

**Universidade Federal de Minas Gerais
Instituto de Geociências
Programa de Pós-Graduação em Análise e Modelagem de Sistemas
Ambientais**

André Carvalho Silveira

**Modelagem de fogo florestal em clima tropical: avanços
para um modelo baseado em processos**

Belo Horizonte
Fevereiro de 2015

André Carvalho Silveira

Modelagem de fogo florestal em clima tropical: avanços para um modelo baseado em processos

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 mestre em Análise e Modelagem de Sistemas Ambientais.

Orientador: Prof. Dr. Britaldo Silveira Soares Filho

Co-orientadora: Dra. Marcia Nunes Macedo

Belo Horizonte
Instituto de Geociências / UFMG
Fevereiro de 2015

S587m Silveira, André Carvalho.
2015 Modelagem de fogo florestal em clima tropical [manuscrito] : avanços para um modelo baseado em processos / André Carvalho Silveira. – 2015.
66 f., enc.: il. (principalmente color.)
Orientador: Britaldo Silveira Soares Filho.
Coorientadora: Marcia Nunes Macedo.
Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Minas Gerais, Instituto de Geociências, 2015.
Bibliografia: f. 50-54.
Inclui anexo.
1. Modelagem de dados – Aspectos ambientais – Teses. 2. Florestas – Teses. 3. Fogo – Teses. 4. Sistemas de informação geográfica – Teses. I. Soares Filho, Britaldo Silveira. II. Macedo, Marcia Nunes. III. Universidade Federal de Minas Gerais. Instituto de Geociências. IV. Título.

CDU: 911.2:519.6




FOLHA DE APROVAÇÃO

Modelagem de fogo florestal em clima tropical: rotina de calibração para um modelo baseado em processos

ANDRE CARVALHO SILVEIRA

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

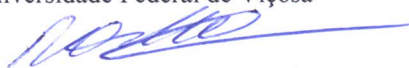
Aprovada em 11 de fevereiro de 2015, pela banca constituída pelos membros:


Prof. Britaldo Silveira Soares Filho - Orientador
Universidade Federal de Minas Gerais


Profa. Marcia Nunes Macedo
Woods Hole Research Center


Prof. Paulo Monteiro Brando
Instituto de Pesquisa Ambiental da Amazônia


Prof. Marcos Heil Costa
Universidade Federal de Viçosa


Prof. Rodrigo Affonso de Albuquerque Nobrega
Universidade Federal de Minas Gerais

Belo Horizonte, 11 de fevereiro de 2015.

Agradecimentos

À minha família, porto de partida e de retorno de qualquer aventura, obrigado pelo amor que me abrigou por todo o caminho. Agradeço de coração à Vânia Cristina Silva do Amaral, que me ensinou que companhia não tem dimensão.

Aos velhos amigos que me ajudam a tomar decisões mesmo de longe, pelo que vivemos juntos. Aos novos amigos, que compartilharam tantos dias comigo, seja no CSR, seja em sala de aula. Saibam que vocês foram meus melhores créditos.

Ao meu orientador, Britaldo Silveira Soares Filho, pelas oportunidades, desafios e ensinamentos, e co-orientadora, Marcia Nunes Macedo, pela atenção e incentivo.

Ao Centro de Sensoriamento Remoto/IGC/UFMG, pela colaboração em um ambiente de trabalho com tantas competências reunidas.

Ao Instituto de Pesquisa Ambiental da Amazônia, em especial ao Paulo Brando e toda equipe do experimento na fazenda Tanguro, pela abertura, cooperação e ótimos momentos em campo.

À secretaria de pós-graduação do Instituto de Geociências da Universidade Federal de Minas Gerais, em especial à Pâmela Siqueira, pelo apoio solícito.

A CAPES, pelo fomento à pesquisa e concessão da bolsa de estudo.

Resumo

O fogo florestal se apresenta como um sistema natural importante para o estudo das interações biosfera-atmosfera. Quando considerados seus efeitos à conservação da biodiversidade, ao balanço do ciclo hidrológico, e ao estoque de carbono na superfície, seu impacto é ainda mais relevante em florestas tropicais. O feedback positivo entre uso e cobertura do solo, clima e fogo ameaça o equilíbrio da floresta, e justifica pesquisas sobre o tema. A integração entre trabalhos de campo e modelagem espacialmente explícita permite abordar o fenômeno sob o ponto de vista de processos, sem restringir a abrangência espacial e temporal. Dessa maneira, o modelo FISC foi desenvolvido para o estudo de fogo florestal em clima tropical, e tem demonstrado bons resultados para estimar a ocorrência de fogo na Amazônia, bem como para simular o espalhamento do fogo na região do alto rio Xingu. Novas demandas em relação à continuidade, resultados e desempenho do modelo guiaram os avanços desenvolvidos para o FISC neste trabalho. Nesse sentido, a base de dados climáticos foi substituída, processos modelados foram revisados e novos aspectos da dinâmica do fogo foram inseridos ao modelo. Assim, todos os métodos numéricos, referentes aos componentes de ignição e de espalhamento do FISC, foram revisitados e recalibrados a partir de novos dados disponíveis para a área de estudo. Como resultado, além da boa aderência obtida para padrões observados de intensidade e sazonalidade de fogo, o FISC foi capaz de representar o impacto de secas anômalas referenciadas para o Xingu ao regime de queimadas na área. Dentre as melhorias apresentadas pelos mapas produzidos pela simulação, destaca-se o novo padrão espacial alcançado para as cicatrizes de fogo simuladas. Os avanços obtidos para o FISC permitem não apenas elevar a qualidade de cenários de fogo florestal em relação a políticas de uso do solo e tendências climáticas, como também expandem a aplicação do modelo a estudos ecológicos de interação com o fogo por métricas de paisagem. Enfim, foi avaliado também o uso do modelo em ambiente operacional, como possível contribuição a esforços permanentes de monitoramento e prevenção de incêndios florestais.

Palavras-chave: Modelagem espacialmente explícita; modelo baseado em processos; fogo florestal; Dinamica-EGO.

Abstract

Forest fire represents a crucial system for the study of interactions between biosphere-atmosphere. Regarding the fire effects on biodiversity conservation, hydrological cycle, terrestrial carbon storage, its impact is even more relevant on tropical forests. The positive feedback among land use/cover, climate and fire threaten the environmental balance and justifies research about the theme. The collaboration between experimental work and spatially explicit modelling allows addressing the phenomena from a process-based point of view, with minor restrictions of spatial and temporal coverage. In this way, the FISC model was developed to study tropical forest fire, and has shown good results for fire region occurrence estimates at Amazonia, as well as simulating fire spread for the Xingu river headwaters. New requirements related to continuity, quality of results, and model performance led the improvements done for FISC during this work. The climatic dataset was replaced, model processes were reviewed and new aspects of fire dynamics were included in the model. Thus each numerical method, relative to the ignition and spread components, were revisited and recalibrated considering new data available for the study area. As results, further on the good fitness obtained for observed patterns of fire intensity and seasonality, FISC was able to represent the consequences of anomalous droughts referenced for Xingu area on fire regimes. The spatial pattern achieved on simulated fire scars represents one of the obtained advances for the result maps. The FISC advances allow to increase the quality of forest fire scenarios due to land use policies and climate trends, still it broaden model's applications on ecological studies with fire interaction using landscape metrics. Lastly, the model use under operational framework was also evaluated as possible contribution to permanent fire monitoring and prevention efforts.

Keywords: Spatially explicit modelling; process-based model; understory fire; Dinamica-EGO.

Sumário

Índice de figuras	8
Índice de tabelas	10
Índice de equações	11
Considerações iniciais	13
1. Introdução.....	14
2. Materiais e métodos	17
2.1. Área de estudo	17
2.2. O modelo FISC.....	18
2.3. Ambiente de trabalho	21
2.4. Variáveis modeladas	22
2.5. Substituição de dados de entrada	23
2.6. Calibração.....	25
2.6.1. Curva objetivo: componente de ignição.....	25
2.6.2. Curva objetivo: componente de espalhamento.....	26
2.6.3. Calibração do componente de ignição	27
2.6.4. Calibração do componente de espalhamento	32
2.6.5. Melhorias para processos modelados.....	36
2.6.5.1. Solução de inconsistências	36
2.6.5.2. Flexibilização do modelo	37
2.6.5.3. Padrão espacial simulado	38
3. Resultados	39
3.1. Ignição.....	39
3.2. Espalhamento	41
4. Discussão.....	44
4.1. Pontos de ignição	44
4.2. Anomalias.....	44
4.3. Áreas queimadas	45
4.4. Métodos de calibração.....	46
4.5. Custo computacional.....	46
4.6. Aplicações	47
5. Conclusões	48
Referências bibliográficas	50

Índice de figuras

Figura 1: Área de estudo envolvendo a parte alta da bacia hidrográfica do rio Xingu, Mato Grosso, Brasil. Notam-se os biomas Amazônia e Cerrado, os limites de áreas protegidas, os principais rios permanentes, e as rodovias BR-158 e BR-163. Também é apontada a localização da fazenda Tanguro que abriga o experimento de fogo florestal.....	18
Figura 2: Diagrama geral do modelo FISC: principais dados, processos e interações, organizados em componentes. Fonte: adaptado de (SOARES-FILHO et al., 2012b).	20
Figura 3: Curva objetivo utilizada na calibração do componente de ignição. Cada ponto da curva representa o número de focos de calor observado no mês para toda área de estudo. Dados de sensoriamento remoto obtidos pelo programa INPE-Queimadas (INPE, 2011a).....	26
Figura 4: Total anual em área de floresta queimada observado nas cabeceiras do rio Xingu. Dados baseados em produtos de sensoriamento remoto. O ano de 2005 se refere apenas a áreas queimadas acumuladas até o mês de agosto.....	27
Figura 5: Diagrama geral do componente de ignição, dados de entrada e saída, processos e interações. As equações utilizadas em cada processo são referenciadas numericamente. Fonte: adaptado de (SOARES-FILHO et al., 2012b).....	28
Figura 6: Número de pontos de ignição simulados por mês, resultados da análise de sensibilidade. A área sombreada representa a amplitude de variação dos resultados obtidos mediante alterações sistemáticas nos coeficientes do componente de ignição do FISC.	30
Figura 7: Diagrama geral do componente de espalhamento, dados de entrada e saída, processos e interações. As equações utilizadas em cada processo são referenciadas numericamente. Fonte: adaptado de (SOARES-FILHO et al., 2012b).....	32
Figura 8: Avaliação da vizinhança de células com fogo para definição do fator de vento sobre o espalhamento (Wf). (a) Pesos de Wf conforme vento de direção 6; (b) Ocorrência de focos simulados; (c) Índice de direções conforme vizinhança D8; (d) Mapa de probabilidades após efeito do fator de vento.	37
Figura 9: Seleção de pontos de ignição em sub-região da área de estudo. (a) Pontos de ignição selecionados entre demais candidatos; (b) Pontos de ignição sobrepostos ao risco geral de espalhamento do fogo.....	39
Figura 10: Resultados preliminares do componente de ignição. (a) Ocorrência mensal de fogo florestal, observada por sensoriamento remoto e simulada pelo FISC antes da correção de VPD. (b) Variação de VPD conforme nova base climática e estação de campo (OMM 83270). Destacam-se os anos que apresentam maior discordância entre as curvas de VPD, mensuradas por diferentes abordagens.....	40
Figura 11: Resultado do componente de ignição após correção de VPD. As curvas representam ocorrência de fogo observada por sensoriamento remoto e simulada pelo FISC.	40
Figura 12: Total de área queimada acumulada por ano, mensurado via observação por sensoriamento remoto e simulado pelo FISC.....	41
Figura 13: Mapas de áreas queimadas: (a) áreas queimadas acumuladas para o ano de 2007 por observação via sensoriamento remoto; (b) áreas queimadas acumuladas para o ano de 2007 simuladas pelo FISC.....	42
Figura 14: Mapas simulados de cicatrizes de fogo acumuladas anualmente. Para cada ano de 2002 a 2013 é apresentado o total de área queimada e a variação de recorrência de fogo. O VPD apresentado se refere ao mês mais seco do ano conforme dataset consumido pelo modelo após correção. As barras verticais apresentam o desvio padrão do gradiente de VPD sobre a área de estudo.....	43

Figura 15: Erro sistemático de subestimação e superestimação pelo modelo, em consequência da alteração do satélite de referência. A diferença entre os sensores oscila a curva objetivo definida para o componente de ignição..... 44

Índice de tabelas

Tabela 1: Variáveis-resposta do modelo FISC e respectivos componentes responsáveis.	22
Tabela 2: Variáveis explanatórias do FISC relativas à Clima ou Terreno/Usos e cobertura da terra, bem como componentes que as operam.....	23
Tabela 3: Valores atribuídos aos coeficientes do componente de ignição como resultado da calibração.	30
Tabela 4: Valores atribuídos aos coeficientes do componente de espalhamento como resultado da calibração.	34

Índice de equações

Equação 1: Cálculo da pressão de saturação do vapor (kPa) a partir da temperatura (°C). Fonte: (ABTEW; MELESSE, 2013).....	24
Equação 2: Cálculo do déficit de pressão de vapor, VPD (kPa) através da pressão de saturação do vapor e umidade relativa do ar. Fonte: (ABTEW; MELESSE, 2013).....	24
Equação 3: Regressão logística do risco climático de ocorrência de fogo (Pcl). O par ordenado (x,y) se refere a linha e coluna da célula raster, o índice i se refere ao mês e j ao ano em análise. Os coeficientes β_0 e β_1 foram recalibrados para o novo dataset de VPD. Fonte: (SILVESTRINI et al., 2011).....	31
Equação 4: Expressão do método Pesos de Evidência utilizada para o cálculo do risco antropogênico de ocorrência de fogo. As variáveis independentes são representadas por B_k , o par ordenado (x,y) se refere a linha e coluna da célula raster, o índice k' referencia cada categoria da variável k. Fonte: adaptado de (SILVESTRINI et al., 2011).....	31
Equação 5: Integração dos riscos climático (Pcl) e antropogênico (Pbiop) de ocorrência de fogo. O modelo permite atribuir um valor de α para cada mês do ano, representado pelo índice i. O par ordenado (x,y) se refere a linha e coluna da célula raster, e o índice j ao ano em análise. Fonte: (SILVESTRINI et al., 2011).....	31
Equação 6: Sorteio de pontos de ignição. A probabilidade sorteada com auxílio de uma PDF (ρ) é flexibilizada pelo coeficiente γ , definindo limiares probabilísticos para simulação de ocorrência de fogo. O par ordenado (x,y) se refere a linha e coluna da célula raster, e os índices i, j a mês e ano em análise. Fonte: (SILVESTRINI et al., 2011).....	31
Equação 7: Controle do número de pontos de ignição simulados (I_g). Para cada ponto simulado é sorteado um número aleatório com distribuição uniforme, se o numero sorteado for maior que θ então é confirmada a ignição; caso contrário o ponto simulado é anulado. O par ordenado (x,y) se refere a linha e coluna da célula raster, e os índices i, j a mês e ano em análise.....	32
Equação 8: Equação do risco geral de espalhamento de fogo (Pburn). São combinados os riscos climático (RiskClim), de terreno (RiskTe), por disponibilidade de combustível (RiskFuel); e os fatores de vento (Wf) e vizinhança (Nbf). O par ordenado (x,y) se refere a linha e coluna da célula raster. Os índices i e j se referem a mês e ano em análise. O índice t se refere à iteração do processo de espalhamento do fogo.....	35
Equação 9: Cálculo do déficit de pressão de vapor sob dossel (InnerVPD). As variáveis cstem e cleaf se referem a estoques de carbono geridos pelo CARLUC que representam troncos e folhas, respectivamente. Fonte: IPAM.....	35
Equação 10: Cálculo do risco climático de espalhamento do fogo. O par ordenado (x,y) se refere a linha e coluna da célula raster, e os índices i e j se referem a mês e ano em análise. Fonte: adaptado de (SOARES-FILHO et al., 2012b).....	35
Equação 11: Cálculo do risco de terreno para espalhamento do fogo. O par ordenado (x,y) se refere a linha e coluna da célula raster, e os índices i e j se referem a mês e ano em análise. Os pesos de evidência W_{te} são relativos a cada categoria de esforço de terreno necessário para deslocamento do fogo. Fonte: adaptado de (SOARES-FILHO et al., 2012b).....	35
Equação 12: Cálculo do risco por disponibilidade de combustível para o espalhamento do fogo. O par ordenado (x,y) se refere a linha e coluna da célula raster, e os índice i e j se referem a mês e ano em análise. A variável strucLL representa o estoque de carbono estrutural em folhas de serrapilheira. Fonte: adaptado de (SOARES-FILHO et al., 2012b).....	35
Equação 13: Cálculo do fator de vento que compõe o risco final de espalhamento do fogo. O fator dependente da direção do vento é representado por τ_{wd} , e a intensidade do vento por W_i . O par ordenado (x,y) se refere a linha e coluna da célula raster, os índice i e j se referem a mês e ano em análise, e t se refere ao timestep corrente. Fonte: adaptado de (SOARES-FILHO et al., 2012b).....	35

Equação 14: Cálculo do fator de vizinhança que compõem o risco final de espalhamento do fogo. A variável n registra o número de vizinhos com fogo e o coeficiente z pondera o impacto de cada vizinho ao contágio do fogo. O par ordenado (x,y) se refere a linha e coluna da célula raster, os índices i e j se referem a mês e ano em análise, e t se refere ao timestep corrente. 36

Considerações iniciais

Para melhor interpretação do texto, são contextualizados alguns termos adotados ao longo do trabalho. O termo ‘fogo florestal’ engloba tanto fogos controlados, quanto incêndios florestais. Uma vez que os dados observados utilizados para o desenvolvimento do modelo não diferenciam categorias de fogo, os resultados do modelo também não se limitam a incêndios florestais, tratando o fogo em floresta independente de intenção ou controle. Referências ao ‘regime’ de fogo florestal se definem pela variação da ocorrência de pontos de ignição de fogo, bem como das extensões de áreas queimadas resultantes de seu espalhamento. Muitas vezes, produtos do modelo e dados observados são denominados ‘mapas’, o que é uma degeneração do termo, pois os arquivos digitais matriciais (raster) produzidos não apresentam todos os elementos cartográficos essenciais a um mapa. Focos de calor susceptíveis à observação por satélite são utilizados para calibrar e validar o modelo, entretanto, adota-se o termo ‘pontos de ignição’ para designar as fontes de fogo simuladas, a fim de diferenciar dados observados e simulados.

O FISC é um modelo baseado em processos que visa representar a dinâmica do fogo em florestas tropicais, para isso o modelo visa reproduzir processos sensíveis à resolução espacial acerca de 300 m e resolução temporal mensal, embora alguns mecanismos operem em diferentes passos de tempo.

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.

1. Introdução

O fogo é um elemento natural que compõe a ecologia da paisagem (BOND; WOODWARD; MIDGLEY, 2005; VAN WILGEN, 2009). Como todo elemento ecológico, sua atividade é essencial à manutenção do meio-ambiente. A ocorrência e abrangência do fogo dependem do contexto físico e biológico, assim são observados regimes específicos para o Cerrado, Amazônia, e demais biomas (BOWMAN et al., 2009). Variações em seu comportamento devem respeitar limites inerentes a cada tipo de paisagem, sendo o impacto do fogo suficiente para que oscilações bruscas em seus regimes coloquem em risco o equilíbrio do ambiente. Se a intensificação das queimadas florestais pode levar à perda de biodiversidade (WHELAN, 1995) e alterações na estrutura da floresta (COCHRANE, 2003), a redução crítica dos fogos no cerrado pode favorecer a ocupação anômala de determinadas espécies, bem como elevar o risco de incêndios de larga escala por permitir o acúmulo de combustível na área (MIRANDA; BUSTAMANTE; MIRANDA, 2002). Por outro lado, mudanças no uso do solo e variações do clima são fatores essenciais à regulação dos regimes de fogo. Considerando que o homem é um dos principais agentes de mudança da paisagem (BRANDO et al., 2014) e possivelmente do clima (COX et al., 2000), é importante embasar a governança das atividades humanas para gestão dos recursos naturais e manutenção dos serviços ambientais (FEARNSIDE, 2008). Nesse sentido, o estudo da dinâmica do fogo se apresenta como um aspecto de grande relevância para interações biosfera-atmosfera.

Dentre os ecossistemas terrestres, a importância das florestas, com destaque às florestas tropicais, é fundamentada em diversos serviços ecossistêmicos sensíveis em escala local, regional e global, dentre os quais estão suporte à biodiversidade, balanço do ciclo hidrológico, regulação climática e estoque de carbono (BACCINI et al., 2012; COE et al., 2013; MYERS et al., 2000; STICKLER et al., 2013). O estudo do impacto do fogo às florestas tropicais é justificado por cada serviço mencionado. Não obstante, a representatividade da parcela de emissões de carbono à atmosfera, relativa à queima de biomassa, chama atenção para a grandeza das consequências de queimadas florestais (GULLISON et al., 2007; THONICKE et al., 2010).

A presença humana na floresta, sobretudo em áreas de entorno, está atrelada a inúmeras perturbações do ambiente. Agricultura, pecuária, extração de madeira, transporte, ocupação urbana, entre outras atividades, geram mudanças de uso e cobertura da terra que impactam substancialmente a floresta. Tais atividades não apenas afetam a estrutura da paisagem (COCHRANE, 2003; NEPSTAD et al., 1999), como também impactam a ocorrência de queimadas, diretamente através do manejo do fogo em áreas de pastagem e agricultura (ALENCAR; SOLÓRZANO; NEPSTAD, 2004; NEPSTAD; MOREIRA; ALENCAR, 1999), e indiretamente por outras interferências ambientais, como a abertura de estradas que elevam o risco de ignição de fogo em áreas próximas (SOARES-FILHO et al., 2012b). Outra importante dinâmica ecológica impulsionada pela intervenção humana é a interação entre fragmentação e fogo florestal. Quanto maior a extensão de bordas apresentada por um

remanescente florestal menor é sua resistência ao fogo. Isso ocorre pois o microclima observado abaixo do dossel varia do interior da floresta até áreas de borda, onde se aproxima do clima externo e aumenta a susceptibilidade ao fogo (BRANDO et al., 2014; KAPOS et al., 1993). Diferenças nas médias de temperatura, umidade relativa do ar e déficit de pressão de vapor são observadas entre o interior de florestas maduras e áreas antropizadas (RAY; NEPSTAD; MOUTINHO, 2005). O impacto da atividade humana sobre os regimes de fogo ficam em evidência quando comparadas as ocorrências de queimadas dentro e fora de áreas protegidas (SOARES-FILHO et al., 2010, 2012b).

Se as mudanças do uso e cobertura da terra impactam a estrutura da floresta favorecendo a atividade do fogo (COCHRANE et al., 1999; SAMPAIO et al., 2007), por outro lado, o fogo é considerado um dos principais agentes de alteração da estrutura da paisagem na Amazônia (LAURANCE; WILLIAMSON, 2001; SILVESTRINI, 2008), configurando uma situação de retroalimentação. Ao interferir na mortalidade de árvores, as queimadas contribuem para uma floresta menos densa e dossel mais esparso. Dessa forma, também é reduzida a capacidade de retenção de umidade no interior da floresta, o que favorece o surgimento de gramíneas com maior flamabilidade (COCHRANE, 2003). Ademais, a incidência do fogo aumenta a quantidade de folhas secas em serrapilheira, e algumas árvores que sobrevivem às queimadas não resistem às condições pós-fogo, gerando restos lenhosos. Assim, o próprio fogo amplia a disponibilidade de combustível no interior da floresta e favorece a recorrência de queimadas (NEPSTAD; MOREIRA; ALENCAR, 1999).

