

UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO
INSTITUTO DE FLORESTAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS AMBIENTAIS E
FLORESTAIS

DISSERTAÇÃO

**VARIABILIDADE NO REGIME DE FOGO DA AMAZÔNIA
LEGAL BRASILEIRA DURANTE AS FASES DO ENOS**

Maria Lucia Ferreira Barbosa

2020



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO
INSTITUTO DE FLORESTAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS
AMBIENTAIS E FLORESTAIS



VARIABILIDADE NO REGIME DE FOGO DA AMAZÔNIA LEGAL BRASILEIRA DURANTE AS FASES DO ENOS

Maria Lucia Ferreira Barbosa

Sob a Orientação do Professor

Dr. Rafael Coll Delgado

Dissertação submetida como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Ciências Ambientais e Florestais, no Curso de Pós-graduação em Ciências Ambientais e Florestais, Área de Concentração em Conservação da Natureza

Seropédica, RJ

Fevereiro de 2020

F238 Ferreira Barbosa, Maria Lucia , 1992-
VARIABILIDADE NO REGIME DE FOGO DA AMAZÔNIA LEGAL
BRASILEIRA DURANTE AS FASES DO ENOS / Maria Lucia
Ferreira Barbosa. - São Gonçalo, 2020.
84 f.: il.

Orientador: Rafael Coll Delgado.
Dissertação (Mestrado). -- Universidade Federal Rural
do Rio de Janeiro, Pós-Graduação em Ciências Ambientais
e Florestais, 2020.

1. Amazônia. 2. Sensoriamento Remoto. 3. Mudanças
Climáticas. 4. Fogo. I. Coll Delgado, Rafael , 1978-,
orient. II Universidade Federal Rural do Rio de
Janeiro. Pós-Graduação em Ciências Ambientais e
Florestais III. Título.

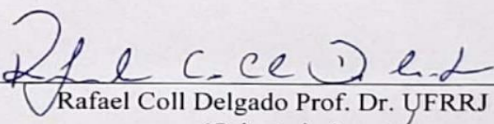
O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001. This study was financed in part by the Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Finance Code 001.

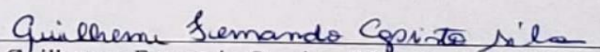
UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO
INSTITUTO DE FLORESTAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS AMBIENTAIS E FLORESTAIS

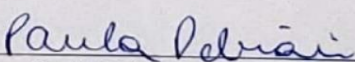
MARIA LUCIA FERREIRA BARBOSA

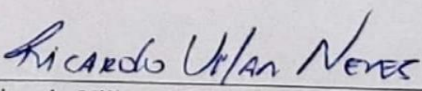
Dissertação submetida como requisito parcial para obtenção do grau de Mestra em Ciências Ambientais e Florestais no curso de Pós-Graduação em Ciências Ambientais e Florestais, área de concentração Conservação da Natureza

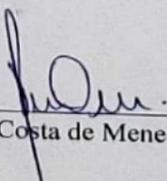
Dissertação aprovada em 19/02/2020


Rafael Coll Delgado Prof. Dr. UFRRJ
(Orientador)


Guilherme Fernando Capristo Silva Prof. Dr. UFMT


Paula Debiasi Prof. Dr. UFRJ


Ricardo Villar Neves Prof. Dr. UFRRJ


Sady Junior Martins Costa de Menezes Prof. Dr. UFRRJ

DEDICATÓRIA

À minha mãe Jamile Lessa Ferreira

Dedico.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradeço a orientação do professor Rafael Coll Delgado, que muito me inspira. Sem seus conselhos, cobranças e compreensão não teria chegado até aqui. Muito obrigada!

À minha mãe por sempre me apoiar, mesmo, às vezes, sem entender muito o que eu faço. Amo você!

À Valério de Holanda Macedo, meu companheiro nessa vida, por toda força, por sempre me apoiar, por me aguentar em meus momentos de estresse, pela ajuda com minhas planilhas, por todo conhecimento que sempre agrega. Amo muito você!

Aos amigos Gabriel, Jorge, Marcella e Rafaela pela amizade e por tantos momentos de alegria.

À Caio Frossard de Andrade pela amizade, pela parceria nos trabalhos, pelos scripts no R, e por todas as outras vezes em que me ajudou.

À Raquel Oliveira pela amizade, conversas, risadas, por me receber tantas vezes em Seropédica, pelos jantares lights, por toda ajuda. Te adoro!

A todos os outros colegas do LSRACA pelas parcerias e profissionalismo.

Aos professores Marcel Carvalho Abreu e Henderson Wanderley pelas considerações iniciais no projeto de pesquisa.

Aos membros da banca, Ricardo Vilar Neves, Paula Debiase, Sady Júnior Martins Costa de Menezes e Guilherme Fernando Capristo Silva pelas importantes contribuições.

Agradeço ao PPGCAF/UFRRJ pela formação, assim como a CAPES pela bolsa de mestrado.

RESUMO

Barbosa, M. L. F. B. Variabilidade no regime de fogo da Amazônia Legal brasileira durante as fases do ENOS, 2020. 83p. Dissertação (Mestrado em Ciências Ambientais e Florestais) Instituto de Florestas, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, RJ, 2020.

A Amazônia Legal brasileira é um extenso território (5,088,668.25 km²) em que diferentes fatores (ambientais e sociais) influenciam na dinâmica de fogo da região. O objetivo geral deste estudo é entender os efeitos do fenômeno El Niño - Oscilação Sul (ENOS), no clima e no regime de fogo da Amazônia legal brasileira. Para isso, utilizou-se dados de focos de calor e área queimada obtidos pelo sensor *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer* e variáveis meteorológicas provenientes de reanálise. Foi aplicado a densidade kernel aos focos de calor, coeficiente de correlação de Spearman entre os focos e as demais variáveis (focos de calor, área queimada, emissões de carbono, evapotranspiração, velocidade zonal do vento, umidade relativa do ar, chuvas, umidade do solo, temperatura máxima, temperatura mínima e temperatura média do ar) e teste de Mann Kendall para as culturas agrícolas: soja, milho e cana-de-açúcar. Os anos considerados de La Niña foram os que apresentaram maior número de focos de calor, área queimada e emissões de carbono. Nossos resultados demonstram que mesmo em períodos considerados de baixo risco de fogo, as florestas podem estar vulneráveis aos incêndios devido a interação com outras variáveis. Além disso, verificamos tendência de aumento de área plantada de soja, milho e cana-de-açúcar que, sem o apoio de políticas públicas, pode acarretar em mais áreas desmatadas na região. A incerteza do comportamento da Amazônia Legal perante as mudanças climáticas destaca a importância de estudos que englobem diversos fatores como este.

Palavras-chave: Floresta Amazônica, Soja, Incêndios Florestais, Mudanças Climáticas, Uso do solo.

Abstract

Barbosa, M. L. F. B. Variability in the fire regime of the Brazilian Legal Amazon during ENSO phases, 2020. 83p. Dissertation (Master of Environmental Science and Forestry) Instituto de Florestas, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, RJ, 2020.

The Brazilian Legal Amazon is a large territory (5,088,668.25 km²) in which different factors (environmental and social) influence the fire dynamics of the region. The general aim of this study is to understand the effects of the El Niño - Southern Oscillation (ENSO) phenomenon on the climate and fire regime of the Brazilian legal Amazon. For this, we used data of fire foci and burned area obtained by the Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer sensor and meteorological variables from reanalysis. Kernel density was applied to fire foci, Spearman correlation coefficient between the fire foci and other variables (burned area, fire carbon emissions, evapotranspiration, wind speed, relative humidity, rainfall, soil moisture, maximum temperature, minimum temperature and average air temperature) and Mann Kendall test for agricultural crops: soybean, maize and sugarcane. La Niña's years were those with the highest number of fire foci, burned area and carbon emissions. Our results demonstrate that even at periods considered of low fire risk, forests can be vulnerable to fire due to interaction with other variables. In addition, there is a tendency for soybean, corn and sugarcane planted areas to increase, which, without the support of public policies, may lead to more deforested areas in the

region. The uncertainty of the behavior of the Legal Amazon in the face of climate change highlights the importance of studies that encompass several factors such as this one.

Keywords: Amazon Forest, Soybean, Wildfire, Climate Change, Land use.

Sumário

LISTA DE FIGURAS	xi
LISTA DE TABELAS	xiv
1 INTRODUÇÃO	15
2 OBJETIVOS	16
2.1 Objetivo geral	16
2.2 Objetivos específicos	16
3 REVISÃO DE LITERATURA	16
3.1 Amazônia legal	16
3.2 El Niño-Oscilação Sul (ENOS)	18
3.3 Sensor MODIS	19
3.4 Densidade kernel	20
4 MATERIAL E MÉTODOS	20
4.1 Caracterização da área de estudo	20
4.2 Período de estudo	23
4.3 Base de dados	24
4.3.1 Produtos de Sensoriamento Remoto	24
4.3.2 Dados meteorológicos	25
4.4 Processamento dos dados	26
4.4.1 Estatística descritiva	26
4.4.2 Coeficiente de correlação de Spearman e teste de Mann-Kendall	26
4.3.2 Densidade Kernel	27
5 RESULTADOS	27
5.1 Focos de calor e área queimada	27
5.2 Variáveis meteorológicas	32
5.3 Circulação atmosférica e Densidade Kernel	42
5.4 Correlação de Spearman	54

5.5 Teste de Mann-Kendall	57
6 DISCUSSÃO	60
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	64

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Localização geográfica da Amazônia Legal	21
Figura 2. Climatologia na Amazônia Legal das variáveis: evapotranspiração (mm), velocidade zonal do vento (m.s-1), umidade relativa do ar (%), chuvas (mm), umidade do solo (mm), temperatura máxima (°C), temperatura mínima (°C) e temperatura média (°C).....	22
Figura 3. Mapa altimétrico da Amazônia Legal (esquerda) e mapa dos biomas da Amazônia legal (direita).....	23
Figura 4. Número de focos de calor, por estado, dos anos estudados.....	30
Figura 5. Número de focos de calor, por classe de vegetação, dos anos estudados.....	31
Figura 6. Densidade de focos de calor (focos.km-2) por classe de vegetação.....	32
Figura 7. Desmatamento da Amazônia Legal, por estado, no período entre 2004 a 2019.....	33
Figura 8. Emissões de Carbono (Tg) oriundos de incêndios para o período de estudo...34	
Figura 9. Análise boxplot da variável velocidade zonal do vento (m s-1) para o período estudado.....	36
Figura 10. Análise boxplot da variável temperatura mínima do ar (°C) para o período estudado.....	37
Figura 11. Análise boxplot para a variável temperatura máxima do ar (°C) para o período estudado.....	38
Figura 12. Análise boxplot para a variável temperatura média do ar (°C) para o período estudado.....	39
Figura 13. Análise boxplot para a variável água no solo (mm) para o período estudado.....	40
Figura 14. Análise boxplot da variável umidade relativa do ar (%) para o período estudado.....	41
Figura 15. Análise boxplot da variável chuva (mm) para o período estudado.....	42
Figura 16. Análise boxplot da variável evapotranspiração para o período estudado.....	43

Figura 17. Anomalias positivas e negativas da variável chuvas (mm) no período estudado.....	45
Figura 18. Anomalias positivas e negativas da variável temperatura média do ar (°C) no período estudado.....	46
Figura 19. Densidade kernel (acima a esquerda), anomalia da temperatura da superfície do mar (°C) (acima a direita), pressão atmosférica a 1000mb (mb) (abaixo a esquerda), correntes de vento (abaixo no centro) e vetores de ventos (abaixo a direita) para fevereiro e setembro de 2015.....	48
Figura 20. Densidade kernel (acima a esquerda), anomalia da temperatura da superfície do mar (°C) (acima a direita), pressão atmosférica a 1000mb (mb) (abaixo a esquerda), correntes de vento (abaixo no centro) e vetores de ventos (abaixo a direita) para fevereiro de 2010 e setembro de 2009 (El Niño).....	50
Figura 21. Densidade kernel (acima a esquerda), anomalia da temperatura da superfície do mar (°C) (acima a direita), pressão atmosférica a 1000mb (mb) (abaixo a esquerda), correntes de vento (abaixo no centro) e vetores de ventos (abaixo a direita) para fevereiro de 2011 e setembro de 2010 (La Niña).....	52
Figura 22. Densidade kernel (acima a esquerda), anomalia da temperatura da superfície do mar (°C) (acima a direita), pressão atmosférica a 1000mb (mb) (abaixo a esquerda), correntes de vento (abaixo no centro) e vetores de ventos (abaixo a direita) para fevereiro de 2008 e setembro de 2007 (La Niña).....	54
Figura 23. Densidade kernel (acima a esquerda), anomalia da temperatura da superfície do mar (°C) (acima a direita), pressão atmosférica a 1000 mb (mb) (abaixo a esquerda), correntes de vento (abaixo no centro) e vetores de ventos (abaixo a direita) para fevereiro de 2004 e setembro de 2003 (neutralidade).....	56
Figura 24. Densidade kernel (acima a esquerda), anomalia da temperatura da superfície do mar (°C) (acima a direita), pressão atmosférica a 1000 mb (mb) (abaixo a esquerda), correntes de vento (abaixo no centro) e vetores de ventos (abaixo a direita) para fevereiro e setembro de 2013 (neutralidade).....	58
Figura 25. Coeficientes de correlação de Spearman nos anos de El Niño, 2009/2010 (a esquerda) e 2015 (a direita), entre as variáveis chuva (Rain), umidade relativa do ar (RH), umidade do solo (soilw), emissões de carbono (FE), área queimada (BA), focos de calor (FF), temperatura máxima do ar (Tmax), temperatura mínima do ar (Tmin), temperatura média do ar (Tmean), velocidade zonal do vento (wind) e evapotranspiração (Eto).....	60
Figura 26. Coeficientes de correlação de Spearman nos anos de La Niña, 2007/2008 (a esquerda) e 2010/2011 (a direita), entre as variáveis chuva (Rain), umidade relativa do ar (RH), umidade do solo (soilw), emissões de carbono (FE), área queimada (BA), focos de calor (FF), temperatura máxima do ar (Tmax), temperatura mínima do ar (Tmin), temperatura média do ar (Tmean), velocidade zonal do vento (wind) e evapotranspiração (Eto).....	61
Figura 27. Coeficientes de correlação de Spearman nos anos de neutralidade, 2003/2004 (a esquerda) e 2013 (a direita), entre as variáveis chuva (Rain), umidade relativa do ar	

(RH), umidade do solo (soilw), emissões de carbono (FE), área queimada (BA), focos de calor (FF), temperatura máxima do ar (Tmax), temperatura mínima do ar (Tmin), temperatura média do ar (Tmean), velocidade zonal do vento (wind) e evapotranspiração (Eto).....62

Figura 28. Área colhida de milho entre os anos de 1990 e 2018, por estado, na Amazônia Legal Brasileira.....63

Figura 29. Área colhida de soja entre os anos de 1990 e 2018, por estado, na Amazônia Legal Brasileira.....64

Figura 30. Área colhida de cana-de-açúcar entre os anos de 1990 e 2018, por estado, na Amazônia Legal Brasileira.....65

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Estados pertencentes a Amazônia legal e suas áreas em km ²	21
Tabela 2. Classes de vegetação em área (km ²) e em porcentagem (%)	23
Tabela 3. Eventos de El Niño e La Niña no período entre 1979 e 2016 incluindo os valores máximos e mínimos do ONI e a intensidade (categoria) de cada evento.....	24
Tabela 4. Tamanho mensal, em km ² , média e coeficiente de variação (%) da área queimada durante o período estudado.....	32
Tabela 5: Resultados do teste Mann-Kendall ($\alpha= 5\%$) para as culturas cana-de-açúcar, milho e soja nos estados da Amazônia Legal para o período entre 1990 e 2018.....	65

1 INTRODUÇÃO

No contexto das mudanças climáticas, a Amazônia Legal, é uma região de grande importância global. A região fornece umidade para o Centro, Sul e Sudeste do Brasil, assim como para o norte da Argentina, influenciando na incidência de chuvas nessas regiões (CORREIA et al., 2007; ARRAUT & SATYAMURTY, 2009). Logo, a necessidade de entender a dinâmica da região e promover sua proteção ambiental é inquestionável.

Um problema em particular é a possibilidade, cada vez maior, de que partes da Amazônia não consigam manter-se e passem por um processo de savanização (MALHI et al., 2009; PIRES & COSTA, 2013; VALE & PIRES, 2018). Guan et al. (2015), evidenciaram que abaixo de 2000 mm de chuvas anuais, as florestas tropicais podem não realizar fotossíntese durante todo o ano e também podem se recuperar mais lentamente de eventuais distúrbios. Dessa forma, eventos extremos de seca podem favorecer a retração de florestas e posteriormente o estabelecimento de um estado de savana mantido pela incidência de fogo.

A variabilidade na temperatura e precipitação da Amazônia pode estar associada a anomalias positivas da temperatura da superfície do mar (El Niño) (DE LINAGE et al., 2014; MARENGO & ESPINOZA, 2016) e uma de suas principais consequências são as estações secas severas e prolongadas cada vez mais recorrentes (LEWIS et al., 2011). As secas podem ser relacionadas, também, a anomalias da temperatura da superfície do oceano atlântico tropical do Norte associadas à Oscilação Multidecadal do Atlântico (GOOD et al., 2008). Além disso, anomalias negativas na temperatura da superfície do mar (La Niña) estão ligadas ao aumento de chuvas e, em consequência, enchentes na região (MARENGO & ESPINOZA, 2016).

Enchentes causam altos impactos nos ecossistemas e nas atividades socioeconômicas, como pesca e agricultura, das populações locais (OVANDO et al., 2016). Já dentre as consequências das secas pode-se citar a diminuição do nível dos rios e impacto na saúde humana, ligado principalmente a fumaça provocada pelo aumento na incidência de incêndios florestais (FERNANDES et al., 2011).

Os incêndios florestais ocorrem em resposta aos eventos de seca, desmatamento e uso em atividades agrícolas. Da Silva et al. (2018) estudaram a dinâmica do fogo no Acre em um período de 33 anos (1984-2016) e encontraram nos últimos 12 anos a maior frequência de cicatrizes de fogo em que 95% da área total queimada ocorreu em períodos de seca extrema. Em Roraima, foram relacionados aos eventos extremos climáticos os incêndios florestais ocorridos de 2000 a 2010 (BARNI et al., 2015). Ainda, Lazzarini et al. (2012), analisaram a distribuição de focos de calor no Tocantins no período de 2002 a 2011 e encontraram a maior concentração de focos de calor na vegetação nativa do Cerrado em anos de seca.

O uso de técnicas de sensoriamento remoto tem se mostrado uma alternativa eficaz no monitoramento do fogo pois permite o controle de grandes áreas ao longo do tempo. Tomzhinski et al. (2011) destacaram a utilização e importância do sensoriamento remoto para dois órgãos federais ligados à prevenção e combate de incêndios no Brasil, o Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade (ICMBio) e o Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA).

Estudos sobre o regime de fogo na Amazônia Legal são importantes para a melhor compreensão dos impactos sobre a biodiversidade da região e suas funções ecológicas,

como o estoque de carbono. É importante, ainda, para auxiliar estudos a respeito do potencial de regeneração das florestas em vista dos incêndios cada vez mais recorrentes. Além disso, um planejamento eficaz de controle e combate de incêndios dependem desse tipo de informação. Dessa forma, o estudo é importante ao subsidiar informações a sociedade e aos órgãos responsáveis que ajudem na manutenção das florestas a longo prazo.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

O objetivo geral do presente trabalho é entender os efeitos do fenômeno El Niño - Oscilação Sul (ENOS), no clima e no regime de fogo da Amazônia legal brasileira.

2.2 Objetivos específicos

- **Explicitar** a relação entre o fenômeno ENOS, a variabilidade climática e o regime de fogo na Amazônia legal;
- **Compreender** como a expansão agrícola e as políticas públicas podem influenciar na dinâmica de fogo da Amazônia Legal;
- **Identificar** a(s) classe(s) de cobertura vegetal que mais sofrem com a ocorrência de focos de calor e/ou fogo;
- **Gerar** informações que subsidiem os órgãos locais na distinção de áreas prioritárias para o monitoramento e controle de incêndios na Amazônia Legal.

3 REVISÃO DE LITERATURA

3.1 Amazônia legal

A região da Amazônia Legal compreende em sua extensão 43,9% de áreas protegidas em que, de acordo com o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), até dezembro de 2010, 22,2% das áreas eram referentes as unidades de conservação e 21,7% por terras indígenas. Apesar da alta representatividade de áreas protegidas, foram desmatados até o ano de 2015, 776.671 km² da região (IBGE, 2017).

Sestini et al. (2002) elaboraram mapas de vegetação para a Amazônia legal utilizando dados de mapas digitais do projeto Radar da Amazônia (RADAM), do IBGE, dados temáticos de desflorestamento provenientes do Projeto de Estimativa do Desflorestamento da Amazônia (PRODES) da Coordenação-Geral de Observação da Terra do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (OBT/INPE) e imagens de alta resolução espacial. O mapa gerado apresentou 37 classes de vegetação para a Amazônia legal (Quadro 1). Ainda, Almeida et al. (2010) realizaram uma estimativa da área de vegetação secundária na Amazônia Legal Brasileira para o ano de 2006 encontrando uma estimativa de 131,873km² de vegetação secundária.

Quadro 1. Classes de vegetação da Amazônia Legal. Fonte: Sestini et al. (2002)

Classes de vegetação	Área (km ² e %)	
Floresta Ombrófila Aberta com agricultura	88079	1,77
Área de tensão ecológica (contato indefinido) com agricultura	3106	0,06
Floresta Ombrófila Aberta terras baixas	367395	7,39
Floresta Ombrófila Aberta Submontana	541516	10,90

Floresta Estacional Decidual Submontana com agricultura	23780	0,47
Floresta Estacional Decidual Submontana	8634	0,17
Floresta Ombrófila Densa com agricultura	200052	4,02
Floresta Ombrófila Densa Aluvial	254790	5,12
Floresta Ombrófila Densa Terras Baixas	826092	16,63
Floresta Ombrófila Densa Montana	37828	0,76
Floresta Ombrófila Densa Submontana	817083	16,45
Floresta Estacional Semidecidual com vegetação secundária com atividades agrícolas	30598	0,61
Floresta Estacional Semidecidual aluvial	3642	0,07
Floresta Estacional Semidecidual Submontana	36286	0,73
Campinarana Arborizada	16352	0,32
Campinarana Florestada	48121	0,96
Campinarana Gramíneo Lenhosa	18567	0,37
Contato Campinarana/Floresta Ombrófila	190351	3,83
Contato Floresta Ombrófila/Floresta Estacional	192134	3,86
Contato Flor. Omb./Floresta Estacional com agricultura	12884	0,25
Formação Pioneira com agricultura	11180	0,22
Formação Pioneira vegetação com influência fluvial ou lacustre	84184	1,69
Form. P. vegetação com influência Fluviomarinha (manguezal e Campo Salino)	7232	0,14
Refúgio montano	356	0,007
Savana com área agrícola	124245	2,50
Savana Arborizada	361003	7,26
Savana Florestada	29428	0,59
Savana Gramíneo Lenhosa	32786	0,66
Contato Savana/Floresta Ombrófila Mista	463	0,009
Contato Savana/Floresta Estacional	199574	4,01
Contato Savana/Floresta Estacional com agricultura	28747	0,57
Contato Savana/Floresta Ombrófila	146354	2,94
Contato Savana/Floresta Ombrófila com agricultura	16591	0,33
Savana Parque	184143	3,70
Contato Savana/Savana estépica	6731	0,13
Savana Estépica Florestada	6063	0,12
Savana Estépica Parque	10522	0,2

De acordo com Wang et al. (2011), a dinâmica da vegetação Amazônica contribuí para a variabilidade multi-decadal das chuvas na região pois a variabilidade da vegetação ano-a-ano causa aumento ou diminuição das chuvas causando recorrência de secas ou enchentes. Além disso, Hilker et al. (2014) estudaram a sensibilidade da vegetação na Amazônia aos padrões de chuvas e encontraram redução na cobertura vegetal associado a diminuição das chuvas a partir do ano 2000.

Almeida et al. (2017) analisaram a variabilidade espaço-temporal das tendências de chuvas e temperatura em 47 estações meteorológicas na Amazônia legal para o período de 1973-2013 e encontraram uma tendência no aumento da temperatura anual máxima e mínima para a maioria das estações. Já para o regime de chuvas, a maioria das estações não apresentou tendência de aumento ou diminuição para esse período. Villar et al. (2009) e Lopes et al. (2013) encontraram alta variabilidade espacial nas chuvas na região Amazônica devido a ocorrência ou não de diferentes sistemas meteorológicos em diferentes escalas.

Diversos são os fatores que atuam no regime de chuvas da região amazônica. A variação na Temperatura da do Mar (TSM) nos oceanos Atlântico e Pacífico é um desses fatores (ANDREOLI et al., 2012). Em algumas regiões da Amazônia, a redução nas chuvas em anos de seca extrema é associada com a ocorrência do El Niño enquanto que o aumento nas chuvas em alguns anos é associado a La Niña. Além disso, o aquecimento anormal das águas do oceano Atlântico Norte também está ligado a eventos de seca, como a grande seca ocorrida em 2005 na região (ZENG et al., 2008; BARBOSA et al., 2018).

Eventos de seca estão ligados a um aumento na incidência de fogo enquanto que o aumento no regime de chuvas pode causar inundações na região amazônica (MARENGO & SPINOZA, 2016). Aragão et al. (2018) examinaram os impactos das secas na incidência de fogo na Amazônia para o período de 2003-2015 e mostraram que, apesar da diminuição do desmatamento na região, a incidência de fogo durante a seca de 2015 foi 36% maior quando comparado aos 12 anos anteriores.

3.2 El Niño-Oscilação Sul (ENOS)

O fenômeno natural El Niño-Oscilação Sul (ENOS) representa, de forma geral, a interação atmosfera-oceano, relacionado a anomalias na Temperatura da Superfície do Mar (TSM) e dos ventos alísios na região do pacífico equatorial (MC PHADEN, 2006). Em relação a TSM, as anomalias podem ser positivas (El Niño) em que ocorre um aquecimento anormal das águas do pacífico ou negativas (La Niña) em que ocorre um resfriamento anormal das águas do pacífico. De acordo com o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), a caracterização desses fenômenos é feita por meio de índices: o índice de Oscilação-Sul (IOS) que é calculado através da diferença de pressão ao nível do mar entre o Pacífico Central (Taiti) e o Pacífico do Oeste (Darwin/Austrália) e os índices nomeados Niño (Niño 1+2, Niño 3, Niño 3.4 e Niño 4) que representam as anomalias nas médias da TSM em diferentes regiões do Pacífico equatorial.

As consequências do ENOS geram impactos globais de grande importância a sociedade. Berlato et al. (2005) associaram a produtividade de milho com o ENOS e encontraram forte tendência do El Niño em favorecer a produção do milho enquanto que a ocorrência de La Niña foi associada a baixa produtividade. Miralles et al. (2014) estudaram as tendências na evaporação continental associado aos eventos de El Niño e La Niña e concluíram que numa escala global, durante eventos de El Niño ocorre uma limitação no suprimento de umidade e consequente estresse hídrico a vegetação resultando em redução na evaporação na Austrália central e oriental, sul da África e na América do Sul oriental.

De acordo com dados do INPE, os anos de 2007/2008 foram caracterizados pela ocorrência de La Niña de intensidade forte. Esse período foi caracterizado por uma seca anormal na região sul do Brasil, aumento nas chuvas da região nordeste e temperaturas mais altas na Amazônia (PETERSON & BARINGER, 2009). Brando et al. (2014), encontraram um aumento na mortalidade de árvores na Amazônia causados pela interação

entre a seca ocorrida em 2007 e o fogo na região. Além disso, avaliaram a precipitação no Xingu para o período de 2000 e 2010 encontrando os menores níveis de precipitação para o ano de 2007.

