

**UFRRJ
INSTITUTO DE FLORESTAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS AMBIENTAIS E
FLORESTAIS**

DISSERTAÇÃO

**VARIABILIDADE ATMOSFÉRICA E SUAS CONSEQUÊNCIAS NA
DETERMINAÇÃO DO FOGO NA REGIÃO SUL DO BRASIL**

CAIO FROSSARD DE ANDRADE

2020



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

**VARIABILIDADE ATMOSFÉRICA E SUAS CONSEQUÊNCIAS NA
DETERMINAÇÃO DO FOGO NA REGIÃO SUL DO BRASIL**

CAIO FROSSARD DE ANDRADE

Sob a orientação do Professor
Rafael Coll Delgado

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

Seropédica, RJ
Fevereiro de 2020

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
Biblioteca Central / Seção de Processamento Técnico

Ficha catalográfica elaborada
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

A553v Andrade, Caio Frossard de , 1993-
Variabilidade atmosférica e suas consequências na
determinação do fogo na Região Sul do Brasil / Caio
Frossard de Andrade. - Seropédica, 2020.
62 f.: il.

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


1. Incêndios Florestais. 2. Fenômenos Atmosféricos.
3. Sensoriamento Remoto. 4. Atividades Antrópicas. I.
Delgado, Rafael Coll, 1978-, orient. II Universidade
Federal Rural do Rio de Janeiro. Programa de Pós
Graduação em Ciências Ambientais e Florestais III.
Título.

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

CAIO FROSSARD DE ANDRADE

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 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

Dedico este trabalho aos meus pais,
Amarildo Custodio Ferreira de Andrade e Rosely Frossard de Andrade.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à inteligência suprema e causa primária de todas as coisas que me criou, me anima e me move pelos caminhos mais férteis e apropriados para minha evolução.

Ao orientador deste trabalho, Rafael Coll Delgado, pelos ensinamentos e rigor requerido nas tarefas, o qual contribuiu para que eu me esforçasse ao máximo.

À minha família pela paciência e apoio incondicional em toda minha trajetória acadêmica.

À minha noiva, Estefanie Rodrigues Ribeiro, pela força e amor oferecidos de forma genuína.

Aos amigos da Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, especialmente os das turmas 2012-2 e 2010-2 de Engenharia Florestal.

Aos colegas de disciplinas da pós-graduação e do Laboratório de Sensoriamento Remoto Ambiental e Climatologia Aplicada (LSRACA).

À CAPES pela concessão da bolsa de estudo.

À todos os seres que trabalham pela paz e harmonia.

RESUMO

ANDRADE, Caio Frossard de. **Variabilidade atmosférica e suas consequências na determinação do fogo na Região Sul do Brasil**. 2020. 50p. Dissertação (Mestrado em Ciências Ambientais e Florestais). Instituto de Florestas, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, RJ, 2020.

O fogo desempenhou relevante papel na formação e ainda é importante para a manutenção da estrutura e composição vegetal de diferentes ecossistemas. A ocorrência do elemento é influenciada por variações meteorológicas que podem condicionar o material combustível. Atualmente, a alteração das paisagens por meio das diferentes atividades antrópicas e modificações no clima causadas pelo homem adulteraram a ocorrência natural do fogo. O uso do fogo não controlado por parte dos seres humanos associado a condições climáticas favoráveis à queima, tem causado prejuízos sociais, econômicos e ambientais em diferentes partes do mundo. O objetivo do presente estudo foi avaliar as variações na ocorrência do fogo na Região Sul do Brasil causadas pelas características sazonais dos anos, bem como pela variação ambiental dada pelo El Niño Oscilação Sul (ENOS). Foram associados produtos de fogo do Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) com elementos meteorológicos e dados de cobertura vegetal, além de serem avaliados dados de emissão de Carbono disponibilizados pela Global Fire Emissions Database (GFED). A correlação entre os elementos meteorológicos e o fogo foi obtida por meio do método não paramétrico de Spearman. Além disso, foi realizado o teste estatístico de Mann Kendall com as extensões de área colhida de três culturas agrícolas temporárias ao longo de 28 anos. O fogo no Sul do Brasil está correlacionado, principalmente, à redução da pluviosidade e da umidade relativa do ar em conjunto com a elevação da pressão atmosférica e o aumento da velocidade de vento. Os períodos sob efeito da fase fria do fenômeno (La Niña) apresentaram de 26% a 114% mais Focos de Calor do que os sob a fase quente (El Niño). As La Niñas também apresentaram de 7% a 77% mais área queimada do que os El Niños. As coberturas vegetais mais afetadas pelo fogo foram as relacionadas à atividade agropecuária. Os eventos de La Niña emitiram para a atmosfera mais Carbono que as ocasiões de El Niño, sendo a maior diferença observada entre a La Niña 2007/2008 (1,5097 Tg) e o El Niño 2015 (0,6467 Tg). A estatística de Mann Kendall apontou que a Cana de Açúcar, cultura agrícola com palhada altamente inflamável, apresentou tendência de expansão no estado do Paraná entre 1990 e 2018. A contínua expansão da cultura pode representar perigo de incêndios quando em conjunto de condições climáticas favoráveis à queima. Por fim, foi possível observar que as variações atmosféricas intra e interanuais e o mosaico de diferentes coberturas vegetais determinaram o regime de incêndios na área de estudo no período avaliado.

Palavras-chaves: Incêndios Florestais, Fenômenos Atmosféricos, Sensoriamento Remoto, Atividades Antrópicas.

ABSTRACT

Fire played an important role in the formation and is still important for maintaining the structure and plant composition of different ecosystems. The occurrence of the element is influenced by weather variations that may condition the combustible material. Nowadays, the alteration of the landscapes through the different anthropic activities and man-made climate changes have tampered with the natural occurrence of fire. The use of uncontrolled fire by humans associated with favorable burning conditions has caused social, economic and environmental damage in different parts of the world. The objective of the present study was to evaluate the variations in the occurrence of fire in the Southern Region of Brazil caused by the seasonal characteristics of the years, as well as the environmental variation given by El Niño Southern Oscillation (ENSO). Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) fire products were associated with meteorological elements and vegetation cover data, and carbon emission data provided by the Global Fire Emissions Database (GFED) were evaluated. The correlation between meteorological elements and fire was obtained by the nonparametric Spearman method. In addition, the Mann Kendall statistical test was performed with the harvested area extensions of three temporary crops over 28 years. Fire in southern Brazil is mainly correlated with a reduction in rainfall and relative humidity in conjunction with rising atmospheric pressure and increasing wind speed. The periods under the cold phase of the phenomenon (La Niña) presented 26% to 114% more fire foci than those under the warm phase (El Niño). La Niñas also had 7% to 77% more burned area than El Niños. Plant coverings most affected by fire were those related to agricultural activity. La Niña events emitted more carbon into the atmosphere than El Niño occasions, with the largest difference observed between La Niña 2007/2008 (1.5097 Tg) and El Niño 2015 (0.6467 Tg). Mann Kendall statistics pointed out that Sugarcane, a highly flammable straw crop, showed a tendency to expand in the state of Paraná between 1990 and 2018. Continued crop expansion can be a fire hazard when combined with favorable burning conditions. Finally, it was possible to observe that the intra and interannual atmospheric variations and the mosaic of different vegetation cover determined the fire regime in the study area during the evaluated period.

Keywords: Forest Fires, Spatial Analysis, Remote Sensing, Climate Change and Southern Brazil.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
2	OBJETIVOS	2
2.1.	Objetivo geral.....	2
2.2.	Objetivos específicos.....	2
3	REVISÃO DE LITERATURA	2
3.1.	Relação do Fenômeno ENOS com a Região Sul do Brasil.....	2
3.2.	Interação fogo-clima na região Sul do Brasil.....	3
3.3.	Relação do fogo e biomas da Região Sul do Brasil.....	4
3.4.	Sensor MODIS e produtos de fogo.....	4
3.5.	Densidade Kernel para focos de calor.....	5
4	MATERIAL E MÉTODOS	5
4.1.	Área de estudo.....	5
4.2.	Dados.....	9
4.2.1.	Temporalidade.....	9
4.2.2.	Dados meteorológicos.....	10
4.2.3.	Focos de calor e área queimada.....	10
4.2.4.	Emissão de Carbono.....	11
4.2.5.	Modelo digital de elevação.....	11
4.2.6.	Cobertura vegetal e culturas agrícolas temporárias.....	11
4.3.	Metodologia.....	12
4.3.1.	Processamento de dados.....	12
4.3.2.	Análise exploratória e estatística.....	13
5	RESULTADOS	13
5.1.	Variáveis meteorológicas.....	13
5.2.	Registros de focos de calor.....	15
5.2.1.	Contagem geral.....	15
5.2.2.	Elevação.....	16
5.2.3.	Cobertura vegetal.....	18
5.3.	Registros de área queimada.....	20
5.3.1.	Extensão geral.....	20
5.3.2.	Cobertura vegetal.....	22
5.4.	Emissão de Carbono.....	23
5.5.	Densidade Kernel.....	24
5.6.	Pressão Atmosférica e Vento.....	30
6	CORRELAÇÃO DE SPEARMAN	36
7	TESTE DE MANN KENDALL	39
8	DISCUSSÃO	39
9	CONCLUSÃO	41
10	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	43

