Dynamic of Closed Canopy Tropical Forests." *Science* 284 (5421):1832-1835. doi: 10.1126/science.284.5421.1832.
- Cox, P. M., R. A. Betts, M. Collins, P. P. Harris, C. Huntingford, and C. D. Jones. 2004. "Amazonian forest dieback under climate-carbon cycle projections for the 21st century." *Theoretical and Applied Climatology* 78 (1):137-156. doi: 10.1007/s00704-004-0049-4.
- Davidson, Eric A, Alessandro C de Araújo, Paulo Artaxo, Jennifer K Balch, I Foster Brown, Mercedes MC Bustamante, Michael T Coe, Ruth S DeFries, Michael Keller, and Marcos Longo. 2012. "The Amazon basin in transition." *Nature* 481 (7381):321.
- Del Grosso, Stephen, William Parton, Thomas Stohlgren, Daolan Zheng, Dominique Bachelet, Stephen Prince, Kathy Hibbard, and Richard Olson. 2008. "GLOBAL POTENTIAL NET PRIMARY PRODUCTION PREDICTED FROM VEGETATION CLASS, PRECIPITATION, AND TEMPERATURE." *Ecology* 89 (8):2117-2126. doi: 10.1890/07-0850.1.
- Eva, Hugh, and Eric F. Lambin. 1998. "Remote Sensing of Biomass Burning in Tropical Regions: Sampling Issues and Multisensor Approach." *Remote Sensing of Environment* 64 (3):292-315. doi: [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(98\)00006-6](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(98)00006-6).

- Grace, John. 2004. "Understanding and managing the global carbon cycle." *Journal of Ecology* 92 (2):189-202. doi: 10.1111/j.0022-0477.2004.00874.x.
- Hirsch, Adam I., William S. Little, Richard A. Houghton, Neal A. Scott, and Joseph D. White. 2004. "The net carbon flux due to deforestation and forest re-growth in the Brazilian Amazon: analysis using a process-based model." *Global Change Biology* 10 (5):908-924. doi: 10.1111/j.1529-8817.2003.00765.x.
- Le Page, Yannick, Douglas Morton, Corinne Hartin, Ben Bond-Lamberty, José Miguel Cardoso Pereira, George Hurtt, and Ghassem Asrar. 2017. "Synergy between land use and climate change increases future fire risk in Amazon forests." *Earth System Dynamics* 8 (4):1237.
- Lenton, Timothy M. 2011. "Early warning of climate tipping points." *Nature Climate Change* 1:201. doi: 10.1038/nclimate1143.
- Lenton, Timothy M., Hermann Held, Elmar Kriegler, Jim W. Hall, Wolfgang Lucht, Stefan Rahmstorf, and Hans Joachim Schellnhuber. 2008. "Tipping elements in the Earth's climate system." *Proceedings of the National Academy of Sciences* 105 (6):1786-1793. doi: 10.1073/pnas.0705414105.
- Lewis, Simon L., Paulo M. Brando, Oliver L. Phillips, Geertje M. F. van der Heijden, and Daniel Nepstad. 2011. "The 2010 Amazon Drought." *Science* 331 (6017):554-554. doi: 10.1126/science.1200807.
- Marengo, Jose A., Javier Tomasella, Lincoln M. Alves, Wagner R. Soares, and Daniel A. Rodriguez. 2011. "The drought of 2010 in the context of historical droughts in the Amazon region." *Geophysical Research Letters* 38 (12):n/a-n/a. doi: 10.1029/2011GL047436.
- McDowell, Nate G, Michael G Ryan, Melanie JB Zeppel, and David T Tissue. 2013. "Feature: Improving our knowledge of drought-induced forest mortality through experiments, observations, and modeling." *New Phytologist* 200 (2):289-293.
- Morello, Thiago Fonseca, Luke Parry, Nils Markusson, and Jos Barlow. 2017. "Policy instruments to control Amazon fires: A simulation approach." *Ecological Economics* 138:199-222.