O ano de 2015 foi caracterizado pela ocorrência de El Niño e superou as anomalias de aquecimento observadas nos grandes eventos de seca dos últimos anos, por exemplo 2005 e 2010 (JIMÉNEZ-MUÑOZ et al., 2016). Ionita et al. (2017), estudaram, sob um ponto de vista climatológico, o verão de 2015 na Europa e relataram a ocorrência da pior seca na região desde 2003. Na Indonésia, Field et al. (2016) avaliaram a magnitude da seca no ano de 2015 associado a uma relação não linear a ocorrência de El Niño e encontraram a maior temporada de fogo e de poluição por fumaça registrada nos anos 2000. Caminade et al. (2017) estudaram a relação entre a proliferação dos vetores do zika vírus e a ocorrência do El Niño em 2015. Encontraram para esse ano o maior risco de transmissão na América do Sul desde 1950 em que esse alto risco está relacionado as altas temperaturas registradas que propiciam altas taxas de mordida e baixa mortalidade entre os mosquitos.

3.3 Sensor MODIS

O sensor MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*) está a bordo dos satélites TERRA e AQUA e possui ampla utilização no Brasil e no mundo. Este sensor opera em 36 bandas espectrais em comprimentos de onda que variam de 0,4 a 14,4 μm e resolução radiométrica de 12 bits. Além disso, as resoluções espaciais variam de acordo com as faixas espectrais que possuem valores de 250 (bandas 1 e 2), 500 (bandas 3 a 7) e 1000 (bandas 8 a 36) metros (NASA, 2018).

Diversos estudos foram feitos a fim de corroborar a qualidade das informações provenientes do MODIS, como por exemplo, Dos Santos et al. (2013) que encontraram dados consistentes na estimativa do saldo de radiação para floresta e pastagem no estado de Rondônia quando comparados aos dados obtidos em torres meteorológicas. E ainda, De Araújo & Ferreira (2015) que avaliaram a performance do produto de área queimada do MODIS no Cerrado e concluíram que o produto é indicado para mapear e entender o comportamento do fogo e seus impactos na região.

Os produtos obtidos pelo MODIS são utilizados para diferentes fins, dentre eles deve-se observar o grande uso no monitoramento e estudos sobre focos de incêndios e área queimada. Tian et al. (2013) utilizaram dados que incluíram o sensor MODIS para analisar as características de distribuição de focos de incêndio no período de 2008-2012 na China. Ressler et al. (2009) demonstraram a importância e utilização de imagens do sensor MODIS no monitoramento em tempo quase real de focos de incêndio em áreas de proteção ambiental no México.

O produto de área queimada do MODIS (MCD64A1) permite a estação receptora processar os dados recebidos em tempo quase real e tem sido usado para estimar as emissões globais causadas por fogo pelo modelo GFED3 (*Global Fire Emissions Database*) (VAN DER WERF et al., 2010). Além disso, o produto é usado para monitorar a propagação e cicatrizes de fogo pelo Serviço Florestal dos Estados Unidos (HAO & LARKIN, 2014). De acordo com Giglio et al. (2013), o MCD64A1 é mais aprimorado do que o produto anterior pois consegue registrar fogo em áreas menores e utiliza dados de reflectância da superfície diários para caracterizar áreas queimadas.

Ruiz et al. (2013), fizeram uma comparação entre os produtos MCD45A1, MCD64A1 e BA GEOLAND-2 no mapeamento de área queimada da floresta boreal

Norte Americana e encontraram os melhores resultados para o produto MCD64A1. Chen et al., (2017) utilizaram o produto de área queimada do MODIS para mapear o regime de fogo na China e, ainda, Rogers et al. (2015), utilizaram o produto MCD64A1 para avaliar as diferenças na dinâmica de fogo entre a América do Norte e Eurásia.

3.4 Densidade kernel

Interpolação é um método que pode ser usado a fim de prever valores de atributos em áreas não amostradas a partir de um conjunto de dados discretos. Dessa forma, pode-se converter dados pontuais em campos contínuos (BURROUGH & MCDONNEL, 1998). Diversas são as técnicas usadas para este fim, dentre eles, a estimativa da densidade de kernel.

A estimativa da densidade de kernel, é um método estatístico não-paramétrico que é útil no estabelecimento de padrões de ocorrência de incêndios espaciais em nível de paisagem (KOUTSIAS et al., 2004) pois converte os pontos de ignição de incêndios em superfícies de densidade contínua. A imprecisão de localização associada aos registros de incêndios torna necessária a transformação em dados contínuos.

Diversos estudos utilizam a densidade kernel para estimar a densidade de eventos de fogo (AMATULLI et al., 2007; KOUTSIAS et al., 2014; DOS SANTOS et al., 2017; BARBOSA et al., 2018). Boer et al. (2009), analisaram o histórico de fogo de 52 anos de uma região de floresta de eucalipto no sudoeste da Austrália para quantificar o impacto da queima controlada na incidência, extensão e distribuição de incêndios florestais. Foi utilizado a densidade kernel para gerar um mapeamento de risco relativo que ajudaram a identificar períodos nos quais a incidência de incêndios não planejados de tamanhos específicos se desviou significativamente das frequências médias de longo prazo para a região.

Oliveira et al. (2012) compararam os resultados da aplicação de dois diferentes métodos usados para identificar os principais fatores estruturais que explicam a probabilidade de ocorrência de incêndios à escala Europeia. Eles utilizaram a densidade kernel para diminuir os problemas de imprecisão associados a localização exata de eventos de fogo nos dados registrados.

4 MATERIAL E MÉTODOS

4.1 Caracterização da área de estudo

A área de estudo compreende toda a Amazônia Legal e sua localização geográfica se encontra na Figura 1. A Amazônia legal foi instituída pela Lei nº 5.173, de 27 de outubro de 1966, que criou a Superintendência do Desenvolvimento da Amazônia (SUDAM) e de acordo com o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) possui uma área de 5.020.000 km² correspondente a cerca de 59% do território nacional. Ainda segundo o IBGE, a região corresponde à área dos Estados da Região Norte (Acre, Amapá, Amazonas, Pará, Rondônia, Roraima e Tocantins), mais o Estado do Mato Grosso e dos municípios do Estado do Maranhão localizados a Oeste do meridiano 44° (Tabela 1). Além disso, a Amazônia Legal abrange quatro biomas (Figura 3): Amazônia, Cerrado, Pantanal e um pequena área de Caatinga.

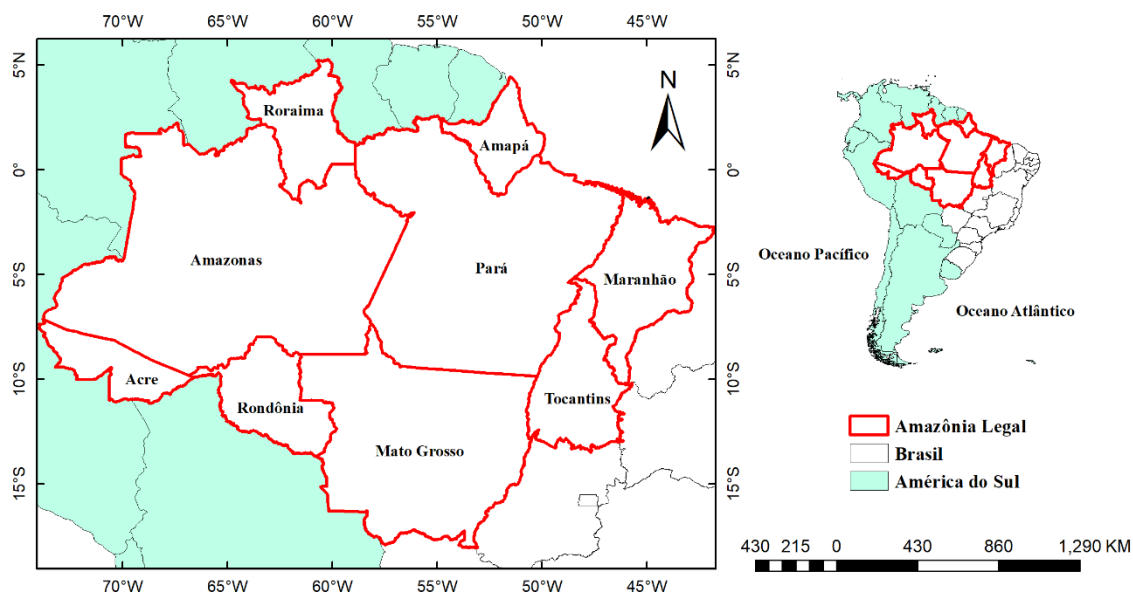


Figura 1. Localização geográfica da Amazônia Legal

Tabela 1. Estados pertencentes a Amazônia legal e suas áreas em km².

Estado	Sigla	Área (km ²)
Rondônia	RO	237,576.17
Acre	AC	152,581.39
Amapá	AP	142,814.59
Amazonas	AM	1,570,745.68
Tocantins	TO	277,620.91
Maranhão	MA	331,983.29
Mato Grosso	MT	903,357.72
Roraima	RR	224,298.98
Pará	PA	1,247,689.52
Total		5,088,668.25

De acordo com a classificação de Köppen, atualizada por Alvares et al. (2013), o clima da Amazônia Legal é do tipo "A" e se divide em quatro subclimas: tropical de monção ("Am"), tropical seco e úmido ("Aw"), equatorial chuvoso ("Af") e tropical quente e úmido ("AS").

De acordo com a climatologia da região (Figura 2), a temperatura média do ar tem seu pico nos meses de setembro (28,81°C) e outubro (28,97°C) e variação aproximada entre 24°C e 29°C. A temperatura máxima atinge seu pico em setembro (35,17°C) e seu menor valor em janeiro (30,27°C). Já a temperatura mínima atinge seus maiores valores nos meses chuvosos, entre outubro e abril, em que a partir de abril a temperatura passa a cair e atinge seu valor mínimo em julho (18,86°C). O regime de chuvas compreende meses em que chove abaixo de 100 mm (julho, agosto e setembro) e meses acima de 300mm (janeiro, fevereiro e março). O volume anual de chuvas varia de 1500mm na porção Sul até 3000mm no Norte da Amazônia Legal.

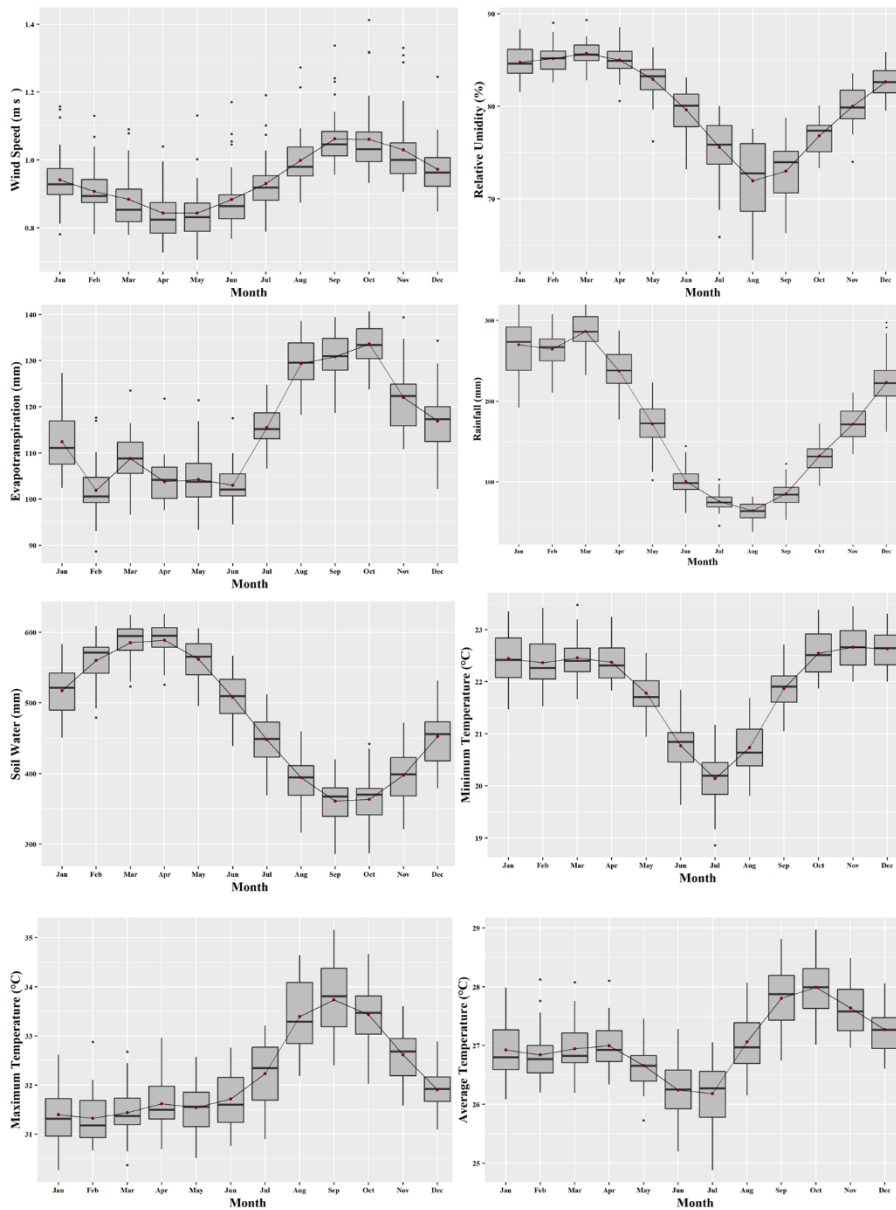


Figura 2. Climatologia na Amazônia Legal das variáveis: evapotranspiração (mm), velocidade zonal do vento (m.s-1), umidade relativa do ar (%), chuvas (mm), umidade do solo (mm), temperatura máxima (°C), temperatura mínima (°C) e temperatura média (°C).

A altitude na região é, em sua maioria, de baixa altitude devido as planícies fluviais dos rios Amazonas e Araguaia. Há também presença de planaltos e depressões e a variação vai de -71 a 2696m (Figura 3).

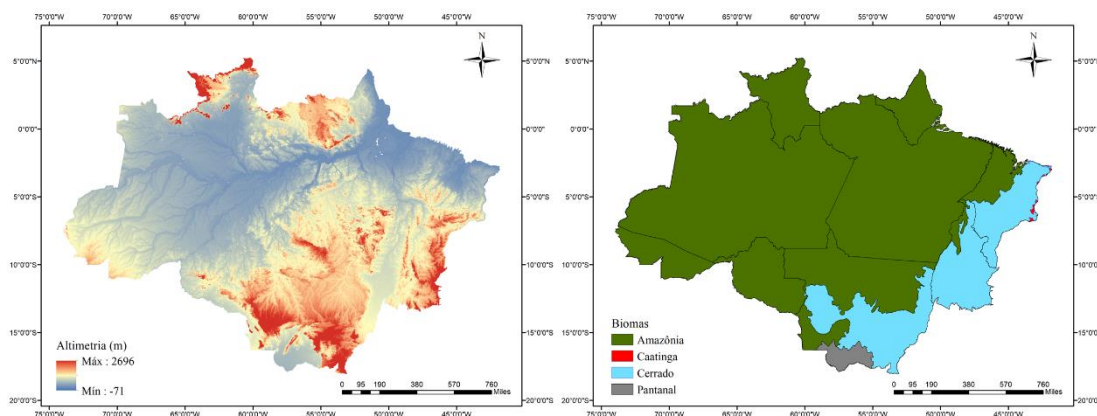


Figura 3. Mapa altimétrico da Amazônia Legal (esquerda) e mapa dos biomas da Amazônia legal (direita).

Na Tabela 2 estão descritas as principais classes de vegetação encontradas na Amazônia Legal com uma sigla atribuída a cada classe e suas respectivas áreas em km² e em porcentagem (%)

Tabela 2. Classes de vegetação em área (km²) e em porcentagem (%).

Classe de vegetação	Sigla	Área (km ²)	Área (%)
Floresta ombrófila aberta	A	976.068,5	19,20
Floresta estacional	B	275.833,6	5,43
Floresta ombrófila densa	C	19.717.89,6	38,79
Campinarana	D	199.920,5	3,93
Formação pioneira	E	85.714,9	1,69
Reflorestamento	F	9.984,1	0,20
Savana	G	700.811,6	13,79
Agricultura	H	114.991	2,26
Pecuária	I	516.026,2	10,15
Área urbana	J	2.678,9	0,05
Vegetação secundária	K	122.221,6	2,40
Corpos d'água	L	107.031,6	2,11

4.2 Período de estudo

O período estudado foi escolhido por pertencer ao fenômeno El Niño-Oscilação Sul (ENOS) que é caracterizado por anomalias, positivas (El Niño) ou negativas (La Niña), da temperatura da superfície do mar (TSM). Os critérios de escolha foram anos a partir de 2000, devido a disponibilidade dos dados do sensor MODIS, e a intensidade do fenômeno (moderado a forte) por representar eventos com grandes impactos ambientais.

A intensidade do fenômeno ENOS é calculada através do Índice ONI (*Oceanic Niño Index*) que considera médias trimestrais móveis de anomalias da TSM na região do Niño 3,4 (5°N-5°S, 120°-170°W, correspondente ao pacífico equatorial tropical). Quando a diferença da TSM em relação à média histórica é superior a 0,5°C por pelo menos cinco trimestres móveis consecutivos caracteriza-se El Niño, enquanto que sendo inferior a 0,5°C por pelo menos cinco trimestres móveis consecutivos caracteriza La Niña. Diferenças inferiores a $\pm 0,5^\circ\text{C}$ correspondem à condição de neutralidade. Os eventos são

classificados, ainda, como fraco (com uma anomalia da TSM entre 0,5°C a 0,9°C), moderado (1,0°C a 1,4°C), forte (1,5°C a 1,9°C) e muito forte ($\geq 2,0^\circ\text{C}$).

O período escolhido foi março de 2003 a fevereiro de 2004 (Neutralidade), setembro de 2007 a agosto de 2008 (La Niña), junho de 2009 a agosto de 2010 (La Niña), junho de 2010 a agosto de 2011, janeiro a dezembro de 2013 (Neutralidade) e janeiro a dezembro 2015 (El Niño). A classificação, de acordo com a intensidade, pode ser vista na Tabela 3.

Tabela 3. Eventos de El Niño e La Niña no período entre 1979 e 2016 incluindo os valores máximos e mínimos do ONI e a intensidade (categoria) de cada evento.

Eventos El Niño			Eventos La Niña		
Anos	Max ONI*	Categoria	Anos	Min ONI*	Categoria
1979-80	0.6	Fraco	1983-84	-0.8	Fraco
1982-93	2.1	Forte	1984-85	-1.1	Moderado
1986-87	1.2	Moderado	1988-89	-1.8	Forte
1987-88	1.6	Moderado	1995-96	-1	Moderado
1991-92	1.6	Moderado	1998-99	-1.4	Moderado
1994-95	1	Moderado	1999-00	-1.6	Forte
1997-98	2.3	Forte	2000-01	-0.8	Moderado
2002-03	1.2	Moderado	2005-06	-0.7	Fraco
2004-05	0.7	Fraco	2007-08	-1.4	Moderado
2006-07	0.9	Moderado	2008-09	-0.7	Fraco
2009-10	1.3	Moderado	2010-11	-1.5	Forte
2014-15	0.6	Fraco	2011-12	1	Moderado
2015-16	2.3	Forte			

*Max ONI= valor máximo do índice ONI Min= valor mínimo do índice ONI Fonte: Kutta et al,2017.

4.3 Base de dados

4.3.1 Produtos de Sensoriamento Remoto

Os dados do produto MCD14, referente aos focos de calor, foram obtidos, em arquivo *shapefile*, no site do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), na plataforma do BDQUEIMADAS – Banco de dados de Queimadas. O INPE utiliza como fonte de dados, a plataforma *Earth Data* da *National Aeronautics and Space Administration* (NASA). Foram utilizados os focos da coleção 6, registrados pelo sensor MODIS através dos satélites AQUA e TERRA, com resolução espacial de 1x1km. São considerados focos de calor quaisquer superfície apresente temperatura acima de 47°C (CEPEDEC, 2019.).

Para a quantificação da área queimada foi utilizado o produto MCD64A1 do sensor MODIS, com resolução de 500x500m, disponível na plataforma Earth Data da NASA. O produto MCD64 A1 tem uma abordagem que utiliza imagens com resolução de 500m em conjunto com as imagens de resolução de 1km do MODIS. Esse algoritmo híbrido aplica limites dinâmicos as imagens compostas geradas a partir de um índice de vegetação sensível ao fogo, derivado dos canais de ondas curtas 5 e 7 (GIGLIO et al. 2016). É um produto amplamente utilizado para mapeamento de área queimada em que, de acordo com Van der werf et al. (2010), mais de 90% da área queimada global no período de 2001 a 2009 foi mapeada utilizando-se produtos do MODIS.

4.3.2 Dados meteorológicos

Devido a reduzida abrangência espacial e falhas encontradas em dados de estações meteorológicas foram utilizados no presente estudo dados da *Reanalysis 2* (NOAA, 2018), em formato NetCDF para as seguintes variáveis: umidade do solo (mm), pressão atmosférica a 1000 mb (mb), temperatura da superfície do mar (°C), correntes de vento ($m s^{-1}$) e vetores de vento ($m s^{-1}$). Os dados de umidade do solo possuem resolução espacial de $0,5^{\circ} \times 0,5^{\circ}$ e estão disponíveis de 1948 até o presente. A pressão atmosférica é disponibilizada com resolução de $2,5^{\circ} \times 2,5^{\circ}$ de 1979 até o presente. A temperatura da superfície do mar possui resolução de $1,0 \times 1,0^{\circ}$ e está disponível de 1981 até o presente. Os componentes de vento são fornecidos em Grid Gaussiano T62 de 192×94 de 1979 até o presente.

Foi utilizado, também, dados de reanálise validados por Xavier et al. (2016) para as variáveis: temperatura máxima do ar (°C), temperatura mínima do ar (°C), temperatura média do ar (°C), evapotranspiração (mm), umidade relativa do ar (%), e velocidade zonal do vento a 10m de altura ($m s^{-1}$). Esses dados estão disponibilizados em escala mensal entre o período de 1980 a 2013 e em escala diária de 2014 a 2016. Além disso, os dados possuem resolução espacial de $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$.

A variável velocidade zonal do vento é disponibilizada a 2m de altura, dessa forma foi necessário fazer a conversão para 10m de altura, através da equação 1 (FAO 56), a seguir:

$$u_2 = u_z \frac{4,87}{\ln(67,8 z - 5,42)} \quad (1)$$

em que: u_2 é a velocidade do vento a 2m da superfície ($m s^{-1}$), u_z é a velocidade do vento medida a z m da superfície ($m s^{-1}$) e z é a altura da mensuração (m).

Dados de reanálise são amplamente utilizados em estudos científicos (TORETI et al., 2018; DAS et al., 2017). Por exemplo, You et al. (2013) utilizaram dados de Reanálise para estudar as tendências de temperatura no planalto do Tibet e Cannon et al. (2015) usaram a reanálise para quantificar a força dos ventos na geração de energia eólica na Grã-Bretanha.

4.3.3 Emissões de Carbono

Foram utilizados dados de emissões de carbono, em teragrama (tg), provenientes de incêndios da base de dados global (*Global Fire Emissions Database*, disponível em: <<https://www.globalfiredata.org>>). Para estimar as emissões, são combinadas informações de satélites sobre a ocorrência de incêndios e a produtividade da vegetação. Foi utilizada a versão 4 que possui uma resolução espacial de 30×30 km. Os dados estão disponíveis a partir de 1997 em planilhas eletrônicas.

4.3.4 Uso e cobertura do solo

Os dados de vegetação utilizados estão disponíveis no site do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatísticas (IBGE) em formato vetor. De acordo com o manual técnico da vegetação brasileira (2012), a atualização do mapeamento para a Amazônia Legal vem sendo realizado gradativamente desde 1996 com escala de 1:250.000. Esses dados foram associados aos focos de calor através do software *ArcGis 10.3* e foi calculada a quantidade de focos de calor por km^2 (densidade) dentro de cada classe.

Além disso, foram utilizados dados, também do IBGE, das áreas colhidas por estado, em hectares, das culturas agrícolas milho, soja e cana-de-açúcar no período entre

1990 e 2018. Por fim, foram utilizados dados do projeto PRODES, associado ao INPE, referente ao desmatamento anual na Amazônia Legal entre o período de 2004 a 2018.

4.4 Processamento dos dados

4.4.1 Estatística descritiva

O software *ArcGIS* 10.5 foi utilizado para acessar o banco de dados e assim realizar a contagem do número mensal de focos de calor e o tamanho mensal da área queimada. O download e processamento dos dados de área queimada foi realizado no *Rstudio* através do pacote *Modistsp*.

Através do software *Rstudio* versão 3.5.0 foram extraídos os valores das variáveis evapotranspiração (mm), velocidade zonal do vento (m s^{-1}), umidade relativa do ar (%), chuvas (mm), umidade do solo (mm), temperatura máxima do ar ($^{\circ}\text{C}$), temperatura mínima do ar ($^{\circ}\text{C}$) e temperatura média do ar ($^{\circ}\text{C}$). Também no R foram gerados boxplots dessas variáveis e gráfico de barras para os dados de emissão de carbono. Os boxplots foram gerados com todos os pontos extraídos da reanálise e não com suas médias. Para as variáveis temperatura média do ar e chuvas foi calculada a anomalia, de acordo com a equação 2, em relação as médias históricas e foram gerados gráficos de barras no R.

$$A = X - \bar{X} \quad (2)$$

Em que: A é a anomalia, X é variável (chuva ou temperatura média) para cada mês de cada ano estudado e \bar{X} é a média histórica referente ao período entre 1980-2013.

O software *Grid Analysis and Display* (GrADS 1.9) foi utilizado para gerar mapas de pressão atmosférica ao nível médio do mar (mb), anomalia da temperatura da superfície do mar ($^{\circ}\text{C}$), correntes de vento e vetores de vento.

4.4.2 Coeficiente de correlação de Spearman e teste de Mann-Kendall

O coeficiente de correlação avalia com que intensidade a relação entre duas variáveis pode ser descrita pelo uso de uma função monótona. A coeficiente varia de -1 a 1 em que quanto mais próximo de -1 mais forte será a relação inversamente proporcional entre as variáveis e quanto mais próximo de 1 maior será a relação diretamente proporcional. Valores próximos a 0 indicam pouca ou nenhuma relação entre as variáveis.

O coeficiente de correlação de Spearman, é uma medida de correlação não-paramétrica. É uma das técnicas mais usadas para dados não-paramétricos e não requer a suposição que a relação entre as variáveis é linear, nem requer que as variáveis sejam quantitativas.

De acordo com a equação 3, foram calculados, através do software *Rstudio*, o coeficiente de correlação entre as variáveis: focos de calor, área queimada, emissões de carbono, evapotranspiração, velocidade zonal do vento, umidade relativa do ar, chuvas, umidade do solo, temperatura máxima, temperatura mínima e temperatura média do ar.

$$r_s = 1 - \frac{6 \sum d_i^2}{n(n^2 - 1)} \quad (3)$$

Em que: d_i é a diferença em postos de cada observação x_i e y_i e n é o número de observações.

A análise de tendência de Mann-Kendall (MANN 1945; KENDALL 1975) foi utilizada nos dados das culturas agrícolas (milho, soja e cana-de-açúcar) entre o período de 1990 e 2018. O objetivo foi verificar se há tendência significativa dos dados ao longo do tempo

e se esta possui características positivas ou negativas, considerando α : 5%, o p-valor e o índice Z do teste.

4.3.2 Densidade Kernel

A fim de melhorar a interpretação dos resultados foram calculadas as densidades dos focos de calor utilizando o estimador da densidade kernel do software *ArcGis* 10.5. Essa ferramenta permite uma visualização mais precisa da concentração e abrangência dos focos de calor.

Foram gerados mapas mensais para cada ano de estudo que foram classificados, em cor e tonalidade, da seguinte forma: vermelho (densidade muito alta), laranja (alta), amarela (média), verde claro (baixa) e verde escuro (muito baixa).

Os mapas interpolados pela densidade kernel possuem resolução de 1km e sua função foi expressa por Silverman (1986):

$$\hat{f}(x) = \frac{1}{nh} \sum_{i=1}^n k\left\{\frac{x-X_i}{h}\right\} \quad (4)$$

em que: n é o número de observações; h é a largura da banda; k é uma função de densidade; x é um vetor de coordenadas que representa o local onde a função está sendo estimada; e x_i são vetores de coordenadas que representam cada ponto de observação.

5 RESULTADOS

5.1 Focos de calor e área queimada

Os anos caracterizados pelo fenômeno La Niña obtiveram o maior registro de focos de calor (388.619 em 2010/2011 e 376.902 em 2007/2008). Já o ano que apresentou o menor número de focos foi 2013 (neutralidade) com um total de 138.739 focos.