Em complemento ao uso do solo, o clima também possui reconhecido destaque como forçante da dinâmica do fogo na Amazônia (COCHRANE; BARBER, 2009; COCHRANE, 2002; SOARES-FILHO et al., 2012b). Além do ar mais seco propiciar os processos de queima, a própria alteração da composição vegetal, entre espécies herbáceas e lenhosas influenciada pela concentração de CO² na atmosfera, amplia a disponibilidade de combustível na floresta (VAN WILGEN, 2009). Oscilações de temperatura, precipitação e diversas outras variáveis climáticas são essenciais para definir circunstâncias ambientais que determinam o comportamento do fogo. Estudos apontam que mudanças climáticas podem gerar condições futuras mais secas e quentes na região amazônica (BETTS et al., 2004; OYAMA; NOBRE, 2003), o que aumentaria a frequência de fogos na floresta (SILVESTRINI et al., 2011). As secas extremas ocorridas na Amazônia nos anos de 1997-1998 (ENSO - El Niño Southern Oscillation) e 2005 (Não ENSO) foram acompanhadas por intensos regimes de fogo que consumiram dezenas de milhares de quilômetros quadrados de floresta (ALENCAR; NEPSTAD; DIAZ, 2006; MARENCO et al., 2008; MORTON et al., 2013; NEPSTAD et al., 1999). Por sua vez, os fogos florestais também impactam substancialmente o clima: observa-se a significativa emissão de gases de efeito estufa proveniente de queimadas, e a alteração na concentração de aerossóis na atmosfera, o que influencia a formação de nuvens e ocorrência de chuvas, além do prejuízo direto da degradação florestal às interações floresta-clima (ACKERMAN et al., 2000; ANDREAE et al., 2004;

RAMANATHAN et al., 2001). A relação cíclica entre clima e fogos florestais configuram o arranjo de feedback positivo e coloca em risco o equilíbrio ecossistêmico.

Estudos tentam avaliar as consequências que o aquecimento global e as intervenções humanas na floresta trarão para a Amazônia. Pesquisas que avaliam as interações biosfera-atmosfera através de modelagem divergem em relação ao futuro da maior floresta do mundo (BOTTA; FOLEY, 2002; FRIEDLINGSTEIN et al., 2003; GULLISON et al., 2007; SALAZAR; NOBRE; OYAMA, 2007). Em todo o caso, cenários extremos apontam possível transição da floresta tropical amazônica para vegetação de semiárido, processo chamado de savanização (COX et al., 2000, 2004; OYAMA; NOBRE, 2003). A sinergia entre o consumo da floresta, guiado por processos antrópicos, e a tendência de clima mais seco, projetada para as próximas décadas, pode acelerar os regimes de fogo na Amazônia e conduzir a floresta para um processo vicioso de degradação (NEPSTAD et al., 2006, 2008; SOARES-FILHO et al., 2006).

A capacidade de investigar de forma quantitativa as interações entre clima, mudanças de uso e cobertura do solo e regimes de fogo florestal é oferecida por modelos computacionais. Através da modelagem espacialmente explícita é possível avaliar tais interações considerando a heterogeneidade da paisagem no espaço (SILVESTRINI et al., 2011; SOARES-FILHO et al., 2012b). Tal ferramenta permite avaliar a efetividade de políticas públicas para a gestão dos recursos naturais florestais, como por exemplo, alterações do código florestal (SOARES-FILHO et al., 2014), fomentos a tecnologia de produção e medidas de conservação (SOARES-FILHO et al., 2012a). A literatura reporta o desenvolvimento de modelos de fogo florestal (SCHLOBOHM; BRAIN, 2002), (VENEVSKY et al., 2002), (DE GROOT et al., 2006), entretanto, a proporção de trabalhos entre as diversas categorias de floresta não reflete a relevância do fogo em florestas tropicais. Mais especificamente, a modelagem de fogo para a Amazônia ainda apresenta pouca maturidade (SILVESTRINI et al., 2011). Estudos realizados por Cardoso et al. (2003), Nepstad et al. (2004), e Sismanoglu e Setzer (2005) criam modelos para a análise do fogo na Amazônia sob o ponto de vista de risco de ocorrência, porém, não abordam o fenômeno a partir de sua dinâmica de ignição e espalhamento. Dentre os principais obstáculos para a modelagem dos processos de fogo, em florestas de clima tropical, está a baixa disponibilidade de dados observados, fundamentais para caracterizar a dinâmica do sistema e permitir a representação de seus principais processos. Nesse sentido, experimentos de campo são essenciais para apoiar o desenvolvimento de modelos baseados em processos (BRANDO et al., 2014; RAY; NEPSTAD; MOUTINHO, 2005).

O modelo FISC (Fire Ignition, Spread and Carbon components) (SILVESTRINI et al., 2011; SOARES-FILHO et al., 2012b) foi desenvolvido para munir o estudo de regimes de fogo florestal em clima tropical sob o ponto de vista de processos. Além de avaliar o risco de ocorrência, o modelo simula o espalhamento do fogo considerando características do terreno, adequabilidade climática, disponibilidade de combustível, influência do vento e padrões de vizinhança das frentes de fogo.

Dentre os produtos fornecidos pelo FISC destacam-se os mapas de ignição de fogo e os mapas de áreas queimadas. Também é possível estimar a emissão de carbono proveniente de queimadas, pois o modelo considera o ciclo do carbono entre estoques específicos do ambiente florestal. Dessa forma, o FISC fornece cenários para regimes de fogo em relação a tendências de uso do solo e variações climáticas (SOARES-FILHO et al., 2012b).

Este trabalho tem por objetivo avançar o FISC a fim de atender a novas demandas relativas a continuidade, resultados e desempenho do modelo. Em relação à continuidade, espera-se que o modelo esteja apto a assimilar dados climáticos recentes para fornecer cenários atualizados sobre o comportamento do fogo. Quanto aos resultados simulados, além de boa aderência à sazonalidade e intensidade das queimadas, é interessante que o modelo represente bem secas anômalas, decorrentes de extremos climáticos, e se aproxime de novos dados observados para a área de estudo, em relação ao total de área queimada e padrão espacial de cicatrizes de fogo. Por último, deseja-se avaliar o uso do modelo como ferramenta que contribua a esforços de monitoramento e prevenção de incêndios florestais.

2. Materiais e métodos

2.1. Área de estudo

A área estudada está contida na porção alta da bacia hidrográfica do rio Xingu, entre as latitudes 9° e 15° sul, e longitudes 51° e 56° oeste, somando 176 000 Km² de área no estado de Mato Grosso, Brasil. Situada ao sudeste da Amazônia brasileira a região apresenta contexto claramente caracterizado por esforços de conservação em contraste à expansão agrícola. Estão presentes na região, áreas protegidas entre unidades de conservação, terras indígenas e o Parque Indígena do Xingu que ocupa a porção central do perímetro estudado, como ilustra a Figura 1. Envolvendo, além da Amazônia, o bioma Cerrado, estão presentes na área floresta ombrófila, floresta de transição e vegetação cerrado-savana (VELASQUEZ; QUEIROZ; BERNASCONI, 2010). A região apresenta topografia plana, regime de chuva bem definido e abundante rede hidrográfica com destaque ao rio Xingu. Vastos campos de soja e áreas de pastagem se destacam como uso da terra, sendo a atividade econômica regional baseada na produção agropecuária de grande representatividade nacional e internacional (ALENCAR et al., 2005). A região envolve centros urbanos interligados por rodovias com destaque a BR-158 e BR-163, incluindo também assentamentos rurais (IBGE, 2013). A atividade madeireira e o uso do fogo como instrumento de manejo da terra por índios e agricultores integram as causas do desmatamento e degradação florestal na região.

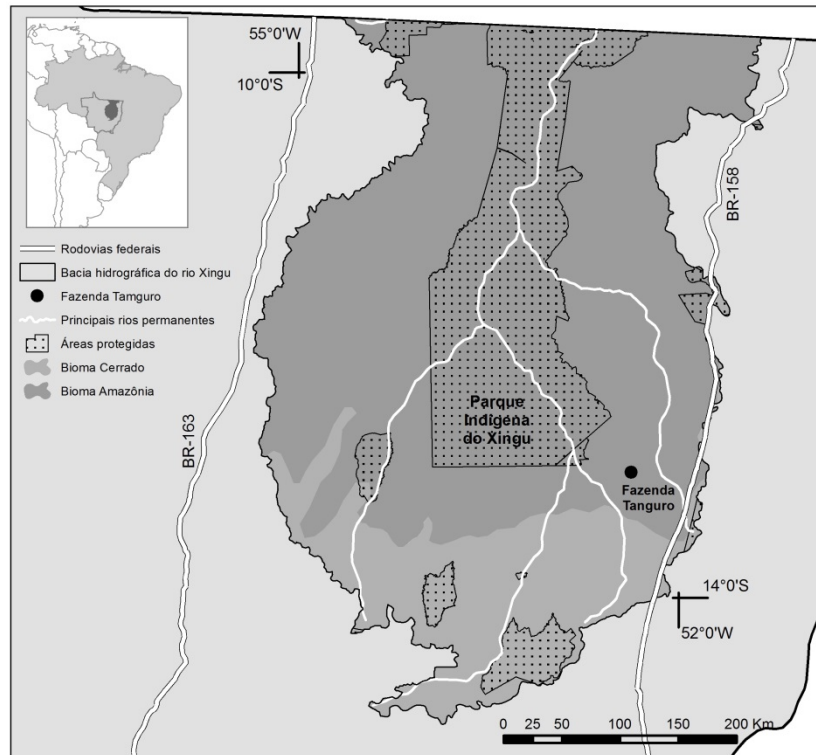


Figura 1: Área de estudo envolvendo a parte alta da bacia hidrográfica do rio Xingu, Mato Grosso, Brasil. Notam-se os biomas Amazônia e Cerrado, os limites de áreas protegidas, os principais rios permanentes, e as rodovias BR-158 e BR-163. Também é apontada a localização da fazenda Tanguro que abriga o experimento de fogo florestal.

O trabalho de modelagem para criação e desenvolvimento do FISC incorpora conhecimento sobre fogo de sub-bosque gerado a partir de trabalhos de observação em campo como em Ray; Nepstad; Moutinho (2005), Balch et al. (2008) e Brando et al. (2014). A área estudada abriga o experimento de fogo florestal prescrito conduzido pelo Instituto de Pesquisa Ambiental da Amazônia (IPAM) na fazenda Tanguro, localizada por volta de 75 km ao norte do município de Canarana - MT. Nesse experimento três áreas de observação adjacentes, de 50 ha cada, se diferenciam em relação à frequência em que sofrem queimadas conduzidas. Além da parcela de controle, uma parcela é queimada anualmente e outra de 3 em 3 anos. O experimento contribui para o estudo da dinâmica do fogo florestal com notável relevância por tratar fogo prescrito a longo termo em clima tropical. Nota-se a importância da interação entre trabalhos experimentais e em modelagem para o avanço do entendimento de sistemas ambientais como o fogo florestal. A Seção S1 do material suplementar apresenta informações sobre a visita a campo realizada durante o aprimoramento do FISC.

2.2. O modelo FISC

O modelo FISC (Fire Ignition, Spread and Carbon components) é um modelo espacialmente explícito baseado em processos que simula ocorrência e espalhamento de fogo florestal em clima tropical (SILVESTRINI et al., 2011; SOARES-FILHO et al., 2012b). O FISC incorpora observações de campo, dados de sensoriamento remoto, e de projeções climáticas e de uso da terra, combinando métodos determinísticos e probabilísticos em um modelo computacional capaz de simular fogo de

sub-bosque em alta resolução espacial e resolução temporal mensal. O modelo trata áreas abrangentes (mais de 150 000 km²) em períodos longos (dezenas de anos) com tempo de processamento suficiente para atuar em ambiente operacional. Assim se apresenta como ferramenta disponível tanto para o estudo do fenômeno, como para munir esforços de monitoramento e prevenção de queimadas. Por ser baseado em processos o modelo permite análises além do risco de fogo, contemplando também os fatores ambientais que contribuem para a evolução ou extinção das frentes de fogo. O modelo se caracteriza espacialmente explícito ao lançar mão de um autômato celular que avalia o estado das variáveis ambientais a cada ponto da área de estudo em relação a sua vizinhança mais próxima. Assim é possível o estudo refinado das interações ecológicas relativas ao fogo, e a análise das condições físicas e biológicas da floresta em relação aos pontos de ignição e áreas queimadas.

O FISC é organizado em três componentes: ignição, espalhamento e carbono. O componente de ignição combina antropismo e clima para calcular o risco de ocorrência de pontos de ignição de fogo na floresta. A condição ambiental ao fenômeno é ponderada pela sazonalidade de temperatura e umidade relativa do ar, bem como pela proximidade a estradas, áreas urbanas, e atividades humanas relacionadas a mudanças do uso do solo. O manejo da terra muitas vezes envolve fogo intencional que ao sair de controle pode evoluir a um incêndio florestal (AXIMOFF, 2011). A sensibilidade do modelo à alteração antropogênica da paisagem é muito relevante para o estudo do fogo em regiões da Amazônia, principalmente em áreas de limite do bioma, onde ocorre acentuada dinâmica de alteração da paisagem. Já a forçante climática também regula a propensão à ocorrência do fogo, assim como a amplitude das queimadas (ALENCAR; NEPSTAD; DIAZ, 2006; NEPSTAD et al., 1999). Os pontos de ignição de fogo simulados precedem o espalhamento das frentes de fogo influenciando diretamente a distribuição espacial das áreas afetadas. Além disso, os mapas de ignição representam por si um importante produto do modelo, uma vez que dados de sensoriamento remoto sensíveis a focos de calor na superfície terrestre podem ser comparados aos mapas simulados a fim de avaliar o desempenho do modelo.

O componente de espalhamento, por sua vez, é um mecanismo que reproduz o avanço das frentes de fogo a partir dos pontos de ignição simulados. Os processos contemplados por esse componente consideram clima, características do terreno, disponibilidade de combustível, condições do vento e estrutura das frentes de fogo para produzir mapas de áreas queimadas, também chamadas de cicatrizes de fogo. Para isso o componente consome variáveis ambientais espacializadas em estrutura matricial raster de alta resolução, o que eleva o custo computacional das simulações. Os mapas de áreas queimadas são úteis para estudos ecológicos, além de basear estimativas de emissões de carbono relativas a eventos de fogo. Se o registro de cicatrizes de fogo através de levantamento em campo requer grande esforço e limita-se em extensão geográfica, por outro o uso de técnicas tradicionais de sensoriamento remoto resulta em registros pouco precisos no tempo e no espaço, o que prejudica a verificação das áreas queimadas simuladas.

O terceiro componente é um modelo independente que foi integrado ao FISC para representar o ciclo do carbono entre a floresta e a atmosfera. O modelo CARLUC (CARbon and Land-Use Change) simula o transporte de carbono entre diferentes estoques florestais de acordo com processos contínuos, como crescimento e regeneração vegetal, assim como em relação a perturbações esporádicas, o que inclui extração seletiva de madeira e eventos de fogo (HIRSCH et al., 2004). Dentre os processos operados pelo componente de carbono destacam-se o cálculo do déficit de pressão de vapor abaixo do dossel (Inner VPD), e o gerenciamento da disponibilidade de combustíveis finos e restos lenhosos na floresta, ambos importantes insumos para o processo de espalhamento do fogo. As equações e coeficientes do componente de carbono, embora mencionados em algumas análises, não foram revisados neste trabalho. Avanços sobre a aplicação do CARLUC no contexto de fogo florestal estão em desenvolvimento em trabalhos complementares. A Figura 2 apresenta os principais dados, processos e respectivas interações, organizados pelos componentes do FISC.

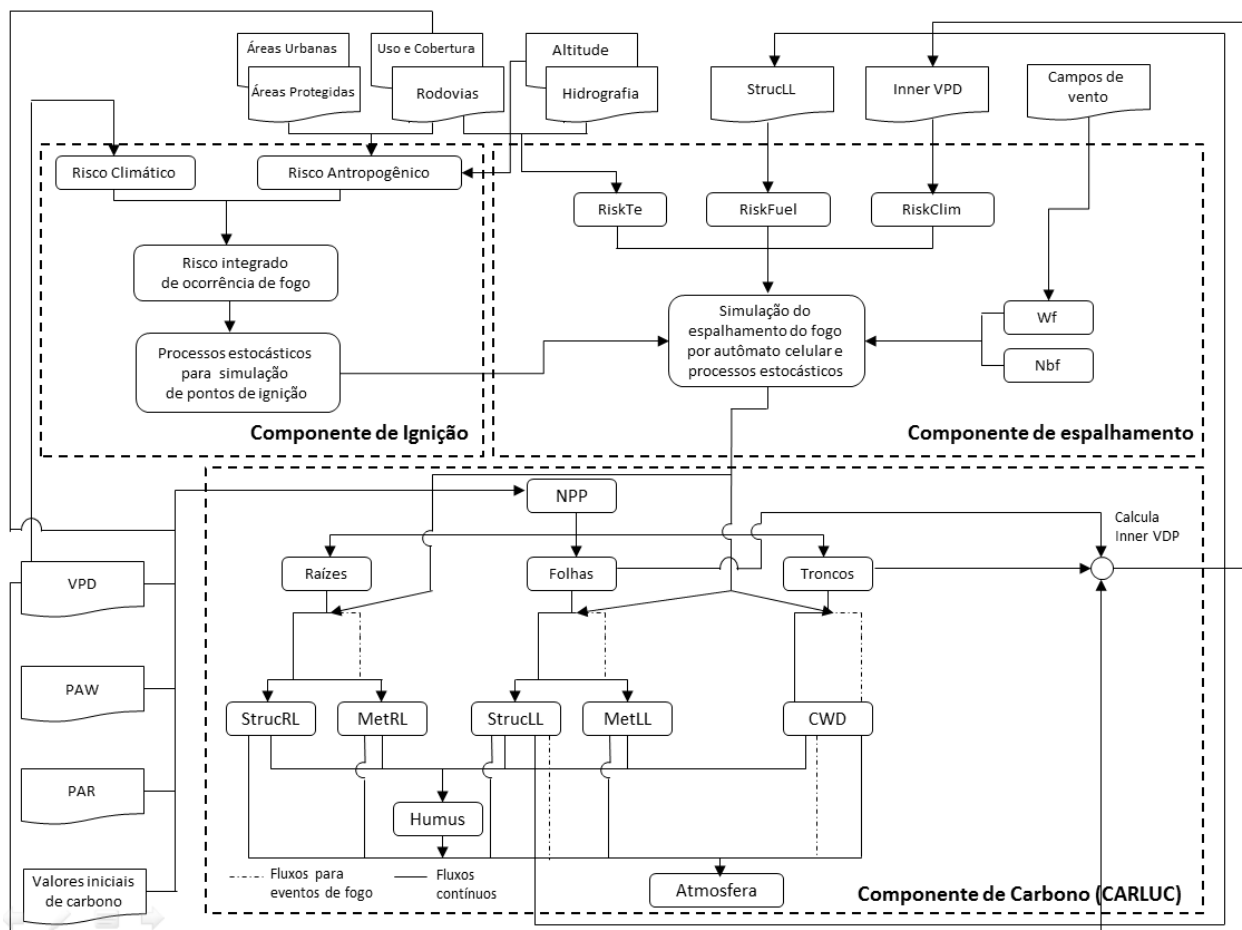


Figura 2: Diagrama geral do modelo FISC: principais dados, processos e interações, organizados em componentes. Fonte: adaptado de (SOARES-FILHO et al., 2012b).

A versão do FISC que precede o presente trabalho apresenta importantes resultados em relação ao regime de fogos na bacia do rio Xingu. Dentre os principais produtos já disponibilizados pelo modelo destacam-se: número de pontos de ignição mensais, mapas de ignição de fogo, total de área queimada dentro e fora de áreas protegidas, e estimativas de emissão de carbono geradas por fogo florestal (SILVESTRINI et al., 2011; SOARES-FILHO et al., 2012b). Contudo versões anteriores utilizam como conjunto de dados de entrada um produto não oficial do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais que foi descontinuado, limitando a sensibilidade do FISC a observações climáticas recentes (posteriores a 2005). Tendo como ponto de partida a substituição do conjunto de dados climáticos, este trabalho visa avançar o modelo FISC de forma a permitir cenários atualizados de fogo florestal nas cabeceiras do rio Xingu, aprimorar o desempenho do modelo vislumbrando melhorias para a representação da dinâmica do fogo, e avaliar métodos numéricos, coeficientes e abordagens de calibração perante a possibilidade de uso do modelo em ambiente operacional (simulações sistematicamente frequentes). As variáveis resposta e variáveis explanatórias do FISC são apresentadas pela Seção 2.4, a lista completa dos dados utilizados é encontrada na Seção S2 do material suplementar.

2.3. Ambiente de trabalho

O modelo FISC foi criado e aprimorado sobre a plataforma de modelagem espacialmente explícita Dinamica-EGO (SOARES-FILHO; RODRIGUES; COSTA, 2009). A ferramenta facilita o trabalho de modelagem por possuir interface gráfica amigável e intuitiva, dispensando totalmente o uso de programação, além de disponibilizar operadores básicos e submodelos que combinados permitem a criação de modelos sofisticados. Para a execução de análises específicas durante o desenvolvimento do FISC, bem como testes de menor demanda computacional, foi utilizado um computador portátil de 2,5 GHz distribuídos em 4 núcleos de processamento, e 8 GB de memória principal. Tal configuração é suficiente para o uso da plataforma de modelagem, de softwares estatísticos, de planilhas numéricas, e de programas de documentação, apresentação e interface de rede. Considerando que o FISC é baseado em processos e opera um autômato celular em alta resolução, e o volume de dados consumidos pelo modelo, faz-se necessário maior poder computacional para avaliar simulações longas em tempo hábil, ou mesmo um conjunto de curtas simulações. Nesse sentido foram utilizados dois servidores, um para o armazenamento do volume de dados de entrada que soma por volta de 50 GB, e outro servidor com poder computacional suficiente para lidar com múltiplas variáveis em séries temporais, para processamento. O servidor de processamento utilizado dispõe de 80 núcleos, 160 processadores lógicos, e memória principal de 768 GB. O ambiente de trabalho descrito é compartilhado por modelos em desenvolvimento e em produção, não sendo exclusivo para o avanço do FISC. Os servidores foram úteis principalmente em testes de alto custo computacional, como análises de sensibilidade, e simulações em longos períodos. O conjunto de dados de saída soma cerca de 3,5 GB por ano simulado.