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Localização geográfica, elevação do terreno, domínios climáticos de Köppen e formações de biomas e classes de vegetação da área estudo.....	7
Figura 2. Climatologia da Região Sul do Brasil de janeiro de 1983 a janeiro de 2013 (31 anos).	8
Figura 3. Temperatura máxima do ar (Tmax), temperatura média do ar (Tmed), temperatura mínima do ar (Tmin) e velocidade do vento a 10 m de altura do terreno (U10) na Região Sul do Brasil em eventos de El Niño, La Niña e Neutralidade.	14
Figura 4. Evapotranspiração de Referência (ETo), precipitação (Prec), umidade relativa do ar (RH) e água no solo (Soilw) na Região Sul do Brasil em eventos de El Niño, La Niña e Neutralidade.	15
Figura 5. Focos de calor na Região Sul do Brasil de acordo com a Altitude, Declividade e Orientação da vertente em eventos de El Niño, La Niña e Neutralidade.	18
Figura 6. Focos de calor na Região Sul do Brasil de acordo com as classes de cobertura vegetal em eventos de El Niño, La Niña e Neutralidade.	20
Figura 7. Área queimada na Região Sul do Brasil de acordo com a cobertura vegetal em eventos de El Niño, La Niña e Neutralidade.	23
Figura 8. Emissões de carbono na Região Sul do Brasil em eventos de El Niño, La Niña e Neutralidade.....	24
Figura 9. Densidades Kernel na Região Sul do Brasil e suas respectivas extensões de acordo com a cobertura vegetal no evento El Niño 2009/2010.....	25
Figura 10. Densidades Kernel na Região Sul do Brasil e suas respectivas extensões de acordo com a cobertura vegetal no evento El Niño 2015.....	26
Figura 11. Densidades Kernel na Região Sul do Brasil e suas respectivas extensões de acordo com a cobertura vegetal no evento La Niña 2007/2008.	27
Figura 12. Densidades Kernel na Região Sul do Brasil e suas respectivas extensões de acordo com a cobertura vegetal no evento La Niña 2010/2011.	28
Figura 13. Densidades Kernel na Região Sul do Brasil e suas respectivas extensões de acordo com a cobertura vegetal no evento Neutralidade 2003/2004.....	29
Figura 14. Densidades Kernel na Região Sul do Brasil e suas respectivas extensões de acordo com a cobertura vegetal no evento Neutralidade 2013.....	30
Figura 15. Pressão ao Nível Médio do Mar, Correntes e Vetores de Vento na Região Sul do Brasil no El Niño 2009/2010 no mês com menos fogo (Jan) e com mais fogo (Ago).	31
Figura 16. Pressão ao Nível Médio do Mar, Correntes e Vetores de Vento na Região Sul do Brasil no El Niño 2015 no mês com menos fogo (Nov) e com mais fogo (Ago).	32
Figura 17. Pressão ao Nível Médio do Mar, Correntes e Vetores de Vento na Região Sul do Brasil na La Niña 2007/2008 no mês com menos fogo (Jan) e com mais fogo (Set).	33
Figura 18. Pressão ao Nível Médio do Mar, Correntes e Vetores de Vento na Região Sul do Brasil na La Niña 2010/2011 no mês com menos fogo (Fev) e com mais fogo (Ago).	34
Figura 19. Pressão ao Nível Médio do Mar, Correntes e Vetores de Vento na Região Sul do Brasil na Neutralidade 2003/2004 no mês com menos fogo (Fev) e com mais fogo (Ago).....	35
Figura 20. Pressão ao Nível Médio do Mar, Correntes e Vetores de Vento na Região Sul do Brasil na Neutralidade 2013 no mês com menos fogo (Fev) e com mais fogo (Ago).	36

Figura 21. Correlação de Spearman entre variáveis meteorológicas e de fogo na Região Sul do Brasil em anos de El Niño, La Niña e Neutralidade. Obs: valores assinalados com um X não são estatisticamente significativos ao nível de 95% de confiança.....	38
Figura 22. Teste de Mann Kendall da área colhida de Cana de Açúcar, Milho e Soja entre 1990 e 2018 nos estados da Região Sul do Brasil.	39

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1. Classes de Vegetação, siglas correspondentes e abrangência territorial.	8
Tabela 2. Anos abrangidos pelo estudo e suas respectivas associações com as fases do fenômeno El Niño-Oscilação Sul (ENOS).	9
Tabela 3. Focos de calor na Região Sul do Brasil em eventos de El Niño, La Niña e Neutralidade.....	16
Tabela 4. Área queimada na Região Sul do Brasil em eventos de El Niño, La Niña e Neutralidade.....	21

1 INTRODUÇÃO

Com as evidências globais de mudanças climáticas, o fenômeno El Niño Oscilação Sul (ENOS) tem sido alvo de interesse por se tratar de uma interação atmosfera-oceano que afeta fortemente o tempo e clima global (CHEN & ZHA, 2018). A fase quente do modo de variabilidade climática (aquecimento anormal da superfície do mar do na região tropical do Pacífico Equatorial) é denominada El Niño e a fase fria (resfriamento anômalo da superfície do mar na região citada) é referida como La Niña (NOAA, 2018).

Os efeitos das fases do ENOS sobre as variáveis atmosféricas são diferentes em regiões distintas do globo e pode ser relatado, por exemplo, aumento de chuva em certas regiões durante a fase quente (RAMPELOTTO et al., 2012; NERY & CARFAN, 2014; CHEN & ZHA, 2018), enquanto outras regiões podem registrar redução desse importante elemento meteorológico (JIMÉNEZ-MUÑOZ et al., 2016; GELCER et al., 2018; BARBOSA et al., 2018).

No Sul dos Estados Unidos, as alterações na circulação atmosférica dadas pela fase fria do fenômeno, a La Niña, condicionam a região à seca extrema, principalmente no inverno (OKUMURA; DINEZIO; DESER, 2017)). No Sul da América do Sul, principalmente no Sul do Brasil, são observadas alterações na precipitação conforme a fase do ENOS, em que anomalias negativas e condição de seca são relatadas na La Niña e anomalias positivas são relatadas no El Niño (CHIODI & HARRISON, 2015; PENALBA & RIVERA, 2016).

De acordo com Tasker & Arima (2016), existe forte relação entre fogo e chuva, em que a redução do segundo elemento pode afetar positivamente o número de focos de calor e área queimada por incêndios. Fonseca et al. (2017) evidenciaram a interferência das condições climáticas na anomalia positiva de focos de calor durante severa seca na Amazônia brasileira condicionada por um evento ENOS (El Niño) entre os anos de 2015 e 2016. Dessa forma, existem evidências de que variações causadas pelo fenômeno podem modificar o regime de incêndios de uma localidade.

O fogo é um agente natural formador de paisagens e representa um fator importante na evolução dos ecossistemas terrestres em uma escala global. Contudo, o aumento e recorrência de incêndios pode, entre outras consequências, alterar a composição vegetal de florestas tropicais (XAUD et al., 2013; SANSEVERO et al., 2017). Em alguns casos também pode ser observada a perda de matéria orgânica e consequente deterioração a longo prazo do solo, que é essencial no fornecimento de nutrientes para o crescimento de plantas (NADPOROZHSKAYA et al., 2018).

Além das consequências negativas do fogo nos ecossistemas, o material particulado produzido pelos incêndios pode se tornar problema de saúde pública. Foram relatadas consequências econômicas dos incêndios devido ao aumento da mortalidade e necessidade de tratamento hospitalar de seres humanos que desenvolveram, principalmente, doenças respiratórias após exposição à fumaça (KOCHI et al., 2010).

Dadas as consequências dos incêndios nos ecossistemas não associados ao fogo e evidências de que a Região Sul do Brasil é fortemente afetada pela variação causada pelo fenômeno ENOS, torna-se de grande relevância social, econômica e ambiental evidenciar as relações do fogo na região sob efeito das fases do fenômeno.

O Sul do Brasil guarda os principais fragmentos de vegetação nativa de Mata Atlântica do país, bioma tropical reconhecido pela biodiversidade e alto nível de degradação. Paraná e Santa Catarina - estados do Sul - possuem, respectivamente, o segundo e o terceiro maiores remanescentes contínuos do bioma (RIBEIRO et al., 2009). Preservar as florestas tropicais mundiais, mesmo fragmentadas, é importante para garantir

a manutenção de serviços ecossistêmicos como o sequestro de Carbono, a retenção de solo, a produção de água e a polinização de plantas agrícolas (MITCHELL et al., 2015).

A Região Sul do Brasil também se destaca pelas atividades agrícolas, produzindo cereais, leguminosas e oleaginosas para consumo interno e para exportação. De acordo com dados oficiais do governo, o Sul foi responsável por 33% da produção brasileira de Soja no ano de 2018, o que representa mais de 38 milhões de toneladas do grão (IBGE, 2019a). No mesmo ano a região também produziu 89% do trigo (mais de 4 milhões de toneladas) e 82% de todo o arroz, cereal mais consumido no Brasil.

Por fim, destaca-se a lacuna científica de pesquisa relacionando a circulação atmosférica e os registros de incêndios em toda a Região Sul do Brasil. Dessa forma, este trabalho abordou a variabilidade das condições atmosféricas e suas consequências nas observações de fogo desta região em anos com a presença do El Niño Oscilação Sul.

2 OBJETIVOS

2.1. Objetivo geral

O trabalho teve como objetivo geral avaliar os efeitos do ENOS no regime de fogo na Região Sul do Brasil.

2.2. Objetivos específicos

- Espacializar os registros mensais de focos de calor e área queimada por incêndios na Região Sul do Brasil;
- Demonstrar as fitofisionomias presentes na região de estudo que estão submetidas aos maiores números de focos de calor e às maiores áreas queimadas por incêndios nas diferentes fases do ENOS;
- Evidenciar as relações entre a circulação atmosférica e o fogo na área de estudo;
- Distinguir áreas prioritárias para a prevenção e controle de incêndios na Região Sul do país.

3 REVISÃO DE LITERATURA

3.1. Relação do Fenômeno ENOS com a Região Sul do Brasil

O ENOS é um modo de variabilidade climática global e altamente persistente resultado de um forte sistema acoplado atmosfera-oceano que modifica o comportamento normal de células de circulação atmosférica, sendo que na fase quente (El Niño), ocorre a elevação da Temperatura da Superfície do Mar (TSM) do Pacífico Equatorial (KOUSKY et al., 1984). Enquanto que na fase fria do fenômeno (La Niña) é registrado o resfriamento anormal da TSM na mesma região equatorial (CPTEC/INPE, 2018) .