Os maiores registros mensais nos meses de novembro a fevereiro foram em anos de El Niño, com destaque para novembro de 2015 que, apesar de ser um mês normalmente chuvoso, obteve 38.931 focos. O período entre 2003/2004 apresentou o maior registro mensal para os meses de março a julho. Além disso, considerando todos os anos, o mês que mais obteve focos de calor foi setembro de 2007 com um total de 191.818 focos, o que representou mais de 50% do total de focos nesse ano. Em todos os anos, setembro foi o mês com o maior registro de focos, representando 40% dos focos entre 2010/2011 e quase 30% em 2013. O mês com o menor registro de focos foi fevereiro de 2011 com 589 focos registrados.

Na contagem por estado (Figura 4), o Amapá foi o estado que registrou o menor número de focos de calor em todos os anos estudados. Já o Mato Grosso apresentou o maior número de focos de calor para a maioria dos anos, exceto em anos de El Niño em que o Pará passou a ser o estado com mais focos. Além disso, em 2003, o Mato Grosso apresentou mais de 40% (148.296) do total de focos no período. Em todos os estados, os meses com mais focos se concentraram entre setembro e novembro, exceto em Roraima que concentrou mais focos entre janeiro e março.

O Amazonas, que é o maior estado da Amazônia Legal, atingiu o pico de focos de calor em 2015, totalizando 20.994 focos. Já o ano com menor contagem de focos foi 2013 com 7.677 focos no estado. O Pará apresentou um alto número de focos, chegando a atingir 100.189 focos em 2007/2008 e 64.601 focos em 2009/2010 que representou 38% dos focos desse período. O Tocantins também esteve entre os estados com mais focos com destaque para 2010/2011 em que foram registrados 58.357 focos no estado.

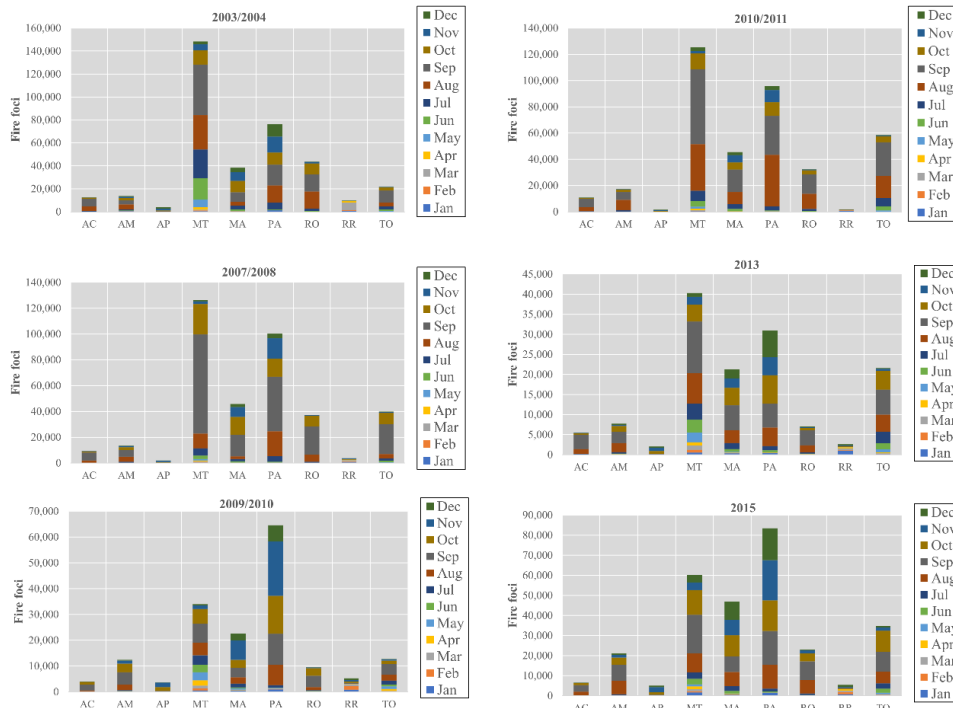


Figura 4. Número de focos de calor, por estado, dos anos estudados.

Na Figura 5 é possível observar os focos de calor por classe de vegetação. As classes, campinarana (D), reflorestamento (F), área urbana (J) foram as classes que apresentaram o menor número de focos em todos os anos, em que em alguns meses o número de focos foi igual a zero.

Dentre as classes que apresentaram mais focos, em 2003/2004, a pecuária (I) e savana (G) registraram 72.227 e 67.763 focos, respectivamente. Em 2007/2008, a savana (G) apresentou 86.412 focos seguida da floresta ombrófila aberta (A) com 76.507 focos. Nos anos de El Niño a classe floresta ombrófila densa (C) se destacou com o maior número de focos em 2009/2010 (43.348) e o segundo maior número em 2015(68.906). Em 2015 a savana (I) atingiu o maior número com 71.885 focos.

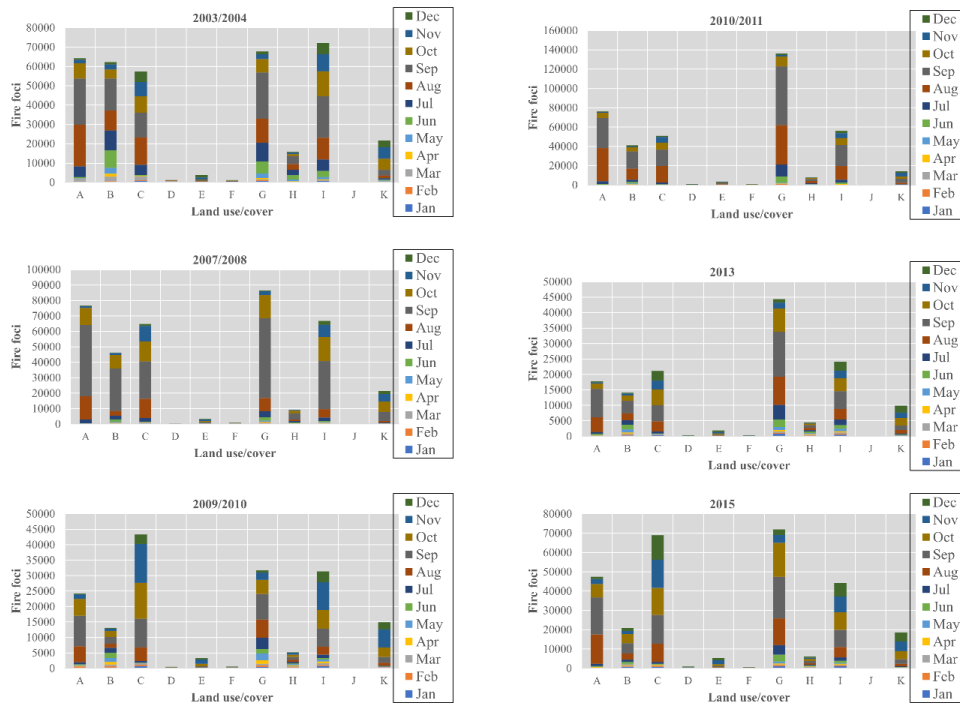


Figura 5. Número de focos de calor, por classe de vegetação, dos anos estudados.

Já quando levado em consideração a densidade de focos por classe de vegetação (Figura 6), as classes reflorestamento (F) e área urbana (J) passam a ter maior destaque em relação aos focos e se assemelham, por exemplo, a densidade encontrada na agricultura (H).

A classe que apresentou maior densidade de focos na maioria dos anos foi a floresta estacional (B) que representa pouco mais de 5% da área da Amazônia Legal (Tabela 2). Ou seja, essa classe apresentou um número alto de focos quando se leva em consideração o tamanho de sua área.

Da mesma forma, as classes floresta ombrófila aberta (A) e densa (C), que possuem as maiores áreas, apresentaram densidades menores do que quando comparados os valores absolutos dos focos de calor. Já a savana (G) e pecuária (I) registraram alta densidade de focos, essas classes representam juntas aproximadamente 24% da Amazônia Legal.

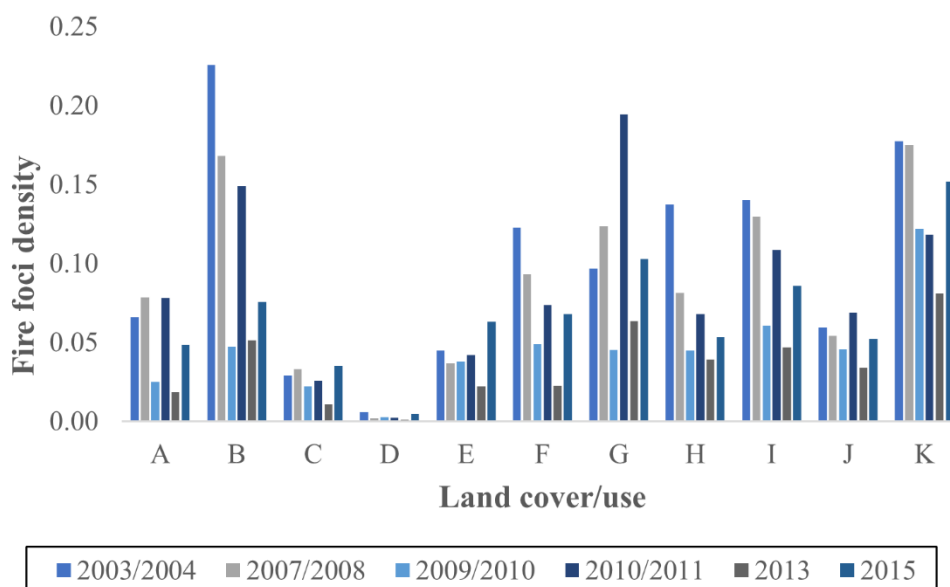


Figura 6. Densidade de focos de calor (focos.km⁻²) por classe de vegetação.

O tamanho mensal de área queimada na Amazônia legal durante o período estudado se encontra na Tabela 4. Semelhante aos focos de calor, os anos que obtiveram maior área queimada foram os anos de La Niña com 28.4665 km² queimados entre 2010/2011 e 207.134,75 km² entre 2007/2008. Já o período que apresentou o menor tamanho em área queimada foi 2009/2010 com um total de 68.527,5km².

Além disso, setembro também foi o mês com o maior tamanho em área queimada em todos os anos. Em 2007, 63% da área queimada ocorreu em setembro, com 131.685km² queimados. Entre 2010/2011, esse mês representou 46% do total registrado no período. Da mesma forma, fevereiro de 2011 foi o mês com o menor tamanho em área queimada em todo o período, com 297,25km² queimados.

Tabela 4. Tamanho mensal, em km², média e coeficiente de variação (%) da área queimada durante o período estudado.

Área queimada (km ²)	Neutralidade		La Niña		El Niño	
	2003/2004	2013	2007/2008	2010/2011	2009/2010	2015
Janeiro	1039,75	1382	359,5	1095,25	1354	1928,5
Fevereiro	1199,75	2398,5	677,25	297,25	3364,75	2607,75
Março	4151,25	1842,5	1446,75	1680,25	1787,5	2038,25
Abril	999,5	552,25	555,5	664,75	1816,75	484,75
Mai	2498,75	1495,5	1758,75	1777,25	3877,75	2086,75
Junho	6004	2495	2936,25	8603,75	2250,25	3992,5
Julho	13448,75	5170,5	5726	22348,5	4846,75	6241,25
Agosto	26942	17493,5	23802	88832,5	12072	25165
Setembro	49595,5	28131,5	131685	131127,5	14014,5	49786
Outubro	12229,75	11257,75	30014	22162,25	8920,25	36301
Novembro	7207	3461,5	7050,25	3320,5	9293,5	14725
Dezembro	4785	2516	1123,5	2755,25	4929,5	13185,25
Total	130.101	78.196,5	207.134,75	284.665	68.527,5	158.542

As taxas de desmatamento nos estados da Amazônia Legal se encontram descritas na Figura 7. Considerando toda a Amazônia Legal, 2012 foi o ano com a menor taxa de desmatamento enquanto 2004 foi o ano com a maior taxa. Ao todo foram desmatados nesse período mais de 160 mil km². De forma geral, o desmatamento foi decrescendo de 2004 a 2012 e a partir de então tem voltado a crescer.

O Pará foi o estado mais desmatado nesse período (62.778 km²), seguido do Mato Grosso (43.065 km²) e Rondônia (22.279 km²). Já os menos desmatados foram o Amapá (616 km²) e o Tocantins (1241 km²).

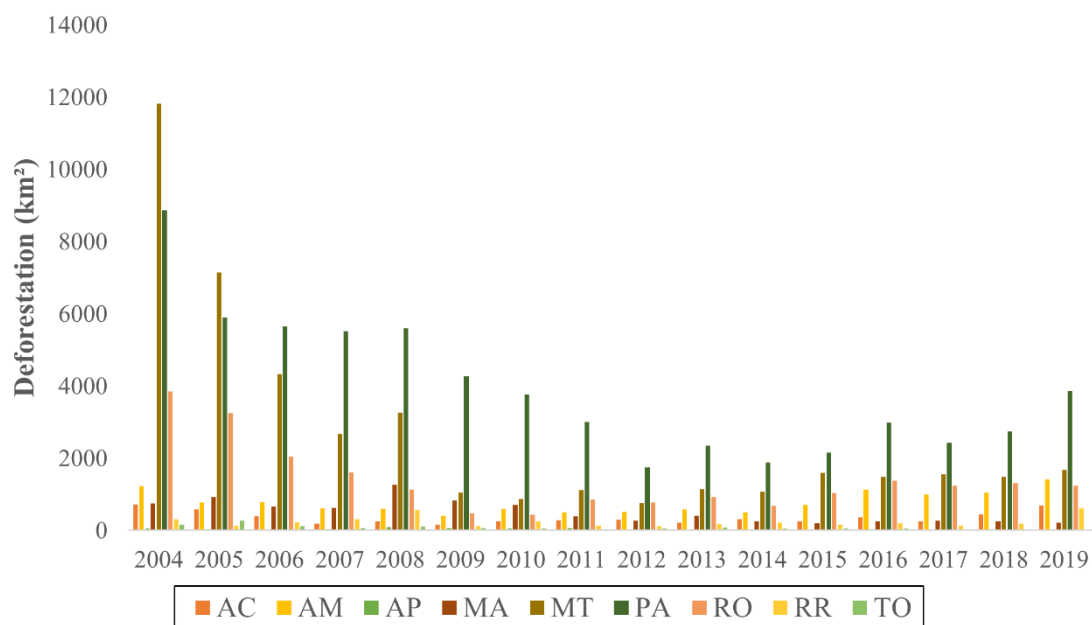


Figura 7. Desmatamento da Amazônia Legal, por estado, no período entre 2004 a 2019.

Na Figura 8, é possível observar as emissões de carbono provenientes de incêndios no período estudado. De forma geral, os meses entre junho e novembro obtiveram as maiores taxas de emissão de carbono. Em todos os anos, exceto entre 2010/2011, as maiores emissões foram registradas em setembro, que foi o mês com mais focos de calor e maior área queimada em todos os anos. Setembro de 2010 obteve uma emissão de 146,13Tg, a segunda maior em todo o período. O mês de agosto também apresentou altas taxas de emissões e entre 2010/2011, foi registrado nesse mês a maior emissão de todo o período (155,59Tg). Nos outros anos, agosto, foi o mês que obteve o segundo maior registro de emissões.

Os menores valores de emissão de concentraram entre os meses entre dezembro e maio, com valores próximos a zero em vários meses (Figura 8). Avaliando-se todo o período, fevereiro de 2011 foi o mês que registrou a menor taxa de emissão de carbono (0,1278Tg). Esse resultado era esperado já que foi também o mês com menor registro de focos de calor e menor tamanho em área queimada.

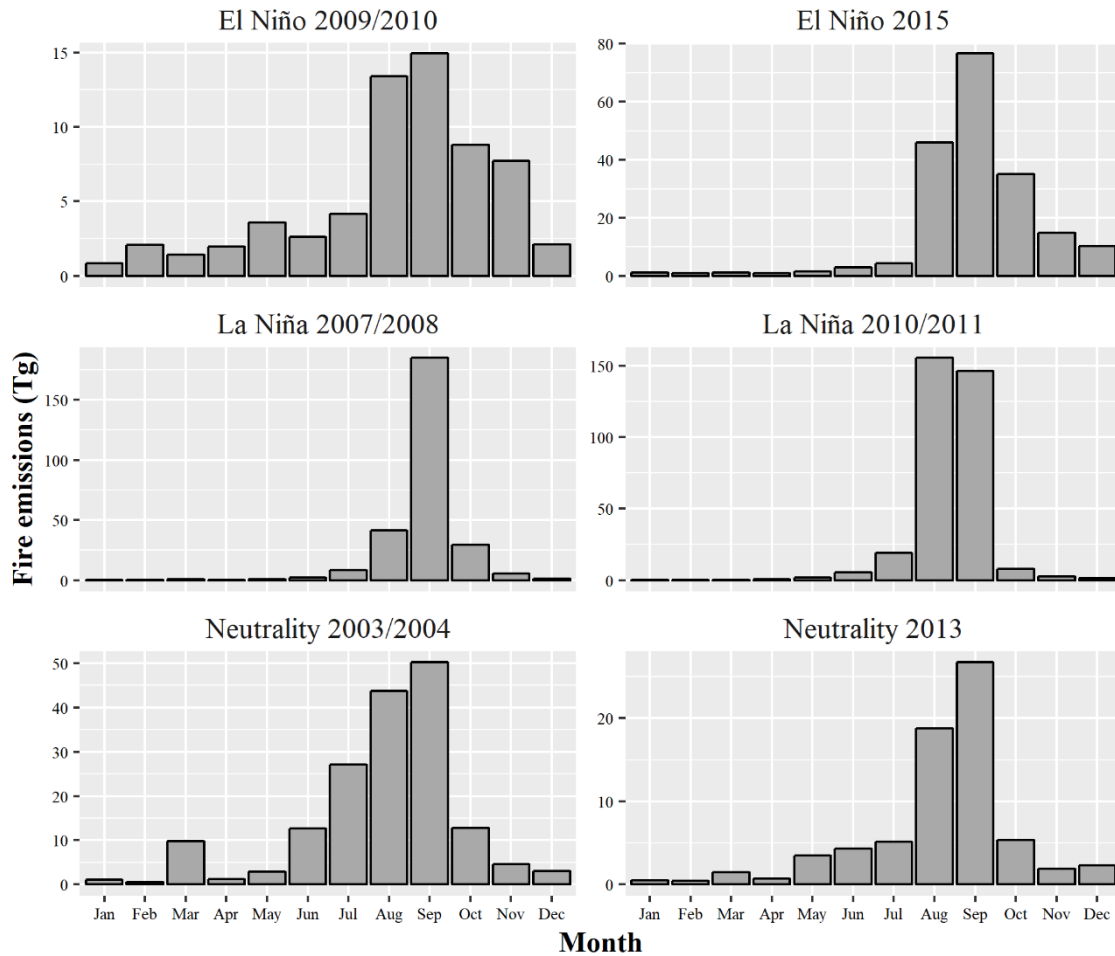


Figura 8. Emissões de Carbono (Tg) oriundos de incêndios para o período de estudo.

5.2 Variáveis meteorológicas

Os valores de velocidade média do vento estão descritos, por meio de boxplot, na Figura 9. Em todos os anos, houve grande presença de valores discrepantes (*outliers*). No período de El Niño, a velocidade do vento variou entre 0,35 e 1,36 m s⁻¹. A maior velocidade do vento foi registrada em junho de 2010 e a menor em dezembro de 2015. Os meses com alto registro de focos de calor e de área queimada registraram velocidades entre 0,68 m s⁻¹ (setembro de 2015) e 1,32 m s⁻¹ (agosto de 2009).

Durante o período de La Niña, a variação dos dados foi menor, em que o valor mínimo foi registrado em maio de 2011 (1,05 m s⁻¹) e o máximo em setembro de 2007 (1,59 m s⁻¹). Dessa forma, o maior valor de velocidade do vento nesse período coincide com o mês com maior registro de focos e área queimada.

O período de neutralidade foi o que apresentou a maior variação dos dados com velocidade do vento entre 0,88 e 4,68 m s⁻¹. Foi o único período com registros acima de 1,60 m s⁻¹. O valor máximo ocorreu em março de 2003 e, apesar de um número não tão alto, quando comparado a outros meses, de focos de calor (7.737) ou de área queimada (4.151 km²), foi o ano em que esses valores foram os maiores para esse mês. O menor valor ocorreu em dezembro de 2013.

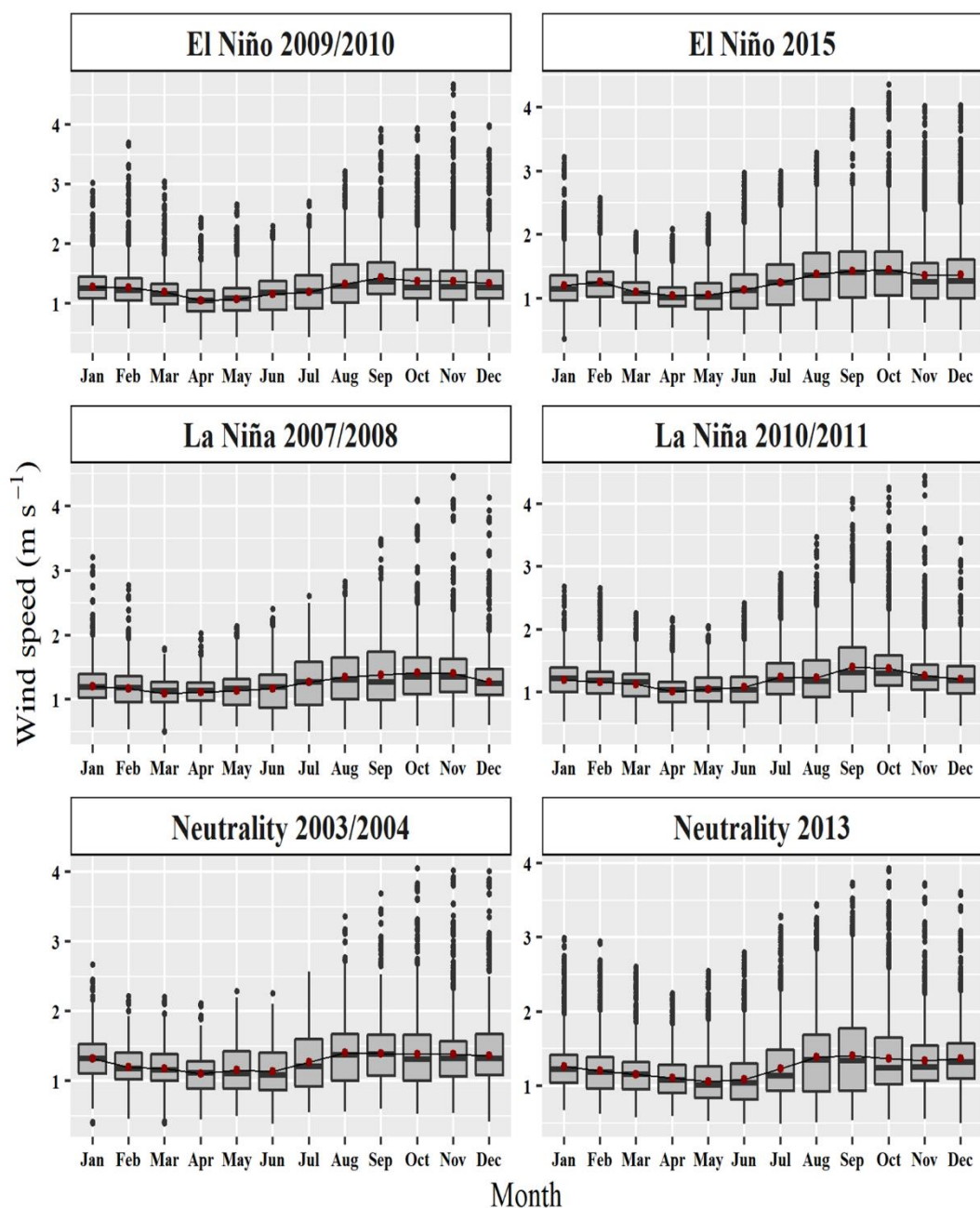


Figura 9. Análise boxplot da variável velocidade zonal do vento (m s^{-1}) para o período estudado.

A temperatura mínima do ar, considerando todo o período, variou entre 11°C em julho de 2003 (neutralidade) e $26,81^{\circ}\text{C}$ em fevereiro de 2010 (El Niño). Além disso, os meses de junho, julho e agosto, apresentaram a maior variabilidade dessa variável. Os boxplots para essa variável constam na Figura 10.

O período de El Niño apresentou registros entre $14,10^{\circ}\text{C}$ (junho de 2010) e $26,81^{\circ}\text{C}$ (fevereiro de 2010). Durante a La Niña os valores ficaram entre $11,53^{\circ}\text{C}$ (julho de 2008) e $26,72^{\circ}\text{C}$ (novembro de 2010). Já na neutralidade foram registrados valores entre $11,03^{\circ}\text{C}$ (julho de 2003) e $26,22^{\circ}\text{C}$ (janeiro de 2013). Para essa variável o comportamento, ao longo do ano, foi semelhante em que os valores máximos foram registrados em meses considerados mais quentes e os valores mínimos nos meses considerados mais frios.

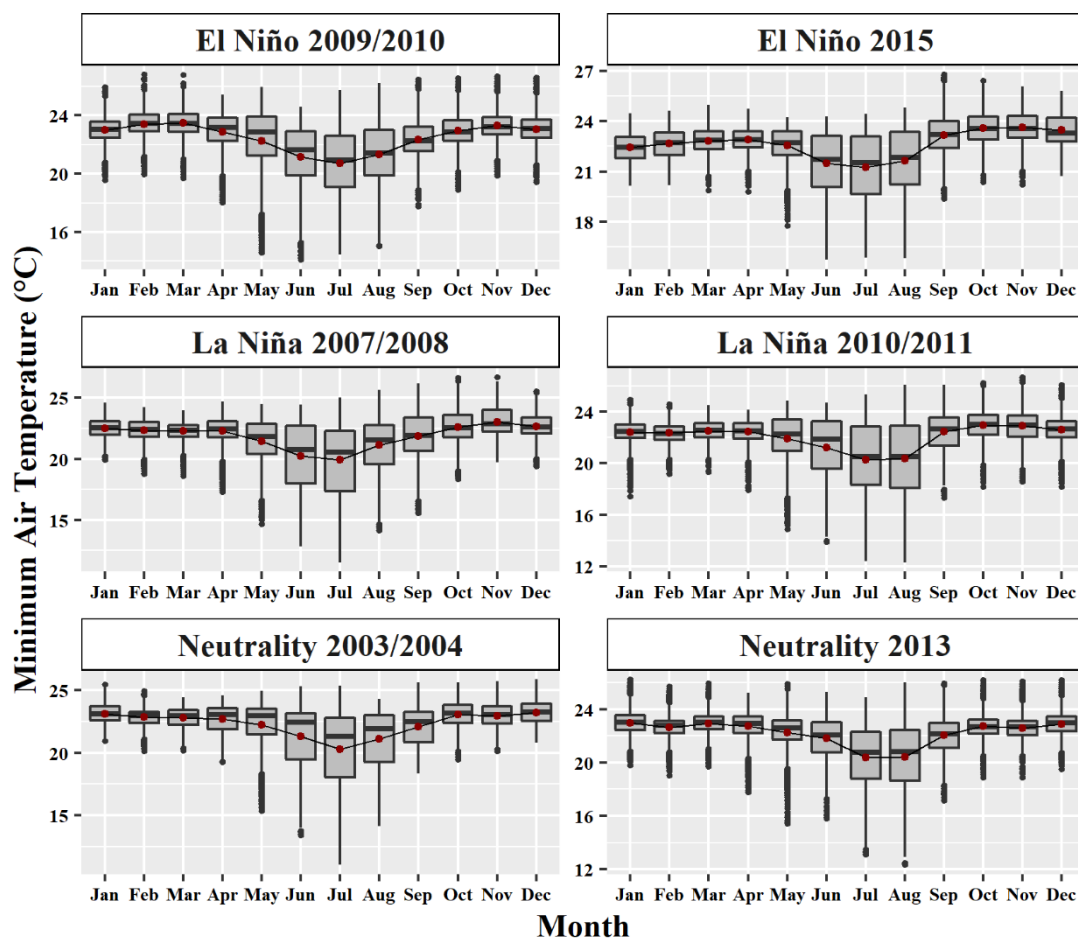


Figura 10. Análise boxplot da variável temperatura mínima do ar (°C) para o período estudado.