2.4. Variáveis modeladas

Para representar a dinâmica do fogo florestal o FISC define duas variáveis-resposta principais: pontos de ignição de fogo em floresta e áreas queimadas. Tais variáveis são consideradas como os principais resultados da simulação e são avaliadas tanto numericamente quanto espacialmente. O FISC também gera produtos auxiliares importantes para verificar o desempenho do modelo e para estudos específicos. Dentre os demais dados de saída, destacam-se os mapas de propensão de ignição e espalhamento do fogo, bem como cada um de seus riscos integrantes: antropogênico, climático, risco de terreno e risco por disponibilidade de combustível. O submodelo CARLUC provê mapas de estoques de carbono na floresta que ao serem combinados com os mapas de áreas queimadas dão base às estimativas de emissão de carbono à atmosfera. A Tabela 1 evidencia as principais variáveis-resposta do FISC e os componentes aos quais estão relacionadas.

Para simular a variação de ocorrência e espalhamento do fogo, o FISC manipula uma série de variáveis explanatórias listadas pela Tabela 2. A análise de variáveis candidatas bem como a escolha das variáveis explanatórias foram desempenhadas em trabalhos anteriores (SILVESTRINI et al., 2011). Durante a elaboração da versão inicial do modelo, Silvestrini et al. (2011) reportam o teste de variáveis, como por exemplo precipitação, e argumentam o uso de déficit de pressão de vapor como principal forçante climática. O grupo Clima da Tabela 2 inclui temperatura, radiação fotossinteticamente ativa (PAR) e disponibilidade de água na planta (PAW), que são utilizadas pelo componente de carbono para regular processos relativos à produção primária; déficit de pressão de vapor acima e abaixo do dossel (VPD e Inner VPD, respectivamente) como as principais variáveis climáticas e microclimáticas do modelo; e campos de intensidade e direção de vento para auxiliar o processo de espalhamento do fogo. O grupo Terreno/Usos e cobertura da terra envolve condições de terreno e superfície como: topografia, hidrografia, cobertura vegetal e distribuição de biomassa; assim como indicadores da presença humana e processos antropogênicos como: áreas urbanas, rodovias, áreas protegidas e uso da terra. Dessa forma, ao simular a dinâmica do fogo florestal, o modelo é sensível tanto a tendências climáticas quanto às alterações antropogênicas da paisagem.

Tabela 1: Variáveis-resposta do modelo FISC e respectivos componentes responsáveis.

Variável-resposta	Componente
Pontos de ignição na floresta	Ignição
Áreas de floresta queimada	Espalhamento

Tabela 2: Variáveis explanatórias do FISC relativas à Clima ou Terreno/Usos e cobertura da terra, bem como componentes que as operam.

Variável explanatória	Grupo	Componente
Déficit de pressão de vapor (VPD)	Clima	Ignição
Déficit de pressão de vapor de sub-bosque (Inner VPD)		Espalhamento
Temperatura		Carbono
Radiação fotossinteticamente ativa (PAR)		Carbono
Disponibilidade de água na planta (PAW)		Carbono
Direção e intensidade do vento		Espalhamento
Topografia	Terreno / Uso e cobertura da terra	Ignição e espalhamento
Hidrografia		Espalhamento
Áreas urbanas		Ignição
Rodovias (pavimentadas e não pavimentadas)		Ignição
Áreas protegidas		Ignição
Uso da terra e cobertura vegetal		Ignição e espalhamento
Biomassa vegetal		Carbono

A especificação dos conjuntos de dados utilizados para derivar cada variável explanatória, suas fontes e outros detalhes podem ser encontrados na Seção S2 do material suplementar. O modelo FISC através da plataforma Dinamica-EGO opera tanto dados tabulares quanto em estrutura matricial raster. Todos os arquivos raster, seja de entrada ou de saída, apresentam resolução espacial de 320 x 320 m, 1665 linhas, 2000 colunas, sistema de projeção LL-WGS84 (EPSG 4326), e referem-se à mesma extensão da área de estudo podendo conter valores nulos.

2.5. Substituição de dados de entrada

A primeira melhoria implementada no modelo foi a substituição do conjunto de dados de entrada referente à variável VPD, conjunto este que foi descontinuado por sua fonte, impossibilitando que o modelo assimile dados observados em períodos posteriores ao ano de 2005. A busca por um dataset substituto envolve não apenas critérios de continuidade e disponibilidade do dado, mas também requer que os campos de VPD sejam abrangentes o suficiente para cobrir florestas tropicais além da área de estudo atual, mostrando-se apto para trabalhos futuros que envolvam novas áreas de estudo. Considerando a dimensão amazônica e a baixa densidade de estações de campo pouco distribuídas pela floresta, não foram encontrados dados de campo representativos para a extensão geográfica desejada. A combinação de observações e projeções climáticas é característica dos produtos de reanálise que permite cobrir amplas áreas com representatividade satisfatória, adequando-se assim aos requisitos do estudo. Dentre os produtos de reanálise avaliados (BOSILOVICH; ROBERTSON; CHEN, 2009; DEE et al., 2011; KALNAY et al., 1996), o produto NCEP/NCAR Reanalysis 1 foi selecionado como nova fonte de VPD para representar o estado natural da atmosfera (livre de cenários artificiais). Tal produto foi escolhido por ser um produto oficial disponível e atualizado sistematicamente para períodos muito próximos do presente (defasagem de meses), e por ser um conjunto de dados amplamente referenciado pela literatura. Não foram encontrados produtos

contínuos de reanálise a partir de modelos regionais com foco na Amazônia, como alguns dos modelos climáticos operados pelo CPTEC/INPE.

Foi necessário tratar o novo conjunto de dados para derivar a série de VPD e para que os arquivos de entrada se adequassem a padrões do modelo. O produto NCEP/NCAR Reanalysis 1 contém um amplo conjunto de variáveis climáticas que retratam vários níveis da atmosfera, em grid global, resolução temporal mensal, diária e 4 vezes por dia, de 1948 até o presente. Todas as dimensões do dataset são agrupadas através do formato de arquivo netCDF. Com o auxílio do software Grads (KINTER, 1994) e scripts Python (VAN ROSSUM, 1998) foram selecionadas as variáveis temperatura e umidade relativa do ar e geradas séries temporais no formato GeoTIFF. Em seguida, utilizando o software ArcGIS (ORMSBY et al., 2010), cada arquivo das séries foi recortado para a extensão geográfica da área e reamostrado para a resolução espacial padrão do estudo. Embora a operação de *downscaling* de 2,5 graus para 320 metros ir além da natureza do dado, não é esperada variação abrupta de VPD ao longo da extensão estudada por tratar-se de uma variável climática, dessa forma a representatividade do dado é mantida (STUDLEY; WEBER, 2010). Com auxílio da plataforma Dinamica-EGO, o cálculo de VPD foi realizado segundo as equações 1 e 2, através de álgebra de mapas das séries tratadas de temperatura e umidade relativa do ar (ABTEW; MELESSE, 2013).

Equação 1: Cálculo da pressão de saturação do vapor (kPa) a partir da temperatura (°C). Fonte: (ABTEW; MELESSE, 2013).

$$e_s = 0,611 \times e^{\frac{17,27 \times T}{T+237,3}}$$

Equação 2: Cálculo do déficit de pressão de vapor, VPD (kPa) através da pressão de saturação do vapor e umidade relativa do ar. Fonte: (ABTEW; MELESSE, 2013).

$$VPD = e_s \times \left(1 - \frac{RH}{100}\right)$$

Foi desenvolvido um fluxo de trabalho que reúne softwares, códigos e demais ferramentas para gerar a série temporal de VPD compatível com o FISC a partir do produto de reanálise do NCEP/NCAR. Dessa forma é possível preparar o conjunto de entrada para outros períodos ou áreas de estudo reaplicando o fluxo. O novo dataset de VPD foi comparado ao anterior para identificar as principais diferenças entre os mesmos. Os impactos de tais diferenças à calibração do modelo são tratados nas próximas seções. Detalhes da comparação realizada podem ser encontrados na Seção S3 do material suplementar. A desvantagem mais relevante encontrada para o novo dataset se refere aos anos de seca anômala. Produtos de reanálise comumente suavizam medidas extremas se comparados a dados puramente observados. A Seção 3.1 apresenta como a nova série de VPD foi corrigida para representar adequadamente os anos de seca extrema observados na área estudada (BRANDO et al.,

2014). A disponibilidade oficial, atualização frequente e amplo uso do produto reiteram a escolha do dataset substituto, além de sua abrangência quase global favorecer futuros estudos em novas áreas.

2.6. Calibração

A variável VPD participa dos principais processos simulados pelo modelo, e a substituição de seu respectivo conjunto de dados por um dataset produzido por outra abordagem requer que a calibração do FISC seja reavaliada. Além disso, processos não relacionados diretamente à variação de VPD também foram revistos, equações foram rearranjadas, inconsistências foram corrigidas, e novos processos da dinâmica do fogo inseridos ao modelo. O trabalho de recalibração do FISC foi orientado a expandir a aplicabilidade do modelo temporalmente e espacialmente, alcançar produtos mais realísticos e avaliar a operacionalização de seu uso. A calibração do FISC inicia-se pelo componente de ignição, primeiramente com foco nos coeficientes diretamente relacionados à variável VPD, estendendo-se posteriormente a demais coeficientes. O componente foi calibrado tendo como referência o ano de 2003 por ser o mesmo ano utilizado em trabalhos anteriores, permitindo comparações diretas de desempenho. Em seguida, o componente de espalhamento teve seus processos reavaliados e coeficientes recalibrados. A disponibilidade de dados observados para a área de estudo, em termos de áreas queimadas, envolve apenas observações acumuladas para o ano de 2007, 2010 e parte do ano de 2005. O ano de 2007 foi, então, escolhido para calibração e o ano de 2010 para validação do componente de espalhamento.

Foram definidas curvas-objetivo baseadas em dados observados relativos às variáveis-resposta de cada componente (ignição e espalhamento). Para cada configuração de coeficientes, o desempenho do modelo foi medido a partir da comparação entre curva observada e curva simulada. A calibração modular demonstrou-se útil para lidar com o número de coeficientes presentes no FISC. Análises de sensibilidade e estudos de processos específicos somaram dezenas de simulações durante a calibração, que além de definir a melhor configuração de valores para os coeficientes, foram necessárias para estudar seus efeitos individuais e combinados sobre o modelo, bem como avaliar o sentido ecológico dos mesmos.

2.6.1. Curva objetivo: componente de ignição

O principal produto gerado pelo componente de ignição são mapas de pontos de ignição de fogo simulados sobre a floresta. Vários sistemas de sensoriamento remoto observam focos de calor na superfície terrestre sendo sensíveis a pontos de fogo florestal, embora focos de calor não representem absolutamente ocorrência de fogo e alguns casos de fogo de sub-bosque sejam omitidos por esses sistemas (INPE, 2011a; NEPSTAD; MOREIRA; ALENCAR, 1999). Para definir a curva de focos observados foi utilizado o padrão do programa INPE-Queimadas que define o satélite de referência conforme o período de análise (INPE, 2011a, 2011b; SETZER, 1993). A alteração da referência ocorre pela desativação de satélites mais antigos, ou alterações críticas em seus sensores. Embora

sejam ponderados registros de diferentes satélites, a alteração da referência impacta substancialmente o comportamento da curva objetivo. Os dados foram adquiridos via website do programa em arquivos anuais em formato texto. Em seguida, os registros foram reagrupados por mês e convertidos em uma série temporal de arquivos raster compatíveis com a extensão geográfica, resolução espacial, sistema de projeção e demais padrões do estudo. Por fim cada arquivo da série foi filtrado mantendo apenas focos incidentes em floresta ou em áreas até 4 km distante de floresta. Cada ponto da curva objetivo representa o número de focos observados no mês, em toda área de estudo, sem considerar recorrência de focos na mesma célula raster. A Figura 3 apresenta a curva objetivo de focos de calor observados em floresta definida para calibração do componente de ignição.

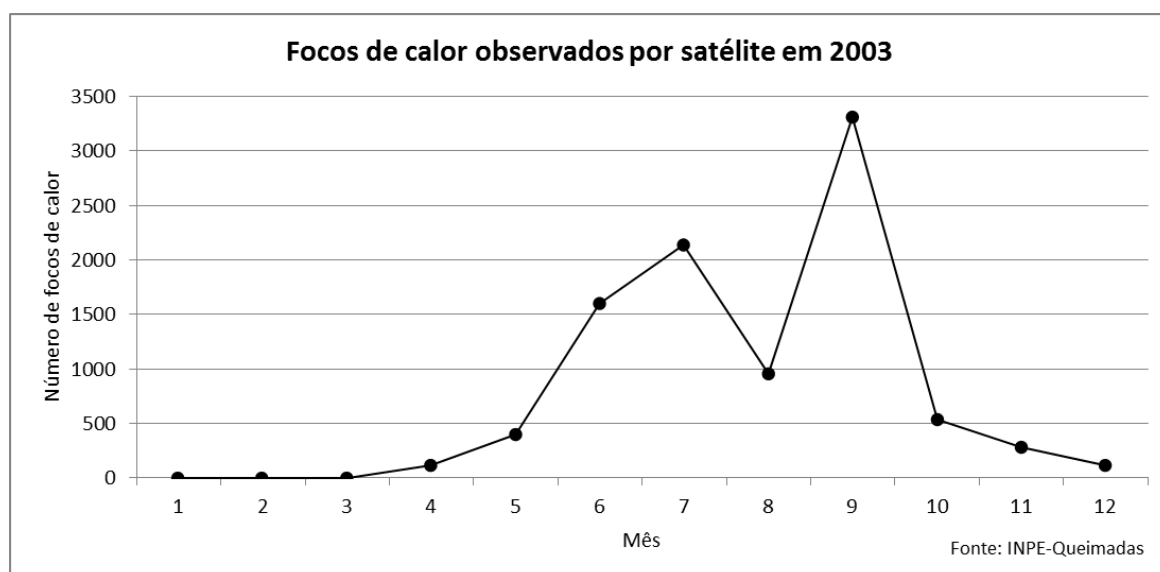


Figura 3: Curva objetivo utilizada na calibração do componente de ignição. Cada ponto da curva representa o número de focos de calor observado no mês para toda área de estudo. Dados de sensoriamento remoto obtidos pelo programa INPE-Queimadas (INPE, 2011a).

2.6.2. Curva objetivo: componente de espalhamento

Correspondem a áreas de floresta queimada, ou cicatrizes de fogo, regiões atingidas pelo fogo incidentes em floresta ou distantes até 4 km da mesma. Ao contrário dos focos de calor observados por satélite, registros de áreas queimadas são de difícil obtenção seja por levantamento em campo, seja via sensoriamento remoto. Algoritmos de processamento digital de imagens (PDI) permitem a extração de cicatrizes de fogo (ALENCAR et al., 2011), porém são pouco precisos em termos de extensão espacial e principalmente sobre a data de cada cicatriz. Dessa forma uma imagem adquirida em determinada data, ao ser processada, resulta em cicatrizes referentes a queimadas ocorridas no mesmo mês de aquisição e em cicatrizes decorrentes de meses anteriores. Já os trabalhos de campo permitem maior precisão temporal e espacial (ALENCAR; NEPSTAD; DIAZ, 2006), porém são muito custosos para cobrir grandes áreas sistematicamente de forma a permitir a observação contínua das queimadas. A baixa disponibilidade de dados observados impede a plotagem de uma curva

contínua de total mensal de áreas queimadas. Para as cabeceiras do rio Xingu, foram utilizados mapas de cicatrizes de fogo observadas por sensoriamento remoto, produzidos pelo IPAM, que consistem em três arquivos raster, e se referem às áreas queimadas acumuladas no ano de 2007, 2010, e até agosto de 2005. Os mapas foram filtrados para contabilizar apenas áreas queimadas em floresta com faixa extra de 4 km. Os mapas mensais de área queimada simulados pelo FISC foram acumulados anualmente para comparação. Da mesma forma como nos algoritmos de PDI, recorrências de fogo são desconsideradas ao gerar o mapa acumulado anual. Os totais anuais de área queimada, observado e simulado, são comparados para medir o desempenho do modelo. A Figura 4 apresenta o gráfico que sintetiza o total em área queimada observada a cada ano na área de estudo.

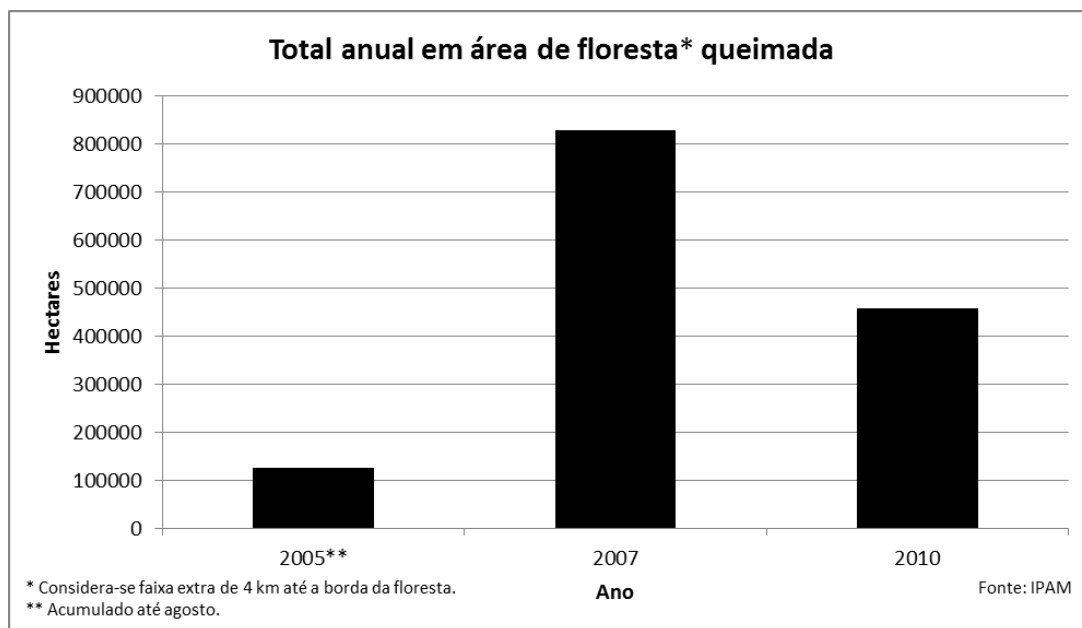


Figura 4: Total anual em área de floresta queimada observado nas cabeceiras do rio Xingu. Dados baseados em produtos de sensoriamento remoto. O ano de 2005 se refere apenas a áreas queimadas acumuladas até o mês de agosto.

2.6.3. Calibração do componente de ignição

O componente de ignição é resultado de trabalhos antecessores que deram base à origem do FISC. Silvestrini et al. (2011) desenvolveram um modelo para simular ocorrência de fogo florestal na Amazônia em resposta a variações de clima e uso da terra. O modelo de ocorrência de fogo foi integrado ao FISC como submodelo, ou seja, transparecendo aos demais componentes apenas dados de entrada, de saída, e parâmetros, mantendo processos internos encapsulados. O uso de submodelos é uma das vantagens da plataforma Dinamica-EGO e permite desenvolver modelos sofisticados com mais organização e eficiência. Técnicas de calibração do componente de ignição podem ser herdadas do modelo antecessor, entretanto adaptações são necessárias principalmente devido a diferenças substanciais de área de estudo e resolução espacial entre os trabalhos. No estudo anterior toda Amazônia foi tratada em resolução espacial de 2 km, já o estudo atual abrange apenas a sub-região

amazônica do alto rio Xingu com resolução espacial de 320 m. O diagrama da Figura 5 ilustra o componente de ignição apresentando seus principais dados de entrada e saída, processos e respectivas equações.

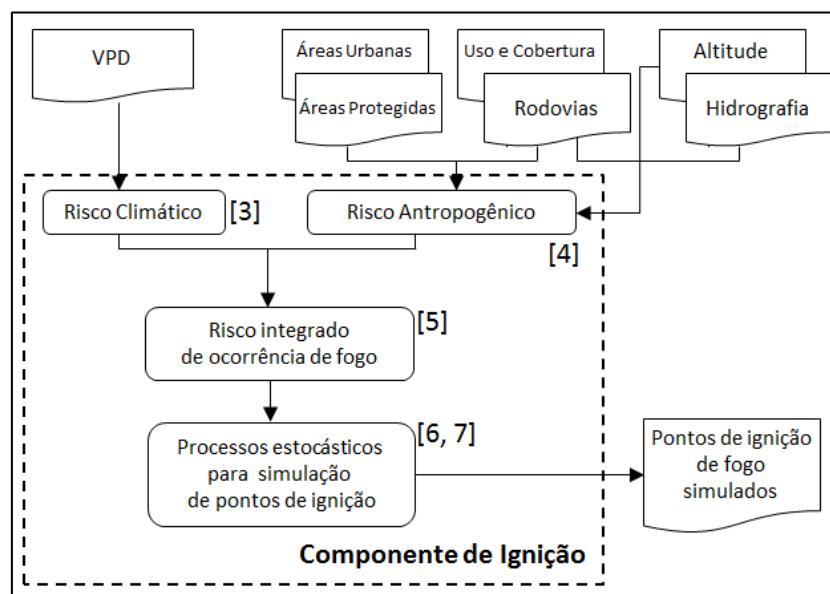


Figura 5: Diagrama geral do componente de ignição, dados de entrada e saída, processos e interações. As equações utilizadas em cada processo são referenciadas numericamente. Fonte: adaptado de (SOARES-FILHO et al., 2012b).

Todos os coeficientes do componente de ignição impactados pela substituição do dataset de VPD foram recalibrados e demais coeficientes foram revistos. O mecanismo de simulação de pontos de ignição de fogo é descrito por Silvestrini (2008), e não teve nenhum de seus processos alterado. A primeira função calibrada foi a regressão logística que traduz o gradiente de VPD em Risco Climático de ocorrência de fogo. Para definir novos valores para os coeficientes β_0 e β_1 da

Equação 3 adotou-se inicialmente a mesma abordagem descrita em Silvestrini et al. (2011), relacionando valores de VPD à variável binária de ocorrência de pontos de ignição, ambas dispostas em raster. Foi estimada uma regressão logística para cada mês, sendo que a expressão final aplicável a todo o ano é a média das regressões mensais. No estudo anterior, tal abordagem mostrou-se adequada para tratar toda extensão amazônica, na qual um único mês apresenta variação climática suficiente para definir sub-regiões secas e úmidas. Como a área de estudo atual, substancialmente menos abrangente, não apresenta variações climáticas abruptas em sua extensão para um mesmo mês, outra abordagem se mostrou mais eficaz para definir risco climático. Assim, o espectro de médias mensais de VPD ao longo do ano foi comparado ao número de focos observados em cada mês. Os coeficientes da regressão logística foram definidos de forma que meses menos secos ($\sim 0,20$ kPa) gerem riscos baixos ($\sim 10\%$), meses secos ($\sim 2,5$ kPa) gerem riscos altos ($\sim 80\%$), e ainda riscos muito altos ($> 80\%$) estejam disponíveis para eventuais meses de seca extrema.

O risco antropogênico de ocorrência de fogo é calculado através da análise de variáveis de uso da terra e presença humana em relação aos focos de calor observados. Para tal, é aplicado o método bayesiano Peso de Evidências, representado pela Equação 4 (BONHAM-CARTER, 1994; SOARES-FILHO; RODRIGUES; COSTA, 2009), atribuindo um peso de atração (positivo) ou repulsão (negativo) à variável resposta para cada categoria das variáveis explanatórias. A única alteração relevante das variáveis antrópicas percebida após a última calibração do FISC foi o uso do fogo como manejo do solo em terras indígenas. Diante disso, foi avaliada a correlação entre o mapa de áreas protegidas e o mapa de cicatrizes de fogo observadas, ao invés do uso de mapas de focos de calor. Dessa forma a ocorrência de fogo em terras indígenas foi melhor representada e o peso da respectiva categoria foi atualizado. Diante da falta de cicatrizes observadas no ano de 2003, foram utilizadas cicatrizes de 2005. O coeficiente α da Equação 5 define a proporção de integração entre risco climático e risco antropogênico. De forma geral o risco antropogênico infere maior viés espacial para os pontos de ignição, e o risco climático é responsável pela sazonalidade e variação e interanual do número de ocorrências simuladas.