A TSM é de grande importância para o clima regional e global, sendo que sua variação pode exercer influências distintas em elementos, como a chuva, até mesmo em diferentes regiões de um mesmo estado (SANTOS et al., 2016). Além disso, os eventos de ENOS podem alterar valores mensais do número total de horas de brilho solar, o que gera consequências em culturas agrícolas, como a interferência no número de dias trabalháveis em que são realizadas atividades de implantação (semeadura, dessecação da vegetação verde em áreas de plantio direto, preparo do solo, etc.) e colheita (PAULA et al., 2015).

O fenômeno climático pode ser classificado de acordo com a sua magnitude por índices, como o Índice Niño Oceânico (*Oceanic Niño Index*) que calcula as anomalias de

TSM de três meses consecutivos na localidade entre 170°W-120°W e 5°S-5°N (região Niño 3.4), como em Kutta et al. (2017), que encontrou 13 eventos de El Niño e 12 ocasiões de La Niña entre os anos de 1976 e 2016. De acordo com os autores, o período de 2007-2008, por exemplo, pode ser classificado como La Niña na categoria moderada, enquanto o período de 2015-2016 como El Niño na categoria forte.

Regiões da América do Sul apresentam mudanças no comportamento climático durante o ENOS, como as secas severas relatadas do centro ao Norte do subcontinente durante anos submetidos à fase quente do fenômeno (JIMÉNEZ-MUÑOZ et al., 2016). Dentre as regiões ao Sul do subcontinente, o Sul do Brasil está associado à resposta mais forte durante a anomalia positiva (GRIMM et al., 2000).

De acordo com Terassi et al. (2018), ocorre elevação nas chuvas anuais na região Norte do estado do Paraná em anos de El Niño e redução nos anos de La Niña. Entretanto, mesmo com o aumento de chuvas em 1997 e 1998 (El Niño), os autores relataram seca moderada na região devido à distribuição irregular das chuvas ao longo do ano. Para o estado do Rio Grande do Sul as chuvas anuais são bem distribuídas em condições de neutralidade, porém em períodos de ENOS a distribuição da chuva mensal é alterada, em que se observa a elevação das chuvas na fase quente do fenômeno e a redução na fase fria (MATZENAUER et al., 2017).

Devido às diferenças intra-sazonais nos impactos dos fenômenos extremos do modo de variabilidade ENOS, é recomendada uma análise mês-a-mês em seus ciclos, pois características consistentes em avaliações mensais podem ser amenizadas quando é realizada uma análise sazonal (GRIMM et al., 2000).

3.2. Interação fogo-clima na região Sul do Brasil

Fatores como teor de umidade do material combustível, ventos, temperatura do ar, umidade atmosférica e inclinação do terreno podem influenciar no comportamento do fogo (COSTA & FONSECA, 2017). Segundo Parisien & Moritz (2009), a maior frequência consecutiva de dias com tempo quente, seco e ventoso acarretarão incêndios florestais mais extensos e numerosos quando essas condições coincidirem com fontes de ignição. Dessa forma, os incêndios são afetados por secas e até mesmo por variações no tempo causadas pelo fenômeno ENOS (FAO, 2007).

Entender as relações fogo-clima e identificar regiões mais sensíveis, onde o clima pode ser considerado o “interruptor” para incêndios, é importante para a avaliação dos impactos potenciais que as projeções climáticas podem exercer em um futuro próximo (BEDIA et al., 2015).

Condições climáticas, topográficas e do material combustível interferem na propagação do fogo, e essa interação varia em cada ecossistema (HOLSINGER et al., 2016). Ruffault et al. (2016) encontraram padrões de anomalias na temperatura atmosférica, umidade relativa do ar e, principalmente, velocidade de ventos que explicam a elevação ou redução do número de grandes incêndios maiores que 120 hectares (ha) na França Mediterrânea.

Os incêndios estão presentes em todos os ecossistemas da América do Sul, e cerca de 85% dos casos no subcontinente tem origem em atividades dos seres humanos como limpeza de pastagens e culturas agrícolas (FAO, 2007).

Para Caúla et al. (2015) o Brasil pode ser dividido em três regiões homogêneas em relação ao fogo: Nordeste (1), Norte e Centro-Oeste (2) e Sudeste e Sul (3). Conforme os autores, o aumento de focos de calor na região homogênea 3 foi causado principalmente pela forte variação dos sistemas meteorológicos, sendo que os sistemas frontais são responsáveis pela uniformidade das chuvas observada na região Sul do país.

Os estados do Sul relataram as menores ocorrências e densidades de focos de calor do país entre 1998 e 2011 (CAÚLA et al., 2015). Segundo Araújo et al. (2012), de 2002 a 2010, a maioria dos municípios do Sul apresentaram área queimada total menor que 100 km², enquanto algumas cidades brasileiras registraram valores superiores a 15 mil km². Os autores também observaram predominância das menores classes de registros delimitadas (<100; 100 – 500; 501 – 1.500 focos) nos municípios da região, enquanto existiram municípios com mais de 30 mil focos no Centro Oeste e Norte do Brasil.

3.3. Relação do fogo e biomas da Região Sul do Brasil

Na região Sul do Brasil as formações originais da vegetação pertencem a dois dos principais biomas brasileiros: a Mata Atlântica (Floresta Ombrófila Densa, Floresta Estacional Semidecidual, Floresta Estacional Decidual, Floresta Ombrófila Mista, Restinga e Manguezal) e o Pampa (IBGE, 2004). A formação predominante do Pampa são os campos nativos, porém existe ocorrência de matas ciliares, matas de encosta, matas de pau ferro, formações arbustivas etc. (MMA, 2018).

De acordo com Leuchtenberger et al. (2018) as pradarias que dominam o Pampa são utilizadas por muitas gerações para a criação de gado. No bioma, a pressão pela mudança do uso e cobertura da terra é significativa, com áreas reduzindo a taxas de 410.000 ha.ano⁻¹ apenas no Rio Grande do Sul (FONTANA et al., 2018). Segundo Costa e Fonseca (2017), os sensores registram anualmente muitos focos de calor em campos naturais do Pampa e Mata Atlântica, entretanto poucos estudos com uso de dados orbitais são realizados para as formações. Os ecossistemas não florestais do Brasil são negligenciados quanto aos esforços para conservação, incluindo o Pampa, em comparação aos ecossistemas florestais (OVERBECK et al., 2015).

Por vezes, formações campestres naturais e/ou pastagens antrópicas estão associados ao maior número de ocorrências de focos de calor, porém eles também ocorrem em fitofisionomias de florestas úmidas, como a Mata Atlântica (ARMENTERAS-PASCUAL et al., 2011; CAÚLA et al., 2017).

Existem evidências de que a vegetação dos campos Sulinos desenvolveu-se em associação com o fogo, muitas das vezes de origem antrópica, dessa forma, as queimadas e o pastoreio podem ser considerados elementos importantes para manter a formação, impedindo o avanço da floresta (JESKE-PIERUSCHKA et al., 2010). Enquanto os Pampas guardam estreita relação evolutiva com o fogo, este elemento pode resultar consequências negativas, por exemplo, na regeneração natural de fitofisionomias florestais do bioma Mata Atlântica (SANSEVERO et al., 2017).

3.4. Sensor MODIS e produtos de fogo

O sensor MODIS - *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer* - é um imageador a bordo das plataformas orbitais Terra e Aqua, em que a primeira é programada para cruzar o equador pela manhã na direção Norte-Sul, enquanto a segunda passa pelo equador na direção Sul-Norte pela tarde (NASA, 2018). Segundo a Administração Nacional do Espaço e da Aeronáutica (*National Aeronautics and Space Administration - NASA*), o equipamento a bordo dos satélites capta 36 bandas espectrais com resoluções espaciais de 250 m (bandas 1-2), 500 m (bandas 3-7) e 1000 m (bandas 8-36) — em que as bandas 31-32 são utilizadas na captação de temperatura da superfície da terra (10.780 - 11.280 e 11.770 - 12.270 µm de largura da banda, respectivamente).

Os produtos derivados do MODIS tem sido utilizados para diversos fins, como identificar mudanças na vegetação de biomas (MIRANDA et al., 2018), analisar

sequestro de carbono (MORAIS et al., 2017; DELGADO et al., 2018) avaliar o desenvolvimento de culturas agrícolas (FIGUEIREDO et al., 2016), observar o crescimento de pastagens (HOTT et al., 2016), etc. A partir dos dados do sensor também são gerados produtos relacionados ao fogo como o MCD14ML, que relata a localização da ocorrência (foco de calor), com sua respectiva data e hora de detecção, e o produto de área queimada MCD64A1 que fornece a cobertura afetada após o incêndio (GIGLIO, 2015; GIGLIO et al., 2016).

Diversas pesquisas associadas aos focos de calor no Brasil tem sido desenvolvidas com as informações do sensor MODIS fornecidas pelo Banco de Dados de Queimadas (BDQueimadas) do Instituto de Pesquisas Espaciais (INPE) (CAÚLA et al., 2015, 2017; CLEMENTE et al., 2017; BARBOSA et al., 2018)

O algoritmo MCD64, para cálculo de área queimada, utiliza imagens MODIS de 500 m de resolução, juntamente com observações de incêndio ativo de 1 km, em que um índice de vegetação diário sensível à queimadura é calculado com as bandas 5 (1,230–1,250 μm) e 7 (2,105–2,155 μm) e a diminuição abrupta do índice é utilizada como o principal sinal para detecção das áreas (MORENO RUIZ et al., 2013). Os resultados obtidos pelo algoritmo evidenciam que, atualmente, ele é o mais preciso em cálculos de área queimada em comparação a outros como o MCD45 e o Geoland2 (PADILLA et al., 2015).