A temperatura máxima variou entre 25,30°C em janeiro de 2004 (neutralidade) e 39,65°C em setembro de 2010 (La Niña). Os boxplots para temperatura máxima constam na Figura 11.

Durante a ocorrência do El Niño, a temperatura máxima variou entre 26,17°C em dezembro de 2009 e 38,91°C em outubro de 2015. Setembro a dezembro apresentaram as maiores temperaturas máximas, período esse que concentrou mais de 70% dos focos registrados e mais de 50% da área queimada nesses anos.

Na ocorrência da La Niña, a temperatura máxima variou entre 25,97°C em fevereiro de 2011 e 39,65°C em setembro de 2010. Setembro de 2007, mês que registrou maior número de focos de calor e área queimada em todo o período, atingiu temperatura máxima de 38,34°C.

Já durante a neutralidade, os valores variaram entre 25,30°C em janeiro de 2004 e 38,70°C em outubro de 2003. Dessa forma, houve pouca variação na amplitude dos dados registrada entre os três períodos estudados.

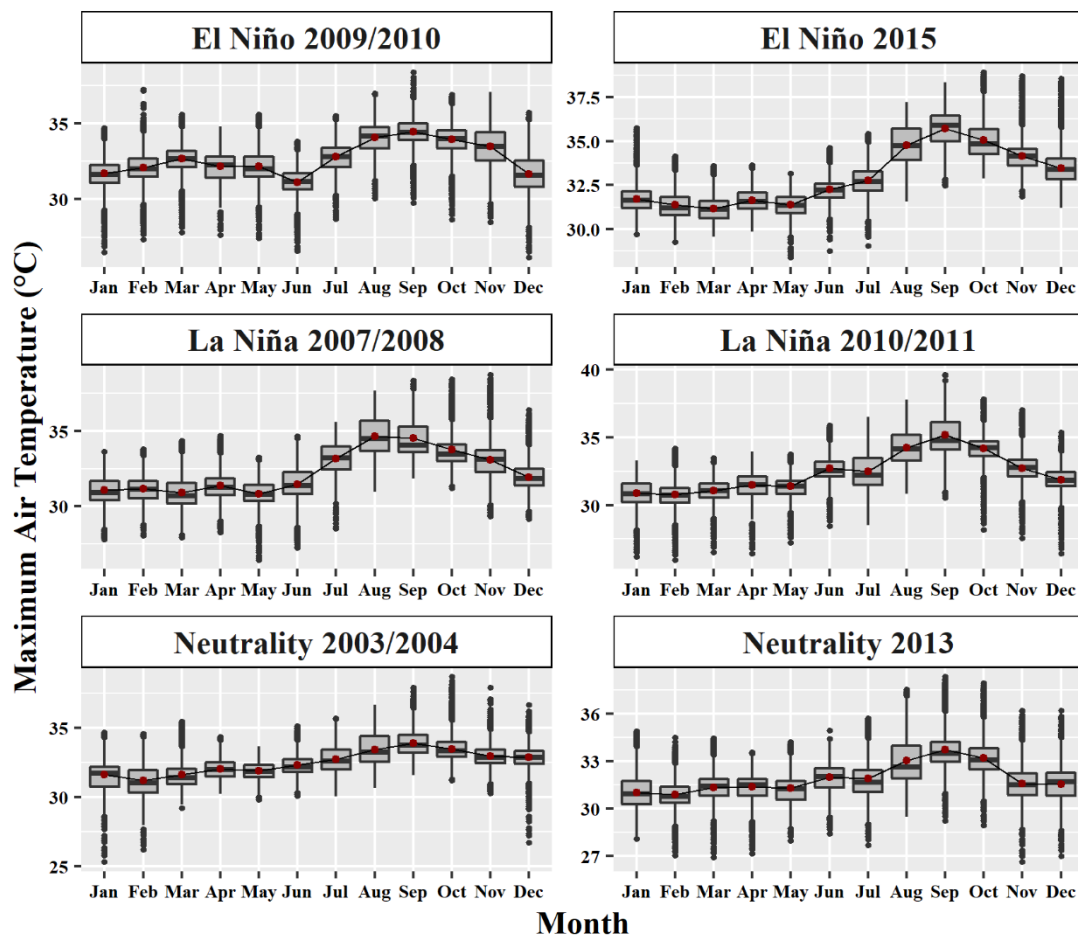


Figura 11. Análise boxplot para a variável temperatura máxima do ar (°C) para o período estudado.

A temperatura média do ar variou entre 20,41°C em junho de 2010 (El Niño) e 32,40°C em outubro de 2007 (La Niña). Assim como nas temperaturas mínimas e máximas, o comportamento ao longo do ano da temperatura média foi similar entre os anos estudados (Figura 12).

Durante o El Niño, a temperatura média variou entre 20,40 °C em junho de 2010 e 31,86°C em fevereiro de 2010. Na La Niña, a variação ficou entre 20,70 °C em junho de 2008 e 32,40°C em outubro de 2007. Já na neutralidade o maior valor foi registrado em 31,78°C em outubro de 2003 e o menor valor foi 20,50°C em julho de 2013.

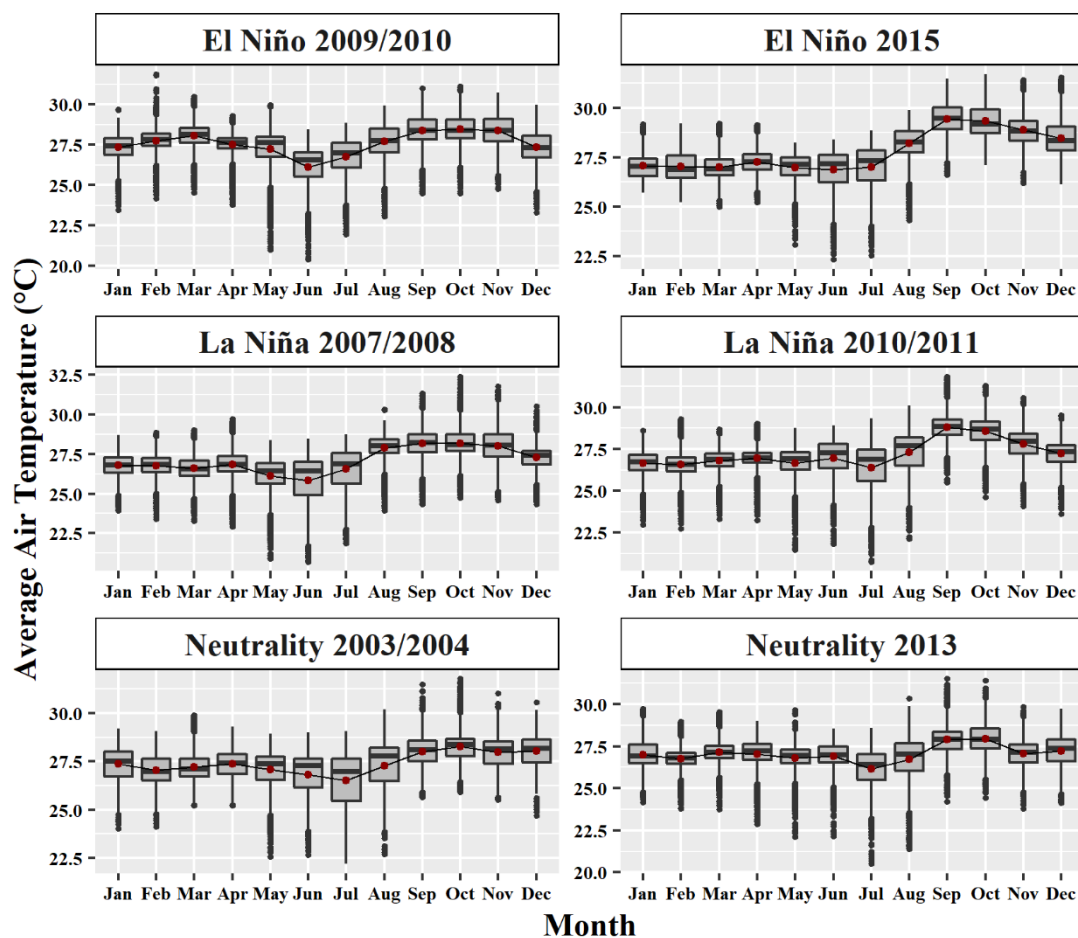


Figura 12. Análise boxplot para a variável temperatura média do ar (°C) para o período estudado.

A variável umidade do solo (Figura 13) apresentou comportamento semelhante em todos os anos estudados, com valores crescentes a partir de dezembro até começar a cair a partir de abril. Os valores variaram entre 48,15mm em outubro de 2015 (El Niño) e 731,526mm em março de 2008 (La Niña).

Nos anos de El Niño a variação foi entre 48,15mm em outubro de 2015 e 711,33mm em junho de 2010. O mês com mais focos e maior área queimada em 2015 (setembro) registrou valores entre 56,96mm a 660,63 a depender da localização. A média para toda a Amazônia legal nesse mês, em 2015, foi de 444,67mm.

Setembro de 2007 ((La Niña) registrou valores entre 73,09 e 666,63mm. O valor mínimo para o período de La Niña coincidiu com setembro de 2007 (73,09mm) enquanto que o valor máximo foi registrado em março de 2008 (731,53mm).

A menor amplitude dos dados foi registrada no período de neutralidade com valor mínimo registrado em setembro de 2013 (77,59mm) e valor máximo em abril de 2003 (720,54mm). Nesse caso, setembro também foi o mês com mais focos e área queimada. Fevereiro, mês com menor quantidade de focos de calor na neutralidade, apresentou uma amplitude ainda menor com valores entre 169,23mm e 713,68mm.

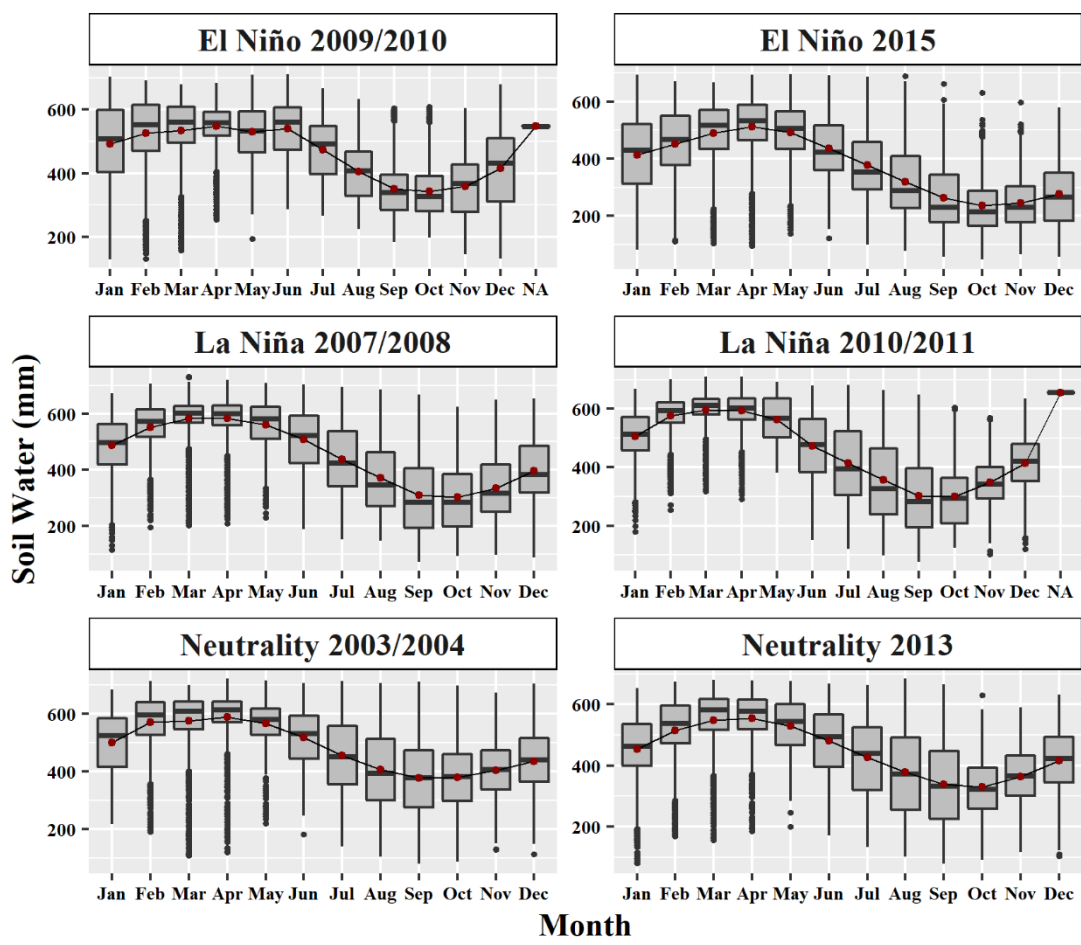


Figura 13. Análise boxplot para a variável água no solo (mm) para o período estudado.

A umidade relativa (%) também apresentou variabilidade semelhante entre os anos estudados (Figura 14). Os meses de janeiro a abril apresentaram as menores amplitudes, enquanto que agosto, em todos os anos, foi o que apresentou a maior variabilidade. A amplitude geral foi de 34,21% em setembro de 2015 (El Niño) e 90,76% em junho de 2010 (El Niño). A amplitude geral dos dados coincidiu com a amplitude do período de El Niño.

Durante os anos de La Niña, os valores variaram entre 34,63% em setembro de 2010 a 90,29% em junho de 2008. Setembro de 2007 variou entre 35,56 e 85,73% com uma média de 78,36%. Já a neutralidade ficou entre 36,75% em setembro de 2013 e 90,59 em fevereiro de 2004 (mês com menos focos nesse período). Setembro de 2003, mês com mais focos no período, apresentou média de 78,60% e variação entre 43,94 e 85,67%.

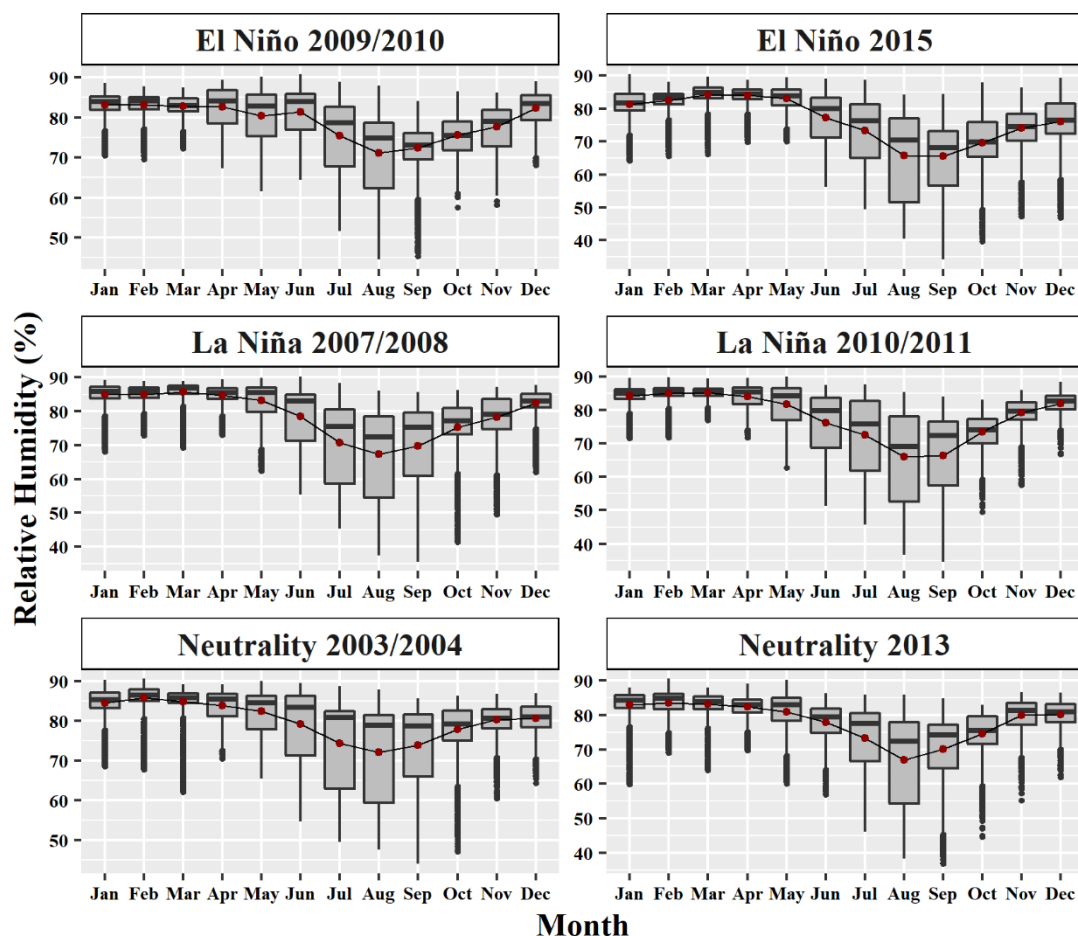


Figura 14. Análise boxplot da variável umidade relativa do ar (%) para o período estudado.

A variabilidade das chuvas em todo o período está descrita na Figura 15. É possível observar que os meses de agosto e setembro apresentaram os menores valores e baixa variabilidade dos dados. A amplitude geral foi de 0 mm em setembro de 2015 (El Niño) a 1328,64mm em fevereiro de 2008 (La Niña).

Considerando os anos de El Niño, a amplitude foi de 0 a 1031,56mm. O valor máximo registrado em setembro de 2015 foi de 209,33mm e média de 172,51mm. Em setembro de 2009 a média foi de 173,61mm e amplitude de 0 a 304,51mm, a depender da localidade. O mês de abril de 2010 foi o que apresentou a maior variabilidade dos dados em todo o período.

Durante a La Niña, a variação dos dados foi de 0mm em maio de 2001 a 1328,64mm em fevereiro de 2008. Maio foi o mês com a maior variabilidade dos dados nos dois anos (0 a 822,21mm). Em setembro de 2007 choveu, em média, 174,89mm.

Na neutralidade os valores variaram entre 0 em agosto de 2013 a 1084,12mm em abril de 2003. Em setembro de 2013, o valor máximo registrado foi de 290,93mm e média de 177,18mm enquanto que em setembro de 2003 (mês com mais focos do período), esse valor chegou a 586,55mm e média de 174,92mm.

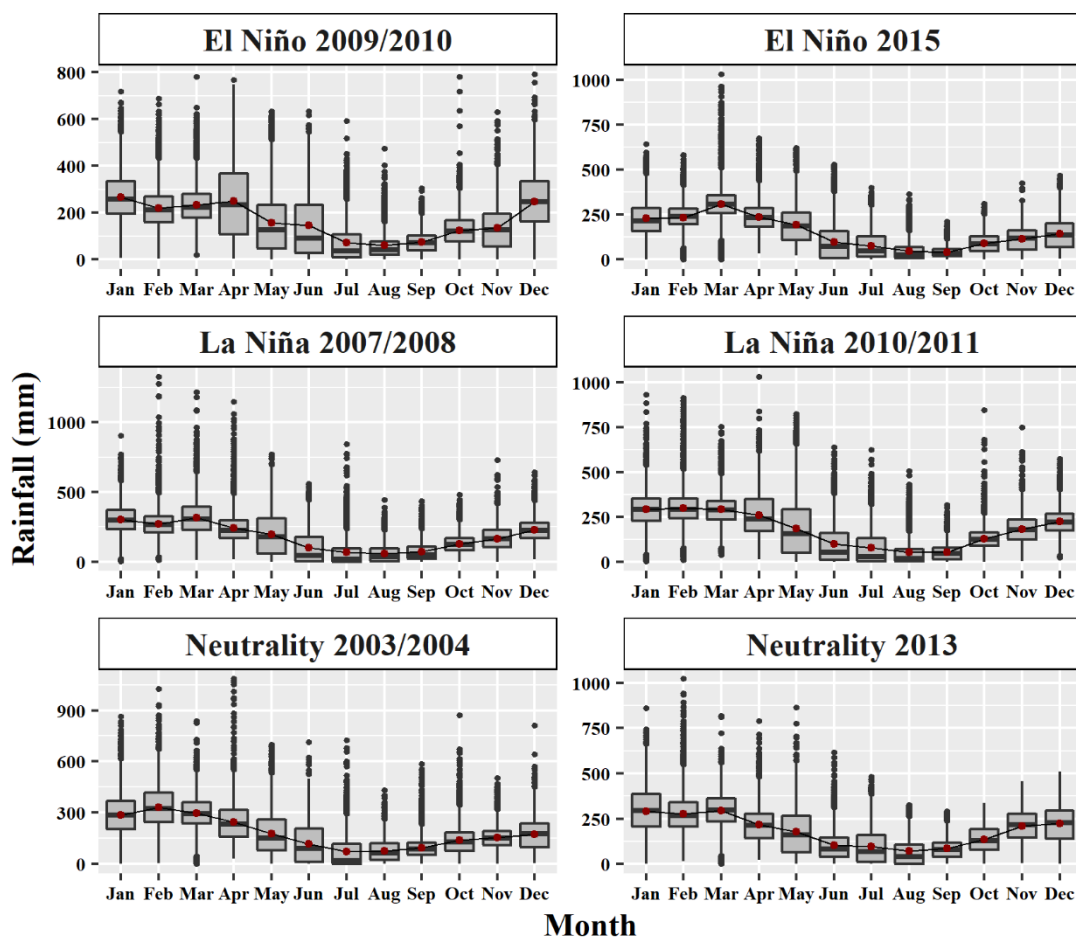


Figura 15. Análise boxplot da variável chuva (mm) para o período estudado.

A descrição da evapotranspiração, por meio de boxplot, consta na Figura 16. Em todos os anos o comportamento da evapotranspiração atingiu seus menores valores entre maio e junho, enquanto que os valores máximos foram registrados entre agosto e outubro. A variabilidade geral dos dados foi de $2,34 \text{ mm dia}^{-1}$ em maio de 2013 (Neutralidade) a $7,15 \text{ mm dia}^{-1}$ em outubro de 2007 (La Niña).

A evapotranspiração, no período de El Niño, variou entre $2,44 \text{ mm dia}^{-1}$ em junho de 2010 a $6,47 \text{ mm dia}^{-1}$ em outubro de 2015. Setembro de 2009 e de 2015 apresentaram uma média de $3,83 \text{ mm dia}^{-1}$. Em março, mês com menor incidência de focos de calor, a média da evapotranspiração foi de $3,66 \text{ mm dia}^{-1}$.

Durante a ocorrência da La Niña, a evapotranspiração esteve entre $2,78 \text{ mm dia}^{-1}$ em março de 2008 e $4,95 \text{ mm dia}^{-1}$ também em março de 2008. Esse também foi o mês com menor ocorrência de focos de calor no período de La Niña. Em setembro para os dois períodos a média foi de $3,83 \text{ mm dia}^{-1}$, mesma média encontrada no período de El Niño.

A neutralidade variou entre $2,34 \text{ mm dia}^{-1}$ (maio de 2013) e $6,88 \text{ mm dia}^{-1}$ (setembro de 2013). Fevereiro de 2004, mês com menos focos de calor, evapotranspirou em média, $3,69 \text{ mm dia}^{-1}$ e setembro de 2003 registrou média de $3,83 \text{ mm dia}^{-1}$.

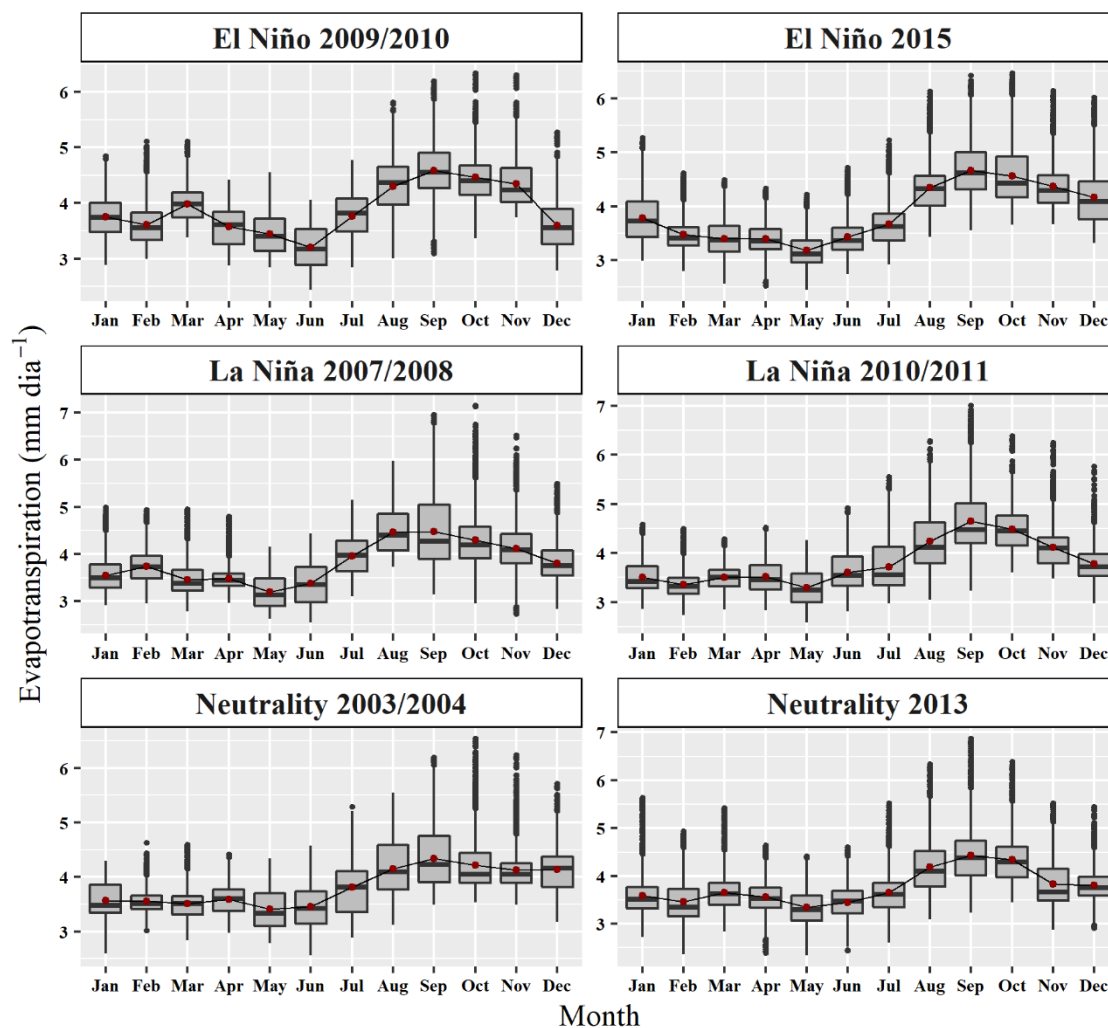


Figura 16. Análise boxplot da variável evapotranspiração para o período estudado.

O desvio da média anual em relação à média histórica (anomalia) da variável chuvas, pode ser vista na Figura 17. No período de El Niño, entre 2009/2010, o mês que choveu mais acima da climatologia (anomalia positiva) foi junho com 43,50mm acima, seguido de dezembro com 24,49mm acima. Já os meses que choveram abaixo da média histórica (anomalia negativa) foram março (-54,30mm), fevereiro (-44,39mm) e novembro (-37,31mm).

O ano de 2015 foi o que apresentou mais meses com anomalias negativas, com destaque para dezembro (-81,64mm), novembro (-57,99mm) e setembro (-44,90mm). Neste mesmo ano, maio e março registraram anomalias positivas significativas, 22,23 e 21,40mm, respectivamente.

Já o período de La Niña, entre 2007/2008, apresentou as maiores anomalias positivas nos meses de março (31,39mm), janeiro (31,39mm) e maio (25,33mm). A maior anomalia negativa foi registrada em setembro que choveu -14,54mm em relação a climatologia. Entre 2010/2011, também foi em setembro o maior registro negativo (-32,46mm) e fevereiro (35,57mm), abril (23,91) e janeiro (21,99mm) os maiores registros positivos.