O mecanismo de simulação de focos seleciona as probabilidades resultantes do risco integrado de forma estocástica, para isso é utilizada uma função densidade de probabilidade (PDF). Também de forma análoga a Silvestrini et al. (2011), foram estimadas PDFs mensais, em seguida as mesmas foram sintetizadas em 2 PDFs, referentes a meses úmidos e secos. Tal abordagem se adequa a grandes áreas de estudo que, dependendo da sub-região analisada, apresentam períodos de seca de diferentes espectros de VPD e em diferentes meses do ano. A partir dos dados disponíveis para a área de estudo atual não é observada variação abrupta de VPD no espaço, e a sazonalidade é percebida de forma homogênea por toda sua extensão. Sendo assim, a PDF que permitiu o melhor desempenho do FISC aplicado ao Xingu é única para todo o ano, suficientemente distribuída para gerar eventuais pontos de ignição em meses úmidos, com média alta o suficiente para representar meses secos inclusive em anos de seca extrema, e bem definida para manter o viés espacial de áreas mais suscetíveis ao fogo. Para incluir propriedade auto-regressiva ao modelo, o índice de Moran é utilizado para regular a atualização do mapa de probabilidades a cada ponto simulado (BAILEY; GATRELL, 1995). Valores do índice foram mantidos para cada mês, uma vez que o viés espacial representado deriva-se de focos observados no mesmo ano utilizado para a calibração no estudo anterior.

Para selecionar células com pontos de ignição simulados o coeficiente γ flexibiliza as probabilidades sorteadas através da PDF, definindo limiares (inferior e superior) conforme Equação 6. O coeficiente θ por sua vez, controla a quantidade de pontos simulados, e é impactado diretamente pela resolução espacial fixada para o estudo. Quanto mais fina a resolução mais células compõem os mapas de probabilidade, logo mais células são candidatas a pontos de ignição. O coeficiente θ baliza o número de células candidatas e o número de pontos simulados conforme a Equação 7. Esse coeficiente apresenta um valor para cada mês do ano, pois meses mais secos possuem mais células eminentes, ou

seja, células candidatas com alta probabilidade. Os coeficientes α , γ e θ foram estimados através da análise de sensibilidade do modelo. Considerando que cada coeficiente possui efeito aos demais, várias combinações para seus valores resultaram em desempenhos próximos. Assim, foram priorizados arranjos de valores com sentido ecológico, evitando-se degenerações dos processos simulados. O período no qual as simulações foram avaliadas extrapola o ano de calibração para evitar *overfitting*. A Figura 6 apresenta resultados gerados a partir de dezenas de simulações durante a análise de sensibilidade, e a Tabela 3 sintetiza o resultado da calibração do componente de ignição. O desempenho alcançado pelo FISC após calibração encontra-se na Seção 3.

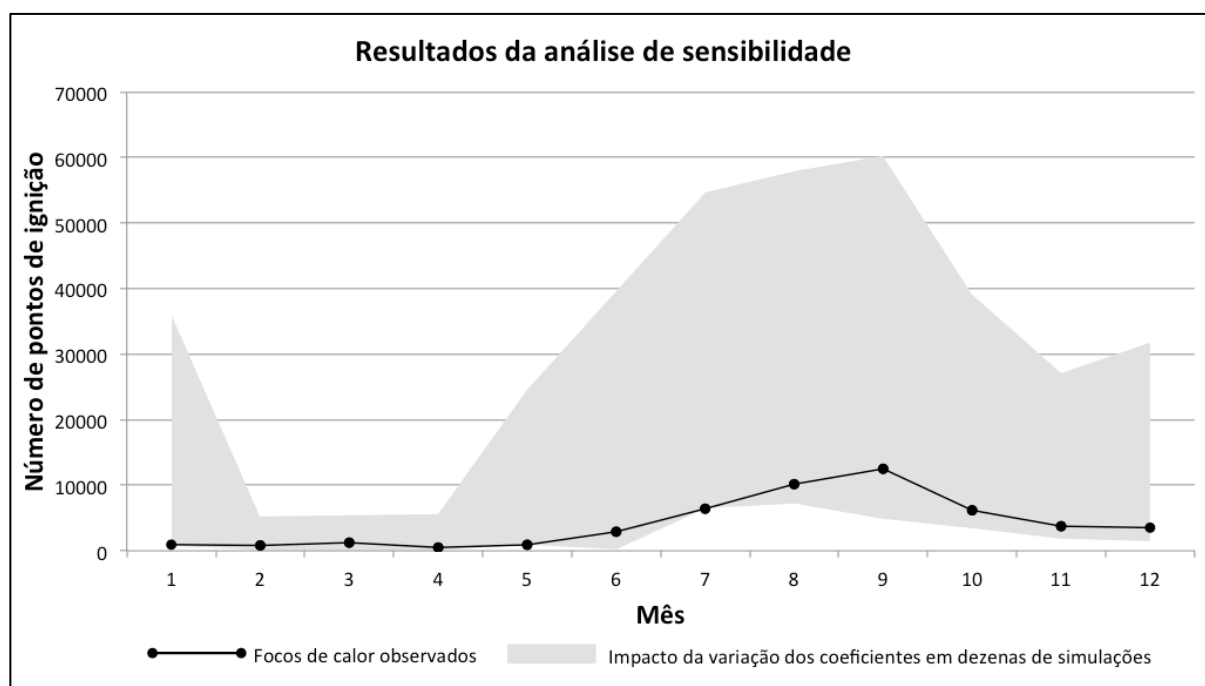


Figura 6: Número de pontos de ignição simulados por mês, resultados da análise de sensibilidade. A área sombreada representa a amplitude de variação dos resultados obtidos mediante alterações sistemáticas nos coeficientes do componente de ignição do FISC.

Tabela 3: Valores atribuídos aos coeficientes do componente de ignição como resultado da calibração.

Equação	Coeficientes	Valores após calibração
Risco Climático de ignição, Equação 3	$\beta_0 ; \beta_1$	-2,5 ; 1,4
Risco antropogênico, Equação 4	Peso de evidência relativo á categoria 'Terra Indígena' da variável 'Áreas protegidas'	-0,789
Integração de riscos, Equação 5	α	0,3
Seleção de células candidatas, Equação 6	PDF ignição	Beta(4,061; 0,475)
Seleção de células candidatas, Equação 6	γ	0,01
Controle de quantidade de pontos de ignição simulados,	θ	01: 0,940 02: 0,955

Equação 7		03: 0,955 04: 0,955 05: 0,930 06: 0,950 07: 0,960 08: 0,970 09: 0,945 10: 0,950 11: 0,940 12: 0,955
Índice de auto-regressão	Moran	01: 0,1396 02: 0,3048 03: 0,2208 04: 0,2145 05: 0,2938 06: 0,3865 07: 0,3921 08: 0,3163 09: 0,2825 10: 0,2458 11: 0,1785 12: 0,2288

Equação 3: Regressão logística do risco climático de ocorrência de fogo (Pcl). O par ordenado (x,y) se refere a linha e coluna da célula raster, o índice i se refere ao mês e j ao ano em análise. Os coeficientes β_0 e β_1 foram recalibrados para o novo dataset de VPD. Fonte: (SILVESTRINI et al., 2011).

$$Pcl_{(x,y),i,j} = \frac{e^{\beta_{0i} + \beta_{1i} VPD_{(x,y),i,j}}}{1 + e^{\beta_{0i} + \beta_{1i} VPD_{(x,y),i,j}}}$$

Equação 4: Expressão do método Pesos de Evidência utilizada para o cálculo do risco antropogênico de ocorrência de fogo. As variáveis independentes são representadas por B_k , o par ordenado (x,y) se refere a linha e coluna da célula raster, o índice k' referencia cada categoria da variável k. Fonte: adaptado de (SILVESTRINI et al., 2011).

$$P(\text{HotPixel} | B_1 \cap B_2 \cap B_3 \cap \dots B_k)_{(x,y)} = \frac{e^{\sum W_{k'}^+}}{1 + e^{\sum W_{k'}^+}}$$

Equação 5: Integração dos riscos climático (Pcl) e antropogênico (Pbiop) de ocorrência de fogo. O modelo permite atribuir um valor de α para cada mês do ano, representado pelo índice i. O par ordenado (x,y) se refere a linha e coluna da célula raster, e o índice j ao ano em análise. Fonte: (SILVESTRINI et al., 2011).

$$P_{(x,y),i,j} = \alpha_i Pbiop_{(x,y),j} + (1 - \alpha_i) Pcl_{(x,y),i,j}$$

Equação 6: Sorteio de pontos de ignição. A probabilidade sorteada com auxílio de uma PDF (ρ) é flexibilizada pelo coeficiente γ , definindo limiares probabilísticos para simulação de ocorrência de fogo. O par ordenado (x,y) se refere a linha e coluna da célula raster, e os índices i, j a mês e ano em análise. Fonte: (SILVESTRINI et al., 2011).

$$(\rho_{(x,y),i,j} - \gamma_i) < P_{(x,y),i,j} < (\rho_{(x,y),i,j} + \gamma_i)$$

Equação 7: Controle do número de pontos de ignição simulados (Ig). Para cada ponto simulado é sorteado um número aleatório com distribuição uniforme, se o numero sorteado for maior que θ então é confirmada a ignição; caso contrário o ponto simulado é anulado. O par ordenado (x,y) se refere a linha e coluna da célula raster, e os índices i, j a mês e ano em análise.

$$Ig(x,y)_{i,j} = \text{se } r\text{Uniform}(0,1) > \theta_i \text{ então } 1, \text{senão } 0$$

2.6.4. Calibração do componente de espalhamento

A criação do FISC é marcada pela combinação do componente de ocorrência de fogo aos componentes de espalhamento e de gestão do ciclo do carbono. Soares-Filho et al. (2012b) descrevem o desenvolvimento do mecanismo de espalhamento, bem como interações com o componente de carbono. Os autores também tiveram como área de estudo as cabeceiras do rio Xingu, tratada na mesma resolução que o presente trabalho. Assim, a recalibração do FISC diante do novo dataset de VPD aproveita abordagens e valores de coeficientes definidos no estudo anterior. A seguir além da revisão da calibração do modelo, são apresentadas melhorias realizadas em processos já existentes, e a inclusão de novos processos ao componente de espalhamento do FISC. A Figura 7 ilustra dados de entrada, saída, processos e respectivas equações do componente.

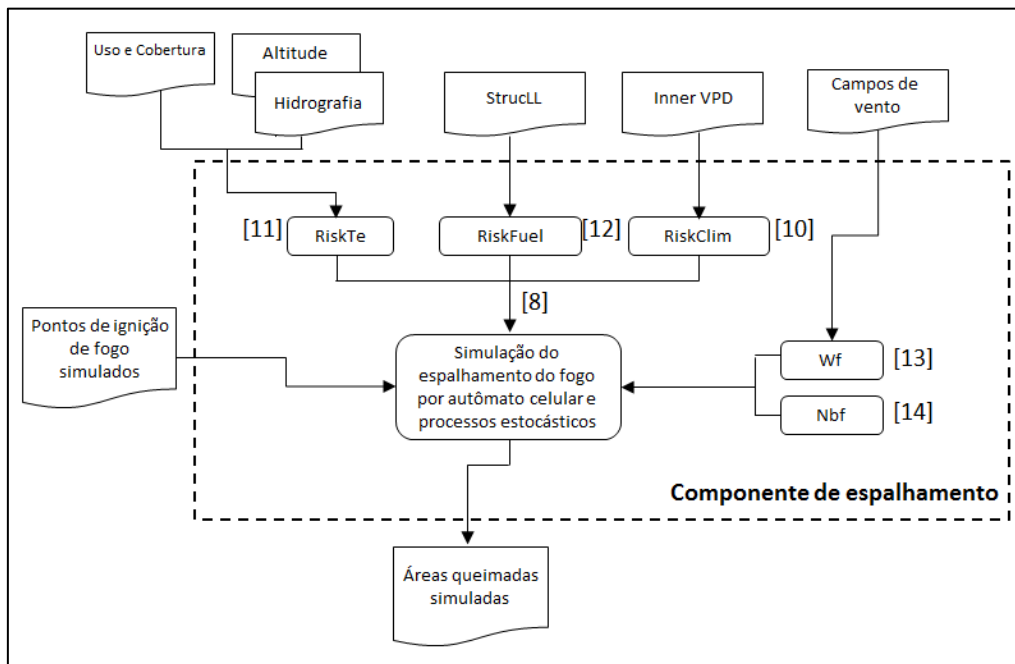


Figura 7: Diagrama geral do componente de espalhamento, dados de entrada e saída, processos e interações. As equações utilizadas em cada processo são referenciadas numericamente. Fonte: adaptado de (SOARES-FILHO et al., 2012b).

A expressão que define o risco de espalhamento do fogo para cada porção da área de estudo (P_{burn}) é definida pela Equação 8. O mapa de probabilidades P_{burn} combina risco climático (RiskClim), risco por condições de terreno (RiskTe) e risco por disponibilidade de combustível (RiskFuel), e mais dois fatores que também impactam a dinâmica do fogo: influência do vento (Wf) e efeito de vizinhança

das frentes de fogo (Nbf). O risco climático, diferentemente do componente de ignição, se estabelece em função do gradiente de déficit de pressão de vapor interno, ou seja, ao microclima de sub-bosque (InnerVPD). O cálculo do InnerVPD é realizado em tempo de execução pelo modelo integrado CARLUC, componente de carbono do FISC, conforme Equação 9. Com o intuito de se aproximar da abordagem adotada em Soares-Filho et al. (2012b), mapas de cicatrizes de fogo observadas foram utilizados para definir a variável resposta da regressão logística expressa pela Equação 10. Células pertencentes às cicatrizes representam ocorrência e as demais ausência de fogo, em função dos campos de InnerVPD. Porém, não foi possível definir curva logística razoável a partir do conjunto de dados de cicatrizes observadas em 2005. A razão da não correlação são as diferentes datas de cicatrizes agrupadas em um único arquivo raster de áreas queimadas acumuladas até agosto de 2005. Assim não é possível relacionar a variação de InnerVPD referente a cada cicatriz observada. Por essa razão optou-se por utilizar uma regressão logística bem definida em torno do limiar de InnerVPD para o espalhamento do fogo extraído de medidas em campo durante queimadas na área de estudo (SOARES-FILHO et al., 2012b).

Características do terreno como cobertura do solo, relevo e obstáculos ao fogo, também são consideradas para compor o risco de espalhamento. Tais feições são combinadas ao mapa de distância a focos de calor observados gerando um mapa de custo de deslocamento. O RiskTe é estimado aplicando-se o método dos pesos de evidência ao mapa de custo calculado, segundo Equação 11. Uma vez mantidos as propriedades de terreno e o ano de calibração, os coeficientes referentes ao RiskTe não sofreram alteração. A disponibilidade de combustível na floresta também é relevante à propensão de espalhamento do fogo, principalmente no que tange a carga mínima de combustível necessária ao processo. A função que define o RiskFuel diante dos estoques de carbono providos pelo CARLUC é expressa pela Equação 12, e foi mantida conforme Soares-Filho et al. (2012b) diante da ausência de novas evidências para inferir melhorias.

Além dos riscos mencionados, a propensão de espalhamento também sofre influência da direção e intensidade do vento sobre as frentes de fogo. Durante a simulação do movimento do fogo, as células de áreas queimadas se diferem de células que ainda apresentam fogo, e representam as frentes de fogo. Assim células candidatas à queima têm suas probabilidades atualizadas conforme condições de vento a favor ou contra a direção definida por cada célula com fogo em relação a todas vizinhas imediatas (vizinhança D8). Os valores assumidos pelo coeficiente τ_{wd} na Equação 13 variam para cada uma das 8 possíveis direções de vento. O segundo fator considerado durante simulação de propagação, fator de vizinhança, tem relação à estrutura das frentes de fogo. A vizinhança D8 de cada célula candidata à queima é avaliada a fim de contabilizar o número de células vizinhas com fogo. O fator de vizinhança atualiza a probabilidade das células candidatas conforme define a Equação 14. Enfim o mapa final de probabilidades referente à combinação e riscos e fatores de espalhamento do fogo é apreciado com a seleção estocástica de novas células de ocorrência, simulando o deslocamento

do fogo. A PDF utilizada para o sorteio foi definida a partir dos valores de probabilidades mais frequentes em cicatrizes de fogo observadas. Os valores atribuídos aos coeficientes τ_{wd} e z , e a função densidade de probabilidade foram mantidos conforme Soares-Filho et al. (2012b). A Tabela 4 sintetiza os coeficientes calibrados para o componente de espalhamento do FISC.

Tabela 4: Valores atribuídos aos coeficientes do componente de espalhamento como resultado da calibração.

Equação	Coeficientes	Valores resultantes da calibração
Risco geral de espalhamento do fogo, Equação 8	$\beta_1; \beta_2; \beta_3; \mu_1; \mu_2$	1 ; 0,95 ; 1 ; 1 ; 1
Risco climático de espalhamento, Equação 10	$\beta_0; \beta_1$	-8,79 ; 6,765
Risco de terreno, Equação 11	Pesos de evidência	0-3: 1,06 3-12: 0,73 12-15: 0,33 15-30: 0,1 30-57: -0,07 57-60: -0,34 60-66: -0,72 66-69: -1,44 69-105: -1,73 105-108: -1,87 108-111: -1,93 111-114: -2,11 114-129: -2,08 129-132: -2,08 132-258: -2,76
Risco por disponibilidade de combustível, Equação 12	$\beta_0; \beta_1$	-13,05; 64,52
Fator de vento, Equação 13	τ_{wd}	Dir 1: 0.8, 0.8, 1, 1, 1.1, 1, 1, 0.8 Dir 2: 0.8, 0.8, 0.8, 1, 1.05, 1.05, 1.05, 1 Dir 3: 1, 0.8, 0.8, 0.8, 1, 1, 1.05, 1 Dir 4: 1.1, 1, 0.8, 0.8, 0.8, 1, 1.1, 1.1 Dir 5: 1.1, 1, 1, 0.8, 0.8, 0.8, 1, 1 Dir 6: 1.05, 1.05, 1.05, 1, 0.8, 0.8, 0.8, 1 Dir 7: 1, 1, 1.05, 1, 1, 0.8, 0.8, 0.8 Dir 8: 0.8, 1, 1.05, 1.05, 1.05, 1, 0.8, 0.8
	c	0,06
Fator de vizinhança, Equação 14	z	0,05
Limiar estocástico para o sorteio de pontos de ignição	ρ	0,75
Seleção de células de ocorrência	PDF espalhamento	Beta(2,97; 1) truncada em 0,3

Equação 8: Equação do risco geral de espalhamento de fogo (Pburn). São combinados os riscos climático (RiskClim), de terreno (RiskTe), por disponibilidade de combustível (RiskFuel); e os fatores de vento (Wf) e vizinhança (Nbf). O par ordenado (x,y) se refere a linha e coluna da célula raster. Os índices i e j se referem a mês e ano em análise. O índice t se refere à iteração do processo de espalhamento do fogo.

$$Pburn_{(x,y)i,j,t} = (\text{Min}(\text{RiskClim}_{(x,y)i,j} + (1 - \beta_1), 1)) * (\text{Min}(\text{RiskTe}_{(x,y)i,j} + (1 - \beta_2), 1)) * (\text{Min}(\text{RiskFuel}_{(x,y)i,j} + (1 - \beta_3), 1)) * [\mu_1 * Wf_{(x,y)i,j,t} * \mu_2 * Nbf_{(x,y)i,j,t}]$$

Equação 9: Cálculo do déficit de pressão de vapor sob dossel (InnerVPD). As variáveis cstem e cleaf se referem a estoques de carbono geridos pelo CARLUC que representam troncos e folhas, respectivamente. Fonte: IPAM.

$$\text{InnerVPD} = 0,140494 - 0,006 * cstem * 10 - 0,594074 * \sqrt{cleaf * 10} + 0,5 + 1,505 * \sqrt{\text{VPD} + 0,5}$$

Equação 10: Cálculo do risco climático de espalhamento do fogo. O par ordenado (x,y) se refere a linha e coluna da célula raster, e os índices i e j se referem a mês e ano em análise. Fonte: adaptado de (SOARES-FILHO et al., 2012b).

$$\text{RiskClim}_{(x,y)i,j} = \frac{e^{-8,79+6,765*\text{innerVPD}_{(x,y)i,j}}}{1 + e^{-8,79+6,765*\text{innerVPD}_{(x,y)i,j}}}$$

Equação 11: Cálculo do risco de terreno para espalhamento do fogo. O par ordenado (x,y) se refere a linha e coluna da célula raster, e os índices i e j se referem a mês e ano em análise. Os pesos de evidência W_{te} são relativos a cada categoria de esforço de terreno necessário para deslocamento do fogo. Fonte: adaptado de (SOARES-FILHO et al., 2012b).

$$\text{RiskTe}_{(x,y)i,j} = \frac{e^{\sum W_{te}^+}}{1 + e^{\sum W_{te}^+}}$$

Equação 12: Cálculo do risco por disponibilidade de combustível para o espalhamento do fogo. O par ordenado (x,y) se refere a linha e coluna da célula raster, e os índices i e j se referem a mês e ano em análise. A variável strucLL representa o estoque de carbono estrutural em folhas de serrapilheira. Fonte: adaptado de (SOARES-FILHO et al., 2012b).

$$\text{RiskFuel}_{(x,y)i,j} = \frac{e^{-13,05+64,52*\text{strucLL}_{(x,y)i,j}}}{1 + e^{-13,05+64,52*\text{strucLL}_{(x,y)i,j}}}$$

Equação 13: Cálculo do fator de vento que compõe o risco final de espalhamento do fogo. O fator dependente da direção do vento é representado por τ_{wd} , e a intensidade do vento por W_i . O par ordenado (x,y) se refere a linha e coluna da célula raster, os índices i e j se referem a mês e ano em análise, e t se refere ao timestep corrente. Fonte: adaptado de (SOARES-FILHO et al., 2012b).

$$Wf_{(x,y)i,j,t} = \tau_{wd}_{(x,y)i,j,t} * e^{0,06*W_i}_{(x,y)i,j,t}$$

Equação 14: Cálculo do fator de vizinhança que compõem o risco final de espalhamento do fogo. A variável n registra o número de vizinhos com fogo e o coeficiente z pondera o impacto de cada vizinho ao contágio do fogo. O par ordenado (x,y) se refere a linha e coluna da célula raster, os índices i e j se referem a mês e ano em análise, e t se refere ao timestep corrente.

$$\begin{aligned} &\text{Se } n = 0 \text{ então} \\ &\quad Nbf_{(x,y)i,j,t} = 0 \\ &\text{senão} \\ &\quad Nbf_{(x,y)i,j,t} = n_{(x,y)i,j,t} * z + 1 \end{aligned}$$

2.6.5. Melhorias para processos modelados

2.6.5.1. Solução de inconsistências

Embora alguns coeficientes tenham sido mantidos conforme calibração de estudos anteriores, outros processos foram aprimorados durante a revisão do componente de espalhamento, como é o caso do efeito de vento. Assim como ilustra a Figura 8, durante a análise de cada célula do mapa de probabilidades de espalhamento, caso uma ou mais células vizinhas apresente fogo, a probabilidade da célula em análise é atualizada. A célula em análise pode apresentar uma das oito direções discretizadas de vento. Conforme a direção apresentada é referenciada uma tabela que define um fator de atualização para cada posição da vizinhança D8. Assim a probabilidade de espalhamento é atualizada conforme a condição de vento observada na célula de análise e a posição do vizinho em queima. Na versão anterior do FISC, algumas direções de vento não eram avaliadas pelo autômato celular, pequenas inconsistências de referência às posições de vizinhança também foram corrigidas. A partir da nova implementação foi possível melhor representação do efeito de vento sobre as frentes de fogo.