3.5. Densidade Kernel para focos de calor

Diversas técnicas de interpolação de dados são utilizadas para converter informações de pontos de fogo para uma superfície contínua, como o interpolador de Densidade Kernel (ZHANG et al., 2017), o que facilita as análises nos padrões espaciais de focos de calor. A função Kernel é utilizada para estimar a densidade de probabilidade de uma variável aleatória de forma não paramétrica, portanto o estimador de densidade suaviza a contribuição de cada observação pontual sobre sua vizinhança local, com essa vizinhança definida pela largura da banda (WAHIDUZZAMAN et al., 2017).

A Densidade Kernel é relatada como método eficaz para avaliar os padrões espaciais de focos de calor (ARAGÓ et al., 2016; CLEMENTE et al., 2017; BARBOSA et al., 2018). Para Barbosa et al. (2018), o monitoramento do fogo com a utilização da Densidade Kernel associada às variáveis meteorológicas pode fornecer subsídios para políticas de preservação e contribuir para aprimorar o controle em locais cuja densidade de focos de calor é muito alta (áreas prioritárias).

4 MATERIAL E MÉTODOS

4.1. Área de estudo

A região geográfica da área de estudo envolve os três estados da Região Sul do Brasil (Figura 1), com extensão territorial de mais de 563 mil km^2 . A área representa cerca de 7% do total do país. O estado do Rio Grande do Sul (RS) ocupa a maior proporção da área de estudo (49%), seguido pelos estados do Paraná (PR) (35%) e Santa Catarina (SC) (16%).

Os três estados da região sofrem influência marítima proveniente do Oceano Atlântico (Figura 1). Além das regiões costeiras, a localidade também apresenta extensa região continental, sendo a variação da elevação do terreno bem acentuada. Existem regiões abaixo do Nível Médio do Mar (NMM) (-37 m de altitude) e regiões muito acima desse nível (1854 m de altitude) (Figura 1).

O Sul do Brasil apresenta mais de um tipo climático de acordo com a classificação de Köppen (1936). Conforme Alvares et al. (2013), os dois principais tipos climáticos que ocorrem na área são o Cfa e Cfb (Figura 1). O primeiro é caracterizado por ser subtropical úmido com influência oceânica, sem estação seca e com verão quente. Enquanto que o domínio climático Cfb é marcado por ser subtropical úmido com influência oceânica, sem estação seca e com verão temperado.

Nos estados do Paraná e Rio Grande do Sul ocorre predomínio do tipo climático Cfa (respectivamente 61.7% e 86.7% da área total dos estados). Em Santa Catarina a predominância é de Cfb (59.9%). O Paraná é o único dentre os três estados em que são registrados domínios climáticos diferentes dos citados anteriormente, porém em proporções bastante reduzidas, sendo eles: Af, Am e Aw (Figura 1).

Conforme a climatologia da Região Sul em 31 anos (1983 a 2013), a localidade experimenta diferentes variações de acordo com o elemento avaliado (Figura 2). A água no solo e a precipitação, por exemplo, são elementos que apresentam variações médias mais brandas ao longo do ano. Enquanto que as temperaturas do ar apresentam uma queda acentuada no meado do ano (inverno).

A área de estudo é coberta por três biomas de acordo com a classificação do IBGE: A Mata Atlântica (70%), o Pampa (29%) e o Cerrado (1%) (Figura 1). O bioma Mata Atlântica é caracterizado por formações florestais e não florestais que se estendem por toda a faixa continental brasileira e adentram para o continente nas regiões Sudeste e Sul do país (IBGE, 2004). De acordo com IBGE (2004), o Pampa possui vegetação de campo em relevo de planície e se restringe, no Brasil, apenas ao estado do Rio Grande do Sul. Por fim, O bioma Cerrado é o segundo em extensão no país e é delimitado de acordo com a sua vegetação arbustiva lenhosa dada principalmente pela física e química do solo.

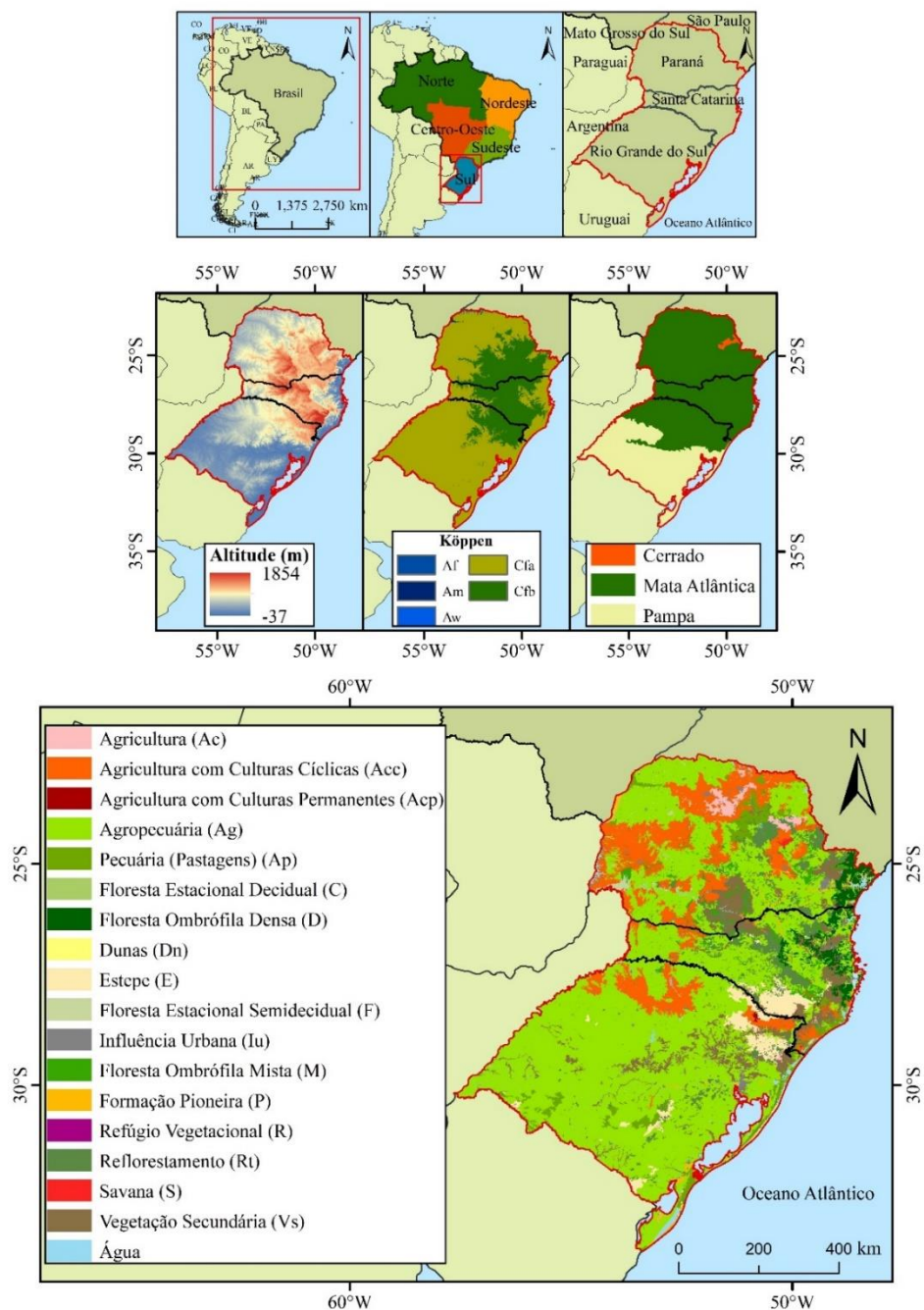


Figura 1. Localização geográfica, elevação do terreno, domínios climáticos de Köppen e formações de biomas e classes de vegetação da área estudo.

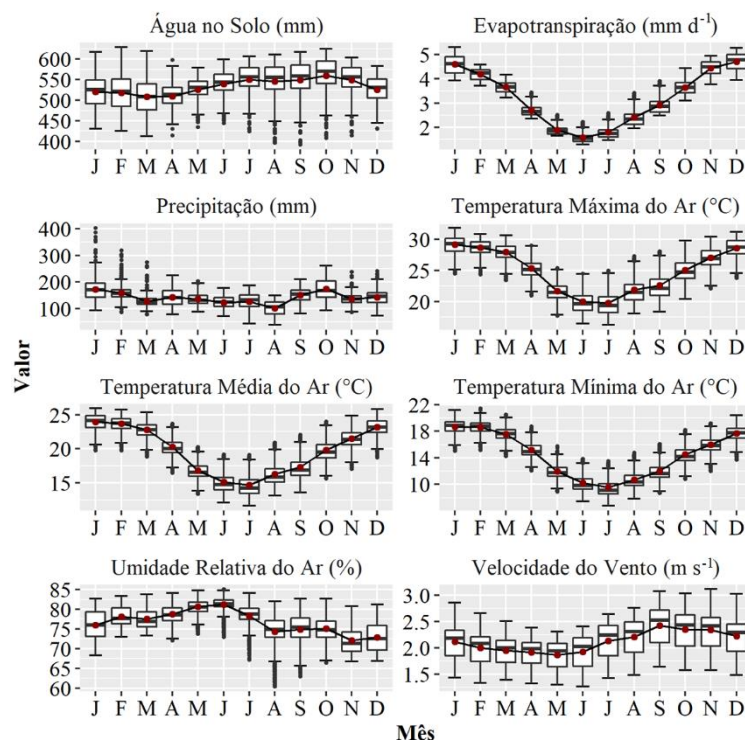


Figura 2. Climatologia da Região Sul do Brasil de janeiro de 1983 a janeiro de 2013 (31 anos).