Entre 2003/2004, período de neutralidade, fevereiro foi o mês que apresentou a maior anomalia positiva (65,29mm). Foram registradas anomalias negativas apenas nos

meses de julho (-3,39mm), novembro (-17,25mm) e dezembro (-49,33mm). Em 2013, abril foi o único mês a apresentar anomalia negativa (-20,03mm) e novembro foi o mês com a maior anomalia positiva (39,08mm).

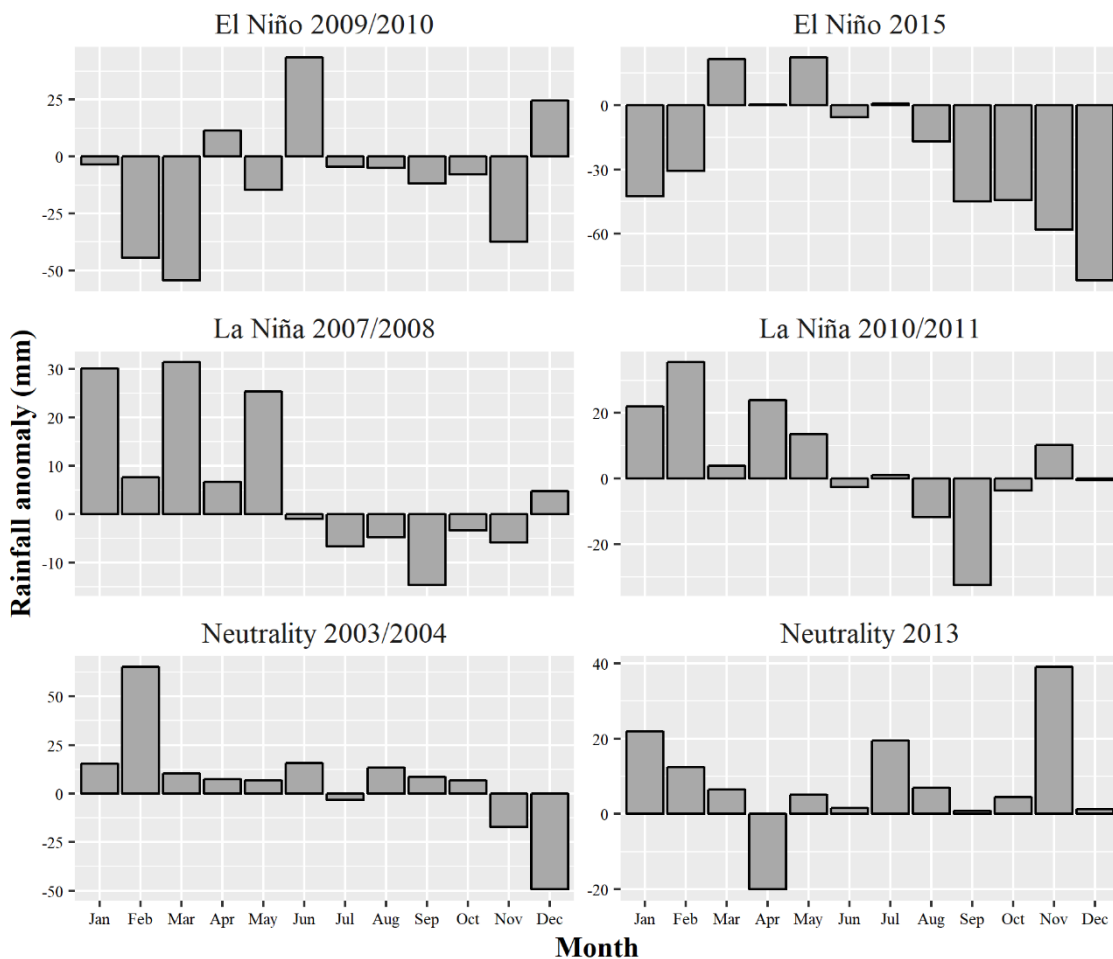


Figura 17. Anomalias positivas e negativas da variável chuvas (mm) no período estudado.

As anomalias da temperatura média do ar ($^{\circ}\text{C}$) estão descritas na Figura 18. O período El Niño apresentou anomalias positivas de temperatura em todos os meses, exceto em junho de 2010 em que a temperatura foi $-0,11^{\circ}\text{C}$ em relação à média histórica. Setembro de 2015 foi o mês com a maior anomalia positiva ($1,64^{\circ}\text{C}$).

Entre 2007/2008, houve anomalias negativas de janeiro a maio, em que maio registrou o maior valor ($-0,52^{\circ}\text{C}$). De agosto a dezembro as anomalias foram positivas, ou seja, foram registradas temperaturas mais altas que a climatologia. O mês que apresentou maior anomalia positiva foi agosto ($0,82^{\circ}\text{C}$). Já entre 2010/2011, o mês com maior anomalia positiva foi setembro (1°C) e maior anomalia negativa foi janeiro ($-0,27^{\circ}\text{C}$).

Na neutralidade, 2003/2004 apresentou anomalias positivas em todos os meses com maior registro em dezembro ($0,78^{\circ}\text{C}$). Já em 2013 houve anomalias negativas nos meses de fevereiro, julho, agosto, outubro, novembro e dezembro, com novembro atingindo o maior valor ($-0,55^{\circ}\text{C}$). Já entre os meses com anomalias positivas, junho foi quem apresentou a maior anomalias ($0,68^{\circ}\text{C}$).

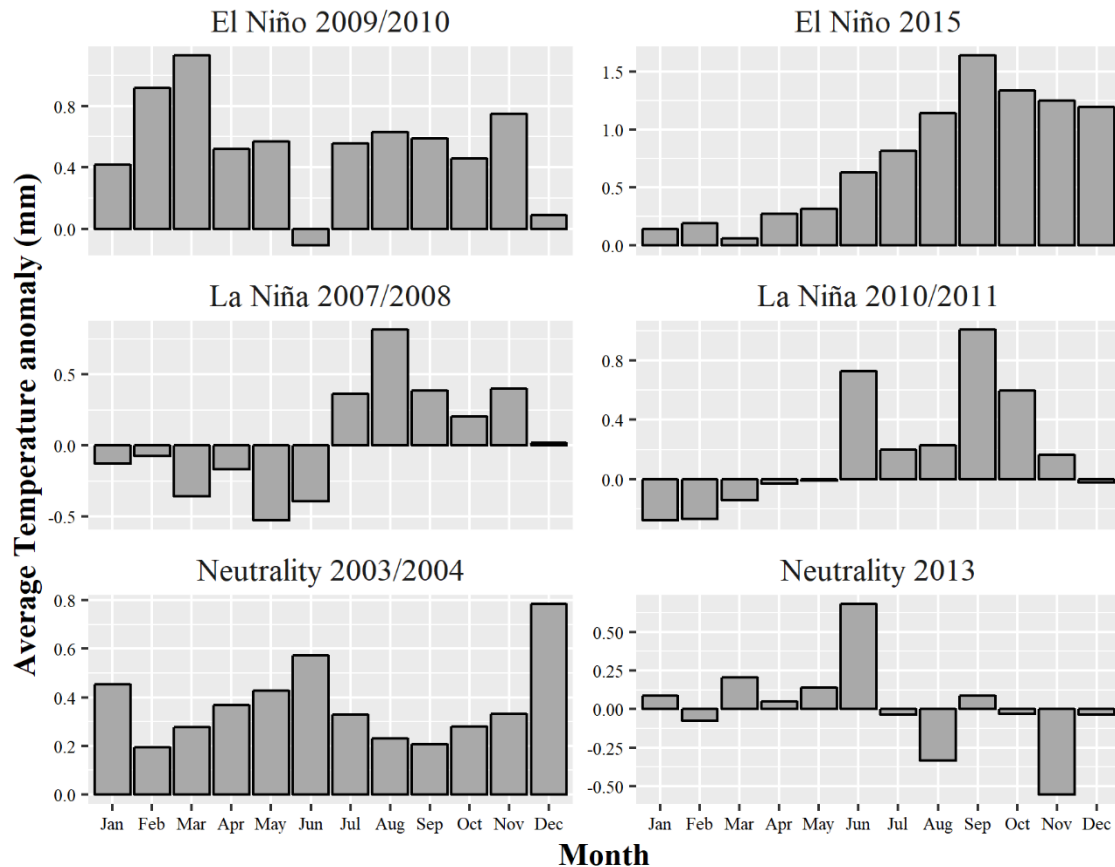


Figura 18. Anomalias positivas e negativas da variável temperatura média do ar ($^{\circ}\text{C}$) no período estudado.

5.3 Circulação atmosférica e Densidade Kernel

Em fevereiro de 2015, mês com menor incidência de focos, os focos de calor se concentraram no estado Roraima, ao norte da Amazônia Legal (Figura 19). Em Roraima, ficaram concentrados as densidades média, alta e muito alta enquanto que nos demais estados as densidades foram, em sua maioria, muito baixa. Nesse mês, a anomalia da TSM apresentou valores positivos entre 1 a 2 $^{\circ}\text{C}$ próximos ao oceano pacífico tropical (OPT), ou seja, a TSM estava mais alta do que a média histórica para esse período. Próximo a região Nordeste do Brasil, a TSM apresentou anomalias de 0,5 a 1 $^{\circ}\text{C}$ enquanto que porção do oceano atlântico tropical do Norte (OAT), a anomalia da TSM variou entre -1,5 a 0 $^{\circ}\text{C}$.

O mapa de pressão atmosférica demonstra zonas de baixa pressão no OPT, sobre a Amazônia Legal e a região Nordeste. Foi observado, ainda, zonas de alta pressão no OAT (Figura 19). No mapa de vetores de vento é possível observar as mais altas velocidades do vento na região dos alísios de Nordeste e também na região do oceano pacífico tropical. Sobre a Amazônia legal, a velocidade do vento atingiu seus menores valores. O mapa de correntes mostra a ação de ventos oriundos dos alísios de Nordeste e Sudeste, sobre a região da Amazônia Legal.

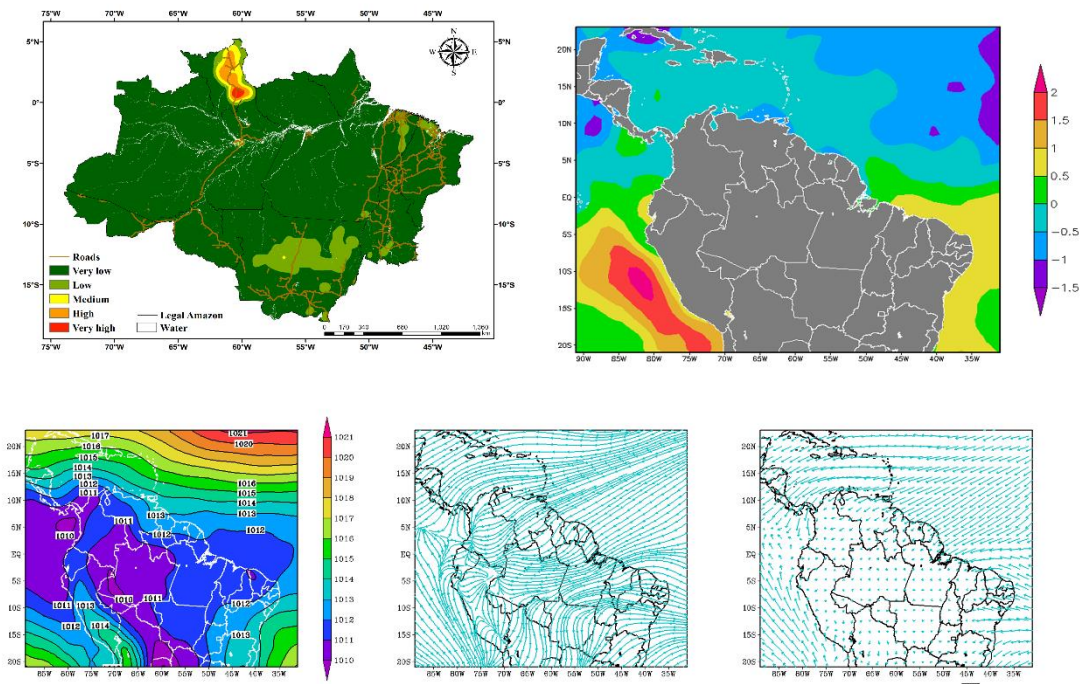
Durante setembro de 2015, mês com maior incidência de focos de calor nesse ano, a concentração de focos nas densidades média, alta e muito alta se espalharam por quase toda a região, exceto ao Norte da Amazônia Legal (Figura 19). O estado de Rondônia e Mato Grosso foram os que apresentaram maior incidência da densidade muito alta nesse mês. A região que compreende o Maranhão e Tocantins também apresentaram altas

concentrações de focos de calor, demonstrados pelas densidades média e alta em grande parte desses estados.

Diferente do esperado para esse período, a anomalia da TSM próximo a região do OPT apresentou valores negativos entre -5 e -1°C , indicando águas mais frias quando comparadas a climatologia. Já na porção do OAT, as anomalias foram positivas e variaram entre 1 e 2°C . Próximo a região Nordeste, as anomalias variaram entre -2 e 0°C .

As baixas pressões se mantiveram sobre a Amazônia Legal nesse mês, porém é possível observar zonas de alta pressão (anticlones) se aproximando do continente nas regiões Sudeste e Sudoeste. As correntes de vento apresentaram comportamento semelhante ao mês de fevereiro. Já no mapa de vetor de vento é possível observar uma diminuição no tamanho do vetor, ou seja, na velocidade dos ventos, na região do OAT.

FEB



SEP

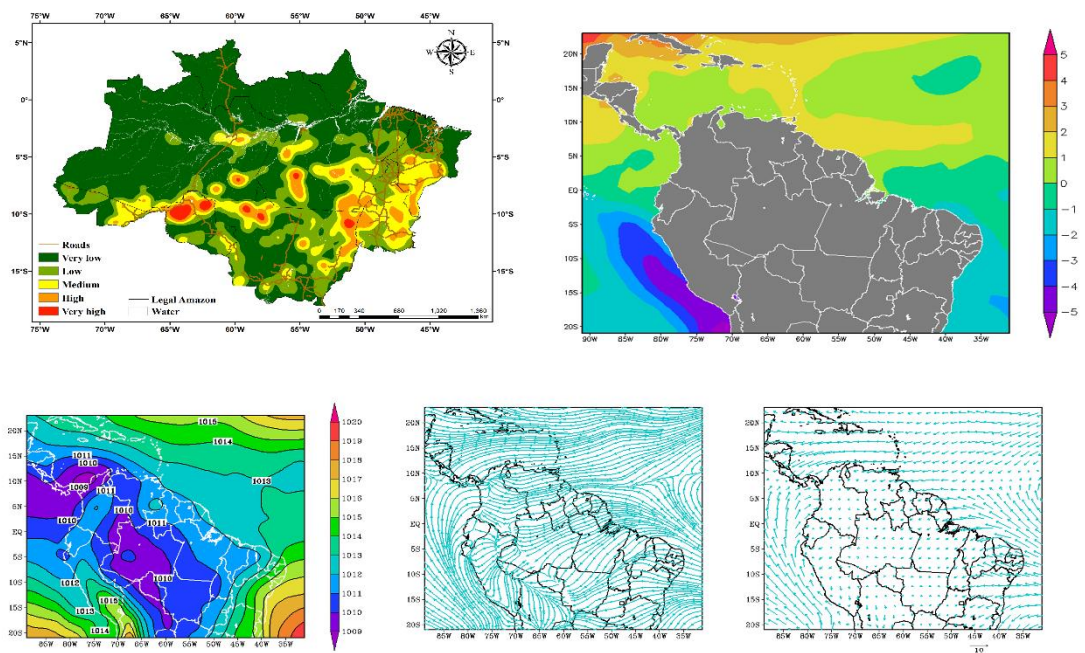


Figura 19. Densidade kernel (acima a esquerda), anomalia da temperatura da superfície do mar (°C) (acima a direita), pressão atmosférica a 1000mb (mb) (abaixo a esquerda), correntes de vento (abaixo no centro) e vetores de ventos (abaixo a direita) para fevereiro e setembro de 2015

Durante fevereiro de 2010, a concentração de focos de calor apresentou padrão semelhante a esse mesmo mês em 2015, em que as densidades média, alta e muito alta se

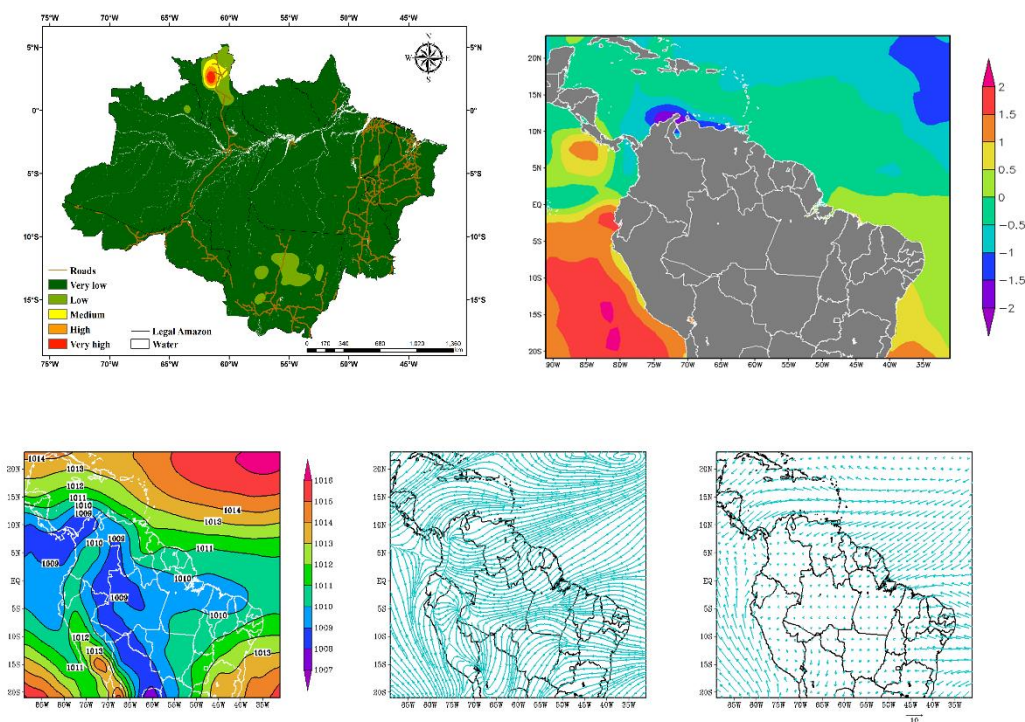
restringiram ao estado de Roraima (Figura 20). Já a anomalia da TSM foi mais pronunciada na região do OPT, variando entre 1 a 2°C. No OAT a anomalia variou entre -1 a 0°C.

É possível verificar no mapa de pressão atmosférica, regiões de alta pressão, ou seja, anticiclones na região do OAT e na porção sudeste e sudoeste. Sobre a Amazônia Legal prevaleceram pressões mais baixas (Figura 20). O padrão dos vetores e correntes de vento foram semelhantes aos observados em fevereiro de 2015.

Os focos de calor, em setembro de 2009, incidiram sobre quase toda a região, com altas densidades na porção Centro-Sul e pequenas manchas na porção Norte. A anomalia da TSM foi negativa na região do OPT e positiva na região do OAT (Figura 20), repetindo o padrão observado em setembro de 2015.

A pressão atmosférica se manteve mais baixa sobre a Amazônia Legal e nas regiões Sudeste e Sudoeste é possível observar a presença de anticiclones se aproximando do continente. As correntes e vetores de vento foram semelhantes aos observados em setembro de 2015.

FEB



SEP

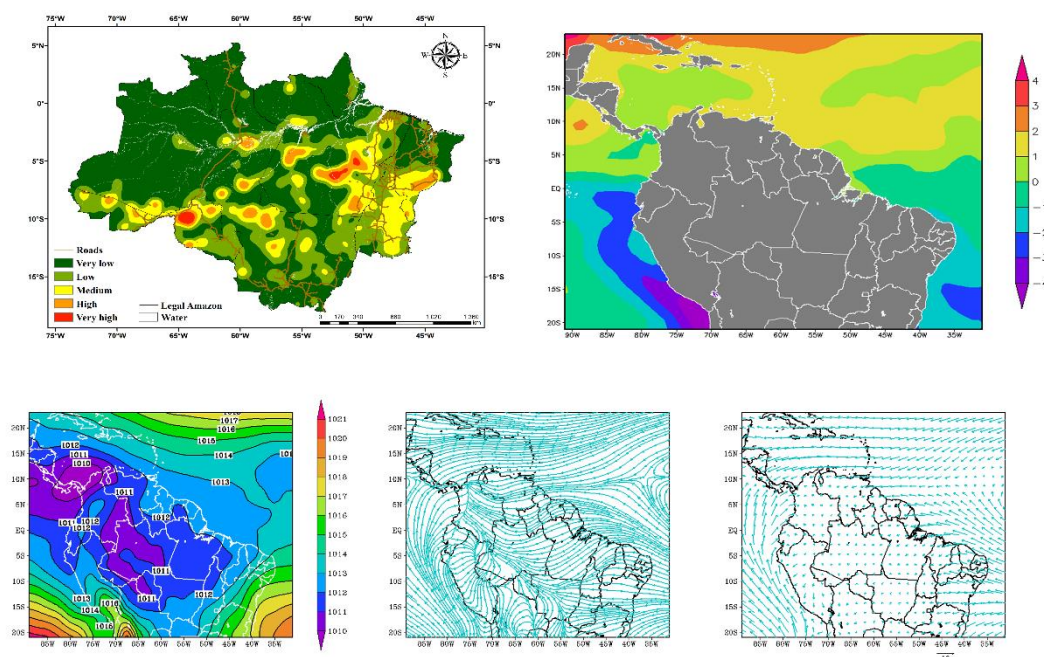


Figura 20. Densidade kernel (acima a esquerda), anomalia da temperatura da superfície do mar (°C) (acima a direita), pressão atmosférica a 1000mb (mb) (abaixo a esquerda), correntes de vento (abaixo no centro) e vetores de ventos (abaixo a direita) para fevereiro de 2010 e setembro de 2009 (El Niño).

O padrão de concentração dos focos de calor, em fevereiro de 2011 (La Niña), foi similar ao observado no período de El Niño para esse mês. Os focos se concentraram no estado de Roraima e é possível observar machas de baixa densidade em outros estados. O Mato Grosso, apresentou, também, pequenas machas de média densidade (Figura 21).

Apesar do período ser considerado La Niña, neste mês as águas do OPT estavam mais quentes quando comparados a climatologia. A variação foi de 1 a 3°C. Na porção do OAT, as águas estavam mais frias, variando entre -2 a -0,5°C. As baixas pressões atuaram sobre toda a região da Amazônia e nas porções Nordeste e Noroeste. É possível observar que os anticlones se encontram mais distantes do continente, tanto na porção Sudeste quanto Sudoeste.

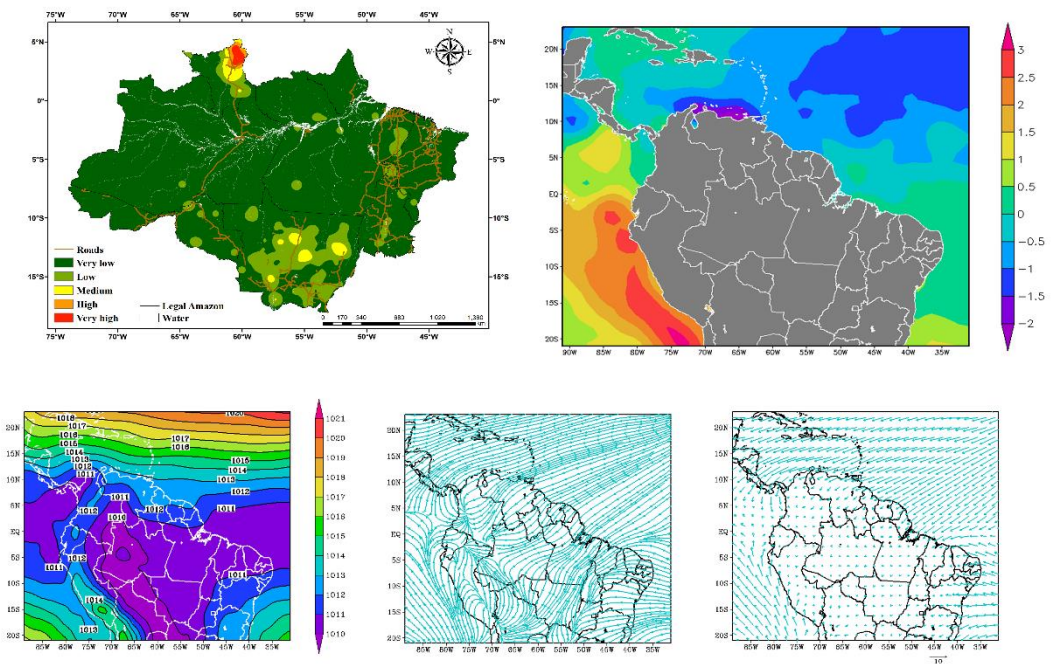
A intensidade dos ventos também foi maior nas regiões do OPT e OAT e menor no continente, sobre a Amazônia Legal. No mapa de correntes é possível observar forte influência na Amazônia Legal das correntes provenientes da porção Nordeste.

Em setembro de 2010, período de La Niña, a porção Norte da Amazônia Legal apresentou apenas densidade muito baixa de focos de calor (Figura 21). A densidade muito alta só foi verificada entre os estados do Pará e Mato Grosso. É possível observar, ainda, manchas de baixa a alta densidade nas porções Sul e Leste do Amazônia Legal.

Na região do OPT, é possível observar anomalias negativas (entre -5 a -2°C), ou seja, as águas oceânicas estavam mais frias do que as médias históricas. Próximo a região Nordeste do Brasil, a anomalia variou entre -1 a 0°C enquanto que na porção do OAT, essa variação foi de 0 a 2°C, indicando águas mais quentes.

Sobre a Amazônia Legal até a porção mais ao Norte, prevaleceram as baixas pressões e é possível observar a presença de anticlones (alta pressão) nas porções Sudeste e Sudoeste. A intensidade dos ventos (vetores) foi alta na região dos ventos alísios e mais baixa sobre a Amazônia Legal. Atuaram sobre a Amazônia Legal, correntes de vento provenientes, principalmente, das porções Nordeste e Sudeste.

FEB



SEP

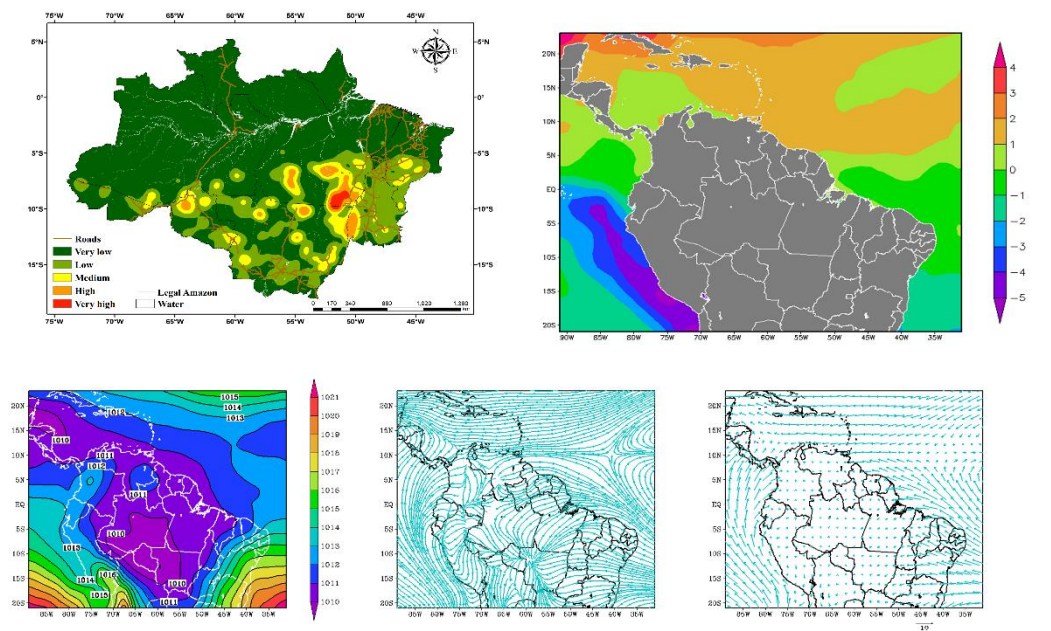


Figura 21. Densidade kernel (acima a esquerda), anomalia da temperatura da superfície do mar (°C) (acima a direita), pressão atmosférica a 1000mb (mb) (abaixo a esquerda), correntes de vento (abaixo no centro) e vetores de ventos (abaixo a direita) para fevereiro de 2011 e setembro de 2010 (La Niña).