- Morton, D. C., Y. Le Page, R. DeFries, G. J. Collatz, and G. C. Hurtt. 2013a. "Understorey fire frequency and the fate of burned forests in southern Amazonia." *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences* 368 (1619). doi: 10.1098/rstb.2012.0163.
- Morton, DC, Y Le Page, R DeFries, GJ Collatz, and GC Hurtt. 2013b. "Understorey fire frequency and the fate of burned forests in southern Amazonia." *Philosophical Transactions of the Royal Society of London B: Biological Sciences* 368 (1619):20120163.
- Mouillot, Florent, and Christopher B. Field. 2005. "Fire history and the global carbon budget: a 1°× 1° fire history reconstruction for the 20th century." *Global Change Biology* 11 (3):398-420. doi: 10.1111/j.1365-2486.2005.00920.x.
- Nepstad, Daniel C, Claudia M Stickler, Britaldo Soares-Filho, and Frank Merry. 2008. "Interactions among Amazon land use, forests and climate: prospects for a near-term forest tipping point." *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences* 363 (1498):1737-1746. doi: 10.1098/rstb.2007.0036.
- Nepstad, Daniel C, Claudia M Stickler, Britaldo Soares-Filho, and Frank Merry. 2008. "Interactions among Amazon land use, forests and climate: prospects for a near-term forest tipping point." *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences* 363 (1498):1737-1746.
- Nepstad, Daniel C, Adalberto Verissimo, Ane Alencar, and Carlos Nobre. 1999. "Large-scale impoverishment of Amazonian forests by logging and fire." *Nature* 398 (6727):505.
- Nepstad, Daniel, Georgia Carvalho, Ana Cristina Barros, Ane Alencar, João Paulo Capobianco, Josh Bishop, Paulo Moutinho, Paul Lefebvre, Urbano Lopes Silva Jr, and Elaine Prins. 2001. "Road paving, fire regime feedbacks, and the future of Amazon forests." *Forest ecology and management* 154 (3):395-407.

- Nepstad, Daniel, Paul Lefebvre, Urbano Lopes da Silva, Javier Tomasella, Peter Schlesinger, Luiz Solorzano, Paulo Moutinho, David Ray, and José Guerreira Benito. 2004. "Amazon drought and its implications for forest flammability and tree growth: A basin-wide analysis." *Global change biology* 10 (5):704-717.
- Nepstad, Daniel, David McGrath, Claudia Stickler, Ane Alencar, Andrea Azevedo, Briana Swette, Tathiana Bezerra, Maria DiGiano, João Shimada, and Ronaldo Seroa da Motta. 2014. "Slowing Amazon deforestation through public policy and interventions in beef and soy supply chains." *science* 344 (6188):1118-1123.
- Nepstad, Daniel, Stephan Schwartzman, Barbara Bamberger, Marcio Santilli, D Ray, Peter Schlesinger, P Lefebvre, Ane Alencar, Elaine Prinz, and Greg Fiske. 2006. "Inhibition of Amazon deforestation and fire by parks and indigenous lands." *Conservation Biology* 20 (1):65-73.
- Nobre, Carlos A, Gilvan Sampaio, Laura S Borma, Juan Carlos Castilla-Rubio, José S Silva, and Manoel Cardoso. 2016. "Land-use and climate change risks in the Amazon and the need of a novel sustainable development paradigm." *Proceedings of the National Academy of Sciences* 113 (39):10759-10768.
- Nobre, Carlos A., Piers J. Sellers, and Jagadish Shukla. 1991. "Amazonian Deforestation and Regional Climate Change." *Journal of Climate* 4 (10):957-988. doi: 10.1175/1520-0442(1991)004<0957:adarcc>2.0.co;2.