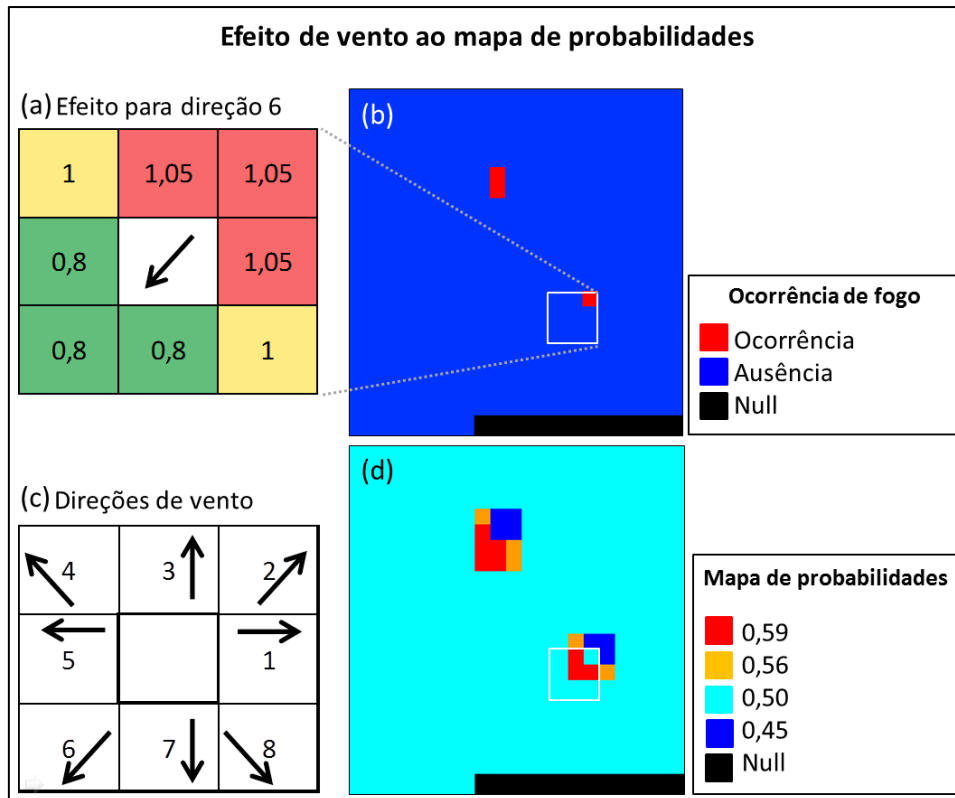


Figura 8: Avaliação da vizinhança de células com fogo para definição do fator de vento sobre o espalhamento (Wf). (a) Pesos de Wf conforme vento de direção 6; (b) Ocorrência de focos simulados; (c) Índice de direções conforme vizinhança D8; (d) Mapa de probabilidades após efeito do fator de vento.

Da mesma forma, o efeito da estrutura espacial das frentes de fogo, representada pelo fator de vizinhança, também foi revisado. A expressão utilizada para atualizar a probabilidade de cada célula da área de estudo mediante o número de células em queima presentes em sua vizinhança considerava o risco de espalhamento em porções não adjacentes às frentes de fogo. Uma nova expressão foi definida para corrigir o efeito de vizinhança anulando o risco de espalhamento em células candidatas sem contato com células em queima. A Seção S4 do material suplementar compara os efeitos de Wf e Nbf antes e depois das melhorias implementadas.

2.6.5.2. Flexibilização do modelo

A versão anterior do FISC combina os riscos integrantes de Pburn, e demais fatores, de forma direta e sem ponderação. A vantagem de se usar um coeficiente que regule tal integração foi evidenciada durante o estudo do coeficiente α , relativo ao componente de ignição. Com esse intuito, foram testadas novas expressões para ponderar a combinação entre RiskClim, RiskTe e RiskFuel, de forma a permitir ao modelo maior flexibilidade para representar condições de espalhamento do fogo. É importante que a calibração do FISC esteja apta a variar, de forma eficiente, intensidade, sazonalidade, e viés espacial das queimadas. Tais propriedades se relacionam de forma direta, respectivamente, ao risco por disponibilidade de combustível, risco climático e risco de terreno. Não obstante, a nova expressão deve considerar a relação intrínseca entre a magnitude de Pburn e a PDF

de espalhamento; assim como deve respeitar também os limiares inferiores de cada um de seus riscos integrantes. Caso algum dos riscos integrantes represente condições insuficientes para a evolução do fogo, os demais riscos não podem compensá-lo mesmo apresentando valores muito altos, de forma a garantir que a simulação respeite as condições mínimas observadas para cada critério.

A Equação 8 apresenta a nova expressão definida para a combinação do risco geral de espalhamento. Os coeficientes β ponderam o efeito de cada risco integrante, e os coeficientes μ ponderam a ação dos efeitos de vento e vizinhança. A calibração desses coeficientes foi conduzida de forma que RiskClim igual a 50% corresponda a 1,3 kPa de InnerVPD; RiskFuel igual a 50% corresponda a 0,2 kg/m² de carbono disponível em liteira fina; e RiskTe menor que 45% restrinja a propagação do fogo. Os dois primeiros limiares são baseados em observações de campo (RAY; NEPSTAD; MOUTINHO, 2005; SOARES-FILHO et al., 2012b) e o último foi otimizado por representar um agrupamento de variáveis de superfície. Os coeficientes de ponderação de riscos e fatores aproximam-se de valores inteiros (vide Tabela 4) pelo fato do FISC ter sido criado já utilizando como área de estudo a região do alto rio Xingu. Os coeficientes de integração do risco de espalhamento podem ser variados conforme a dinâmica de fogo apresentada por novas áreas de estudo.

2.6.5.3. Padrão espacial simulado

A qualidade dos padrões espaciais simulados pelo FISC varia entre os mapas produzidos pelo modelo. Tais diferenças refletem o grau de complexidade e disponibilidade de dados observados para os diferentes processos modelados. Os mapas de áreas queimadas simuladas por versões anteriores do FISC apresentam padrão espacial distante das cicatrizes observadas na região do Xingu. Para avançar o modelo nesse quesito foi inserido um novo processo ao componente de espalhamento que distingue os pontos de ignição simulados em relação à evolução do fogo. Ou seja, dentre todos os pontos de ignição simulados apenas alguns evoluem para queimadas. Comportamento também observado para o sistema natural do fogo em florestas.

A seleção dos pontos de ignição que darão início ao processo de espalhamento utiliza dois critérios: adequabilidade ambiental ao fogo e sorteio estocástico. Mais uma vez o modelo utiliza um autômato celular para avaliar o risco de espalhamento na vizinhança de cada ponto simulado. A média das probabilidades P_{burn} apresentadas pelas células vizinhas deve ser maior que 50% de adequabilidade ambiental ao fogo. Assim pontos de ignição com vizinhança pouco adequada são desconsiderados para a evolução de frentes de fogo. Os pontos com entorno adequado são novamente avaliados, dessa vez comparando um limiar fixo a um valor aleatório sorteado conforme distribuição uniforme. Apenas pontos de ignição que superam o limiar de adequabilidade ambiental e o limiar estocástico são selecionados para dar origem ao espalhamento do fogo. O limiar estocástico foi definido por heurística, porém estudos realizados entre focos de calor e cicatrizes de fogo observadas confirmam o valor otimizado, conforme descreve a Seção S5 do material suplementar. A Figura 9 ilustra a seleção

dos pontos de ignição, perante os dois quesitos. O novo processo incorporado ao componente de espalhamento apresentou melhoria significativa aos mapas de cicatrizes simuladas, conforme resultados apresentados nas próximas seções.

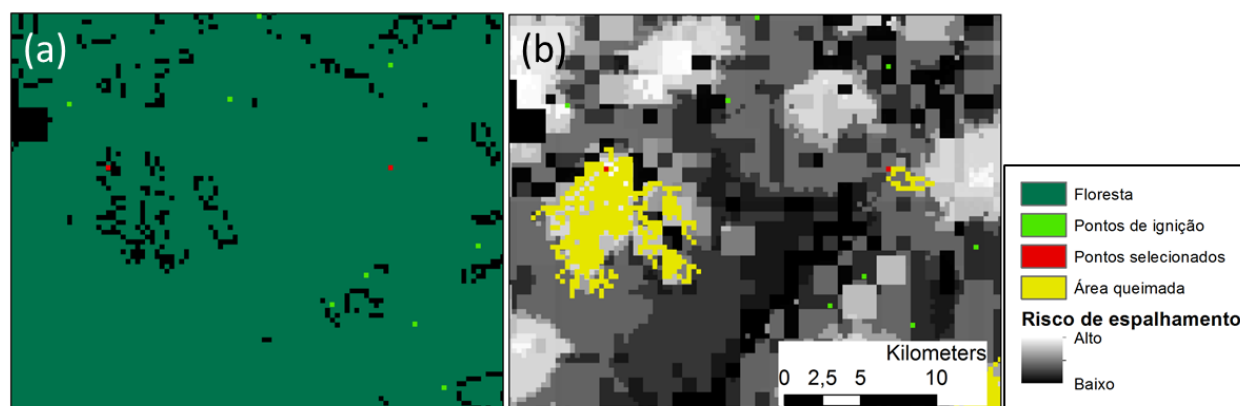


Figura 9: Seleção de pontos de ignição em sub-região da área de estudo. (a) Pontos de ignição selecionados entre demais candidatos; (b) Pontos de ignição sobrepostos ao risco geral de espalhamento do fogo.

3. Resultados

3.1. Ignição

Os principais produtos do FISC se referem à distribuição de pontos de ignição e áreas queimadas simuladas para a área de estudo. O componente de ignição fornece um raster binário por mês que representa a ocorrência de pontos de fogo na floresta. Diversos produtos de sensoriamento remoto registram focos de calor na superfície terrestre, o que permite analisar o desempenho do modelo a partir da comparação entre mapas simulados e observados. Os dados observados são adquiridos e tratados conforme descrito na Seção 2.6.1. Dessa forma, o número de pontos de ignição simulados é definido como a primeira métrica de performance do FISC. A Figura 10 apresenta os primeiros resultados obtidos para a métrica após calibração do FISC para o novo conjunto de dados de VPD.

Dentre os anos analisados, é possível que a simulação apresente pior ajuste para o ano de 2007, subestimando as áreas queimadas. Para estudar as causas da subestimação foram avaliadas distribuições de VPD tanto referente ao produto de reanálise adotado como nova base climática, quanto ao registro por estação de campo interna à área de estudo. A forte seca observada sobre as cabeceiras do rio Xingu no ano de 2007 (BRANDO et al., 2014) é representada apenas pelos registros de estação de campo. A característica de suavizar extremos foi apontada como um dos principais pontos contra o uso de produtos de reanálise durante o estudo dos possíveis substitutos datasets de VPD. Nesse sentido, o novo dataset foi corrigido de forma a representar coerentemente as secas extremas ocorridas na região, conforme descreve a Seção S6 do material suplementar. A correção se baseia em dados de estação de campo, e é aplicada proporcionalmente respeitando a diferença entre a

natureza das duas abordagens. A simulação executada após a correção mantém exatamente a calibração descrita. A Figura 11 apresenta o resultado alcançado pelo FISC uma vez que as fortes secas observadas no Xingu são representadas pela variável climática do modelo.

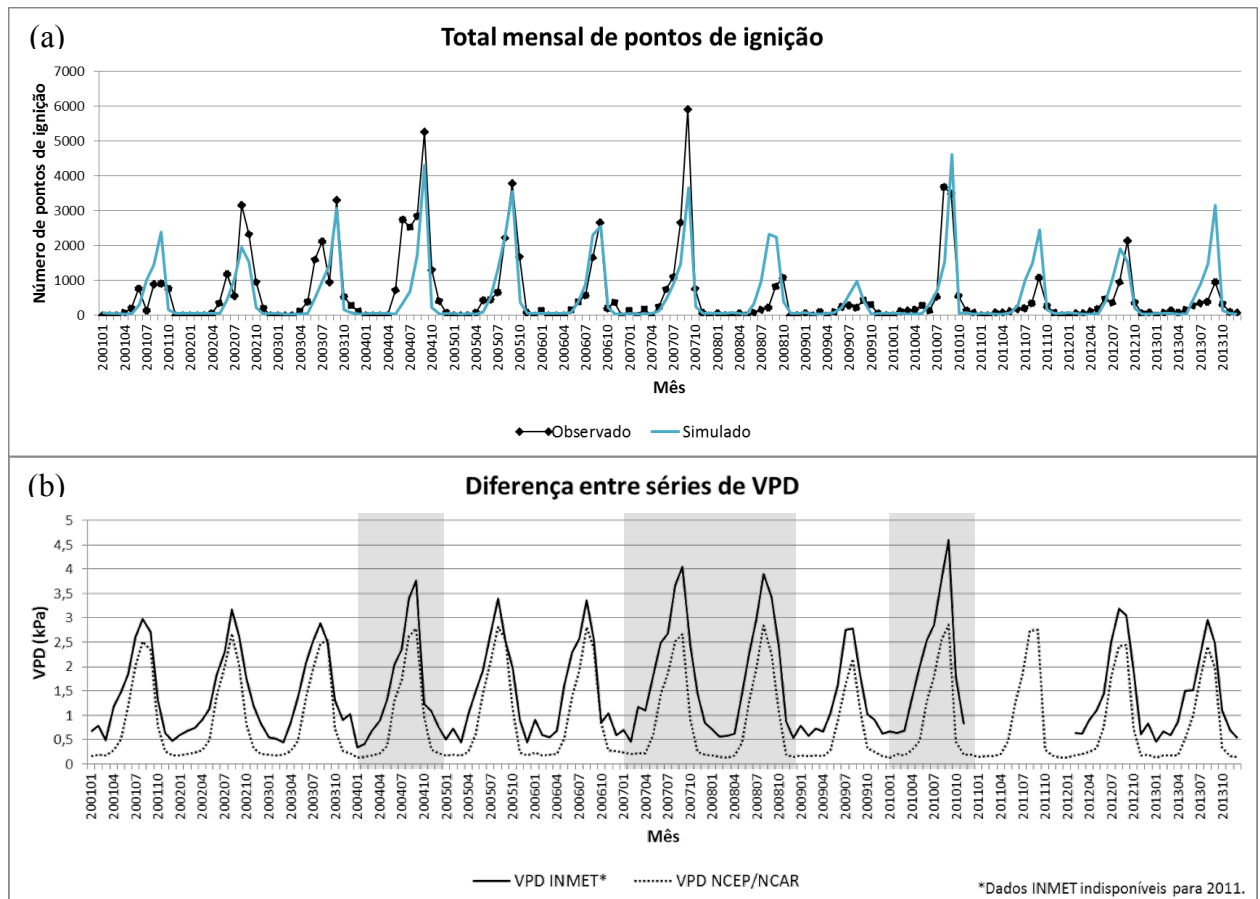


Figura 10: Resultados preliminares do componente de ignição. (a) Ocorrência mensal de fogo florestal, observada por sensoriamento remoto e simulada pelo FISC antes da correção de VPD. (b) Variação de VPD conforme nova base climática e estação de campo (OMM 83270). Destacam-se os anos que apresentam maior discordância entre as curvas de VPD, mensuradas por diferentes abordagens.

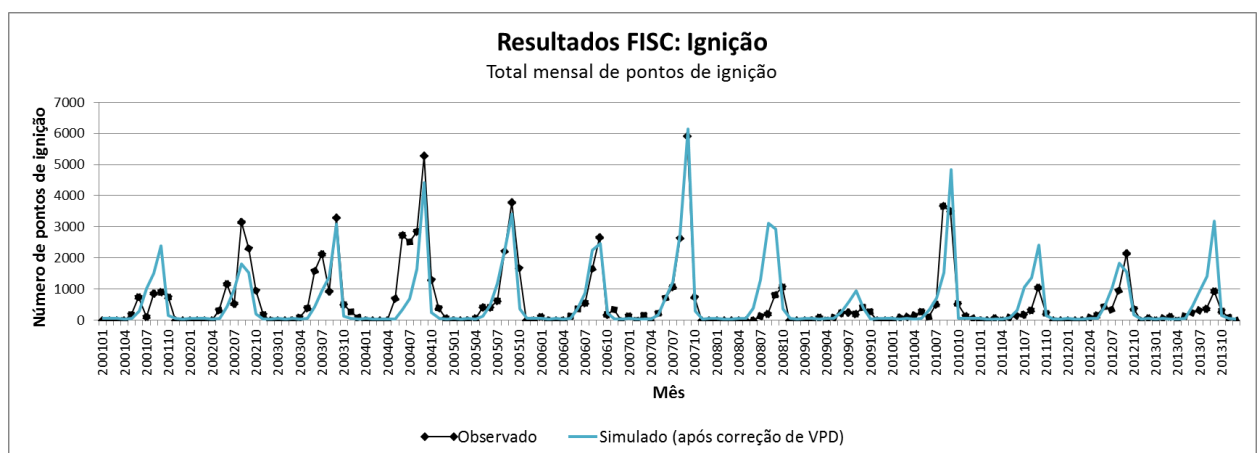


Figura 11: Resultado do componente de ignição após correção de VPD. As curvas representam ocorrência de fogo observada por sensoriamento remoto e simulada pelo FISC.

3.2. Espalhamento

Outro importante produto do FISC são mapas de floresta queimada, que são fornecidos pelo componente de espalhamento, mas também dependem da interação entre os demais componentes do modelo. As áreas queimadas são representadas por rasters binários mensais nos quais cada cicatriz é resultado do espalhamento de um ou mais pontos de ignição. Como mencionado na Seção 2.6.2, o registro de áreas de floresta queimada é de difícil obtenção tanto em métodos de levantamento em campo quanto em técnicas de sensoriamento remoto, o que explica a baixa disponibilidade de observações de áreas queimadas. Os dados disponíveis para a área de estudo se referem a mapas anuais de áreas queimadas acumuladas para 2007 e 2010, e para o ano de 2005 são acumuladas cicatrizes ocorridas até o mês de agosto. As áreas queimadas observadas foram obtidas através de imagens de satélites e não consideram recorrência de fogo. O total de área queimada ao ano foi definido como outra métrica de performance do modelo, sendo que 2007 soma 828.504,06 ha observados frente a 817.072,10 ha simulados, e 2010 soma 456.485,21 ha observados frente a 344.022,27 ha simulados. A Figura 12 apresenta o resultado obtido para a métrica de espalhamento após a calibração do FISC. Os mapas mensais de cicatrizes simuladas foram acumulados anualmente sem considerar recorrência de fogo, a fim de tornar o produto comparável às observações.

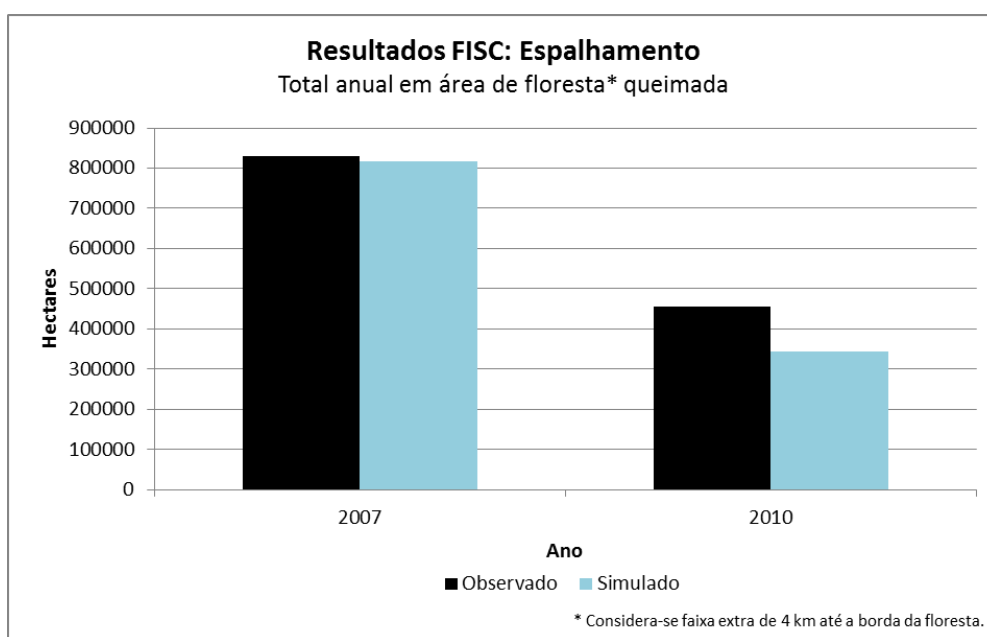


Figura 12: Total de área queimada acumulada por ano, mensurado via observação por sensoriamento remoto e simulado pelo FISC.

Um importante resultado deste trabalho é a representatividade agregada aos mapas de cicatrizes simuladas. A inclusão de novos processos e calibração do componente de espalhamento permitiu avançar a qualidade das cicatrizes simuladas, que já apresentavam boa representação de magnitude e viés geográfico, e agora alcançam padrão espacial substancialmente mais realístico. Tais mapas são

utilizados para o cálculo do total de áreas queimadas, e quando combinados a mapas de estoque de carbono servem de base para estimar emissões relativas a fogo florestal. A complexidade da dinâmica do fogo somada à falta de registros de cicatrizes precisos espacial e temporalmente limitam a reprodução do padrão do fenômeno e, até então, restringiam análises com métricas de paisagem. Apesar da localização das áreas afetadas pelo fogo ainda ser passível de melhorias significativas, notam-se claramente os avanços obtidos no padrão espacial das cicatrizes simuladas. A Figura 13 ilustra os mapas de cicatrizes de fogo, observadas e simuladas.