A área de estudo é composta principalmente por classes de vegetação antrópica (Tabela 1). A principal classe que ocupa a área de estudo é a Agropecuária (Ag), com cerca de 38% do total (326406.2 km²), seguida por Agricultura com Culturas Cíclicas (Acc) que se estende por mais de 13% da localidade. A terceira classe dominante em área também possui influência antrópica, a Vegetação Secundária (Vs), que ocupa cerca de 7% da região. As principais classes de vegetação primária que cobrem a terra são Estepe (E) (3%), Floresta Ombrófila Densa (D) (2.5%) e Floresta Ombrófila Mista (M) (2.2%).

Tabela 1. Classes de Vegetação, siglas correspondentes e abrangência territorial.

Classes de Vegetação	Sigla	Área (km ²)	%
Água*	-	9054.8	1.6
Agricultura	Ac	5430.5	1.0
Agricultura com Culturas Cíclicas	Acc	74944.1	13.3
Agricultura com Culturas Permanentes	Acp	232.5	0.0
Agropecuária	Ag	326406.2	58.0
Pecuária (Pastagens)	Ap	17335.4	3.1
Floresta Estacional Decidual	C	641.0	0.1
Floresta Ombrófila Densa	D	14212.9	2.5
Dunas*	Dn	1107.8	0.2
Estepe	E	16854.3	3.0
Floresta Estacional Semidecidual	F	2981.3	0.5
Influência Urbana	Iu	7690.0	1.4
Floresta Ombrófila Mista	M	12662.5	2.2
Formação Pioneira	P	5280.8	0.9

Refúgio Vegetacional	R	78.9	0.0
Reflorestamento	Rt	27645.3	4.9
Savana	S	428.0	0.1
Vegetação Secundária	Vs	40121.4	7.1
Total		563107.7	100

*Classe sem vegetação; Fonte: adaptado de (IBGE, 2019)

De acordo com o Manual Técnico da Vegetação Brasileira (IBGE, 2012), Ag é formada pelo agrupamento de culturas agrícolas cíclicas e pecuária devido à dificuldade em distinguir as duas classes pela interpretação de imagens orbitais. A Acc é formada por culturas agrícolas cíclicas como soja, trigo, arroz e cana de açúcar (IBGE, 2012). Enquanto que Vs é constituída por áreas em que houve intervenção antrópica para uso da terra (agricultura, pecuária, reflorestamento etc.) e ocorreu a descaracterização da vegetação primária (original).

Conforme a classificação dada pelo manual da vegetação, a classificação de Estepe é aplicada aos campos localizados no Sul do Brasil, estendendo-se desde o Paraná até o Rio Grande do Sul. A estepe localizada no Rio Grande do Sul (Pampas) não possuem período seco, porém sofrem com frentes polares frias e dessecantes da vegetação. A Estepe brasileira foi submetida a intenso processo de antropização pela criação extensiva de gado aliada ao uso do fogo (IBGE, 2012).

A Floresta Ombrófila Densa é caracterizada pela presença de plantas de médio e grande porte, além da abundância de lianas (cipós) e epífitas (IBGE, 2012). Porém, a principal característica dessa classe se encontra no elevado volume de chuvas, com apenas 0 a 60 dias secos no ano, e altas temperaturas médias do ar (25°C) (IBGE, 2012). A Floresta Ombrófila Mista é conhecida também como Mata de Araucária pela presença de espécies do gênero *Araucaria* (Araucariaceae), e possui como região clímax ideal o Planalto Meridional Brasileiro, que engloba os três estados da Região Sul (IBGE, 2012).

4.2. Dados

4.2.1. Temporalidade

Os dados de fogo e as variáveis meteorológicas utilizadas nesse estudo abrangeram a Região Sul compreendendo 12 meses para seis períodos distintos (72 meses no total), sendo dois anos para cada fase do fenômeno ENOS (Tabela 2). Os períodos de estudo foram selecionados considerando eventos de intensidade moderada a muito forte de acordo com o índice ONI e a classificação das intensidades dada pela Golden Gate Weather Services (GGWEATHER, 2019).

Tabela 2. Anos abrangidos pelo estudo e suas respectivas associações com as fases do fenômeno El Niño-Oscilação Sul (ENOS).

Início	Término	Fase ENOS	Intensidade*
01/03/2003	29/02/2004	Neutralidade	-
01/09/2007	31/08/2008	La Niña	Forte
01/06/2009	31/05/2010	El Niño	Moderada
01/06/2010	31/05/2011	La Niña	Forte
01/01/2013	31/12/2013	Neutralidade	-

4.2.2. Dados meteorológicos

Devido a abrangência territorial do estudo, foram utilizados dados provenientes de duas fontes de Reanálise de informações meteorológicas: a reanálise produzida por Alexandre C. Xavier (UT, 2018) e a NCEP-DOE AMIP-II Reanalysis (NOAA, 2018b), ambas fontes disponibilizam dados em formato NetCDF. Dados provenientes de diferentes fontes de reanálises são utilizados como base confiável para o desenvolvimento de pesquisas científicas (RUFFAULT et al., 2016; DAS et al., 2017).

Foram utilizadas seis variáveis meteorológicas produzidas e validadas por Xavier et al. (2016): temperaturas máxima, mínima e média do ar ($^{\circ}\text{C}$); precipitação acumulada (mm); umidade relativa do ar (%); evapotranspiração de referência (mm); e velocidade média do vento a 2 m de altura do terreno (m s^{-1}). Os dados abrangem todo o território brasileiro no período de 1980 a 2017 com a resolução espacial de $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$.

A temperatura média do ar foi obtida pela média simples entre a temperatura máxima e temperatura mínima disponibilizadas pela UT (2018). A evapotranspiração de referência (mm) foi transformada em média diária (mm d^{-1}) conforme preconiza o padrão internacional de medidas da variável. A velocidade média do vento a 10 m de altura foi obtida por meio da transformação da velocidade do vento disponibilizada a 2 m de altura com utilização de fórmula recomendada pela FAO-56 (FAO, 1998):

$$U_2 = U_z \frac{4.87}{\ln(67.8 z - 5.42)} \quad (1)$$

Em que:

U_2 velocidade do vento a 2 m de altura da superfície do terreno (m s^{-1});

U_z velocidade do vento medida a z m de altura da superfície do terreno (m s^{-1});

z altura de medição em relação a superfície do terreno (m).

Foram utilizadas quatro variáveis provenientes da Reanálise 2: água no solo (mm); pressão atmosférica ao nível médio do mar (mb); componente zonal (u) de vento a 10 m de altura do terreno; componente meridional (v) de vento a 10 m de altura do terreno. Os componentes u e v foram combinados para encontrar o vento resultante. Todas as variáveis são disponibilizadas em cobertura global. A água no solo é disponibilizada em resolução espacial de $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$ de janeiro de 1948 até o presente. A pressão ao nível médio do mar é fornecida com resolução de $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ de janeiro de 1979 até o presente. Os componentes de vento são disponibilizados em Grid Gaussiano T62 de 192×94 de janeiro de 1979 até o presente.

4.2.3. Focos de calor e área queimada

As avaliações de fogo foram realizadas com base em produtos do sensor MODIS (*Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer*), que está a bordo das plataformas orbitais TERRA e AQUA. Foram utilizadas a localização geográfica dos focos de calor (MCD14ML) e área queimada por incêndios (MCD64A1). Os focos e a área queimada são gerados, respectivamente, em resolução espacial de $1 \text{ km} \times 1 \text{ km}$ e $500 \text{ m} \times 500 \text{ m}$ (GIGLIO, 2015; GIGLIO et al., 2016). Armenteras-Pascual et al. (2011) utilizaram os produtos para desenvolver pesquisa dos padrões de incêndios relacionados ao clima e vegetação em diferentes localidades da Colômbia.

O arquivo em vetor (*shapefile*) da localização geográfica dos focos de calor foi adquirido junto ao Banco de Dados de Queimadas do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE, 2019). O INPE mantém contato direto com os servidores da NASA que distribuem os produtos do sensor MODIS e sua base de dados está de acordo com a última versão dos produtos (Coleção 6). O produto MCD64A1 foi adquirido em contato direto com o servidor Earth Data da NASA (NASA, 2019). Foram utilizados os tiles H13V11 e H13V12 (coleção 6) do sensor MODIS para cobrir a Região Sul do Brasil.

4.2.4. Emissão de Carbono

Os dados da emissão de Carbono na atmosfera proveniente de incêndios são produzidos, validados e disponibilizados pela equipe que mantém o projeto *Global Fire Emissions Database (GFED)* (VAN DER WERF et al., 2017; GIGLIO et al., 2019). A emissão é produzida com base na área queimada do sensor MODIS (MCD64A1). Foi utilizada a última versão da base de dados (versão 4). O produto é gerado mensalmente para todo o globo terrestre em resolução espacial de $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ do ano de 1997 ao ano de 2018. Os dados da Região Sul do Brasil foram adquiridos em formato de texto por meio da ferramenta *Analysis Tool* presente no site oficial da *GFED*.

4.2.5. Modelo digital de elevação

O modelo digital de elevação (MDE) utilizado no estudo é proveniente do sensor a bordo da plataforma orbital conhecida por *Shuttle Radar Topography Mission (SRTM)*. A resolução do produto utilizado é de 1 arco de segundo, o que representa cerca de 30 m x 30 m. O produto foi adquirido na plataforma Earth Explorer da *United States Geological Service (USGS)* (USGS, 2019).

4.2.6. Cobertura vegetal e culturas agrícolas temporárias

A cobertura vegetal utilizada foi extraída do arquivo em vetor da vegetação brasileira, disponível no domínio digital do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatísticas (IBGE, 2019). O mapeamento utilizado foi o realizado em escala de 1:250 mil. A classificação das regiões fito-ecológicas está de acordo com o sistema de classificação da vegetação do IBGE (IBGE, 2018).