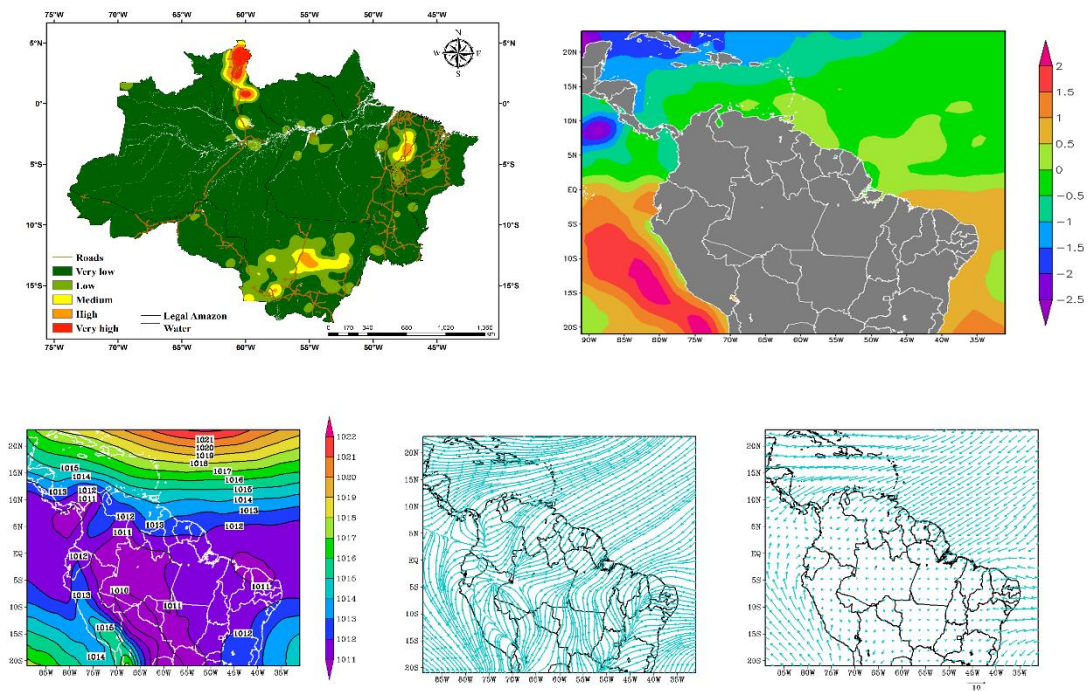
Em fevereiro de 2008, os focos se concentraram novamente no estado Roraima sendo o único estado a apresentar a densidade muito alta (Figura 22). Também foram significativos os focos no estado do Mato grosso. Similar a fevereiro de 2011, as águas na região do OPT estavam mais quentes do que a média histórica, entre 1 a 2°C. No OAT, as anomalias variaram entre -0,5 a 0,5°C.

O padrão das zonas de pressão também foi similar aos observados em fevereiro de 2011, ou seja, zonas de baixa pressão por quase todo o continente e os anticlones mais afastados. Os padrões de correntes e vetores de vento foram semelhantes a fevereiro de 2011. É possível observar que os vetores no estado de Roraima foram um pouco maiores quando comparados ao resto da região amazônica, indicando velocidades de vento mais altas no estado.

O padrão das densidades, em setembro de 2007, se manteve nas porções Sul e Leste da Amazônia Legal (Figura 22). Com uma mancha mais acentuada de alta densidade de focos entre os estados do Pará e Mato Grosso. Esses foram os únicos estados a apresentar densidade muito alta para esse mês. As águas do OPT estavam mais frias com variação da anomalia entre -6 e -3 °C. No OAT, a anomalia foi positiva e variou entre 0 a 2°C.

Nesse período, os anticlones se encontram mais próximos ao continente e sobre a Amazônia Legal até as regiões mais ao Norte prevaleceram as baixas pressões. Os padrões de vetores e correntes de vento observados foram semelhantes a esse mês em 2010.

FEV



SEP

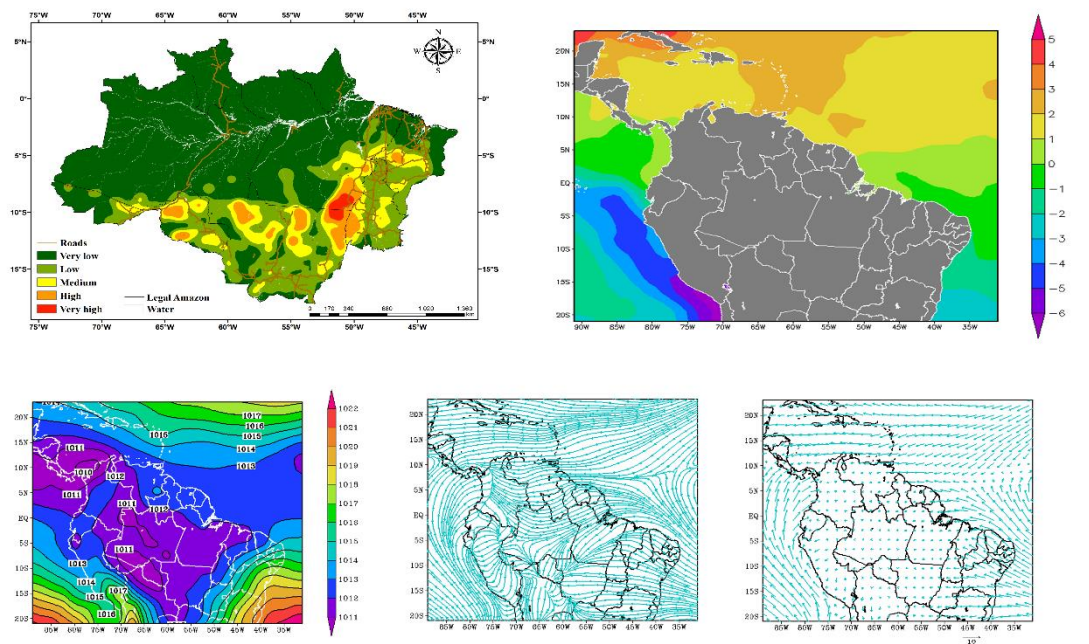


Figura 22. Densidade kernel (acima a esquerda), anomalia da temperatura da superfície do mar (°C) (acima a direita), pressão atmosférica a 1000mb (mb) (abaixo a esquerda), correntes de vento (abaixo no centro) e vetores de ventos (abaixo a direita) para fevereiro de 2008 e setembro de 2007 (La Niña).

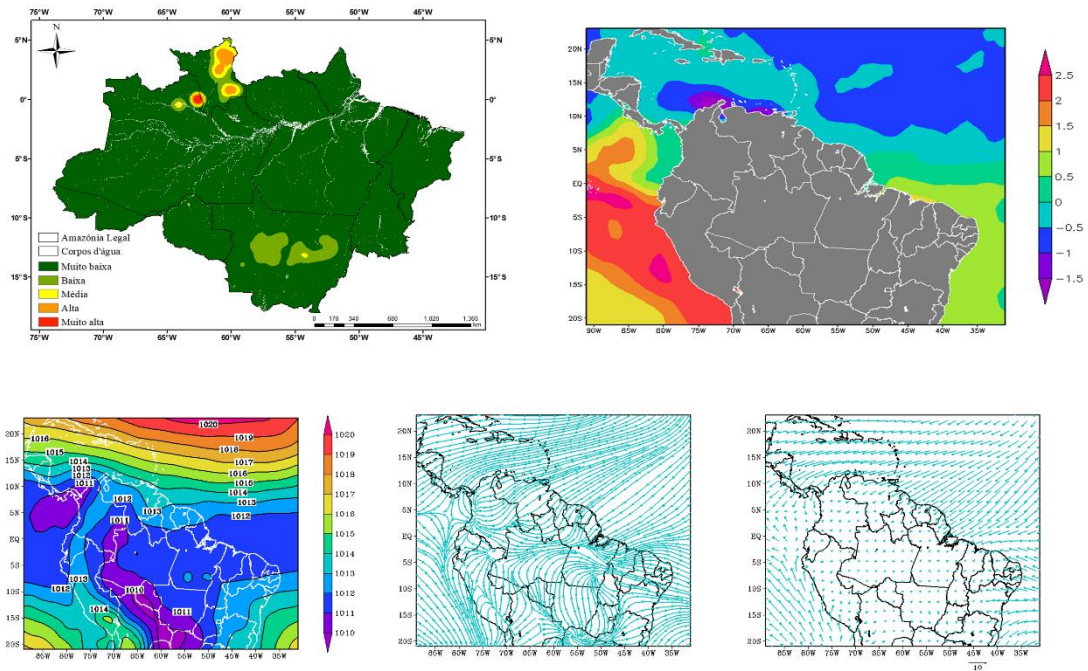
No período de neutralidade, em fevereiro de 2004, foi observado densidades médias a alta no estado de Roraima, manchas de densidade baixa no estado do Mato Grosso e uma pequena mancha de densidade muito alta no Norte do estado do Amazonas na fronteira com Roraima (Figura 23). A anomalia da TSM na porção do OPT apresentou variação entre 1,5 a 2,5 °C, ou seja, as águas estavam mais quentes quando comparados a média histórica. Na região do OAT, a variação foi de -1 a 0,5 °C.

No OAT, é possível observar a atuação de uma zona de alta pressão enquanto que sobre a Amazônia Legal e o OPT, predominaram baixas pressões. Os vetores e correntes de vento mostram a atuação dos ventos oriundos do Nordeste e Sudeste com maior intensidade nos oceanos do que no continente.

É possível ver na Figura 23 a diferença no padrão de concentração de focos para setembro de 2003. Houve alta concentração de focos na porção Sul e Leste, englobando os estados do Acre, Rondônia, Mato Grosso, Pará, Tocantins e Maranhão. A densidade muito alta só foi observada no Mato Grosso e Pará. As águas no OPT estavam mais frias do que a climatologia, nesse mês. A anomalia variou entre -4 a 0 °C. Na região do OAT, a anomalia foi positiva, variando entre 0 a 2 °C.

Nesse período, é possível observar as baixas pressões atuando desde a Amazônia Legal até a porção Norte, incluindo a região do OAT, enquanto as regiões de alta pressão se aproximam do continente vindos da porção Sudeste e Sudoeste. Os mapas de corrente e vetor mostram maior atuação e intensidade dos ventos de Sudeste no continente. Enquanto que os ventos de Nordeste apresentaram menor intensidade e maior atuação ao Norte da América do Sul.

FEB



SEP

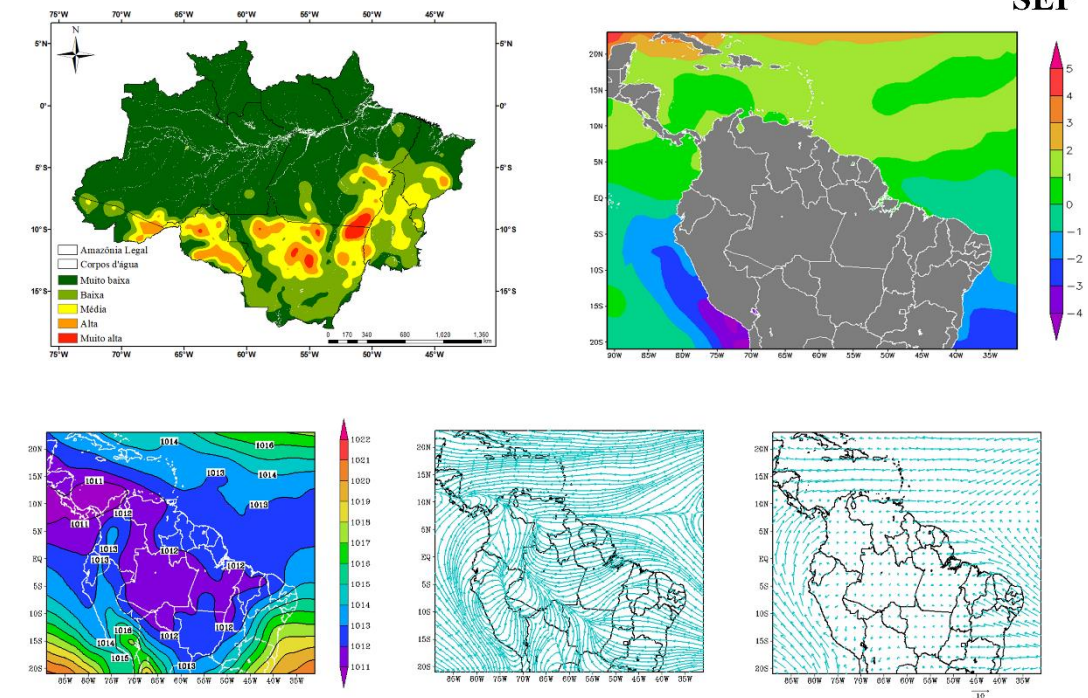


Figura 23. Densidade kernel (acima a esquerda), anomalia da temperatura da superfície do mar (°C) (acima a direita), pressão atmosférica a 1000 mb (mb) (abaixo a esquerda), correntes de vento (abaixo no centro) e vetores de ventos (abaixo a direita) para fevereiro de 2004 e setembro de 2003 (neutralidade).

O estado do Mato Grosso, em fevereiro de 2013, apresentou uma porção considerável de densidade alta a muito alta, diferente do encontrado em fevereiro de 2004. Além disso, também é possível observar novamente no estado de Roraima machas de concentração de focos, dessa vez das densidades baixa a alta (Figura 24). A anomalia da TSM na região do OPT foi de 2 a 3,5°C, indicando águas ainda mais quentes quando

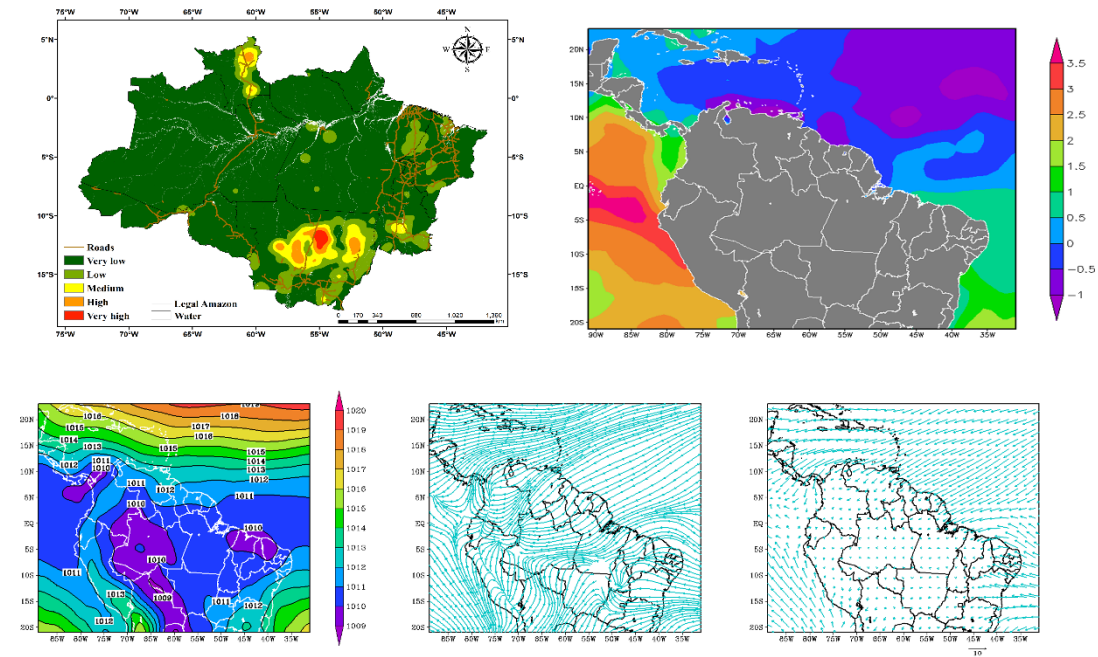
comparadas a fevereiro de 2004. No OAT, as águas estavam mais frias e variaram entre -1 a 0°C.

A atuação das pressões, correntes e dos vetores de vento apresentou padrão bastante similar a esse mesmo mês em 2004. Logo, é possível observar alta pressão no OAT e baixa pressão sobre a Amazônia Legal e o OPT. Da mesma forma, os vetores e correntes de vento provenientes do Nordeste e Sudeste atuaram com mais força nos oceanos.

Em setembro de 2013, foi observado densidades média a muito alta na região Sul, Leste e Oeste da Amazônia Legal (Figura 24). Nesse mês, o estado de Roraima apresentou apenas a densidade muito baixa. Assim como em setembro de 2003, as águas do OPT apresentaram anomalias negativas que variaram entre -4 a 0°C e no OAT essa variação foi de 0 a 2°C.

A atuação das pressões, correntes e dos vetores de vento apresentou padrão bastante semelhante a setembro de 2003, ou seja, baixas pressões atuando sobre a Amazônia Legal e ao Norte. E regiões de alta pressão oriundos da região Sudeste e Sudoeste próximos ao continente. Os ventos de Sudeste, mais intensos, atuaram mais no continente e os de Nordeste, menos intensos, tiveram maior atuação ao Norte da América do Sul.

FEB



SEP

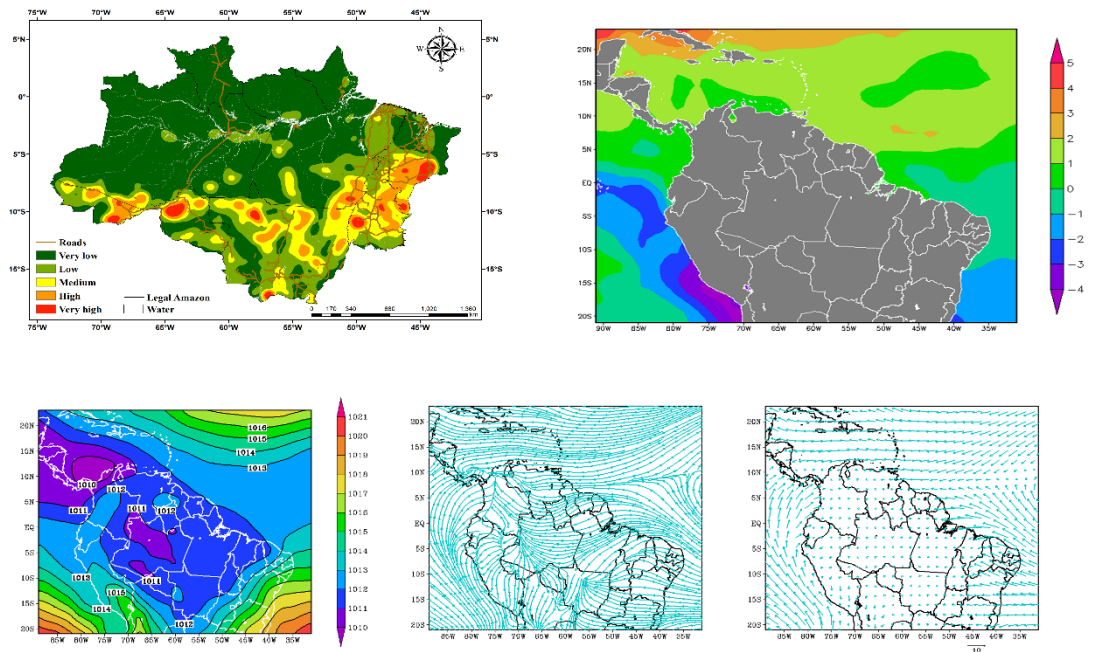


Figura 24. Densidade kernel (acima a esquerda), anomalia da temperatura da superfície do mar (°C) (acima a direita), pressão atmosférica a 1000 mb (mb) (abaixo a esquerda), correntes de vento (abaixo no centro) e vetores de ventos (abaixo a direita) para fevereiro e setembro de 2013 (neutralidade).

5.4 Correlação de Spearman

Os coeficientes de correlação de Spearman se encontram nas Figuras 25 (El Niño), 26 (La Niña) e 27 (Neutralidade). Valores riscados não apresentaram significância ao nível de 95%. Os valores em tons de vermelho representam relação inversamente proporcional (negativa) e valores em tons de amarelo a branco representam relação diretamente proporcional (positiva).

Entre 2009/2010, os focos de calor apresentaram correlação significativa com todas as variáveis (Figura 25). Foi observada alta correlação positiva com as variáveis área queimada (0,92), emissões de carbono (0,9) e velocidade zonal do vento (0,73). Dessa forma, quanto mais focos de calor maior é o tamanho da área queimada, maiores são as emissões de carbono e maior é a velocidade do vento. Apresentou, também, correlação, ainda que menor, com evapotranspiração (0,64), temperatura máxima (0,64) e temperatura média (0,39). Nas demais variáveis foram observadas correlação negativa em que a maior correlação foi com a umidade relativa do ar (-0,84), ou seja, quanto maior a incidência de focos de calor, menor é a umidade relativa. A umidade do solo também possui alta correlação negativa com um coeficiente de -0,83. A área queimada apresentou comportamento similar aos focos de calor.

Dentre as demais variáveis, é preciso destacar algumas outras relações. A umidade do solo apresentou alta correlação negativa com a velocidade do vento (-0,93) e evapotranspiração (0,8). As emissões de carbono demonstraram alta correlação negativa em relação a umidade relativa (-0,93) e chuvas (-0,9). A temperatura mínima não apresentou correlação significativa com as variáveis umidade do solo, temperaturas máxima e média, velocidade do vento e evapotranspiração.

Durante 2015, os focos de calor apresentaram relação ainda maior com as variáveis, exceto temperatura mínima que permaneceu o mesmo coeficiente (0,31). Neste ano a correlação dos focos com as chuvas foi de -0,87, com a umidade relativa foi -0,94 e com a temperatura média foi 0,99. Novamente, a área queimada e emissões de carbono demonstraram relação similar a dos focos de calor.

A temperatura mínima apresentou correlação significativa com a temperatura média (0,76) mas não demonstrou correlação com as chuvas, umidade relativa, emissões de carbono e área queimada. Já evapotranspiração demonstrou forte relação negativa com a umidade do solo (-0,91) e forte relação positiva com variáveis como temperatura máxima (0,9), emissões de carbono (0,85) e velocidade do vento (0,86).

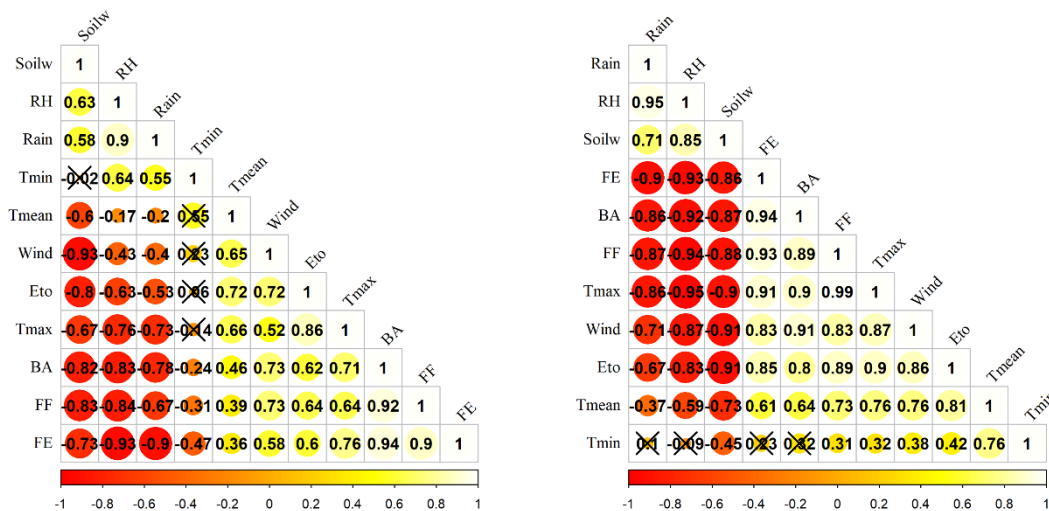


Figura 25. Coeficientes de correlação de Spearman nos anos de El Niño, 2009/2010 (a esquerda) e 2015 (a direita), entre as variáveis chuva (Rain), umidade relativa do ar (RH), umidade do solo (soilw), emissões de carbono (FE), área queimada (BA), focos de calor (FF), temperatura máxima do ar (Tmax), temperatura mínima do ar (Tmin), temperatura média do ar (Tmean), velocidade zonal do vento (wind) e evapotranspiração (Eto).

No período de La Niña, entre 2007/2008, os focos de calor apresentaram alta correlação com quase todas as variáveis (Figura 26). Entre as correlações negativas, a maior foi com a umidade relativa (-0,9), seguido da umidade do solo (-0,88). Já entre as positivas, a maior foi com a emissão de carbono (0,96), seguidos da área queimada (0,93) e temperatura máxima (0,84).

A área queimada demonstrou alta correlação negativa com a umidade relativa (-0,85) e chuvas (-0,8) e alta correlação positiva com as emissões de carbono (0,96). Observou-se, também, alta correlação negativa entre velocidade do vento e umidade do solo (-0,98) e alta correlação positiva entre chuvas e umidade relativa (0,96). A temperatura mínima não apresentou correlação significativa com nenhuma variável.

Em 2013, verificou-se alta correlação negativa entre a incidência de focos de calor e as variáveis chuva (-0,94), umidade relativa (-0,97) e umidade do solo (-0,87). Dentre as maiores correlações positivas estão novamente a área queimada (0,96), as emissões de carbono (0,97) e a temperatura máxima (0,97).

As emissões de carbono apresentaram correlação de -0,99 com as chuvas e -0,98 com a umidade relativa. Evapotranspiração demonstrou correlação de 0,89 com a velocidade do vento. E novamente, a temperatura mínima não apresentou correlação significativa com nenhuma das variáveis.

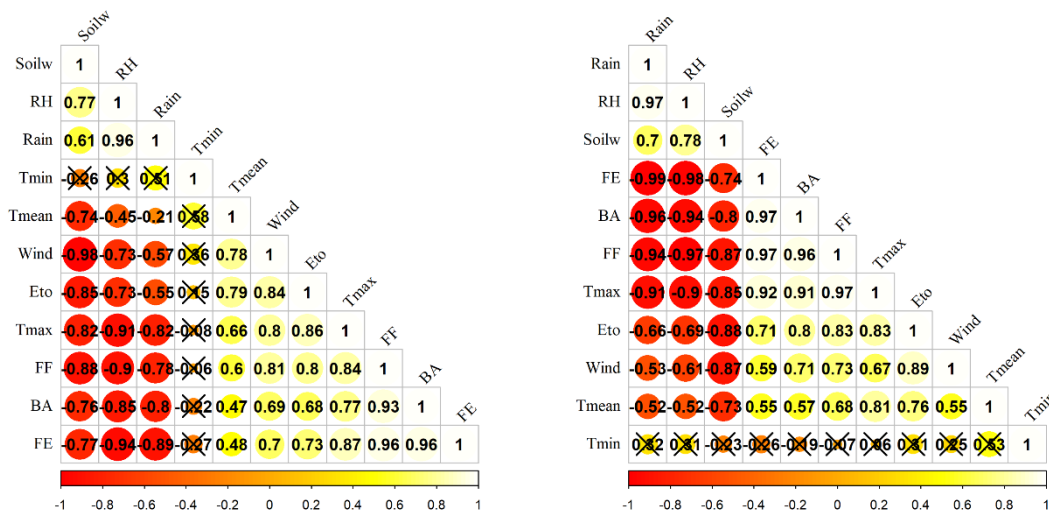


Figura 26. Coeficientes de correlação de Spearman nos anos de La Niña, 2007/2008 (a esquerda) e 2010/2011 (a direita), entre as variáveis chuva (Rain), umidade relativa do ar (RH), umidade do solo (soilw), emissões de carbono (FE), área queimada (BA), focos de calor (FF), temperatura máxima do ar (Tmax), temperatura mínima do ar (Tmin), temperatura média do ar (Tmean), velocidade zonal do vento (wind) e evapotranspiração (Eto).

Na neutralidade, entre 2003/2004, o comportamento dos focos de calor foi similar aos anos descritos anteriormente. As maiores correlações negativas entre os focos foram com as chuvas (-0,9), umidade relativa (-0,95) e umidade do solo (-0,86) e as maiores relações positivas foram observadas com a área queimada (0,97), as emissões de carbono (0,93) e a temperatura máxima (0,92) (Figura 27).