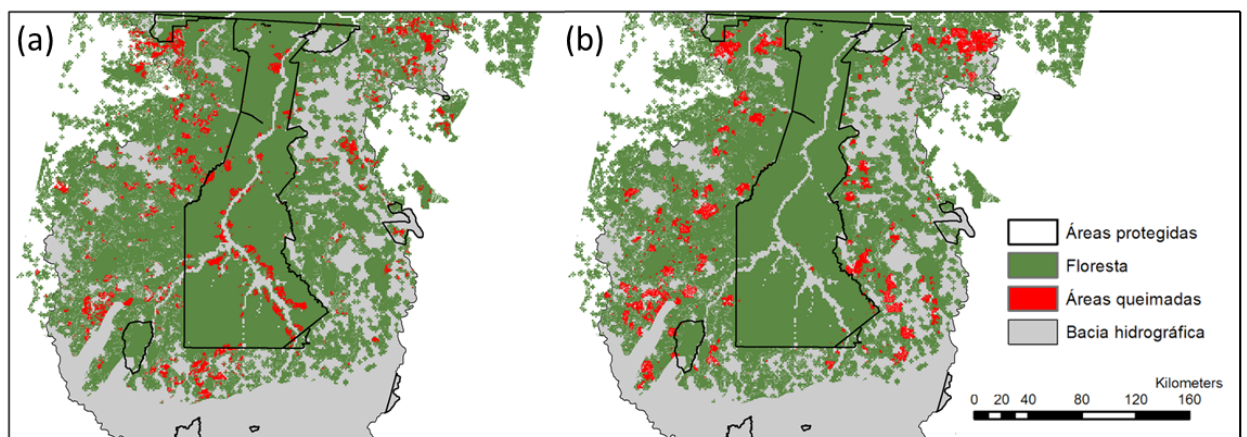


Figura 13: Mapas de áreas queimadas: (a) áreas queimadas acumuladas para o ano de 2007 por observação via sensoriamento remoto; (b) áreas queimadas acumuladas para o ano de 2007 simuladas pelo FISC.

O desempenho do FISC pode ser avaliado em termos de diversas outras métricas relacionadas à dinâmica do fogo florestal. Emissões de carbono por fogo em florestas, mortalidade de árvores decorrente de eventos de fogo, métricas de paisagem para degradação florestal atrelada ao fogo, índices de susceptibilidade ao fogo perante o uso da terra, índices de intensidade e permanência dos regimes de fogo em consequência a alterações nos períodos de seca, são exemplos de métricas que estão fora do escopo deste trabalho, porém foram avaliadas em trabalhos anteriores, são consideradas em trabalhos paralelos e ainda podem ser estudadas em trabalhos futuros.

A Figura 14 apresenta cicatrizes de fogo simuladas pelo FISC, acumuladas para cada ano entre 2002 a 2013. Cada imagem resulta da sobreposição dos mapas simulados mensalmente. O gráfico à esquerda representa o total de área queimada por ano considerando recorrência, ou seja, áreas que sofreram queimadas em mais de um mês foram contabilizadas mais de uma vez. A recorrência de fogo apresentada a cada ano pode ser observada no gráfico à direita. O ultimo gráfico, ao centro, mostra a variação do VPD no período, onde cada ponto da curva representa o VPD no mês mais seco do ano, e o desvio padrão de seu gradiente sobre a área de estudo é indicado por barras verticais.

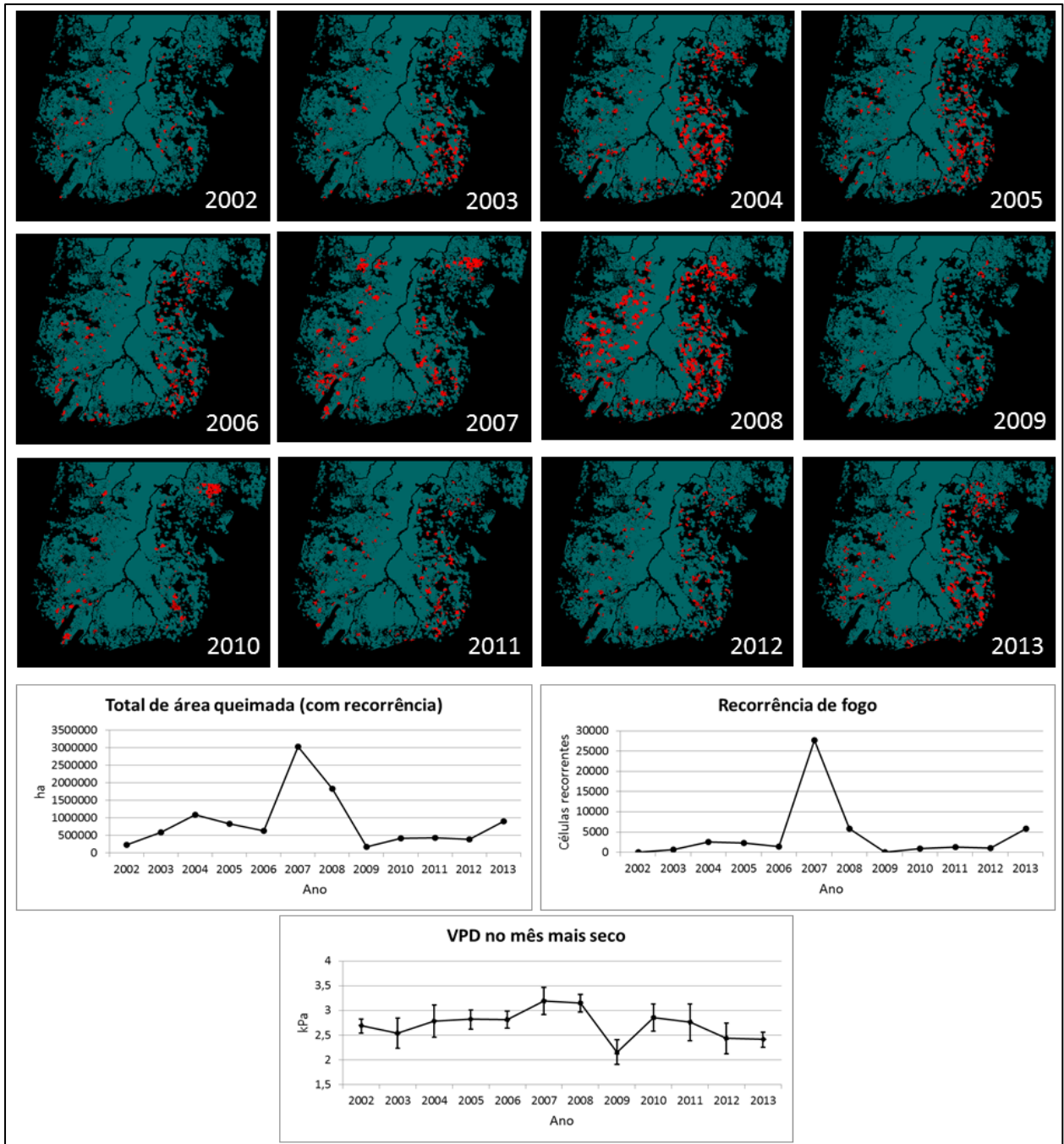


Figura 14: Mapas simulados de cicatrizes de fogo acumuladas anualmente. Para cada ano de 2002 a 2013 é apresentado o total de área queimada e a variação de recorrência de fogo. O VPD apresentado se refere ao mês mais seco do ano conforme dataset consumido pelo modelo após correção. As barras verticais apresentam o desvio padrão do gradiente de VPD sobre a área de estudo.

4. Discussão

4.1. Pontos de ignição

O modelo apresenta boa aderência em relação à curva de focos de calor observados, conforme ilustra a Figura 11. O número de pontos de ignição simulados por mês não apenas apresenta grandeza razoável em comparação à curva objetivo, como também sua variação representa claramente a sazonalidade definida por meses úmidos e secos. Quando o período avaliado abrange vários anos, a variação interanual não apresenta tendências dominantes de subestimação ou superestimação, e os anos mais secos são bem representados. É importante lembrar que o satélite usado como fonte de observações varia eventualmente. A Figura 15 aponta a data de alteração do satélite de referência, observa-se que o período em que cada satélite é referenciado coincide com as superestimativas e subestimativas apresentadas pelo modelo. Dessa forma, o fitness apresentado pelo modelo está sempre sujeito à variação do padrão de referência da curva observada.

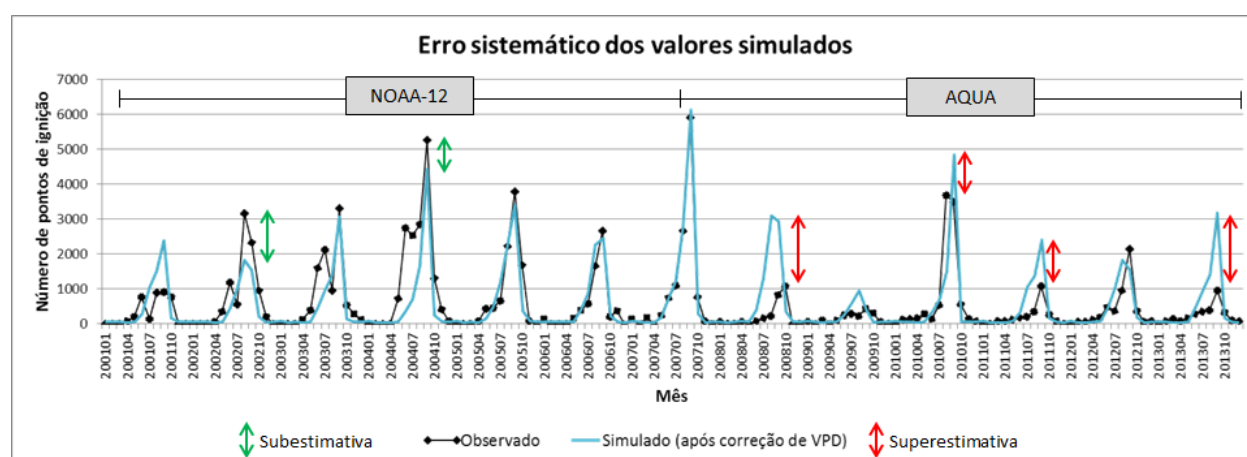


Figura 15: Erro sistemático de subestimação e superestimação pelo modelo, em consequência da alteração do satélite de referência. A diferença entre os sensores oscila a curva objetivo definida para o componente de ignição.

4.2. Anomalias

Outro importante ponto a ser observado nos resultados do FISC é a capacidade do modelo de evidenciar os anos de seca extrema, referenciados para as cabeceiras do rio Xingu no período estudado. Os anos de 2004, 2007 e 2010 se referem aos três maiores picos simulados, e podem ser observados na Figura 11. Resultados preliminares representaram a seca de 2007 com pouca evidência, entretanto, tal deficiência não tem origem nos mecanismos da dinâmica do fogo inerentes ao modelo, e sim nos dados climáticos de entrada, conforme análise apresentada pela Seção S6 do material suplementar. Uma vez que a anomalia de clima seja representada por suas variáveis explanatórias, o FISC se mostrou apto a simular o impacto das mesmas sobre a dinâmica do fogo em florestas. Quando necessário, correções podem ser aplicadas aos conjuntos de dados de entrada de forma a

permitir melhor representação das condições ambientais e alcançar melhores resultados com o modelo.

4.3. Áreas queimadas

O gráfico relativo ao acumulado anual de áreas de floresta queimada apresentado pela Figura 12, demonstra a boa aderência entre o total simulado e o total observado. É desejável que o desempenho do modelo seja avaliado com um maior número de observações anuais, ou até mesmo em intervalos mensais. Como mencionado anteriormente, o conjunto de dados de cicatrizes observadas disponíveis para este estudo é restrito a acumulados anuais para 2007, 2010 e parte de 2005. Ainda assim a abordagem utilizada para definir tais registros é pouco precisa no tempo e no espaço. Tal restrição limita não apenas a validação como também a calibração do componente de espalhamento do FISC. À medida que novas observações forem disponibilizadas para a área de estudo espera-se verificar os resultados simulados em mais detalhes, e principalmente, aprimorar a calibração do modelo.

Versões anteriores do FISC representam a intensidade das queimadas, conforme condições ambientais, através da extensão das cicatrizes simuladas, e distribuem as áreas queimadas mediante a susceptibilidade das sub-regiões da área de estudo. A recente calibração e inclusão de novos processos ao componente de espalhamento permitiram aprimorar o formato das cicatrizes simuladas, conforme apresenta a Figura 13. Esse avanço ganha relevância à medida que amplia o alcance das aplicações do FISC, permitindo análises com métricas de paisagem em estudos ecológicos de interação com o fogo. O mapa simulado não é ainda mais próximo do mapa observado, pois a localização exata das cicatrizes depende de processos não considerados pelo modelo. Embora as variáveis explanatórias do FISC sejam sensíveis às práticas de manejo da terra, aspectos como tamanho da propriedade, demandas econômicas, atividades indígenas, não são diretamente representados. Ainda assim, a nova calibração desenvolvida para o FISC permite que o modelo simule queimadas dentro de terras indígenas, fenômeno este observado na região do Xingu.

Secas anômalas na região do alto rio Xingu são referenciadas pela literatura nos anos 2004, 2007 e 2010. A série temporal do acumulado anual de áreas queimadas entre 2002 e 2013, apresentada pela figura 14, destaca a intensidade da seca simulada para 2004. A seca de 2007 também foi simulada com grande intensidade, apesar da extensão das áreas queimadas não ser tão expressiva, a alta recorrência de fogo gera um total de área queimada significativamente acima de média, condizente com o observado (vide Figura 12). Era esperada maior evidência para a seca de 2010 em termos de áreas queimadas, entretanto, o total de área resultante da sobreposição de cicatrizes simuladas para 2010 apresenta boa aderência ao total de área coberta por cicatrizes observadas, ambos os cálculos não consideram recorrência (vide Figura 12). Vale lembrar que os dados observados de cicatrizes de fogo utilizados para calibração e validação do componente de espalhamento se referem aos anos de 2007 e 2010, respectivamente.

Nota-se que os sucessores imediatos aos anos de seca anômala (2005, 2008 e 2011) também apresentam queimadas acentuadas. Esse efeito é acompanhado por condições climáticas semelhantes entre os anos consecutivos mencionados, que podem ser observadas pelo gráfico de variação de VPD. Além disso, tal comportamento pode se relacionar com a disponibilidade de combustível na floresta impactada pela intensidade das queimadas antecedentes. Apesar da imagem de cicatrizes acumuladas em 2008 indicar maior abrangência do fogo sobre a área de estudo em relação ao ano anterior, o total de área queimada em 2007 é substancialmente maior ao serem consideradas áreas de recorrência. Esse fato é demonstrado pela análise conjunta dos gráficos de total de área queimada e de recorrência de fogo. Por fim observa-se que a magnitude das queimadas simuladas para 2013 está acima da média entre os anos regulares, contudo, é necessária a comparação com dados observados para verificar tal comportamento, principalmente pelo fato do VPD considerado pelo modelo em 2013 não apresentar valor relativamente alto.

4.4. Métodos de calibração

O trabalho de revisão do FISC se depara com boas práticas e desafios referenciados pela literatura sobre a calibração de modelos baseados em processo (JANSSEN; HEUBERGER, 1995). Dentre eles menciona-se como exemplos, o tratamento prévio dos dados utilizados para calibração, o que permite a correção de inconsistências e antecipa inferências sobre o sistema; a combinação de métodos de diferentes naturezas, como deduções determinísticas e probabilísticas, abordagem orientada a conhecimento, otimização e técnicas de heurística; e o desequilíbrio entre a complexidade dos processos modelados e a disponibilidade dos dados observados.

Considera-se para trabalhos futuros a automatização da rotina de calibração do FISC. Para isso, deve-se levar em conta o grande número de coeficientes, o elevado custo computacional das simulações, e a definição de métricas efetivas para funções-objetivo. Vale lembrar que diferentes configurações do modelo podem atingir boa aderência, entretanto, nem todos os valores atribuídos aos coeficientes são adequados perante os processos simulados. Para evitar a degeneração do sistema estudado é preciso garantir o sentido ecológico de cada coeficiente, o que muitas vezes é difícil em calibrações automáticas. Respeitar o intervalo de valores adequados para cada coeficiente é importante para evitar *overfitting* e permitir resultados razoáveis mesmo em condições distantes do contexto de calibração, assim como foi observado neste trabalho.

4.5. Custo computacional

Quando executado nos servidores descritos (80 núcleos de processamento, 768 GB de memória principal de, ambiente compartilhado com demais aplicações), o FISC levou 18 minutos para concluir um ano de simulação para a região do alto rio Xingu em resolução espacial de 320 m. Para isso, a plataforma Dinamica-EGO paraleliza processos do modelo entre vários núcleos do servidor de processamento, dependendo do relacionamento temporal e espacial dos mesmos. Em termos de custo

computacional total, não foram constatadas vantagens substanciais no uso de leituras e escritas em disco local, mantendo os conjuntos de dados em servidor de armazenamento. O custo apresentado é suficiente para que o FISC seja utilizado em ambiente operacional, o que permite o apoio a esforços de monitoramento e prevenção a queimadas.

4.6. Aplicações

Diversas aplicações são vislumbradas para o FISC, desde o estudo exploratório do próprio fenômeno de fogo florestal até interfaces com estudos ecológicos mais abrangentes. Os produtos de ocorrência e intensidade de fogo florestal, representados pelos mapas de ignição e cicatrizes simuladas em alta resolução, munem pesquisas sobre a dinâmica do fogo na Amazônia. Além disso, a possibilidade de combinar produtos do FISC a novas ferramentas de observação e modelagem ambiental, disponibilizados por estudos correlatos, expande o leque das possíveis aplicações. Thonicke et al. (2010) utilizam um modelo baseado em processo para estudar queima de biomassa e respectivas emissões de gases à atmosfera em escala global. A comparação entre a sazonalidade dos eventos de fogo simulada pelo FISC e por Thonicke et al. (2010) permite, respectivamente, combinar detalhamento e abrangência através da análise multi-escalar dos processos de fogo perante suas principais forçantes. Uma das principais contribuições dessa comparação é o estudo do feedback entre mudanças climáticas e regimes de fogo em escopo local e global. Baccini et al. (2012) disponibilizam mapas de densidade de carbono em alta resolução a partir de novas tecnologias de sensoriamento remoto. Considerando a parcela de emissões de CO₂ referente ao desmatamento, e a representatividade das florestas tropicais entre os estoques de carbono na superfície, os mapas de áreas queimadas produzidos pelo FISC podem ser comparados aos mapas de densidade de carbono para atualizar as estimativas de emissões referentes a fogo florestal. A alta resolução dos mapas mencionados, atrelada à aderência obtida para os totais anuais em área queimada simulada pelo FISC, favorecem estimativas mais precisas.

Entretanto, evidências mostram que o estudo da resiliência de florestas tropicais não deve se basear apenas em mudanças do clima global. Brando et al. (2014) destacam a relevância do uso do solo e dos regimes de fogo sobre a degradação de florestas no sudeste da Amazônia. O feedback entre condições extremas do clima local e fortes alterações nos regimes de fogo afeta o equilíbrio do ecossistema. A projeção de cenários críticos pelo FISC pode evidenciar os limites da floresta perante mudanças no clima e no uso do solo, uma vez que as secas extremas observadas na área foram bem representadas pelo modelo. A maior ameaça à biodiversidade nos trópicos, provavelmente, se relaciona à perda de habitat e fragmentação da floresta, o que altera estoques de carbono, ciclos biogeoquímicos e aspectos hidrológicos (LAURANCE, 2004). O aumento do efeito de borda gerado pela fragmentação da floresta favorece a ocorrência do fogo, principalmente por impactar o microclima, a disponibilidade de combustível e a exposição ao manejo do solo no entorno. Por sua vez, as queimadas fragmentam a

floresta fechando um ciclo de retroalimentação. O modelo FISC já se mostrou apto a avaliar o efeito da fragmentação florestal e das mudanças climáticas à degradação da Amazônia (SOARES-FILHO et al., 2012b), e agora pode ser aplicado em análises com métricas de paisagem a partir do novo padrão espacial obtido para as cicatrizes simuladas. Pütz et al. (2014) estimam a perda de carbono relativo ao efeito de borda através de um modelo de dinâmica florestal baseado em processo. Em regiões de fronteira do bioma amazônico, tais estimativas devem considerar o substancial efeito do fogo à fragmentação florestal, podendo assim, se beneficiar das melhorias alcançadas para o FISC.

Por fim, o custo computacional apresentado pelo modelo torna o FISC apto a contribuir para esforços de monitoramento de queimadas florestais (INPE, 2011a; REID et al., 2009). A convergência de projeções climáticas e de tendências do uso do solo em cenários de regimes de fogo permite maior preparo de brigadistas, e baseia políticas públicas para prevenção e combate a incêndios florestais (IBAMA, 1989).

5. Conclusões

A substituição da base climática utilizada pelo modelo torna o FISC apto a assimilar dados recentes, e assim, produzir cenários atualizados sobre regimes de fogo florestal. As deficiências encontradas no novo conjunto de dados são passíveis de correção e não superam os benefícios de seu uso. A nova base climática dispõe suas variáveis de forma espacializada, e apresenta abrangência suficiente para permitir a aplicação do modelo a outras áreas de floresta tropical. Além disso, o dataset favorece o uso do FISC em ambiente operacional, uma vez que é atualizada sistematicamente.

A nova calibração realizada para o FISC, a priori motivada pela substituição da base climática, bem como a implementação de melhorias a processos modelados, e a inclusão de novos processos da dinâmica de fogo florestal, permitiram avançar a qualidade dos produtos do FISC. Magnitude e sazonalidade de ignição e espalhamento do fogo foram representadas com boa aderência às observações disponíveis para a bacia hidrográfica do alto rio Xingu. Ademais, o avanço no padrão espacial alcançado para as cicatrizes simuladas amplia as possibilidades de aplicação do modelo, principalmente em relação a estudos ecológicos de interação com o fogo em alta resolução.

A abordagem baseada em processos se mostrou adequada para simular anomalias além do padrão regular do sistema. Dessa forma, o modelo foi capaz de simular, com boa representatividade, o impacto de secas extremas ao regime de fogo florestal na região de estudo. A partir da sensibilidade do modelo aos processos do sistema estudado, e da qualidade dos dados de entrada, espera-se que cenários futuros mais distantes do período de calibração sejam projetados com coerência.

O preparo do modelo para tratar novas áreas de estudo envolve a análise de dados observados para configuração de seus componentes. Para isso, estratégias que consideram a natureza dos métodos numéricos usados, e que priorizam os coeficientes a serem ajustados, podem simplificar o processo de

calibração. Por conseguinte, o volume e a resolução dos dados processados durante a simulação elevam o custo computacional do modelo. Embora os esforços de calibração e simulação do FISC sejam relevantes, ainda são compatíveis para aplicações em ambiente operacional.

Vale ressaltar a importância da interface entre trabalhos experimentais e trabalhos de modelagem para a pesquisa ambiental. O modelo FISC é fruto dessa cooperação ao absorver conhecimento adquirido em campo e, ao mesmo tempo, permitir o estudo do fogo florestal com larga abrangência no espaço e no tempo. Em relação a trabalhos futuros, além das aplicações discutidas, destacam-se algumas sugestões a seguir. A inclusão de variáveis que refletem a decisão do uso do fogo como manejo da terra poderia melhorar a localização das cicatrizes simuladas. A adaptação do componente de carbono para avaliar a aplicação do FISC ao Cerrado seria de grande valia, ainda mais considerando a relevância do fogo para o bioma. Também seria interessante a colaboração com instituições competentes para projetar um ambiente operacional de monitoramento de queimadas, utilizando o FISC como mais uma ferramenta para prevenção e combate a incêndios florestais.