Para este estudo, a maioria das classes de cobertura da vegetação foram agrupadas em seu eixo principal. Dessa forma, por exemplo, as Florestas Ombrófila Densa Aluvial, Submontana, Montana e Alto Montana foram agrupadas todas em Floresta Ombrófila Densa e as siglas apresentadas no Manual Técnico da Vegetação Brasileira foram aqui adotadas. O nível de detalhamento das classes de cobertura vegetal é tido como satisfatório para os fins do presente estudo.

Além da cobertura vegetal, foram utilizados dados anuais da extensão de três culturas temporárias: Cana de Açúcar, Milho e Soja. A informação é disponibilizada pelo IBGE no Sistema IBGE de Recuperação Automática (SIDRA) (IBGE, 2019b). A cultura da Cana, devido à alta flamabilidade da sua palhada, está muito associada a queima intencional e acidental no Brasil.

4.3. Metodologia

4.3.1. Processamento de dados

Os dados em NetCDF foram manipulados no software R (R CORE TEAM, 2018), por meio dos pacotes *ncdf4* (PIERCE, 2013) e *raster* (HIJMANS & ETTEN, 2019). Dessa forma, os valores de cada célula de grade que cobre a área de estudo foram obtidos por meio desse processamento. A pressão atmosférica e o vento da Reanálise 2 foram processados no software *Grid Analysis and Display* (GrADS) versão 1.9, onde foi possível espacializar as variáveis.

Os focos de calor foram processados no software *ArcGis* v. 10.5, enquanto que os tiles H13V11 e H13V12 do MCD64A1 (área queimada) foram inicialmente processados no software R por meio do pacote *MODISstp* (BUSETTO et al., 2019). Com a utilização do pacote, os tiles foram adquiridos, mosaicados e reprojetados para WGS84 em formato GEOTIFF. Após o processamento, os tiles foram também manipulados no *ArcGis*. Os dados em formato de texto de emissão de Carbono foram tabulados em planilha eletrônica.

Os focos de calor e a área queimada foram associados geograficamente a cobertura vegetal, em que se obteve a informação mensal da contagem de focos e a extensão de queima de acordo com as diferentes classes de vegetação. Além disso, os focos também foram avaliados de acordo com a sua altitude, declividade e face de exposição solar no *ArcGis*. As características topográficas da área de estudo foram obtidas pelo processamento do modelo digital de elevação. O MDE foi manipulado no *ArcGis*, em que foram geradas a declividade do terreno (porcentagem) e a face de exposição das encostas (graus) por meio das ferramentas *Slope* e *Aspect*.

As classes de altitude do MDE foram obtidas pela divisão das altitudes observadas em cinco classes de intervalos iguais, sendo elas: - 37 m – 341.2 m; 341.2 m – 719.4 m; 719.4 m – 1097.6 m; 1097.6 m – 1475.8 m; 1475.8 m – 1854 m. A declividade foi classificada conforme seis classes apresentadas pela EMBRAPA (1979): Plano (0 – 3%); Suave-ondulado (3% – 8%); Ondulado (8% – 20%); Forte Ondulado (20% – 45%); Montanhoso (45% – 75%); e Escarpado (> 75%). As faces de orientação foram classificadas de acordo com os graus decimais em: Norte (337.5° – 22.5°); Nordeste (22.5° – 67.5°); Leste (67.5° – 102.5°); Sudeste (102.5° – 157.5°); Sul (157.5° – 202.5°); Sudoeste (202.5° - 247.5°); Oeste (247.5° – 292.5°); e Noroeste (292.5° – 337.5°).

Para a análise dos focos de calor também foi utilizada a estatística não paramétrica de Densidade Kernel no *ArcGis* v. 10.5. A função de Kernel é expressa em Silverman (1986):

$$\hat{f}(x) = \frac{1}{nh} \sum_{i=1}^n k\left\{\frac{x-X_i}{h}\right\} \quad (2)$$

Em que:

n número total de observações;

h largura da banda;

k função de densidade;

x vetor de coordenadas que representa o local onde a função está sendo estimada;

x_i vetores de coordenadas que representam cada ponto de observação.

As densidades obtidas foram divididas em cinco classes conforme sua concentração de focos de calor e cada classe foi associada à uma cor, tal que: Muito Baixa (verde escuro), Baixa (verde), Moderada (amarelo), Alta (laranja) e Muito Alta (vermelho). Por fim, os rasters com as classes de densidade Kernel foram transformados em vetor (*shapefile*) no *ArcGis*, onde cada classe foi associada ao uso e cobertura do terreno.

4.3.2. Análise exploratória e estatística

As variações dos dados meteorológicos em toda Região Sul foram representadas mensalmente por meio de boxplots indicando os valores máximos, mínimos, médios e seus outliers. As figuras de boxplot e os gráficos de barra foram obtidos no software R com a utilização do pacote ggplot2 (WICKHAM, 2016). Os dados de fogo foram descritos por meio do valor médio, do desvio padrão e do coeficiente de variação em porcentagem (CV%).

A Correlação de Spearman foi utilizada para avaliar variação anual entre a contagem de focos de calor e extensão de área queimada em associação com cada variável meteorológica. O coeficiente varia de -1 a 1, sendo que o extremo negativo representa uma correlação forte e inversamente proporcional. O extremo positivo representa uma correlação forte e proporcional na variação dos dados. De acordo com Mukaka (2012), o coeficiente de Spearman (ρ_s) pode ser utilizado quando as variáveis são ordinais e valores extremos são observados, sendo o resultado obtido pela Equação 3:

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

Em que:

d_i diferença em postos de cada observação x_i e y_i ;

n número de observações.

O coeficiente de Spearman foi obtido no software R e a visualização gráfica dos resultados foi produzida por meio do pacote corrplot (WEI & SIMKO, 2017)

O teste de tendência de Mann-Kendall foi utilizado para avaliar o comportamento das áreas das culturas agrícolas temporárias nos três estados da Região Sul entre os anos de 1990 e 2018. A estatística não paramétrica aponta a existência ou não de tendência em uma sequência de dados independentes. Além disso, discrimina, caso haja tendência nos dados, se a mesma é de crescimento (sinal positivo) ou redução (sinal negativo). Os resultados foram obtidos por meio do pacote Kendall no software R (MCLEOD, 2011).

5 RESULTADOS

5.1. Variáveis meteorológicas

As Temperaturas Máxima, Mínima e Média do ar da Região Sul do Brasil seguiram, em geral, o comportamento esperado. Dessa forma, estas variáveis foram mais elevadas nos meses de Verão (DJF) e menos elevadas nos meses de Inverno (JJA) (Figura 3). A maior Temperatura Máxima média da região (29,94°C) foi observada em janeiro de 2011 (La Niña), enquanto que o menor valor (17,47°C) foi encontrado em julho de 2009 (El Niño) (Figura 3). Em relação à temperatura mínima, o maior valor médio da região foi encontrado em fevereiro de 2010 (El Niño), 20,02 °C, enquanto que o menor em junho de 2009 (El Niño), 8,09 °C (Figura 3). O evento mais quente, de acordo com a temperatura média do ar foi o El Niño de 2015, que registrou a média anual de 20,24°C.

A velocidade do vento nos anos estudados apresenta, muitas vezes, elevação em seu valor médio nos meses de transição entre o Inverno (JJA) e a Primavera (SON). No El Niño 2009/2010 os meses com Velocidade mais elevada foram os meses de agosto (2,73 m s⁻¹), setembro (2,77 m s⁻¹) e outubro (2,70 m s⁻¹). No El Niño de 2015 foram os mesmos meses: agosto (2,53 m s⁻¹); setembro (2,33 m s⁻¹) e outubro (2,59 m s⁻¹). Para a La Niña de 2007/2008, setembro (2,83 m s⁻¹) e outubro (2,82 m s⁻¹) também obtiveram os maiores valores, e na La Niña de 2010/2011 o mês de setembro obteve o maiores valor: 2,83 m s⁻¹

¹ (Figura 3). As médias anuais revelam que em anos de La Niña os ventos são mais intensos que em anos de El Niño e Neutralidade.