A temperatura média não apresentou correlação significativa com as variáveis focos de calor, área queimada, emissões de carbono, umidade relativa, chuvas e

temperatura mínima. A temperatura mínima apresentou correlação média com as chuvas (0,61).

Em 2013, de forma geral, os focos de calor apresentaram correlações um pouco menores quando comparadas aos outros anos (Figura 27). A relação com as emissões de carbono foi de 0,87, com a temperatura máxima foi de 0,86 e com a área queimada foi de 0,88. Além disso, a evapotranspiração obteve um coeficiente de 0,87. Dentre as relações negativas com os focos de calor, a umidade relativa apresentou coeficiente de -0,89 e a umidade do solo um coeficiente de 0,88.

Diferente dos outros anos, a temperatura média não apresentou correlação com nenhuma das variáveis. A temperatura máxima apresentou forte correlação inversa com a umidade relativa (-0,92) e a umidade do solo apresentou forte correlação inversa com as variáveis área queimada (-0,86), evapotranspiração (-0,84) e velocidade do vento (-0,87).

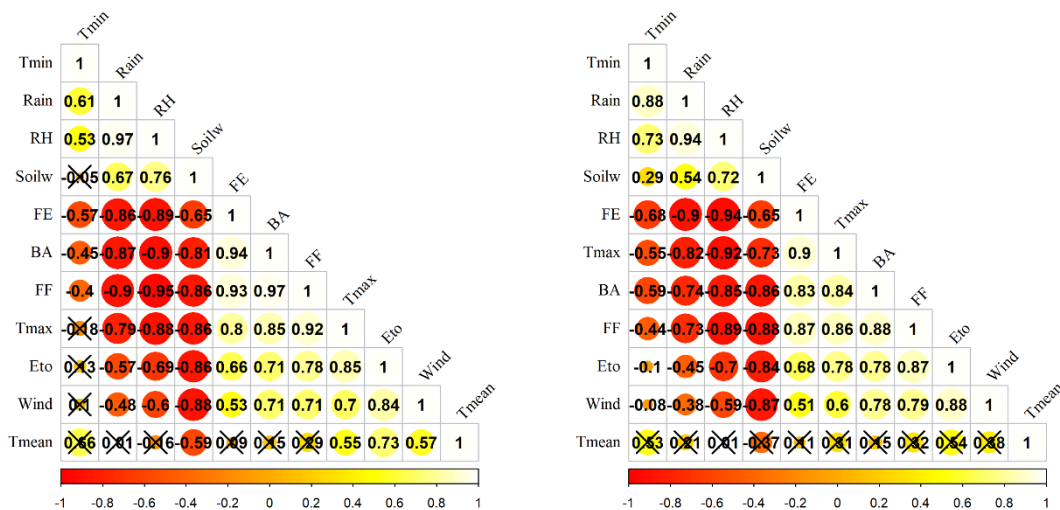


Figura 27. Coeficientes de correlação de Spearman nos anos de neutralidade, 2003/2004 (a esquerda) e 2013 (a direita), entre as variáveis chuva (Rain), umidade relativa do ar (RH), umidade do solo (soilw), emissões de carbono (FE), área queimada (BA), focos de calor (FF), temperatura máxima do ar (Tmax), temperatura mínima do ar (Tmin), temperatura média do ar (Tmean), velocidade zonal do vento (wind) e evapotranspiração (Eto).

5.5 Teste de Mann-Kendall

As três principais culturas temporárias cultivadas na Amazônia Legal são milho, soja e cana-de-açúcar. As áreas colhidas para essas culturas no período entre 1990 e 2018 estão apresentadas nas Figuras 28, 29 e 30. No Mato Grosso e Tocantins as áreas colhidas de milho vêm aumentando desde os anos 1990, com pico em 2017 e uma leve queda em 2018 (Figura 28). Foram colhidos, apenas em 2018, 4.417.207ha no Mato Grosso e 217.873ha no Tocantins. Nos outros estados, os anos que apresentaram maiores áreas colhidas variaram. Em Roraima as áreas foram maiores entre 1997 e 2004 enquanto que Rondônia apresentou crescimento até meados dos anos 90, voltando a crescer apenas a partir de 2011. Foram colhidos, em 2018, considerando-se toda a Amazônia Legal, 5.505.940ha de milho.

De acordo com a análise de tendência (Tabela 5), não houve tendência significativa para o milho nos estados do Acre, Amazonas, Maranhão, Pará e Roraima. Nos demais estados foi verificada tendência significativa positiva, ou seja, as áreas

colhidas de milho vêm crescendo e o esperado é que continue a aumentar ao longo dos anos.

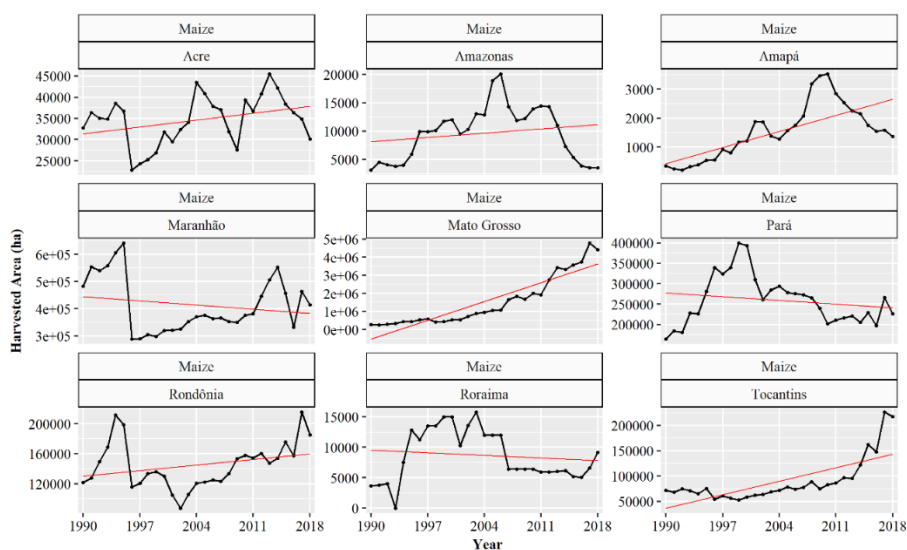


Figura 28. Área colhida de milho entre os anos de 1990 e 2018, por estado, na Amazônia Legal Brasileira.

Para a soja (Figura 29), é possível observar que no Acre havia pouca ou nenhuma soja sendo cultivada até os anos 2000. Já em 2018 foram cultivados 480ha de soja no estado. No Amapá, a soja começou a ser cultivada a partir de 2013, alcançando 20,500 ha de área colhida em 2018. No estado do Pará, o cultivo de soja vem crescendo desde 1997, tendo sido colhidos 557.532 ha em 2018. O Mato Grosso foi o estado com maior área colhida de soja com 9.437.849ha colhidos em 2018. Ao todo, em 2018, foram colhidos 12.199.111ha de soja na Amazônia Legal.

O teste de Mann-Kendall demonstrou que a tendência foi significativa e positiva para todos os estados, exceto o Amazonas. De acordo com a análise pode-se inferir que a tendência nos próximos anos é que a área cultivada por soja aumente na maioria dos estados que compreendem a Amazônia Legal.

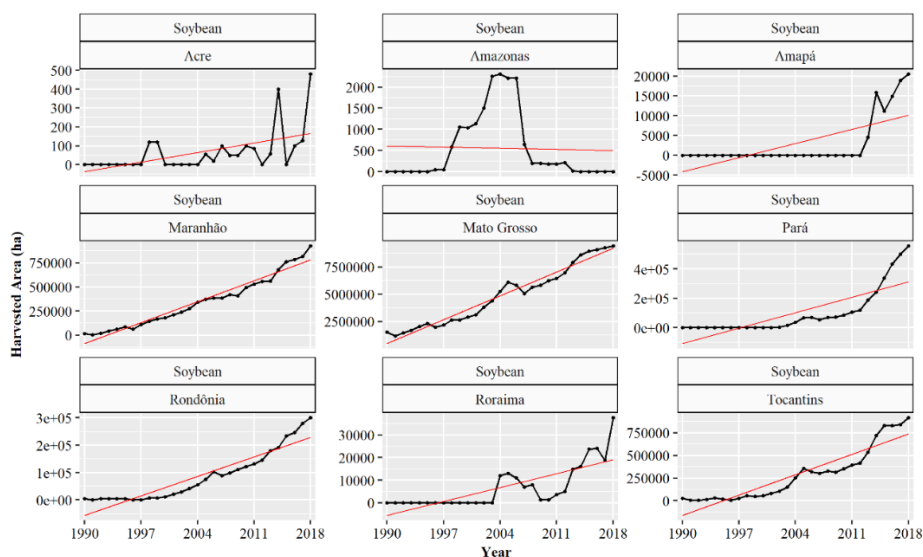


Figura 29. Área colhida de soja entre os anos de 1990 e 2018, por estado, na Amazônia Legal Brasileira.

Os estados do Mato Grosso e Maranhão foram os que apresentaram as maiores áreas colhidas de cana-de-açúcar com um pico de 289.091ha em 2015 no Mato Grosso e 50.477ha no Maranhão em 2010 (Figura 30). O Acre apresentou redução na área colhida a partir de 2015, diminuindo de 3.568ha em 2015 para 455 ha em 2018. Na Amazônia Legal como um todo foram colhidos 386.866ha de cana-de-açúcar no ano de 2018.

A análise de tendência para cana-de-açúcar foi significativa e positiva para todos os estados da Amazônia Legal. Da mesma forma que para as demais culturas, espera-se que ao longo dos anos essas áreas continuem aumentando.

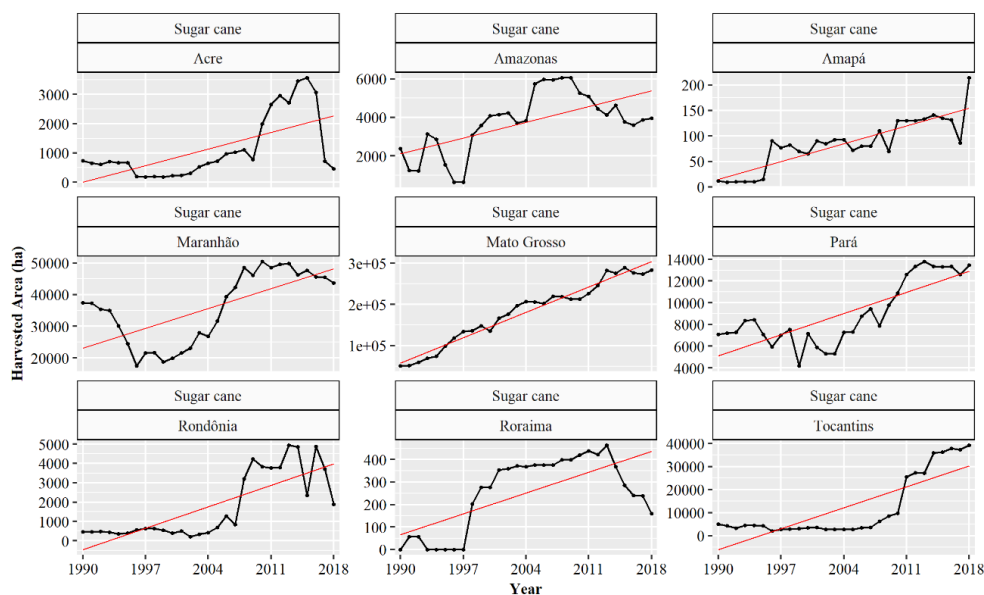


Figura 30. Área colhida de cana-de-açúcar entre os anos de 1990 e 2018, por estado, na Amazônia Legal Brasileira.

Tabela 5: Resultados do teste Mann-Kendall ($\alpha= 5\%$) para as culturas cana-de-açúcar, milho e soja nos estados da Amazônia Legal para o período entre 1990 e 2018.

Estado	Cultura	Tau	p-valor	Zmk
Acre	Cana-de-açúcar	0,474	0,00034*	3,58
	Milho	0,232	0,08107	1,74
	Soja	0,508	0,00038*	3,55
Amazonas	Cana-de-açúcar	0,417	0,00162*	3,15
	Milho	0,207	0,11949	1,56
	Soja	0	1	0
Amapá	Cana-de-açúcar	0,683	0*	5,13
	Milho	0,584	0,00001*	4,43
	Soja	0,598	0,00008*	3,94
Maranhão	Cana-de-açúcar	0,409	0,00197*	3,1
	Milho	0,143	0,28498	1,07
	Soja	0,985	0*	7,48
Mato Grosso	Cana-de-açúcar	0,906	0*	6,88
	Milho	0,921	0*	7
	Soja	0,936	0*	7,11

Pará	Cana-de-açúcar	0,562	2,1E-05*	4,26
	Milho	-0,187	0,15947	-1,41
	Soja	0,928	0*	6,92
Rondônia	Cana-de-açúcar	0,552	2,9E-05*	4,18
	Milho	0,315	0.01721*	2,38
	Soja	0,895	0*	6,79
Roraima	Cana-de-açúcar	0,508	0.00016*	3,77
	Milho	-0,12	0.37669	-0,88
	Soja	0,711	0*	5,05
Tocantins	Cana-de-açúcar	0,498	0.00016*	3,77
	Milho	0,635	1E-06*	4,82
	Soja	0,901	0*	6,85

***Valores significativos ao teste de Mann-Kendall com 95% de confiança.**

6 DISCUSSÃO

A região que compreende a Amazônia Legal é um grande sistema que depende de diversos fatores para seu funcionamento. Entender os processos que ali ocorrem requer o entendimento de quais fenômenos vem alterando os padrões climáticos e de fogo e, ainda, qual o papel do ser humano e das políticas públicas nesse contexto.

No presente estudo, diferente do esperado, os focos de calor e tamanho de área queimada foram maiores no período de La Niña. Esse fato pode estar evidenciando o papel de outros fenômenos (ambientais e sociais) no regime de fogo da região. Da Silva Junior et al. (2019), associaram área queimada maior em 2007/2008 (La Niña), a influência de um período neutro entre janeiro e julho de 2007 e também a maior magnitude dos ventos alísios (propagadores de fogo) que tende a ocorrer em períodos de La Niña.

O Mato Grosso e o Pará foram os estados com mais focos de calor e também os mais desmatados desde 2004 (Figura 7). São estados que compreendem o chamado arco do desmatamento – região que sofre com a expansão da agropecuária. A partir dos anos 90, houve avanços tecnológicos e um maior interesse em comercialização de *commodities*, que permitiram uma grande expansão da soja e de outras culturas na Amazônia. O Mato Grosso, Pará e Rondônia absorveram juntos 83% da expansão agrícola e 93% da expansão pecuária entre 1995 e 2006 (IMAFLOA, 2016). A partir de 2006, com políticas como a moratória da Soja e posteriormente com a reformulação do código florestal, o desmatamento na região diminuiu drasticamente até 2012.

Apesar da diminuição do desmatamento, o alto número de focos de calor e área queimada no Mato Grosso e Pará pode estar ligada ao fato de grande parte do território já ter sido desmatado e também ao tamanho desses estados. Além disso, são estados que contém regiões de florestas secas (WWF, 2004) que são conhecidas como regiões de transição entre o Cerrado e as florestas mais úmidas da Amazônia. Essas áreas são pouco protegidas por unidades de conservação e muito afetadas com as mudanças de uso do solo.

Considerando a densidade de focos de calor, a floresta estacional obteve destaque. De acordo com o manual técnico da vegetação brasileira (2012), a floresta estacional apresenta uma baixa diversidade de espécies quando comparadas as florestas do entorno.

São florestas que sofrem diversos impactos com a exploração madeireira e expansão agrícola, porém poucos estudos existem a respeito da mesma (KUNZ et al., 2008).

Quando considerados os valores absolutos, as florestas ombrófila aberta e densa registraram alto número de focos. A floresta ombrófila aberta ocorre em área menos úmida do que quando comparada a floresta ombrófila densa e é caracterizada por um dossel mais aberto. Compreende florestas de bambus e de palmeiras. Ferreira (2014), salienta a suscetibilidade das florestas de bambus da Amazônia ao fogo devido as características climáticas mais secas nessas áreas e a sincronicidade na morte dos bambus que aumentam o material combustível dos incêndios florestais. Além disso, a recorrente incidência de incêndios nessas florestas, favorece a expansão dos bambus para além das fronteiras das florestas mais úmidas (SMITH & NELSON, 2011).

No período de El Niño, a floresta ombrófila densa sofreu ainda mais com os focos de calor, superando em 2009/2010 a classe savana que foi a que mais registrou focos de calor em todos os outros anos. O período de El Niño foi o que menos choveu e o que apresentou as maiores anomalias positivas de temperatura, evidenciando a vulnerabilidade das florestas úmidas em períodos de seca extrema.

Já a savana e pecuária apresentaram valores altos em ambos os casos, ou seja, quando considerados os valores absolutos e em forma de densidade. Essas classes são mais propícias a incidência do fogo devido a suas características florísticas, climáticas e também devido a práticas antrópicas. Silvério et al. (2013), sugerem que o fogo pode agir como um mediador para a substituição da floresta amazônica por ecossistemas dominados pela grama. Balch et al. (2009), demonstraram que o fogo próximo a bordas de florestas úmidas pode favorecer a invasão de gramíneas para o interior da floresta. Em estados como o Mato Grosso que já sofreu bastante com o desmatamento e ainda possui uma grande área de Cerrado, a alta incidência de fogo é extremamente preocupante.

Um outro fator de influência no regime de fogo da região é o plantio de culturas como o milho, a cana-de-açúcar e, principalmente, a soja. A tendência em aumentar a área plantada dessas culturas na Amazônia pode significar avanço nas fronteiras agrícolas, aumento de áreas degradadas, diminuição dos estoques de carbono e mudanças no clima da região. Todos esses fatores juntos podem favorecer a incidência de períodos de seca extrema e por isso aumentar a ocorrência e propagação de incêndios.

O interesse pelo cultivo da cana-de-açúcar no Brasil é proveniente, além da produção de açúcar, da alta demanda por etanol. Esse combustível tem ganhado destaque devido à valorização do petróleo e, conseqüente aumento nos preços da gasolina, e maior procura por biocombustíveis. O Brasil é o segundo maior produtor de etanol do mundo (DEPEC, 2017), demonstrando a importância econômica dessa cultura para o país.

Entretanto, a produção de cana-de-açúcar tem sido associada a diversos prejuízos ambientais e sociais, tais como: prática de fogo para facilitar a colheita que acarreta em aumento da poluição do ar (LARA et al., 2005), perda de biodiversidade (GHELER-COSTA, 2006), degradação do solo, aumento de doenças respiratórias provenientes do fogo (URIARTE et al. 2009) e exploração de trabalhadores nas colheitas de cana (MARTINELLI & FILOSO, 2008).

Da mesma forma que a cana-de-açúcar, o cultivo de soja, explicitado pelo teste de Mann-Kendall, tenderá a aumentar no decorrer dos anos (CELIDONIO et al., 2018). De acordo com relatório publicado pelo departamento de Agricultura dos Estados Unidos (USDA), o Brasil deverá ultrapassar os Estados Unidos, tornando-se líder mundial na

produção de soja durante a temporada 2019/2020. O aumento na demanda por soja pode ser explicado, além de outros fatores, pela mudança do mercado principal da Europa para a China no início dos anos 2000.

Lathuillière et al. (2017), explicitaram que o bioma amazônico sofre ainda mais impactos com a produção de soja do que o Cerrado. O estudo aponta importantes políticas governamentais que auxiliaram na redução da conversão de áreas de floresta para a agricultura, como a já citada moratória da soja. Apesar da importância da moratória no combate ao desmatamento, ruralistas vêm pressionando pelo fim da medida. Além do impacto ambiental, a revogação da moratória pode afetar as exportações de soja já que o mercado externo exige produtos provenientes de áreas não desmatadas.

É previsto que a intensidade das temporadas de secas aumente na Amazônia durante o atual século. Essas secas causadas por anomalias na TSM estão relacionadas ao forçamento radioativo e as emissões de aerossóis pelo hemisfério norte (BOOTH, et al. 2012). Aragão et al. (2018), apontam que com a recorrência de eventos de seca, as emissões de carbono provenientes de fogo em períodos de estiagem terão mais importância na Amazônia do que as emissões oriundas do desmatamento.

No presente estudo, os anos de La Niña apresentaram as maiores emissões de carbono, acompanhando o fato de ter sido o período com maior incidência de fogo entre os anos aqui estudados. Os meses com maiores emissões, em todos os anos, foram também os meses com quantidades de chuvas inferiores à média histórica. Esse fato se deve a maior suscetibilidade da vegetação ao fogo em meses mais secos e ao uso de fogo em atividades agrícolas (CRUZ-LÓPEZ et al., 2019).

Machado-Silva et al. (2020), encontraram para agosto de 2010 o maior número de internações por bronquite em Porto Velho, terceira maior cidade da região amazônica. Os autores estudaram a série temporal 2000-2016 e 2010 esteve entre os anos com maiores taxas de fumaça na região. Esse e outros estudos evidenciam a vulnerabilidade na saúde das populações amazônicas ao aumento das secas e do fogo devido a doenças respiratórias (NUNES et al., 2013; DE ANDRADE FILHO et al., 2017). De forma geral, as cidades da Amazônia Legal são pouco preparadas para lidar com os impactos das mudanças climáticas (MALHADO et al., 2017).

Estudos a níveis globais e regionais tem mostrado que a maioria dos incêndios florestais se inicia por ação do homem, entretanto o clima é o principal fator para a ocorrência de grandes incêndios (BOWMAN et al., 2009). Os resultados aqui encontrados para o coeficiente de correlação de Spearman corroboram a ideia de que a variabilidade do fogo dentro e entre anos está relacionada a elementos climáticos. O fato dos anos de La Niña (período com mais fogo) terem apresentado a estação seca com baixas taxas de chuvas e altas temperaturas também reafirmam o papel central do clima na incidência de fogo na região amazônica. Por outro lado, os anos de El Niño apresentaram anomalias de chuva e temperatura ainda mais drásticas que nos anos de La Niña, evidenciando que o clima é importante, mas não o único fator que influencia a incidência de fogo na Amazônia.

A estrutura espacial dos focos de calor apresentados aqui pela densidade kernel aponta um padrão em que o Norte da Amazônia, especificamente Roraima, registra mais focos no período mais úmido enquanto que os estados do Mato Grosso, Acre, Tocantins e Pará detém a maioria dos focos no período seco. Dessa forma, as áreas com maior risco de ocorrência de fogo são aquelas que apresentam maior fragmentação de florestas (estados mais desmatados), áreas próximas a grandes estradas, áreas de pastagem,

agricultura e regiões de savana. Resultados semelhantes foram encontrados por Zhang et al. (2017) e Da Silva Junior et al. (2019).

De acordo com Santos et al. (2015), a região que compreende parte dos estados do Mato Grosso, Pará, Acre e Rondônia corresponde a porção mais seca da Amazônia. Os autores atribuem as diferenças de temperatura, umidade e chuvas nessas áreas a uma combinação entre desmatamento e umidade do solo. As áreas desmatadas geram sistemas de circulação específicas que em pequena escala aumentam a incidência de chuvas, mas que após um limite pode diminuir a formação de nuvens (SILVA DIAS et al., 2002).

Dentre os sistemas meteorológicos atuantes na Amazônia, pode-se destacar a zona de convergência intertropical (ZCIT), a zona de convergência do atlântico sul (ZCAS), as linhas de estabilidade (LE) e a alta da Bolívia (AB). Cada um desses sistemas influencia o regime de chuvas em diferentes partes e períodos do ano na Amazônia Legal (DE SOUZA & ROCHA, 2006; DE OLIVEIRA VIEIRA et al., 2013).

Nos mapas de corrente de vento é possível observar a ZCIT atuando diretamente na Amazônia legal em fevereiro (período chuvoso) e migrando mais ao Norte em setembro (período seco). Além disso, os dados de anomalia da TSM demonstram que o aquecimento anormal das águas do oceano atlântico tropical do Norte também tem um importante papel na geração de secas extremas. Marengo et al. (2011) associaram o início da grande seca de 2010 ao El Niño, entretanto o evento foi intensificado pelo aquecimento do atlântico tropical do Norte. O presente estudo corrobora o fato de que os climas extremos e a ocorrência de fogo na Amazônia Legal dependem não de uma, mas de diversas variáveis que atuam na região e essas tendem a se comportar de maneira imprevisível com o avanço das mudanças climáticas.

7 CONCLUSÃO

Os anos considerados de La Niña foram os que apresentaram maior número de focos de calor, área queimada e emissões de carbono. O estudo demonstra que mesmo em períodos considerados de baixo risco de fogo, as florestas podem estar vulneráveis aos incêndios devido a outras razões. Esse entendimento pode tornar o planejamento e controle do fogo mais eficazes por parte de órgãos governamentais e não governamentais.

A classe Savana foi o que mais sofreu com fogo no período estudado, isso pode ser explicado pela ocorrência natural de fogo nesse tipo de vegetação, mas também ao histórico de expansão agrícola ainda mais agressivo nessas áreas. Além disso, é possível inferir que a floresta ombrófila densa torna-se bastante vulnerável em anos de seca extrema.

O cultivo da soja é particularmente alarmante na região. Ainda que políticas do passado tenham amenizado os efeitos da expansão da soja e de outras culturas na Amazônia, o contínuo crescimento da produção em quase todos os estados da Amazônia Legal revela uma situação que, sem a interferência de políticas públicas, só tende a piorar.

Por fim, a grande incerteza a respeito do comportamento da Amazônia Legal perante o aquecimento global aumenta a necessidade de estudos como este, que leva em consideração diferentes fatores para o entendimento da dinâmica de fogo na região. Além disso, faltam trabalhos que englobem todos os estados da Amazônia Legal. Os resultados aqui encontrados podem servir como suporte a pesquisas de modelagem na região e a realização de estudos complementares que contemplem variáveis aqui não abordadas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALCÁNTARA MANZANARES, J., MUÑOZ ÁLVAREZ, J.M., 2015. Landscape classification of Huelva (Spain): an objective method of identification and characterization. *Estudios Geográficos* 76 (279), 447–471.

ALLEN, R. G., PEREIRA, L. S., RAES, D., & SMITH, M. Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements-FAO Irrigation and drainage paper 56. FAO, Roma, 300(9), D05109, 1998.

ALMEIDA, C. A., VALERIANO, D. M., ESCADA, M. I. S., & RENNÓ, C. D. Estimativa de área de vegetação secundária na Amazônia Legal Brasileira. *Acta Amazônica*, 40(2), 289-302, 2010.

ALMEIDA, C. T., OLIVEIRA-JÚNIOR, J. F., DELGADO, R. C., CUBO, P., & RAMOS, M. C. **Spatiotemporal rainfall and temperature trends throughout the Brazilian Legal Amazon, 1973–2013**. *International Journal of Climatology*, v. 37, n. 4, p. 2013-2026, 2017

ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; GONÇALVES, J. L. M.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. *Meteorologische Zeitschrift*, v. 22, n. 6, p. 711–728, 2013.

AMATULLI, G., PEREZ-CABELLO, F., DE LA RIVA, J. **Mapping lightning/human-caused wildfires occurrence under ignition point location uncertainty**. *Ecological Modelling* 200, 321–333, 2007.

ANDREOLI, R.V., SOUZA, R.A.F., KAYANO, M.T., CANDIDO, L.A. **Seasonal anomalous rainfall in the central and eastern Amazon and associated anomalous oceanic and atmospheric patterns**. *International Journal of Climatology*. V.32, p 1193–1205, 2012.

ARAGÃO, L. E., ANDERSON, L. O., FONSECA, M. G., ROSAN, T. M., VEDOVATO, L. B., WAGNER, F. H., ... & BARLOW, J. **21st Century drought-related fires counteract the decline of Amazon deforestation carbon emissions**. *Nature communications*, v. 9, n. 1, p. 536, 2018.

ARRAUT, J. R.; SATYAMURTY, P. **Precipitation and water vapor transport in the Southern Hemisphere with emphasis on the South American region**. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, v. 48, n. 9, p. 1902-1912, 2009

BALCH, J. K., NEPSTAD, D. C., & CURRAN, L. M. Pattern and process: fire-initiated grass invasion at Amazon transitional forest edges. In *Tropical fire ecology* p. 481-502. Springer Praxis Books. Springer, Berlin, Heidelberg, 2009.