Enfim, como um modelo ambiental, o FISC simplifica um sistema natural, portanto o uso de seus resultados deve ser orientado pelo escopo da modelagem. Ou seja, devem ser considerados: a finalidade para a qual o modelo foi desenvolvido, as variáveis às quais o modelo é sensível, a qualidade dos dados utilizados, e as características dos métodos determinísticos e probabilísticos aplicados. Não se espera que produtos de modelagem sejam corretos, e sim que sejam razoáveis o suficiente para serem úteis.

Referências bibliográficas

- ABTEW, D. W.; MELESSE, P. D. A. Vapor Pressure Calculation Methods. In: **Evaporation and Evapotranspiration**. [s.l.] Springer Netherlands, 2013. p. 53–62.
- ACKERMAN, A. S. et al. Reduction of Tropical Cloudiness by Soot. **Science**, v. 288, n. 5468, p. 1042–1047, 12 maio 2000.
- ALENCAR, A. et al. A pavimentação da BR-163 e os desafios à sustentabilidade: uma análise econômica, social e ambiental. **Instituto Centro de Vida**, v. 1, p. 29, 2005.
- ALENCAR, A. et al. Temporal variability of forest fires in eastern Amazonia. **Ecological Applications**, v. 21, n. 7, p. 2397–2412, 1 out. 2011.
- ALENCAR, A. A. C.; SOLÓRZANO, L. A.; NEPSTAD, D. C. Modeling forest understory fires in an eastern amazonian landscape. **Ecological Applications**, v. 14, n. sp4, p. 139–149, 1 ago. 2004.
- ALENCAR, A.; NEPSTAD, D. C.; DIAZ, M. DEL 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. 1, p. 1–17, jan. 2006.
- ANDREAE, M. O. et al. Smoking Rain Clouds over the Amazon. **Science**, v. 303, n. 5662, p. 1337–1342, 27 fev. 2004.
- AXIMOFF, I. O que perdemos com a passagem do fogo pelos campos de altitude do estado do Rio de Janeiro? **Biodiversidade Brasileira**, v. 0, n. 2, p. 180–200, 30 dez. 2011.
- BACCINI, A. et al. Estimated carbon dioxide emissions from tropical deforestation improved by carbon-density maps. **Nature Climate Change**, v. 2, n. 3, p. 182–185, 29 jan. 2012.
- BAILEY, T. C.; GATRELL, A. C. **Interactive spatial data analysis**. New York, New York, USA: Longman Scientific & Technical Essex, 1995. v. 413
- BALCH, J. K. et al. Negative fire feedback in a transitional forest of southeastern Amazonia. **Global Change Biology**, v. 14, n. 10, p. 2276–2287, 1 out. 2008.
- BETTS, R. A. et al. The role of ecosystem-atmosphere interactions in simulated Amazonian precipitation decrease and forest dieback under global climate warming. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 78, n. 1-3, p. 157–175, 1 jun. 2004.
- BOND, W. J.; WOODWARD, F. I.; MIDGLEY, G. F. The global distribution of ecosystems in a world without fire. **New Phytologist**, v. 165, n. 2, p. 525–538, 1 fev. 2005.
- BONHAM-CARTER, G. **Geographic Information Systems for Geoscientists: Modelling with GIS**. [s.l.] Elsevier, 1994.
- BOSILOVICH, M. G.; ROBERTSON, F. R.; CHEN, J. **Modern Era Retrospective-Analysis for Research and Applications**. 1 jan. 2009. Disponível em: <<http://ntrs.nasa.gov/search.jsp?R=20090042689>>. Acesso em: 8 jan. 2015.
- BOTTA, A.; FOLEY, J. A. Effects of climate variability and disturbances on the Amazonian terrestrial ecosystems dynamics. **Global Biogeochemical Cycles**, v. 16, n. 4, p. 1070, 1 dez. 2002.
- BOWMAN, D. M. J. S. et al. Fire in the Earth System. **Science**, v. 324, n. 5926, p. 481–484, 24 abr. 2009.

BRANDO, P. M. et al. Abrupt increases in Amazonian tree mortality due to drought–fire interactions. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 111, n. 17, p. 6347–6352, 29 abr. 2014.

CARDOSO, M. F. et al. Projecting future fire activity in Amazonia. **Global Change Biology**, v. 9, n. 5, p. 656–669, 1 maio 2003.

COCHRANE, M. A. et al. Positive Feedbacks in the Fire Dynamic of Closed Canopy Tropical Forests. **Science**, v. 284, n. 5421, p. 1832–1835, 11 jun. 1999.

COCHRANE, M. A. **Spreading like wildfire: Tropical forest fires in Latin America and the Caribbean: Prevention, assesment and early warning**. Mexico: United Nations Environment Programme, 2002. Disponível em: <http://www.unep.org/publications/search/pub_details_s.asp?ID=246>. Acesso em: 28 maio. 2014.

COCHRANE, M. A. Fire science for rainforests. **Nature**, v. 421, n. 6926, p. 913–919, 27 fev. 2003.

COCHRANE, M. A.; BARBER, C. P. Climate change, human land use and future fires in the Amazon. **Global Change Biology**, v. 15, n. 3, p. 601–612, 1 mar. 2009.

COE, M. T. et al. Deforestation and climate feedbacks threaten the ecological integrity of south–southeastern Amazonia. **Philosophical Transactions of the Royal Society of London B: Biological Sciences**, v. 368, n. 1619, p. 20120155, 5 jun. 2013.

COX, P. M. et al. Acceleration of global warming due to carbon-cycle feedbacks in a coupled climate model. **Nature**, v. 408, n. 6809, p. 184–187, 9 nov. 2000.

COX, P. M. et al. Amazonian forest dieback under climate-carbon cycle projections for the 21st century. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 78, n. 1-3, p. 137–156, 1 jun. 2004.

DE GROOT, W. J. et al. Developing a global early warning system for wildland fire. **Northern Forestry Centre**, 2006.

DEE, D. P. et al. The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v. 137, n. 656, p. 553–597, 2011.

FEARNSIDE, P. M. Amazon Forest maintenance as a source of environmental services. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v. 80, n. 1, p. 101–114, mar. 2008.

FRIEDLINGSTEIN, P. et al. How positive is the feedback between climate change and the carbon cycle? **Tellus B**, v. 55, n. 2, p. 692–700, 1 abr. 2003.

GULLISON, R. E. et al. Tropical forests and climate policy. **SCIENCE-NEW YORK THEN WASHINGTON-**, v. 316, n. 5827, p. 985, 2007.

HIRSCH, A. I. et al. 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, n. 5, p. 908–924, maio 2004.

IBAMA, I. B. DO M. A. E DOS R. N. R. **Centro Nacional de Prevenção e Combate aos Incêndios Florestais - Prevfogo**. Disponível em: <<http://www.ibama.gov.br/prevfogo>>. Acesso em: 17 jan. 2015.

IBGE. **Atlas do censo demográfico 2010**. 1. ed. Rio de Janeiro: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2013.

INPE. **Portal do Programa de Monitoramento de Queimadas e Incêndios, Perguntas Frequentes**. Website oficial. Disponível em: <<http://www.inpe.br/queimadas/faq.php>>. Acesso em: 9 jan. 2015a.

INPE. **INPE Queimadas, aviso de referencia para dados de focos**, 24 ago. 2011b. Disponível em: <http://queimadas.cptec.inpe.br/~rqueimadas/documentos/20110824_Aviso_Ref_Mudoup_Aqua.pdf>

JANSSEN, P. H. M.; HEUBERGER, P. S. C. Calibration of process-oriented models. **Ecological Modelling**, Modelling Water, Carbon and Nutrient Cycles in Forests. v. 83, n. 1–2, p. 55–66, 1 dez. 1995.

KALNAY, E. et al. The NCEP/NCAR 40-Year Reanalysis Project. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 77, n. 3, p. 437–471, 1 mar. 1996.

KAPOS, V. et al. $\delta^{13}C$ as an Indicator of Edge Effects in Tropical Rainforest Reserves. **Journal of Ecology**, v. 81, n. 3, p. 425–432, 1 set. 1993.

KINTER, J. L. **The Grid Analysis and Display System (GrADS)**. United States: Institute of Global Environment and Society, Inc.; Center for Ocean-land-atmosphere Studies.; Calverton, MD, United States, 1 out. 1994. Disponível em: <<http://ntns.nasa.gov/search.jsp?R=19950011076>>. Acesso em: 29 dez. 2014.

LAURANCE, W. F. Forest-climate interactions in fragmented tropical landscapes. **Philosophical Transactions of the Royal Society of London B: Biological Sciences**, v. 359, n. 1443, p. 345–352, 29 mar. 2004.

LAURANCE, W. F.; WILLIAMSON, G. B. Positive Feedbacks among Forest Fragmentation, Drought, and Climate Change in the Amazon. **Conservation Biology**, v. 15, n. 6, p. 1529–1535, 14 dez. 2001.

MARENGO, J. A. et al. The Drought of Amazonia in 2005. **Journal of Climate**, v. 21, n. 3, p. 495–516, fev. 2008.

MIRANDA, H. S.; BUSTAMANTE, M. M.; MIRANDA, A. C. The fire factor. **The Cerrados of Brazil. Ecology and Natural History of a Neotropical Savanna**, p. 51–68, 2002.

MORTON, D. C. et al. Understorey fire frequency and the fate of burned forests in southern Amazonia. **Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences**, v. 368, n. 1619, p. 20120163, 5 jun. 2013.

MYERS, N. et al. Biodiversity hotspots for conservation priorities. **Nature**, v. 403, n. 6772, p. 853–858, 24 fev. 2000.

NEPSTAD, D. C. et al. Large-scale impoverishment of Amazonian forests by logging and fire. **Nature**, v. 398, n. 6727, p. 505–508, 8 abr. 1999.

NEPSTAD, D. C. et al. Amazon drought and its implications for forest flammability and tree growth: a basin-wide analysis. **Global Change Biology**, v. 10, n. 5, p. 704–717, 1 maio 2004.

NEPSTAD, D. C. et al. Inhibition of Amazon Deforestation and Fire by Parks and Indigenous Lands. **Conservation Biology**, v. 20, n. 1, p. 65–73, 1 fev. 2006.

NEPSTAD, D. C. et al. 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**, v. 363, n. 1498, p. 1737–1746, 27 maio 2008.

NEPSTAD, D. C.; MOREIRA, A. G.; ALENCAR, A. A. **Flames in the rain forest: origins, impacts and alternatives to Amazonian fires**. [s.l.] Pilot Program to Conserve the Brazilian Rain Forest, 1999.

ORMSBY, T. et al. **Getting to Know ArcGIS Desktop**. 2. ed. Redlands, USA: Esri Press, 2010.

OYAMA, M. D.; NOBRE, C. A. A new climate-vegetation equilibrium state for tropical South America. **Geophysical Research Letters**, v. 30, n. 23, 2003.

PÜTZ, S. et al. Long-term carbon loss in fragmented Neotropical forests. **Nature Communications**, v. 5, p. 5037, 7 out. 2014.

RAMANATHAN, V. et al. Aerosols, Climate, and the Hydrological Cycle. **Science**, v. 294, n. 5549, p. 2119–2124, 7 dez. 2001.

RAY, D.; NEPSTAD, D. C.; MOUTINHO, P. Micrometeorological and canopy controls of fire susceptibility in a forested Amazon landscape. **Ecological Applications**, v. 15, n. 5, p. 1664–1678, 2005.

REID, J. S. et al. Global Monitoring and Forecasting of Biomass-Burning Smoke: Description of and Lessons From the Fire Locating and Modeling of Burning Emissions (FLAMBE) Program. **IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing**, v. 2, n. 3, p. 144–162, set. 2009.

SALAZAR, L. F.; NOBRE, C. A.; OYAMA, M. D. Climate change consequences on the biome distribution in tropical South America. **Geophysical Research Letters**, v. 34, n. 9, 2007.

SAMPAIO, G. et al. Regional climate change over eastern Amazonia caused by pasture and soybean cropland expansion. **Geophysical Research Letters**, v. 34, n. 17, 2007.

SCHLOBOHM, P.; BRAIN, J. **Gaining an understanding of the National Fire Danger Rating System**: PMS 932, NFES 2665. Boise, Idaho, USA: National Wildfire Coordinating Group, 2002. Disponível em: <<http://www.nwcg.gov/pms/pubs/MasterGaining.pdf>>.

SETZER, A. **Operational satellite monitoring of fires in Brazil**. **International Forest Fire News**. [s.l.] United Nations, Economic Commission for Europe, Food and Agriculture Organization of the United Nations, jul. 1993. Disponível em: <http://queimadas.cptec.inpe.br/~rqueimadas/documentos/1993_Setzer_Operational_Monitoring_FA_O.pdf>. Acesso em: 9 jan. 2015.

SILVESTRINI, R. A. **Modelo probabilístico de ignição e propagação de fogo em áreas de floresta na Amazônia Brasileira**. Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais, 2008.

SILVESTRINI, R. A. et al. Simulating fire regimes in the Amazon in response to climate change and deforestation. **Ecological Applications**, v. 21, n. 5, p. 1573–1590, 2011.

SISMANOGLU, R. A.; SETZER, A. W. Risco de fogo da vegetação na América do Sul: comparação de três versões na estiagem de 2004. **XII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Goiania, Brazil**, p. 16–21, 2005.

SOARES-FILHO, B. et al. Role of Brazilian Amazon protected areas in climate change mitigation. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 107, n. 24, p. 10821–10826, 15 jun. 2010.

SOARES-FILHO, B. et al. Challenges for low-carbon agriculture and forest conservation in Brazil. **Inter-American Development Bank Environmental Safeguards Unit (VPS/ESG) Technical Notes**, 2012a.

SOARES-FILHO, B. et al. Forest fragmentation, climate change and understory fire regimes on the Amazonian landscapes of the Xingu headwaters. **Landscape Ecology**, v. 27, n. 4, p. 585–598, 15 mar. 2012b.

SOARES-FILHO, B. et al. Cracking Brazil's Forest Code. **Science**, v. 344, n. 6182, p. 363–364, 2014.

SOARES-FILHO, B.; RODRIGUES, H.; COSTA, W. **Modeling environmental dynamics with Dinamica EGO**. Belo Horizonte, Minas Gerais, Brazil: Centro de Sensoriamento Remoto, Universidade Federal de Minas Gerais, 2009. Disponível em: <<http://www.csr.ufmg.br/dinamica/tutorial/tutorial.html>>.

SOARES-FILHO, B. S. et al. Modelling conservation in the Amazon basin. **Nature**, v. 440, n. 7083, p. 520–523, 23 mar. 2006.

STICKLER, C. M. et al. Dependence of hydropower energy generation on forests in the Amazon Basin at local and regional scales. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 110, n. 23, p. 9601–9606, 4 jun. 2013.

STUDLEY, H.; WEBER, K. T. **Comparison of Image Resampling Techniques for Satellite Imagery**: Final Report: Assessing Post-Fire Recovery of Sagebrush-Steppe Rangelands in Southeastern Idaho. Pocatello, USA: Idaho State University, set. 2010. Disponível em: <http://giscenter.isu.edu/research/Techpg/nasa_postfire/>.

THONICKE, K. et al. The influence of vegetation, fire spread and fire behaviour on biomass burning and trace gas emissions: results from a process-based model. **Biogeosciences**, v. 7, n. 6, p. 1991–2011, 23 jun. 2010.

VAN ROSSUM, G. **Glue it all together with python** Workshop on Compositional Software Architectures, Workshop Report, Monterey, California. **Anais...** In: WORKSHOP ON COMPOSITIONAL SOFTWARE ARCHITECTURES. Monterey, California: 1998

VAN WILGEN, B. W. The evolution of fire management practices in savanna protected areas in South Africa. **South African Journal of Science**, v. 105, n. 9-10, p. 343–349, out. 2009.

VELASQUEZ, C.; QUEIROZ, H.; BERNASCONI, P. **Fique por dentro: a bacia do rio Xingu em Mato Grosso**: Série Cartô Brasil Socioambiental. Sao Paulo, Sao Paulo, Brazil: ISA, ICV, 2010. Disponível em: <<http://www.socioambiental.org/sites/blog.socioambiental.org/files/publicacoes/10395.pdf>>.

VENEVSKY, S. et al. Simulating fire regimes in human-dominated ecosystems: Iberian Peninsula case study. **Global Change Biology**, v. 8, n. 10, p. 984–998, 1 out. 2002.

WHELAN, R. J. **The ecology of fire**. 1. ed. Cambridge: Cambridge University Press, 1995.

Anexo I - Material suplementar

Sumário

S1. Trabalho de campo	58
S2. Dados utilizados	61
S3. Comparação entre os conjuntos de dados climáticos.....	62
S4. Efeitos de vento e vizinhança ao espalhamento do fogo.....	63
S5. Limiar estocástico para seleção de pontos de ignição.....	64
S6. Correção dos dados de VPD.....	65
Referências	66

Índice de figuras

Figura S1: Área 01 do experimento de fogo florestal. Observa-se o contraste entre floresta e campos de soja. São indicadas em amarelo as trilhas percorridas em campo.	59
Figura S2: Área 02 do experimento de fogo florestal. Observa-se o contraste entre floresta e campos de soja. São indicadas em amarelo as trilhas percorridas em campo.	59
Figura S3: Medidas tomadas antes e durante a ocorrência do fogo controlado. Entre as variáveis observadas estão temperatura, umidade relativa do ar, disponibilidade de combustíveis finos, velocidade do vento e altura das chamas. Também são tomadas medidas após a extinção do fogo. 60	
Figura S4: Deslocamento do fogo controlado e parcela florestal após extinção do fogo.....	60
Figura S5: Efeito de vento e vizinhança ao mapa de probabilidades para espalhamento do fogo. (a) Resultado nulo do efeito de vento antes das melhorias implementadas, todas as células apresentam probabilidade 0,5. (b) Efeito de vento gerando maiores probabilidades para células a favor do vento, e menores probabilidades para células contra o vento. (c) Efeito de vizinhança antes das melhorias, células não adjacentes à ocorrência de fogo possuem probabilidade maior do que zero. (d) Efeito de vizinhança após melhorias, todas as células não adjacentes tiveram suas probabilidades reduzidas a zero.	63
Figura S6: Coincidência entre focos de calor e cicatrizes de fogo observados. As subáreas (a), (b) e (c) apresentam o padrão de coincidência encontrado sobre a área de estudo. Considerando uma janela de 3x3 células, 23% dos focos se sobrepõem a cicatrizes observadas, conforme dados acumulados para o ano de 2007.	64
Figura S7: Correção da nova base climática adotada para o FISC. É apresentada a variação do déficit de pressão de vapor segundo produto de reanálise NCEP/NCAR antes e após correção, bem como conforme a estação de campo do INMET utilizada como referência para melhor representação de secas anômalas. Os anos de 2007 e 2008 foram corrigidos de forma a manter o desvio médio entre diferentes abordagens: reanálise e medição em campo.	65

Índice de tabelas

Tabela S1: Dados utilizados no desenvolvimento do modelo FISC.....	61
Tabela S2: Gradiente de VPD sobre a Amazônia segundo bases climáticas geradas por dados de estações de campo (INPE), e por reanálise (NCEP/NCAR).	62

S1. Trabalho de campo

O Instituto de Pesquisa Ambiental da Amazônia (IPAM) conduz um experimento de fogo florestal na fazenda Tanguro, localizada ao sudeste da Amazônia já em área de transição para o Cerrado, próxima ao Parque Indígena do Xingu, e entre os municípios de Canarana e Querência, no estado de Mato Grosso, Brasil. O experimento utiliza fogo controlado em parcelas com diferente frequência de queima, dessa forma é possível estudar as condições de início e evolução do fogo, bem como o impacto do mesmo à floresta. Duas áreas de estudo se diferenciam pelos tamanhos das parcelas e períodos de queima. A área 01, representada pela Figura S1, apresenta três parcelas de 50 ha, que são queimadas anualmente, a cada 3 anos, e outra de controle (BRANDO et al., 2014). A área 02, representada pela Figura S2, apresenta parcelas menores, onde o fogo é conduzido entre meses e horários do dia variados em termos umidade e temperatura. É importante notar o contraste da floresta aos campos de soja presentes na área de estudo, bem como a variação microclimática e demais efeitos de borda.

Esse experimento apresenta destacada relevância por ter como objeto de pesquisa fogo em floresta tropical, acumulando relativamente longo período de estudo. No mês de agosto de 2014 uma equipe do Centro de Sensoriamento Remoto/IGC/UFMG visitou a área em trabalho de campo, para acompanhar os fogos conduzidos para aquele ano, tendo em vista o desenvolvimento do FISC. Conforme ilustra a Figura S3, medidas são tomadas antes, durante e após o fogo, permitindo assim a avaliação das condições ambientais ao fogo, tanto em termos de variáveis microclimáticas, quanto em termos de disponibilidade de combustível. É avaliada também a estrutura da floresta antes e após as queimadas, em termos de índice de área foliar, mortalidade de árvores, entre outras observações. As imagens da Figura S4 apresentam o impacto do fogo de sub-bosque conduzido na área 02 do experimento.

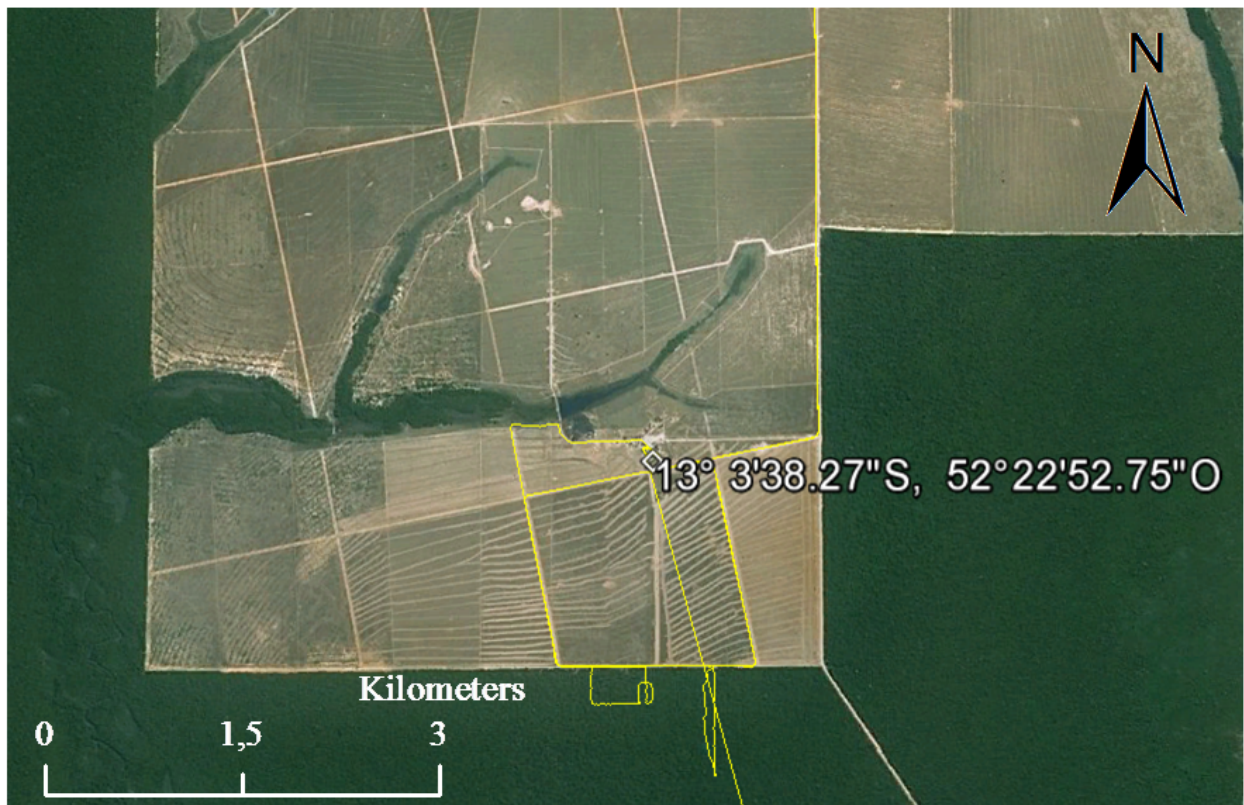


Figura S1: Área 01 do experimento de fogo florestal. Observa-se o contraste entre floresta e campos de soja. São indicadas em amarelo as trilhas percorridas em campo.