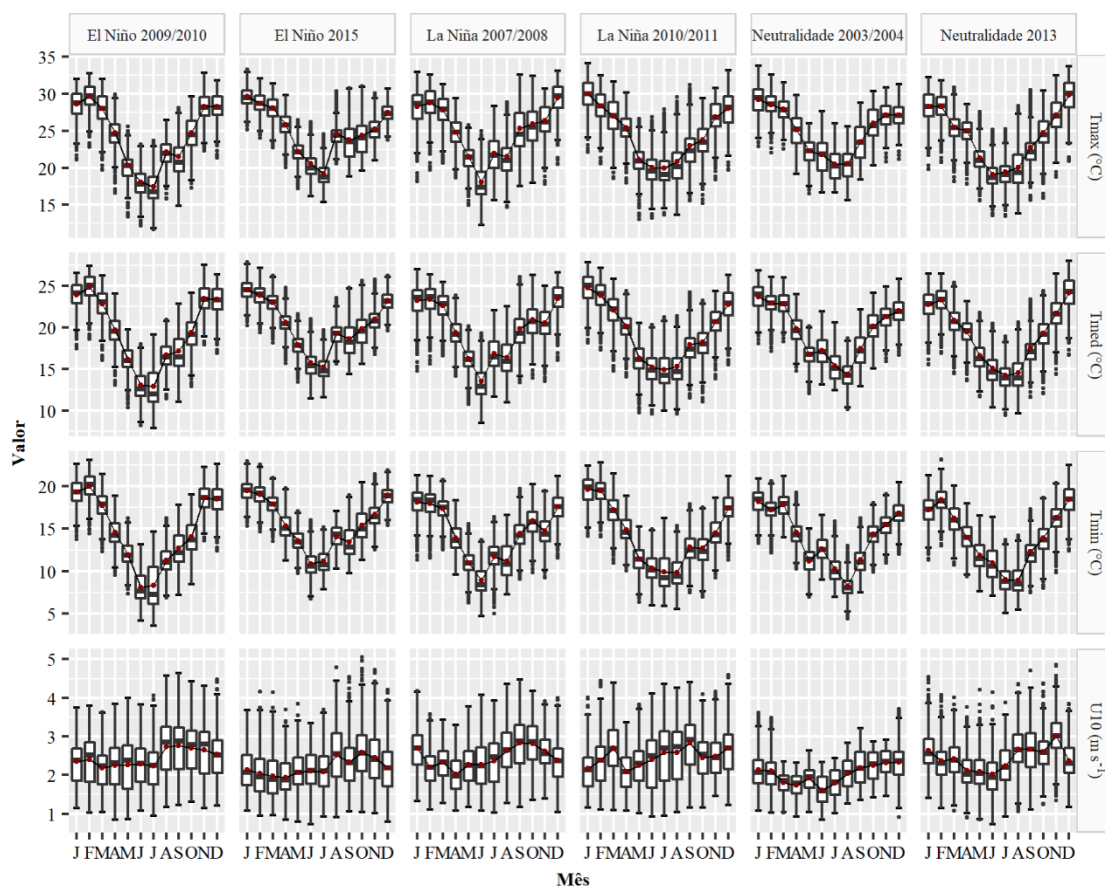


Figura 3. Temperatura máxima do ar (Tmax), temperatura média do ar (Tmed), temperatura mínima do ar (Tmin) e velocidade do vento a 10 m de altura do terreno (U10) na Região Sul do Brasil em eventos de El Niño, La Niña e Neutralidade.

As taxas de evapotranspiração reduzem nos meses de maio, junho e julho quando comparados aos outros meses do ano (Figura 4). Na maior parte das ocasiões, a variável atingiu os menores valores em junho, com exceção dos El Niños, em que o menor valor estava em julho ($1,49 \text{ mm d}^{-1}$ em ambos). A Neutralidade de 2013 registrou o menor valor médio para a região dos meses de junho ($1,35 \text{ mm d}^{-1}$), seguida pelo mês na La Niña de 2007/2008 ($1,43 \text{ mm d}^{-1}$), na Neutralidade de 2003/2004 ($1,53 \text{ mm d}^{-1}$) e na La Niña 2010/2011 ($1,66 \text{ mm d}^{-1}$). Os El Niños de 2015 e de 2009/2010 apresentaram, respectivamente, médias anuais de evapotranspiração de $3,05 \text{ mm d}^{-1}$ e $3,07 \text{ mm d}^{-1}$, enquanto verificou-se para as La Niñas 2010/2011 e 2007/2008 os valores de $3,23 \text{ mm d}^{-1}$ e $3,35 \text{ mm d}^{-1}$.

A precipitação nos diferentes eventos foi bem distribuída ao longo do ano, não sendo observado acúmulo das chuvas nos meses de alguma estação climática específica (Figura 4). O que foi observado é que os dois anos de El Niño foram mais chuvosos que todos os outros eventos, sendo medidos $2.217,31 \text{ mm}$ no El Niño de 2015 e $2.192,69 \text{ mm}$ no El Niño 2009/2010. Para os eventos de La Niña foram registrados $1.564,04 \text{ mm}$ em 2010/2011 e $1.543,01 \text{ mm}$ em 2007/2008. A Neutralidade de 2003/2004 foi o evento que obteve o menor acúmulo de chuva anual, com $1.476,47 \text{ mm}$.

A Umidade Relativa, ao contrário das outras variáveis descritas até o momento, apresentou por vezes picos de elevação em meses da estação de Inverno da Região Sul

do Brasil. É o caso do mês de junho de 2013 (Neutralidade), em que foi observado o maior valor médio da variável na região, 85,79% (Figura 4). Em comparação, dezembro, Verão do mesmo evento, registrou 72,02%. Entretanto, o mês de agosto (exceto na La Niña 2007/2008 e no El Niño 2010/2011) foi o que apresentou localidades da Região Sul com menores valores. Como no caso La Niña 2010/2011 em que o Boxplot do mês de agosto apresentou um outlier inferior de 50,91%, representando uma região com UR% muito reduzida. O menor valor dos Boxplots, 47,59%, um outlier inferior, foi encontrado para o mês de setembro de 2007 (La Niña) (Figura 4). As médias anuais dos anos demonstram também que em El Niño os anos são mais úmidos (79,55% em 2009/2010 e em 2015) que em La Niña (75,80% em 2007/2008 e 76,90% em 2010/2011). Por fim, a água no solo na região apresentou alguns dos valores mais baixos nos dois eventos de El Niño (Figura 4).

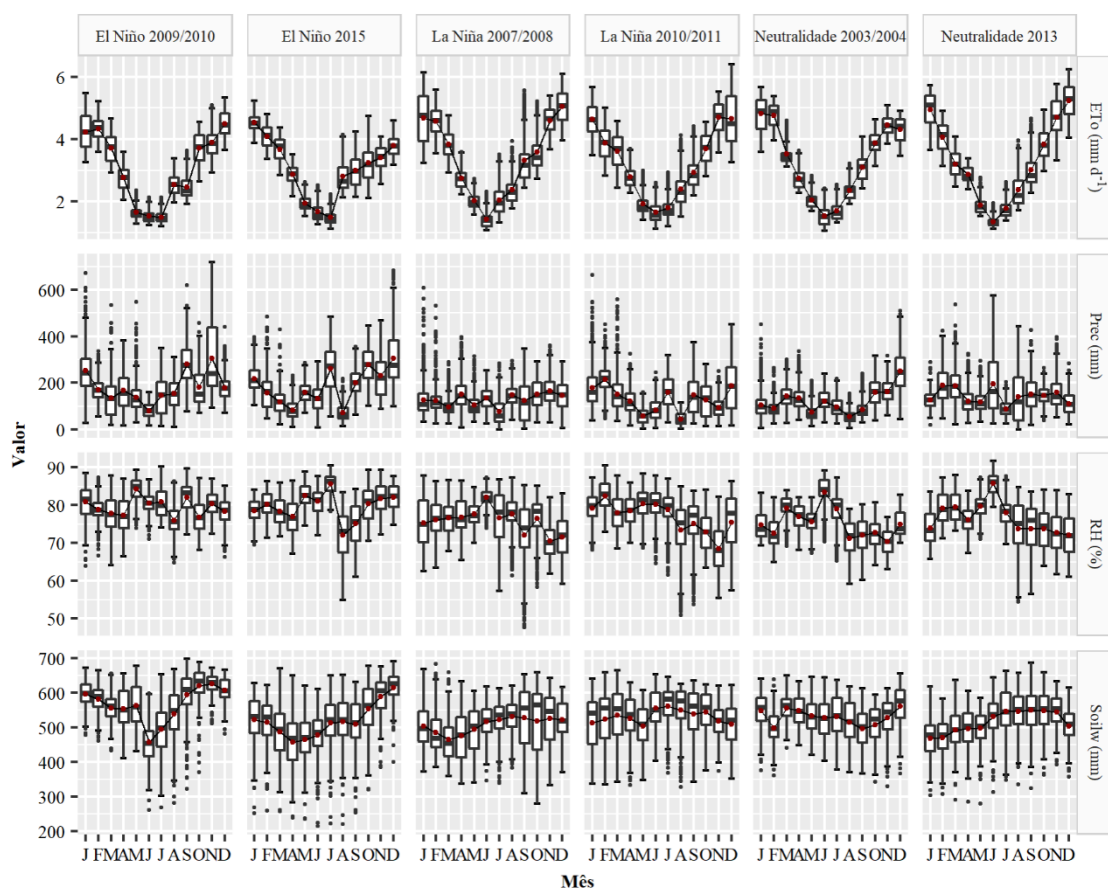


Figura 4. Evapotranspiração de Referência (ETo), precipitação (Prec), umidade relativa do ar (RH) e água no solo (Soilw) na Região Sul do Brasil em eventos de El Niño, La Niña e Neutralidade.

5.2. Registros de focos de calor

5.2.1. Contagem geral

O El Niño de 2015 foi o evento que apresentou menos focos (6.061), sendo 41% no Paraná, 35% no Rio Grande do Sul e 24% em Santa Catarina. O El Niño 2009/2010 registrou 8716 focos, em que 54% ocorreram no Paraná, 29% no Rio Grande do Sul e 18% em Santa Catarina. A La Niña 2007/2008 foi o segundo evento em número de focos (12.997 registros – 50% no estado do PR, 26% no RS e 24% em SC). A La Niña 2010/2011 foi o terceiro evento em total de focos, com 10.995 registros, sendo 49% no PR, 28% no RS e 23% em SC. A Neutralidade de 2003/2004 foi um período excepcional,

em que se observou a maior contagem, 28.215 focos (45% no PR, 25% no RS e 30% em SC). A Neutralidade de 2013 foi muito reduzida em relação à primeira, com 7.938 focos, sendo 49% distribuídos no PR, 27% no RS e 24% em SC.

A La Niña 2007/2008 apresentou cerca de 114% mais focos que o El Niño 2015 e cerca de 49% mais que o El Niño 2009/2010 (Tabela 3). A La Niña 2010/2011 registrou aproximadamente 81% mais focos que o El Niño 2015 e 26% mais que o de 2009/2010. Em relação à Neutralidade, o evento de 2003/2004 obteve mais registros que os dois anos de La Niña juntos, enquanto que a Neutralidade 2013 registrou menos focos que as duas La Niñas e que o El Niño 2009/2010. Em todos os anos os focos de calor foram mais elevados no último mês do Inverno (agosto) e no primeiro mês da Primavera (setembro) (Tabela 3). Em agosto de 2010, mês com mais focos deste ano, o número total foi 4.042% maior do que em janeiro, mês com menos focos deste ano. Desse modo, o coeficiente de variação foi o mais elevado entre os eventos (160,10%) (Tabela 3).