BARBOSA, M. L. F., DELGADO, R. C., TEODORO, P. E., PEREIRA, M. G., CORREIA, T. P., DE MENDONÇA, B. A. F., & DE ÁVILA RODRIGUES, R. **Occurrence of fire foci under different land uses in the State of Amazonas during the 2005 drought**. *Environment, Development and Sustainability*, v. 20, p. 1-14, 2018.

BARNI, P.E., PEREIRA, V.B., MANZI, A.O. & BARBOSA, R.I. **Deforestation and forest fires in Roraima and their relationship with phytoclimatic regions in the Northern Brazilian Amazon**. *Environmental Management* .55: 1124, 2015.

- BOOTH, B. B., DUNSTONE, N. J., HALLORAN, P. R., ANDREWS, T. & BELLOUIN, N., 2012. Aerosols implicated as a prime driver of twentieth-century North Atlantic climate variability. *Nat.* 484, 228–232
- BRANDO, P. M., BALCH, J. K., NEPSTAD, D. C., MORTON, D. C., PUTZ, F. E., COE, M. T., ... & ALENCAR, A. **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, 2014.
- BRASIL. LEI Nº 5.173, DE 27 DE OUTUBRO DE 1966. Dispõe sobre o Plano de Valorização Econômica da Amazônia, Brasília,DF. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/15173.htm>. Acesso em: 20 abr. 2018.
- BERLATO, M. A., FARENZENA, H., FONTANA, D. C. Associação entre El Niño Oscilação Sul e a produtividade do milho no Estado do Rio Grande do Sul. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v. 40, n. 5, p. 423-432, 2005.
- BOER, M. M., SADLER, R. J., WITTKUHN, R. S., MCCAWE, L., & GRIERSON, P. **Long-term impacts of prescribed burning on regional extent and incidence of wildfires—evidence from 50 years of active fire management in SW Australian forests.** *Forest Ecology and Management*, v.259(1), p. 132-142,2009.
- BOWMAN, D.M.J.S., BALCH, J.K., ARTAXO, P., BOND, W.J., CARLSON, J.M., COCHRANE, M.A., D’ANTONIO, C.M., DEFRIES, R.S., DOYLE, J.C., HARRISON, S.P., JOHNSTON, F.H., KEELEY, J.E., KRAWCHUK, M.A., KULL, C.A., MARSTON, J.B., MORITZ, M.A., PRENTICE, I.C., ROOS, C.I., SCOTT, A.C., SWETNAM, T.W., VAN DER WERF, G.R., PYNE, S.J., 2009. Fire in the earth system. *Science* 324, 481–484.
- BURROUGH, P. A., & MCDONNELL, R. A. **Principles of geographical information systems** (pp. 98–99). Oxford7 Oxford Univ. Press, 1998.
- CAMINADE, C., TURNER, J., METELMANN, S., HESSON, J. C., BLAGROVE, M. S., SOLOMON, T., ... & BAYLIS, M. **Global risk model for vector-borne transmission of Zika virus reveals the role of El Niño 2015.** *Proceedings of the National Academy of Sciences*, v.114, n. 1, p. 119-124, 2017.
- CANNON, D. J., BRAYSHAW, D. J., METHVEN, J., COKER, P. J., & LENAGHAN, D. **Using reanalysis data to quantify extreme wind power generation statistics: A 33 year case study in Great Britain.** *Renewable Energy*, v. 75, p. 767-778, 2015.
- CELIDONIO, O. L. D. M., WERNER, L., & GIL, J. D. B., 2018. The determinants of recent soybean expansion in Mato Grosso, Brazil. *International food and agribusiness management review*. Wageningen. Vol. 22 (2), p. 173–191
- Centro de estudos e pesquisas em defesa civil – CEPEDEC. Mapa de susceptibilidade à ocorrência de focos de calor no estado do rio de janeiro (erj), 2019. Disponível em: <<http://defesacivil.rj.gov.br/images/sedec-arquivos/ARTIGO---Susceptibilidade-a-Incndios-Florestais.pdf>>
- CHEN, D., PEREIRA, J. M., MASIERO, A., & PIROTTI, F. **Mapping fire regimes in China using MODIS active fire and burned area data.** *Applied Geography*, 85, 14-26, 2017.

CORREIA, F. W. S.; MANZI, A. O.; CÂNDIDO, L. A.; dos SANTOS, R. M. N; PAULIQUEVIS, T. Balanço de umidade na Amazônia e sua sensibilidade às mudanças na cobertura vegetal. *Ciência e Cultura*, v. 59, n. 3, p. 39-43, 2007.

CRUZ-LÓPEZ, M. I., MANZO-DELGADO, L. D. L., AGUIRRE-GÓMEZ, R., CHUVIECO, E., & EQUIHUA-BENÍTEZ, J. A., 2019. Spatial Distribution of Forest Fire Emissions: A Case Study in Three Mexican Ecoregions. *Remote Sens.*, 11(10), 1185.

DA SILVA, S. S., FEARNSIDE, F. M., GRAÇA, P. M. L. DE A., BROWN, I. F., ALENCAR, A., DE MELO, A. W. F. **Dynamics of forest fires in the southwestern Amazon.** *Forest Ecology and Management*. V. 424, p. 312-322, 2018.

DA SILVA JÚNIOR, L. A. S., DELGADO, R. C., PEREIRA, M. G., TEODORO, P. E., & DA SILVA JUNIOR, C. A., 2019. Fire dynamics in extreme climatic events in western amazon. *Environ. Develop.*, 32, 100450.

DAS, L.; DUTTA, M.; MEZGHANI, A.; BENESTAD, R. E. **Use of observed temperature statistics in ranking CMIP5 model performance over the Western Himalayan Region of India.** *International Journal of Climatology*, v. 38, n. 2, p. 554–570, 2017.

DE ALMEIDA, C. T., DELGADO, R. C., DE OLIVEIRA JUNIOR, J. F., GOIS, G., & CAVALCANTI, A. S. Avaliação das estimativas de precipitação do produto 3B43-TRMM do estado do Amazonas. *Floresta e Ambiente*, 22(3), 279-286, 2015.

DE ANDRADE FILHO, V. S., NETTO, P. E. A., DE SOUZA HACON, S., & DO CARMO, C. N. Distribuição espacial de queimadas e mortalidade em idosos em região da Amazonia Brasileira, 2001-2012. *Ciencia & saude coletiva*, 22(1), 245-254, 2017.

DE ARAÚJO, F. M., & FERREIRA, L. G. **Satellite-based automated burned area detection: A performance assessment of the MODIS MCD45A1 in the Brazilian savanna.** *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 36, 94-102, 2015.

DE LINAGE, C., FAMIGLIETTI, J.S., RANDERSON, J.T. **Statistical prediction of terrestrial water storage changes in the amazon basin using tropical pacific and north Atlantic sea surface temperature anomalies.** *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 18 (6), 2089–2102, 2014.

DE OLIVEIRA GALVAO, M. F., DE OLIVEIRA ALVES, N., FERREIRA, P. A., CAUMO, S., DE CASTRO VASCONCELLOS, P., ARTAXO, P., HACON, F., ROUBICEK, D.A., & DE MEDEIROS, S. R. B., 2018. Biomass burning particles in the Brazilian Amazon region: Mutagenic effects of nitro and oxy-PAHs and assessment of health risks. *Environ. Pollut.*, 233, 960-970.

DE OLIVEIRA VIEIRA S., SATYAMURTY P., ANDREOLI R.V., 2013. On the South Atlantic Convergence Zone affecting southern Amazonia in austral summer. *Atmos. Science Letters* 14: 1–6.

Departamento de Pesquisas e Estudos Econômicos - DEPEC. Acúcar e Etanol, 2017. Disponível em: <https://www.economiaemdia.com.br/EconomiaEmDia/pdf/infset_acucar_etanol.pdf>.

- DE SOUZA E.B., ROCHA E.J.P., 2006. Diurnal variations of rainfall in Bragança-PA (eastern Amazon) during rainy season: mean characteristics and extreme events. *Revista Brasileira de Meteorologia* 21(3), 142–152.
- DIAS, M. S., PETERSEN, W., DIAS, P. S., CIFELLI, R., BETTS, A. K., LONGO, M., GOMES, A. M., FISCH, G. F., LIMA, M. A., ANTONIO, M. A., & ALBRECHT, R. I., 2002. A case study of convective organization into precipitating lines in the Southwest Amazon during the WETAMC and TRMM-LBA. *J. of Geol. Research: Atmospheres*, 107(D20), LBA-46.
- DOS SANTOS, C.A.C., WANDERLEY, R.L.N., ARAÚJO, A.L. and BEZERRA, B.G. Obtenção do saldo de radiação em áreas de pastagem e floresta na Amazônia através do sensor MODIS. *Revista brasileira de meteorologia*, 29(3), 2013.
- DOS SANTOS, S. M. B., BENTO-GONÇALVES, A. J., & de MELLO BAPTISTA, G. M. Quantificação e avaliação dos focos de calor no parque nacional da chapada diamantina e entorno no período de 2007 a 2016. *Revista Brasileira de Cartografia*, 69(4), 2017.
- FERNANDES, K., BAETHGEN, W., BERNARDES, S., DE FRIES, R., DE WITT, D., GODDARD, L., LAVADO, W., EUN LEE, D., PADOCH, C., PINEDO VASQUEZ, M., URIARTE, M. **North tropical Atlantic influence on western Amazon fire season variability**. *Geophys. Res. Lett.* 38 (12), L12701. 651, 2011.
- FIELD, R. D., VAN DER WERF, G. R., FANIN, T., FETZER, E. J., FULLER, R., JETHVA, H., ... & WORDEN, H. M. **Indonesian fire activity and smoke pollution in 2015 show persistent nonlinear sensitivity to El Niño-induced drought**. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, v. 113, n. 33, p. 9204-9209, 2016.
- FLEMING, K., AWANGE, J., KUHN, M., & FEATHERSTONE, W. **Evaluating the TRMM 3B43 monthly precipitation product using gridded rain-gauge data over Australia**. *Australian meteorological and oceanographic Journal*, 61, 2011.
- GHELIER-COSTA, C., 2006. Distribuição e Abundância de Pequenos Mamíferos em Relação à Estrutura da Paisagem: A Sub-Bacia do Rio Passa-Cinco como Modelo. PhD Thesis. *Ecology Agroecosystems Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, ESALQ, Brasil*.
- GIGLIO, L., RANDERSON, J.T., WERF, G.R. **Analysis of daily, monthly, and annual burned area using the fourth-generation global fire emissions database (GFED4)**. *J. Geophys. Res. Biogeosci.* v.118 (1), p.317-328, 2013.
- GIGLIO, L.; BOSCHETTI, L.; ROY, D.; HOFFMAN, A. A.; HUMBER, M. **Collection 6 MODIS Burned Area product User Guide**, 2016.
- GOOD, P., LOWE, J., COLLINS, M. & MOUFOUMA-OKIA, W., 2008. An objective Tropical Atlantic SST gradient index for studies of South Amazon dry season climate variability and change. *Phil. Trans. R. Soc. B* 363, 1761–1766. <https://doi:10.1098/rstb.2007.0024>.
- GUAN, K., PAN, M., LI, H., WOLF, A., WU, J., MEDVIGY, D., CAYLOR, K. K., SHEFFIELD, J., WOOD, E. F., MALHI, Y., LIANG, M., KIMBALL, J. S., SALESKA, S. R., BERRY, J., JOINER, J., & LYAPUSTIN, A.L., 2015. Photosynthetic seasonality of global tropical forests constrained by hydroclimate. *Nat. Geosci.* 8, 284–289.

HAO, W. M., & LARKIN, N. K. (2014). **Wildland fire emissions, carbon, and climate: wildland fire detection and burned area in the United States**. *Forest Ecology and Management*. v. 317, p. 20-25, 2014.

HILKER, T., LYAPUSTIN, A. I., TUCKER, C. J., HALL, F. G., MYNENI, R. B., WANG, Y., BI, J., DE MOURA, Y. M. & Sellers, P. J. **Vegetation dynamics and rainfall sensitivity of the Amazon**. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 111(45), p. 16041-16046, 2014.

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE. Manual Técnico Da Vegetação Brasileira. Diretoria De Geociências Coordenação De Recursos Naturais E Estudos Ambientais. 2nd ed. Rio de Janeiro: Manuais Técnicos em Geociências 1, 2012.

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE. Indicadores de Desenvolvimento Sustentável, 2017. Disponível em: <https://sidra.ibge.gov.br/tabela/896>. Acesso em: 26 jun. 2018.

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE. Amazônia legal-base de dados espaciais. Disponível em: < <https://www.ibge.gov.br/geociencias-novoportal/informacoes-ambientais/geologia/15819-amazonia-legal.html?=&t=sobre>>. Acesso em: 25 abr. 2018.

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE. Produção Agrícola Municipal – PAM. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/estatisticas/economicas/agricultura-e-pecuaria/9117-producao-agricola-municipal-culturas-temporarias-e-permanentes.html?=&t=series-historicas>>. Acesso em: 25 de out. 2019.

Instituto de pesquisas espaciais – INPE. Centro de previsão do tempo e estudos climáticos - CPTEC,2018. Disponível em: <<http://enos.cptec.inpe.br/>> Acesso em: 3 mai. 2018.

Instituto de pesquisas espaciais – INPE. PRODES – Amazônia. Monitoramento do Desmatamento da Floresta Amazônica Brasileira por Satélite. Disponível em: <http://www.obt.inpe.br/OBT/assuntos/programas/amazonia/prodes>. Acesso em: 5 jan. 2020.

Instituto de pesquisas espaciais – INPE. Ocorrências do La Niña. Disponível em: <<http://enos.cptec.inpe.br/>> Acesso em: 3 mai. 2018.

IONITA, M., TALLAKSEN, L. M., KINGSTON, D. G., STAGGE, J. H., LAAHA, G., VAN LANEN, H. A., ... & HASLINGER, K. **The European 2015 drought from a climatological perspective**. *Hydrology and Earth System Sciences*, v. 21, n. 3, p. 1397, 2017.

JIMÉNEZ-MUÑOZ, J. C., MATTAR, C., BARICHIVICH, J., SANTAMARÍA-ARTIGAS, A., TAKAHASHI, K., MALHI, Y., ... & VAN DER SCHRIER, G. **Record-breaking warming and extreme drought in the Amazon rainforest during the course of El Niño 2015–2016**. *Scientific reports*, v. 6, p. 33130, 2016.

KENDALL, Kevin. Thin-film peeling-the elastic term. *Journal of Physics D: Applied Physics*, v. 8, n. 13, p. 1449, 1975.

KOUTSIAS, N., KALABOKIDIS, K. D., & ALLGFWER, B. **Fire occurrence patterns at landscape level: beyond positional accuracy of ignition points with kernel density estimation methods**. *Natural Resource Modeling*, 2004.

KOUTSIAS, N., BALATSOS, P., & KALABOKIDIS, K. **Fire occurrence zones: kernel density estimation of historical wildfire ignitions at the national level.** Greece. *Journal of Maps*, v. 10 n. 4, p. 630-639, 2014.

KUNZ, S. H., IVANAUSKAS, N. M., MARTINS, S. V., SILVA, E., & STEFANELLO, D., 2008. Aspectos florísticos e fitossociológicos de um trecho de Floresta Estacional Perenifolia na Fazenda Trairão, Bacia do rio das Pacas, Querência-MT. *Acta amazonica*, 38(2), 245-254.

KUTTA, E., HUBBART, J. A., SVOMA, B. M., EICHLER, T., & LUPO, A. R. Symmetric and asymmetric components of anomalous tropospheric-mean horizontal fluxes of latent and sensible heat associated with ENSO events of variable magnitude. *Atmospheric research*, 198, 173-184, 2017.

LARA, L.L., ARTAXO, P., MARTINELLI, L.A., CAMARGO, P.B., VICTORIA, R.L., FERRAZ, E.S.B. Properties of aerosols from sugar-cane burning emissions in Southeastern Brazil. *Atmos. Environ.* 39, 4627–4637, 2005.

LATHUILLIÈRE, M. J., MIRANDA, E. J., BULLE, C., COUTO, E. G., & JOHNSON, M. S., 2017. Land occupation and transformation impacts of soybean production in Southern Amazonia, Brazil. *J. of clean. prod.*, 149, 680-689.

LAZZARINI, G. M. J., FERREIRA, L. C. C., FELICÍSSIMO, M. F. G., LIRA, R. G., JUSTINO, A. G., GOMES, C. S., & MAGALHÃES, G. R. D. Análise da distribuição de focos de calor no Tocantins entre 2002 e 2011. *Revista Interface (Porto Nacional)*, v.5, 2012.

LEWIS, S.L., BRANDO, P.M., PHILLIPS, O.L., VAN DER HEIJDEN, G.M.F., NEPSTAD, D.C. **The 2010 Amazon drought.** *Science* 331, 554 554, 2011.

LOPES, M. N. G., DE SOUZA, E. B., FERREIRA, D. B. S. Climatologia regional da precipitação no estado do Pará. *Revista Brasileira de Climatologia*, n. 9, v. 12, p. 84-102, 2013.

MACHADO-SILVA, F., LIBONATI, R., DE LIMA, T. F. M., PEIXOTO, R. B., DE ALMEIDA FRANÇA, J. R., MAGALHÃES, M. D. A. F. M., SANTOSA, F. L. M., RODRIGUES, J. A. & DACAMARA, C. C., 2020. Drought and fires influence the respiratory diseases hospitalizations in the Amazon. *Ecol. Indicators*, 109, 105817.

MALHADO, A. C. M, COSTA, M.H., CORREIA, R.A., MALHADO, A. C. M., FERNANDA, M., FUENTE, C. DE AMESSON, M., VERÇOSA, J. Land Use Policy Are capacity de fi cits in local government leaving the Amazon vulnerable to environmental change? *Land Use Policy* 69, 326–330, 2017.

MALHI, Y., ARAGÃO, L. E., GALBRAITH, D., HUNTINGFORD, C., FISHER, R., ZELAZOWSKI, P., SITCH, S., MCSWEENEY, C., & MEIR, P., 2009. Exploring the likelihood and mechanism of a climate-change induced dieback of the Amazon rainforest. *Proc. Natl Acad. Sci. USA* 106, 20610–20615.

MANN, H. B. (1945). Nonparametric tests against trend. *Econometrica: Journal of the Econometric Society*, 245-259.

MARLIER, M. E., DEFRIES, R. S., VOULGARAKIS, A., KINNEY, P. L., RANDERSON, J. T., SHINDELL, D. T., CHEN, Y., & FALUVEGI, G., 2013. El Niño

and health risks from landscape fire emissions in southeast Asia. *Nat. climate change*, 3(2), 131.

MARENGO, J. A., TOMASELLA, J., ALVES, L. M., SOARES, W. R., & RODRIGUEZ, D. A. The drought of 2010 in the context of historical droughts in the Amazon region. *Geophysical Research Letters*, 38(12), 2011.

MARENGO, J. A., & ESPINOZA, J. C. **Extreme seasonal droughts and floods in Amazonia: causes, trends and impacts**. *International Journal of Climatology*, v. 36, n. 3, p. 1033-1050, 2016.

MARTINELLI, L.A., FILOSO, S., 2008. Expansion of sugarcane land cover and ethanol production in Brazil: environmental and social challenges. *Ecol. Appl.* 18, 885–898

MCPHADEN, M. J., ZEBIAK, S.E., and GLANTZ, M.H. **ENSO as an intriguing concept in Earth science**. *Science*, v. 314, p. 1740–1745, 2006.

MIRALLES, D. G., VAN DEN BERG, M. J., GASH, J. H., PARINUSSA, R. M., DE JEU, R. A., BECK, H. E., HOLMES, T. R. H., JIMÉNES, C., VERHOEST, N. E. C., DORIGO, W. A., TEULING, A. J. & DOLMAN, A. J. **El Niño–La Niña cycle and recent trends in continental evaporation**. *Nature Climate Change*, v.4 n.2, p.122, 2014.

NASA - NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION. **MODIS - Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer: about**. Disponível em: <<https://modis.gsfc.nasa.gov/about/>>. Acesso em: 25 mai. 2018.

NOAA - NATIONAL OCEANIC AND ATMOSPHERIC ADMINISTRATION. NCEP-DOE Reanalysis 2: Summary. Disponível em: <<https://www.esrl.noaa.gov/psd/data/gridded/data.ncep.reanalysis2.html>>

NUNES, K.V.R., IGNOTTI, E., HACON, S.S. Circulatory disease mortality rates in the elderly and exposure to PM 2.5 generated by biomass burning in the Brazilian Amazon in 2005. *Cad Saude Publica* 29(3):589–598, 2013.

OLIVEIRA, S., OEHLER, F., SAN-MIGUEL-AYANZ, J., CAMIA, A., PEREIRA, J. M.C. **Modeling spatial patterns of fire occurrence in Mediterranean Europe using Multiple Regression and Random Forest**. *Forest Ecology and Management*, v. 275, p. 117–129, 2012.

OVANDO, A., TOMASELLA, J., RODRIGUEZ, D. A., MARTINEZ, J. M., SIQUEIRA-JUNIOR, J. L., PINTO, G. L. N., PASSY, P., VAUCHEL, P., NORIEGA, L. & VON RANDOW, C. **Extreme flood events in the Bolivian Amazon wetlands**. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, v.5, p. 293-308, 2016.

PETERSON, T. C., BARINGER, M. O. **State of the climate in 2008**. *Bulletin of the American Meteorological Society*, v. 90, n. 8, p. S1-S196, 2009.

PIATTO, M., DE SOUZA, L., I., (2017) 10 anos da moratória da soja na amazônia: história, impactos e a expansão para o Cerrado. *Imaflora*. Disponível em: <http://www.imaflora.org/downloads/biblioteca/IMF-10-anos-moratoria-da-soja-WB.pdf>.

PIRES, G. F. & COSTA, M. H., 2013. Deforestation causes different subregional effects on the Amazon bioclimatic equilibrium. *Geophys. Res. Lett.* 40, 3618–3623.

FERREIRA, E. J. L., 2014. O bambu é um desafio para a conservação e o manejo de florestas no sudoeste da Amazônia. *Ciência e Cultura*, 66(3), 46-51.

- RESSL, R., LOPEZ, G., CRUZ, I., COLDITZ, R.R., SCHMIDT, M., RESSL, S. and JIMÉNEZ, R. **Operational active fire mapping and burnt area identification applicable to Mexican Nature Protection Areas using MODIS and NOAA-AVHRR direct readout data.** *Remote Sensing of Environment*, v. 113 n. 6, p.1113-1126, 2009.
- ROGERS, B. M., SOJA, A. J., GOULDEN, M. L., & RANDERSON, J. T. **Influence of tree species on continental differences in boreal fires and climate feedbacks.** *Nature Geoscience*, v. 8, n. 3, p. 228, 2015.
- RUIZ, J.A.; LÁZARO, J.R.; CANO, I.D.; LEAL, P.H. **Burned area mapping in the North American boreal forest using terra-MODIS LTDR (2001-2011): A comparison with the MCD45A1, MCD64A1 and BA GEOLAND-2 products.** *Remote Sens.* 2013, 6, 815–840.
- SANTOS, E. B., LUCIO, P. S., & SILVA, C. M. S. E., 2015. Precipitation regionalization of the Brazilian Amazon. *Atmos. Science Letters*, 16(3), 185-192
- SESTINI, M. F., ALVALÁ, R. D. S., MELLO, E. M. K., VALERIANO, D. D. M., CHAN, C. S., NOBRE, C. A., PAIVA, J. A. DE C., & REIMER, E. D. S. Elaboração de mapas de vegetação para utilização em modelos meteorológicos e hidrológicos. São José dos Campos. *INPE*, p 74, 2002.
- DIAS, M. S., RUTLEDGE, S., KABAT, P., DIAS, P. S., NOBRE, C., FISCH, G., ... & FUENTES, J. D. Cloud and rain processes in a biosphere-atmosphere interaction context in the Amazon region. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 107(D20), LBA-39, 2002.
- SILVÉRIO, D. V., BRANDO, P. M., BALCH, J. K., PUTZ, F. E., NEPSTAD, D. C., OLIVEIRA-SANTOS, C., & BUSTAMANTE, M. M. Testing the Amazon savannization hypothesis: fire effects on invasion of a neotropical forest by native cerrado and exotic pasture grasses. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biolog. Scien.*, 368(1619), 20120427, 2013.
- SILVERMAN, B. W. **Density estimation for statistics and data analysis.** [s.l: s.n.]v. 37, 1986.
- SMITH, M., & NELSON, B. W., 2011. Fire favours expansion of bamboo-dominated forests in the south-west Amazon. *J. of Tropical Ecology*, 27(1), 59-64.
- TIAN, X., ZHAO, F., SHU, L. and WANG, M. **Distribution characteristics and the influence factors of forest fires in China.** *Forest ecology and management*, v.310, p.460-467, 2013.
- TOMZHINSKI, G. W. T., COURA, P. H. F., & DO COUTO FERNANDES, M. Avaliação da detecção de focos de calor por sensoriamento remoto para o Parque Nacional do Itatiaia. *Biodiversidade Brasileira*, n. 2, p. 201-2011, 2011.
- TORETI, A., MAIORANO, A., DE SANCTIS, G., WEBBER, H., RUANE, A.C., FUMAGALLI, D., CEGLAR, A., NIEMEYER, S., ZAMPIERI, M. **Using reanalysis in crop monitoring and forecasting systems.** *Agricultural Systems*, 0308-521X, 2018.
- URIARTE, M., YACKULIC, C. B., COOPER, T., FLYNN, D., CORTES, M., CRK, T., CULLMAN, G., MCGINTY, M., & SIRCELY, J., 2009. Expansion of sugarcane production in São Paulo, Brazil: implications for fire occurrence and respiratory health. *Agriculture, ecosystems & environment*, 132(1-2), 48-56

USTINOVA, E., 2019. Oilseeds and Products Update. United States Department of Agriculture. Report Number: BR2019-0065. Disponível em: https://apps.fas.usda.gov/newgainapi/api/Report/DownloadReportByFileName?fileName=Oilseeds%20and%20Products%20Update_Brasilia_Brazil_12-28-2019.

VALE, M. M., & PIRES, A. P. F., 2018. Climate Change in South America. *Encyclopedia of the Anthropocene*, 205–208.

VAN DER WERF, G. R., RANDERSON, J. T., GIGLIO, L., COLLATZ, G. J., MU, M., KASIBHATLA, P. S., MORTON, D. C., DEFRIES, R. S., JIN, Y., and VAN LEEUWEN, T. T.: **Global fire emissions and the contribution of deforestation, savanna, forest, agricultural, and peat fires (1997– 2009)**, *Atmos. Chem. Phys.*, 10, 11707–11735, 2010.

VILLAR, E. J. C.; RONCHAIL, J., GUYOT, J. L. **Spatio-temporal rainfall variability in the Amazon basin countries (Brazil, Peru, Bolivia, Colombia, and Ecuador)**. *International Journal of Climatology*, v. 29, p. 1574–1594, 2009.

WANG, G., SUN, S., & MEI, R. **Vegetation dynamics contributes to the multi-decadal variability of precipitation in the Amazon region**. *Geophysical Research Letters*, v. 38, p. 19, 2011.

World wild life fund (WWF). Priority ecoregions. 2004. Disponível em: Worldwildlife.org/science/ecoregions.cfm

XAVIER, A. C.; KING, C. W.; SCANLON, B. R. Daily gridded meteorological variables in Brazil (1980–2013). *International Journal of Climatology*, v. 36, n. 6, p. 2644–2659, 2016.

YOU, Q., FRAEDRICH, K., REN, G., PEPIN, N., & KANG, S. **Variability of temperature in the Tibetan Plateau based on homogenized surface stations and reanalysis data**. *International Journal of Climatology*, v. 33, n. 6, p. 1337-1347, 2013.

ZENG, N., YOON, J. H., MARENGO, J. A., SUBRAMANIAM, A., NOBRE, C. A., MARIOTTI, A., & NEELIN, J. D. **Causes and impacts of the 2005 Amazon drought**. *Environmental Research Letters*, v. 3, n. 1, p. 014002, 2008.

ZHANG, Z., FENG, Z., ZHANG, H., ZHAO, J., YU, S., DU, W., 2017. Spatial distribution of grassland fires at the regional scale based on the MODIS active fire products. *Int. J. Wildland Fire* 26, 209–218.