- Rammig, Anja, Tim Jupp, Kirsten Thonicke, Britta Tietjen, Jens Heinke, Sebastian Ostberg, Wolfgang Lucht, Wolfgang Cramer, and Peter Cox. 2010. "Estimating the risk of Amazonian forest dieback." *New Phytologist* 187 (3):694-706.
- Ray, David, Daniel Nepstad, and Moutinho Paulo. 2005. "Micrometeorological and Canopy Controls of Fire Susceptibility in a Forested Amazon Landscape." *Ecological Applications* 15 (5):1664-1678.
- Rowland, L, Antonio Carlos Lola da Costa, David R Galbraith, RS Oliveira, OLIVER J Binks, AAR Oliveira, AM Pullen, CE Doughty, DB Metcalfe, and SS Vasconcelos. 2015. "Death from drought in tropical forests is triggered by hydraulics not carbon starvation." *Nature* 528 (7580):119.
- Silvério, Divino V, Paulo M Brando, Marcia N Macedo, Pieter SA Beck, Mercedes Bustamante, and Michael T Coe. 2015. "Agricultural expansion dominates climate changes in southeastern Amazonia: the overlooked non-GHG forcing." *Environmental Research Letters* 10 (10):104015.
- Silvestrini, Rafaella Almeida, Britaldo Silveira Soares-Filho, Daniel Nepstad, Michael Coe, Hermann Rodrigues, and Renato Assunção. 2011. "Simulating fire regimes in the Amazon in response to climate change and deforestation." *Ecological Applications* 21 (5):1573-1590. doi: 10.1890/10-0827.1.
- Soares-Filho, Britaldo S, Hermann O Rodrigues, and W Costa. 2009. "Modeling environmental dynamics with Dinamica EGO." *Centro de Sensoriamento Remoto. Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, Minas Gerais* 115.
- Soares-Filho, Britaldo Silveira, Daniel Curtis Nepstad, Lisa M Curran, Gustavo Coutinho Cerqueira, Ricardo Alexandrino Garcia, Claudia Azevedo Ramos, Eliane Voll, Alice McDonald, Paul Lefebvre, and Peter Schlesinger. 2006. "Modelling conservation in the Amazon basin." *Nature* 440 (7083):520.
- Soares-Filho, Britaldo, Rafaella Silvestrini, Daniel Nepstad, Paulo Brando, Hermann Rodrigues, Ane Alencar, Michael Coe, Charton Locks, Letícia Lima, Letícia Hissa, and Claudia Stickler. 2012. "Forest fragmentation, climate change and understory fire regimes on the Amazonian landscapes of the Xingu headwaters." *Landscape Ecology* 27 (4):585-598. doi: 10.1007/s10980-012-9723-6.
- Soares-Filho, Britaldo, Ane Alencar, Daniel Nepstad, Gustavo Cerqueira, Vera Diaz, Maria del Carmen, Sérgio Rivero, Luis Solórzano, and Eliane Voll. 2004. "Simulating the response of land-cover changes to road paving and governance along a major Amazon highway: the Santarém–Cuiabá corridor." *Global change biology* 10 (5):745-764.

- Thonicke, Kirsten, Sergey Venevsky, Stephen Sitch, and Wolfgang Cramer. 2001. "The role of fire disturbance for global vegetation dynamics: coupling fire into a Dynamic Global Vegetation Model." *Global Ecology and Biogeography* 10 (6):661-677. doi: 10.1046/j.1466-822X.2001.00175.x.
- Trumbore, S., P. Brando, and H. Hartmann. 2015. "Forest health and global change." *Science* 349 (6250):814-818. doi: 10.1126/science.aac6759.
- Vayda, Andrew P. 2006. "Causal Explanation of Indonesian Forest Fires: Concepts, Applications, and Research Priorities." *Human Ecology* 34 (5):615-635. doi: 10.1007/s10745-006-9029-x.
- IPCC (2014) Fifth Assessment Report. Cambridge: Cambridge University Press.