Figura S2: Área 02 do experimento de fogo florestal. Observa-se o contraste entre floresta e campos de soja. São indicadas em amarelo as trilhas percorridas em campo.



Figura S3: Medidas tomadas antes e durante a ocorrência do fogo controlado. Entre as variáveis observadas estão temperatura, umidade relativa do ar, disponibilidade de combustíveis finos, velocidade do vento e altura das chamas. Também são tomadas medidas após a extinção do fogo.



Figura S4: Deslocamento do fogo controlado e parcela florestal após extinção do fogo.

S2. Dados utilizados

A Tabela S1 especifica os dados manipulados pelo FISC, ou utilizados para o desenvolvimento do modelo.

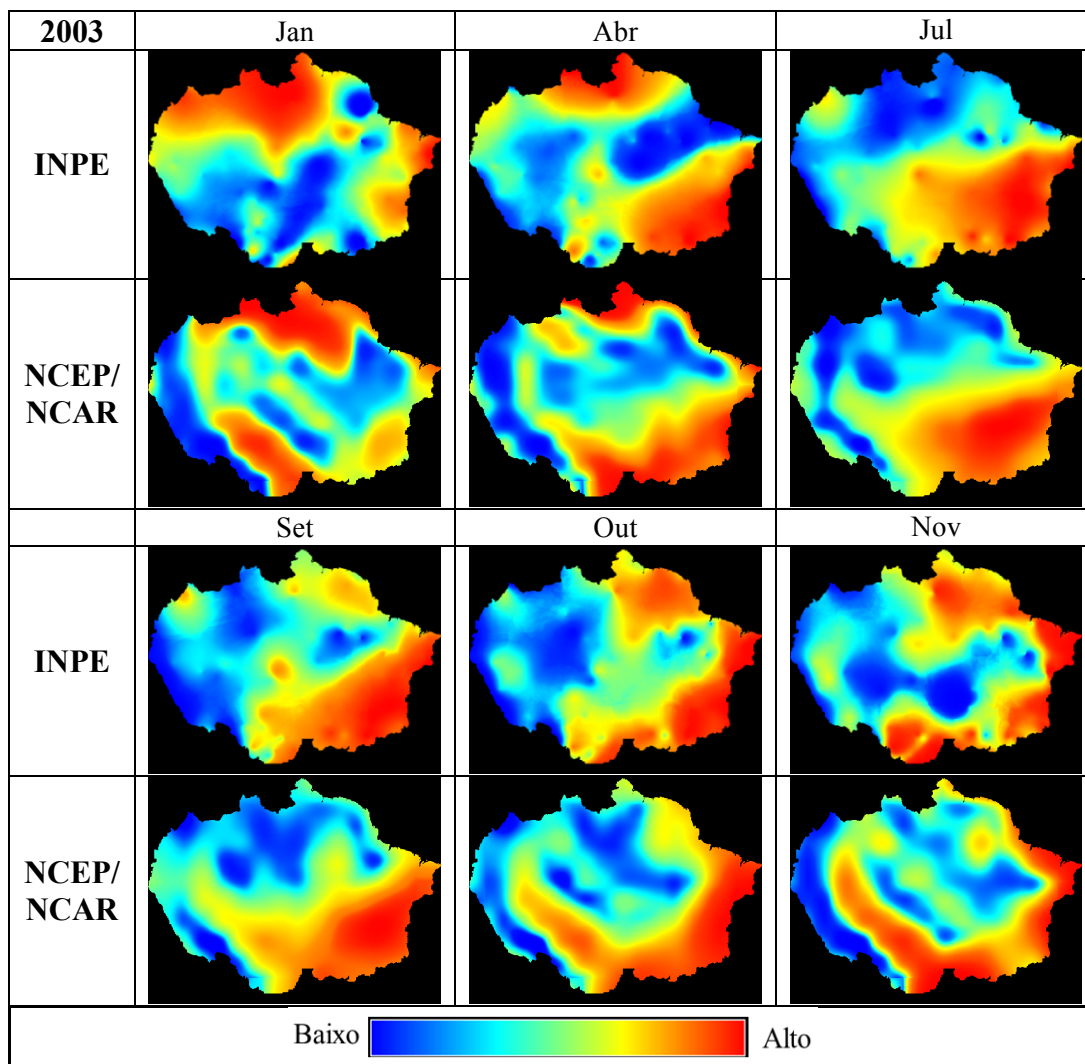
Tabela S1: Dados utilizados no desenvolvimento do modelo FISC.

Descrição	Fonte
Modelo digital de terreno	SRTM (FARR et al., 2007)
Áreas urbanas	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) (IBGE, 2005)
Rodovias	Dados compilados em (SOARES-FILHO et al., 2010)
Áreas protegidas	Dados compilados em (SOARES-FILHO et al., 2010)
Floresta e área desmatada	INPE – PRODES (INPE, 2008)
Biomassa vegetal	(SAATCHI et al., 2007)
Hidrografia	Agencia Nacional de águas (ANA)
Déficit de pressão de vapor	NCEP/NCAR Reanalysis 1 (KALNAY et al., 1996) Instituto Nacional de Meteorologia (INMET)
Temperatura	NCEP/NCAR Reanalysis 1 (KALNAY et al., 1996)
Radiação fotossinteticamente ativa (PAR)	Estações de campo (HIRSCH et al., 2004)
Disponibilidade de água na planta (PAW)	Estações de campo (HIRSCH et al., 2004)
Velocidade do vento (Meridional e Zonal)	CPTEC-INPE
Focos de calor na superfície terrestre	INPE-Queimadas (INPE, 2011) Satélites: NOAA-12, AQUA
Cicatrizes de fogo observadas por sensoriamento remoto	IPAM

S3. Comparação entre os conjuntos de dados climáticos

A base climática utilizada anteriormente pelo FISC tinha origem em um produto não oficial do INPE que foi descontinuado. Essa base é gerada a partir da interpolação de dados de estações meteorológicas espalhadas pela Amazônia. A nova base climática é derivada do produto de reanálise NCEP/NCAR Reanalysis 1 (KALNAY et al., 1996), originalmente disponibilizada em resolução 2,5 graus. Ambas as bases se referem a variável de déficit de pressão de vapor (VPD). A Tabela S2 compara o gradiente de VPD de ambas as bases em alguns meses do ano de 2003. É possível notar que o número de estações e a distribuição geográfica das mesmas prejudicam interpolação dos campos. Por outro lado produtos de reanálise tendem a suavizar anomalias o que requer correção para que secas extremas sejam bem representadas. Por fim, a nova base é atualizada regularmente e possui defasagem de poucos meses em relação ao presente.

Tabela S2: Gradiente de VPD sobre a Amazônia segundo bases climáticas geradas por dados de estações de campo (INPE), e por reanálise (NCEP/NCAR).



S4. Efeitos de vento e vizinhança ao espalhamento do fogo

Foram implementadas melhorias para o efeito de vento e vizinhança ao espalhamento do fogo. Anteriormente, o mecanismo não contemplava todas as direções de vento possíveis, não apresentando efeito para algumas direções específicas, conforme ilustra Figura S5-a. Após as melhorias, células a favor do vento passam a apresentar probabilidades maiores, ao contrário de células contra o vento que sofrem redução das mesmas, conforme ilustra a Figura S5-b. O efeito de vizinhança, por sua vez, não eliminava risco de espalhamento para células distantes de células com fogo. A Figura S5-c apresenta probabilidades maiores que zero mesmo para células não adjacentes à ocorrência do fogo. Após as melhorias todas as células não adjacentes à células com fogo têm probabilidades anuladas diante do risco de contágio por frentes de fogo, conforme ilustra a Figura S5-d.

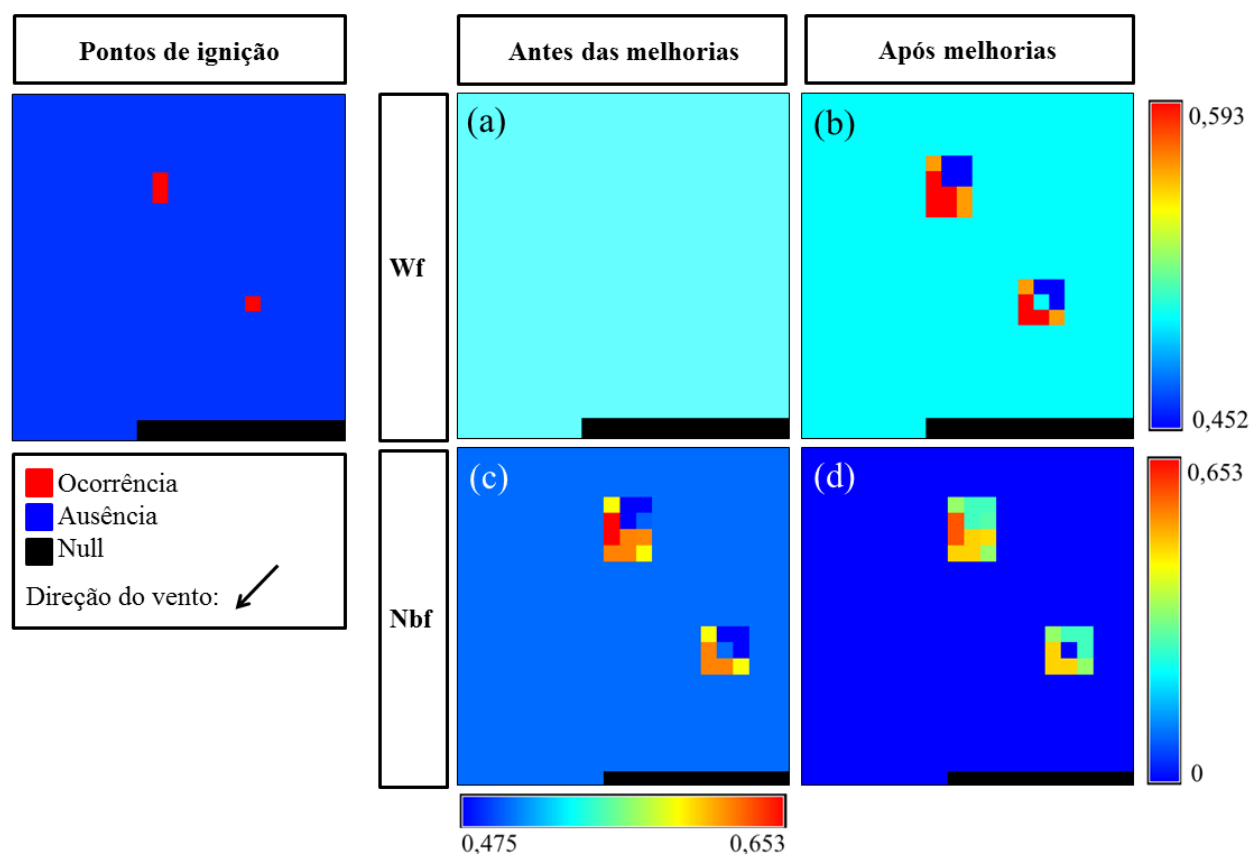


Figura S5: Efeito de vento e vizinhança ao mapa de probabilidades para espalhamento do fogo. (a) Resultado nulo do efeito de vento antes das melhorias implementadas, todas as células apresentam probabilidade 0,5. (b) Efeito de vento gerando maiores probabilidades para células a favor do vento, e menores probabilidades para células contra o vento. (c) Efeito de vizinhança antes das melhorias, células não adjacentes à ocorrência de fogo possuem probabilidade maior do que zero. (d) Efeito de vizinhança após melhorias, todas as células não adjacentes tiveram suas probabilidades reduzidas a zero.

S5. Limiar estocástico para seleção de pontos de ignição

A Figura S6, apresenta focos de calor e cicatrizes de fogo observadas acumuladas no ano de 2007. É possível observar pelas subáreas (a), (b) e (c) a relação de coincidência entre focos e cicatrizes de fogo. Ao avaliar a sobreposição entre cicatrizes e focos observados obteve-se um índice de coincidência a cerca de 23% para o ano de 2007, e 22% para o ano de 2010, isso considerando uma janela de 3x3 células. O mecanismo de seleção de pontos de ignição para o processo de espalhamento de fogo implementado para o FISC, além de analisar a adequabilidade ambiental do entorno, também utiliza um teste estocástico. Ou seja, para cada ponto simulado, e com condições de entorno favorável ao fogo, é sorteado um valor aleatório, conforme distribuição uniforme, que deve ser superior ao limiar estocástico de 75% para que se inicie o processo de espalhamento. A partir da seleção de pontos de ignição foi possível melhor representação da relação entre focos e cicatrizes, e ainda gerar cicatrizes simuladas com padrão espacial mais próximo ao das cicatrizes observadas.

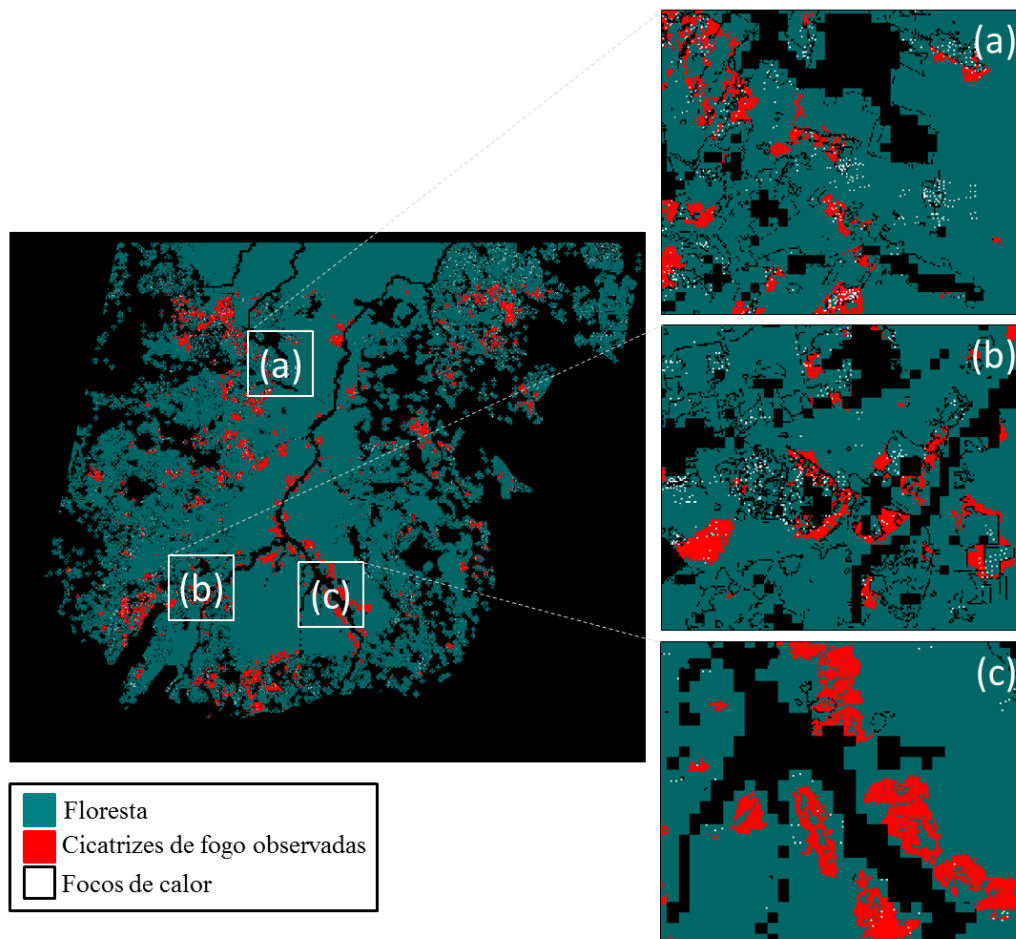


Figura S6: Coincidência entre focos de calor e cicatrizes de fogo observadas. As subáreas (a), (b) e (c) apresentam o padrão de coincidência encontrado sobre a área de estudo. Considerando uma janela de 3x3 células, 23% dos focos se sobrepõem a cicatrizes observadas, conforme dados acumulados para o ano de 2007.

S6. Correção dos dados de VPD

A Figura S7 apresenta a variação do déficit de pressão de vapor (VPD) na área de estudo conforme o produto de reanálise do NCEP/NCAR (KALNAY et al., 1996) e uma estação de campo do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). A estação utilizada localiza-se em Canarana – MT, código OMM 83270, latitude -13.47, longitude: -52.27 e altitude: 430.00 m. A diferença entre a curva relativa a estação de campo e a curva referente a reanálise se explica por tratar-se de abordagens distintas. Além disso, a estação é sensível a um contexto pontual enquanto os rasters de reanálise consideram toda a área de estudo. Entretanto, nota-se que nos anos de 2007 e 2008 a diferença entre as curvas se acentua para os meses mais secos, de forma substancial. A característica de suavizar medidas extremas é conhecida para produtos de reanálise, e no ano de 2007 foi observada forte seca nas cabeceiras do rio Xingu (BRANDO et al., 2014). Sendo assim, foi aplicado um fator para corrigir a variação de VPD NCEP/NCAR, de forma que as curvas mantenham um padrão de diferença, principalmente nos meses mais secos. O fator de correção é um coeficiente que quando multiplicado pelo valor de VPD do mês mais seco torna a diferença entre as curvas, para aquele ponto, igual ao padrão encontrado nos demais anos. O cálculo do fator se baseia nos meses mais secos de cada ano, assim para esses meses o fator é aplicado integralmente, enquanto para os demais meses, o fator de correção sofre decaimento linear a medida que os valores de VPD se distanciam do pico. A partir da correção, a nova base climática adotada para o FISC atinge melhor representatividade de secas anômalas referenciadas para a área de estudo, mantendo a diferença entre as abordagens de medição.

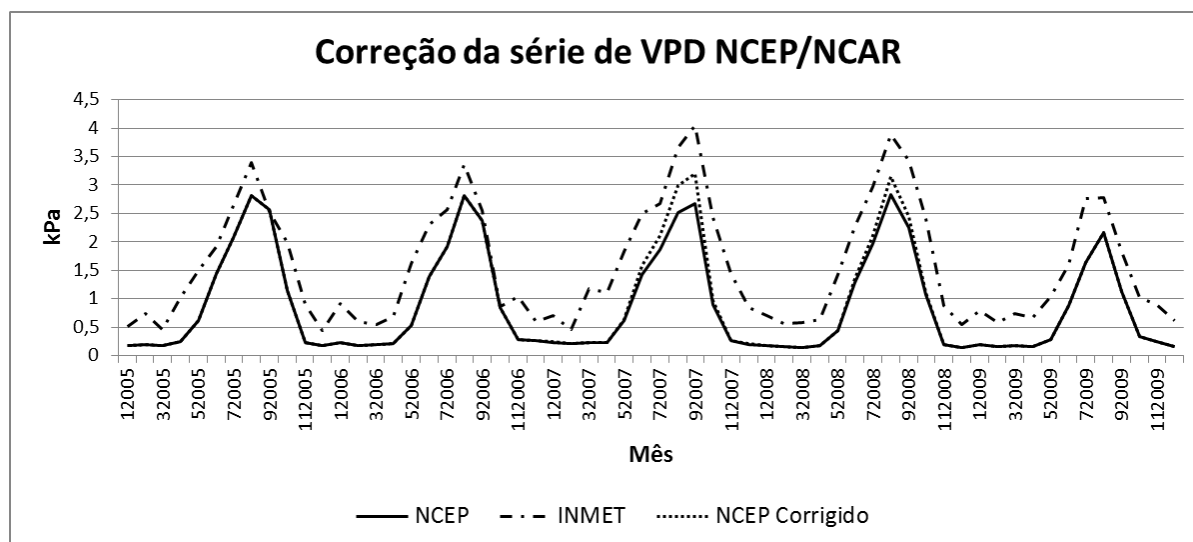


Figura S7: Correção da nova base climática adotada para o FISC. É apresentada a variação do déficit de pressão de vapor segundo produto de reanálise NCEP/NCAR antes e após correção, bem como conforme a estação de campo do INMET utilizada como referência para melhor representação de secas anômalas. Os anos de 2007 e 2008 foram corrigidos de forma a manter o desvio médio entre diferentes abordagens: reanálise e medição em campo.

Referências

BRANDO, P. M.; BALCH, J. K.; NEPSTAD, D. C.; et al. Abrupt increases in Amazonian tree mortality due to drought–fire interactions. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 111, n. 17, p. 6347–6352. doi: 10.1073/pnas.1305499111, 2014.

FARR, T. G.; ROSEN, P. A.; CARO, E.; et al. The Shuttle Radar Topography Mission. **Reviews of Geophysics**, v. 45, n. 2, p. RG2004. doi: 10.1029/2005RG000183, 2007.

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, n. 5, p. 908–924. doi: 10.1111/j.1529-8817.2003.00765.x, 2004.

IBGE. **Base Cartográfica Integrada do Brasil ao Milionésimo**. Technical Report, Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brazil: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Retrieved from http://www.ibge.gov.br/home/geociencias/cartografia/topo_doc3.shtm, 2005.

INPE. Projeto PRODES: Monitoramento da floresta Amazônica brasileira por satélite. **Perguntas Frequentes**. oficial, . Retrieved from <http://www.obt.inpe.br/prodes/index.php>, 2008.

INPE. Portal do Programa de Monitoramento de Queimadas e Incêndios, Perguntas Frequentes. **Monitoramento de Queimadas e Incêndios por satélite em tempo quase-real**. Website oficial, . Retrieved January 9, 2015, from <http://www.inpe.br/queimadas/faq.php>, 2011, June 22.

KALNAY, E.; KANAMITSU, M.; KISTLER, R.; et al. The NCEP/NCAR 40-Year Reanalysis Project. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 77, n. 3, p. 437–471. doi: 10.1175/1520-0477(1996)077<0437:TNYRP>2.0.CO;2, 1996.

SAATCHI, S. S.; HOUGHTON, R. A.; DOS SANTOS ALVALÁ, R. C.; SOARES, J. V.; YU, Y. Distribution of aboveground live biomass in the Amazon basin: AGLB IN THE AMAZON BASIN. **Global Change Biology**, v. 13, n. 4, p. 816–837. doi: 10.1111/j.1365-2486.2007.01323.x, 2007.

SOARES-FILHO, B.; MOUTINHO, P.; NEPSTAD, D.; et al. Role of Brazilian Amazon protected areas in climate change mitigation. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 107, n. 24, p. 10821–10826. doi: 10.1073/pnas.0913048107, 2010.