Tabela 3. Focos de calor na Região Sul do Brasil em eventos de El Niño, La Niña e Neutralidade.

Mês	El Niño 2009/2010	El Niño 2015	La Niña 2007/2008	La Niña 2010/2011	Neutralidade 2003/2004	Neutralidade 2013	Total
Jan	108	195	231	122	445	195	1.296
Fev	170	121	272	58	349	149	1.119
Mar	214	237	283	183	374	219	1.510
Abr	384	436	460	247	799	483	2.809
Mai	193	421	873	514	1.442	393	3.836
Jun	460	543	372	523	1.363	280	3.541
Jul	481	330	1.883	1.030	2.007	854	6.585
Ago	4.473	1.877	2.275	4.207	8.986	1.963	23.781
Set	562	1.295	3.664	1.931	6.701	1.790	15.943
Out	1.178	382	1.385	1.078	3.300	682	8.005
Nov	320	102	806	740	1.642	527	4.137
Dez	173	122	493	362	807	403	2.360
Total	8.716	6.061	12.997	10.995	28.215	7.938	74.922
<i>Estatística Descritiva</i>							
	El Niño 2009/2010	El Niño 2015	La Niña 2007/2008	La Niña 2010/2011	Neutralidade 2003/2004	Neutralidade 2013	
Média	726,33	505,08	1.083,08	916,25	2.351,25	661,50	6.243,50
DP ¹	1.162,86	515,59	1.008,29	1.114,51	2.623,80	578,46	6.598,12
CV% ²	160,10	102,08	93,09	121,64	111,59	87,45	105,68

¹ Desvio Padrão da Média; ² Coeficiente de Variação em Porcentagem.

5.2.2. Elevação

Os mais elevados registros de focos estavam, geralmente, entre 341 m e 1097 m de altitude (Figura 5). Essa faixa de altitude abrange duas classes delimitadas neste estudo: 341,2 m – 719,4 m e 719,4 m – 1.097,6 m. Em todos os eventos os registros das duas classes somados representaram valores próximos a 70% do total de focos. A classe com

menos registros em todos os eventos foi a de 1.475,8 m – 1854 m, seguida pela faixa altitudinal de 1.097,6 m – 1.475,8 m (Figura 5).

Em 2009/2010 (El Niño), 3287 focos estavam localizados entre 719,4 m – 1.097,6 m de altitude e 3.086 foram capturados entre 341,2 m – 719,4 m (Figura 5). No El Niño 2015 foram 2247 entre 341,2 m – 719,4 m de altitude. Na La Niña 2007/2008 as classes 341,2 m – 719 m e 719,4 m – 1.097,6 m apresentaram valores bem próximos, 4.781 e 4.927 focos, respectivamente. Para a La Niña 2010/2011, houve proeminente acúmulo entre 341,2 m – 719,4 m de altitude: o total de 4.418 focos. Na Neutralidade 2003/2004 os registros estavam principalmente entre 719,4 m – 1.097,6 m de altitude (12.877). Na Neutralidade 2013 ocorreram 3.177 focos entre 341,2 m – 719 m.

Em todas fases do ENOS os focos concentraram-se principalmente no relevo ondulado (8% – 20%) (Figura 5), sendo a classe imediatamente inferior a esta, relevo suave ondulado (3% – 8%), a segunda mais expressiva. Para o El Niño 2009/2010 foram 3.173 focos (36%) entre 8% – 20% de declividade, e no de 2015 foram 2.191 (36%). Em anos de La Niña: em 2007/2008 foram 4.851 focos (37%) e 4.180 (38%) em 2010/2011. Por fim, nos anos de Neutralidade a classe apresentou 10.940 em 2003/2004 (39%) e 2.969 focos (37%) no evento de 2013.

Os focos de calor distribuíram-se de forma relativamente igualitária nas nove classes de Orientação das vertentes (Figura 5). Porém, com registros mais pronunciados na face de exposição Norte (N) em todos os eventos. No El Niño 2009/2010 foram registrados 1.248 focos na classe, para o de 2015 foram 871, ambos representando cerca de 14% dos focos em seus respectivos anos. Na La Niña 2007/2008 foram 1.899 (15%) e na de 2010/2011 foram 1543 (14%). Nos anos de Neutralidade foram 4059 em 2003/2004 (14%) e 1.114 em 2013 (14%). Além do relevo plano, as faces de orientação Leste (L) e Sudeste (SE) foram as duas classes com menores registros em cada ano (Figura 5), sendo a primeira a que apresentou os menores números de focos.

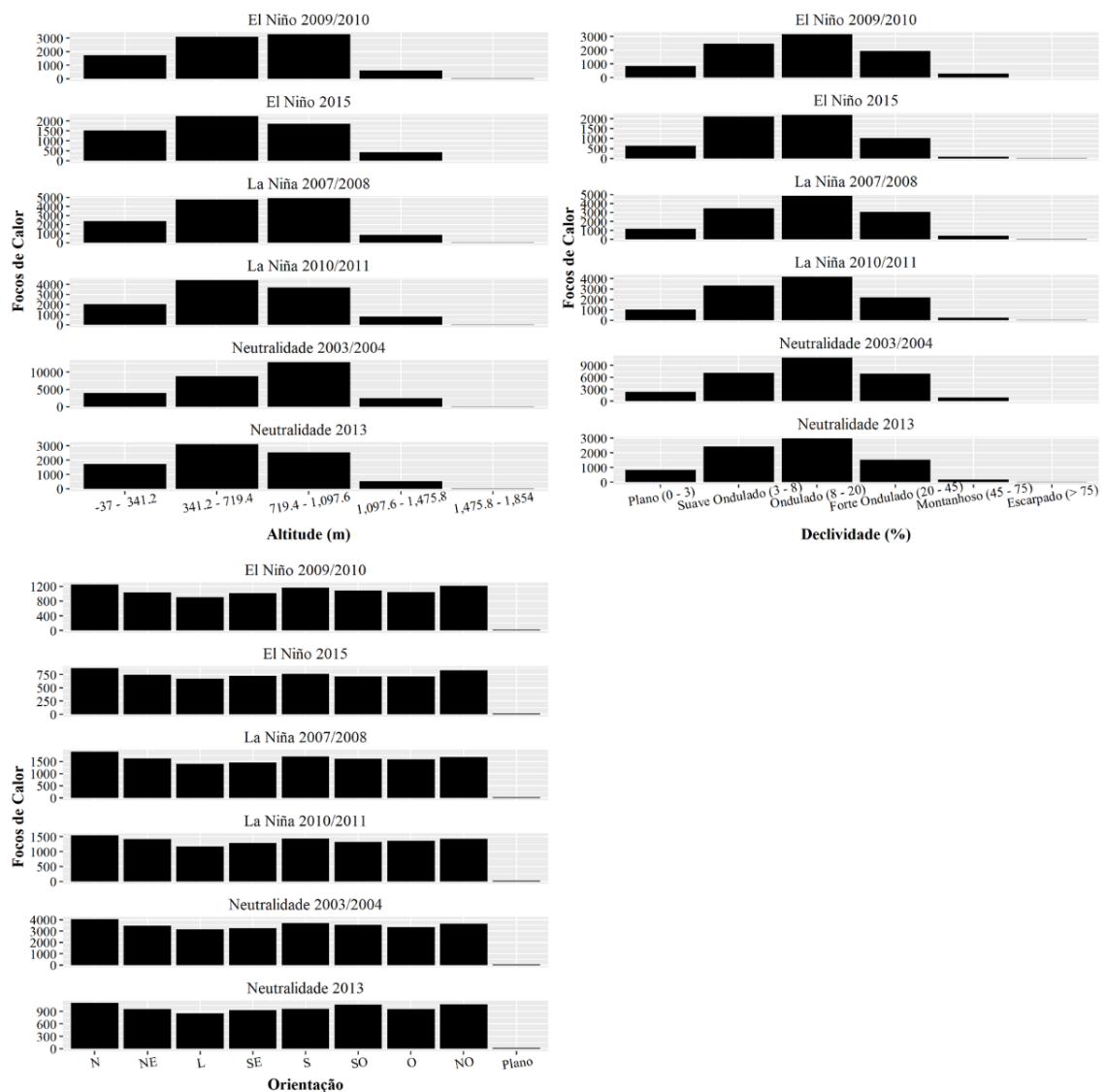


Figura 5. Focos de calor na Região Sul do Brasil de acordo com a Altitude, Declividade e Orientação da vertente em eventos de El Niño, La Niña e Neutralidade.

5.2.3. Cobertura vegetal

Em todas as fases do ENOS as maiores contagens de focos de calor foram obtidas para a Classe de Agropecuária (Ag). Além dessa classe, a Agricultura com Culturas Cíclicas (Acc) e a Vegetação Secundária (Vs) figuraram entre as três classes com maiores registros de focos (Figura 6). As classes Agricultura com Culturas Permanentes (Acp), Floresta Estacional Decidual (C), Floresta Estacional Semidecidual (F), Refúgio Vegetacional (R) e Savana (S) registraram número muito reduzido de focos (Figura 6) sempre menores que 50 registros em todos os anos, o que representou menos de 1% total de focos em todos os eventos.

Para o El Niño de 2009/2010, a Agropecuária registrou 4.899 focos (Figura 6), o que representou cerca de 56% do total do evento. O pico de registros na classe foi em agosto (2.403 focos), valor muito superior aos outros meses. A fitofisionomia de Estepe (E) foi a segunda classe mais afetada no ano, com 1.013 focos (12% do total) e com acúmulo de 839 registros no mês de agosto (Figura 6). A Agricultura com Culturas Cíclicas e a

Vegetação Secundária representaram, cada uma, cerca de 11% do total de focos (respectivamente 941 e 920 registros). No El Niño 2015, a Agropecuária registrou 3.372 focos do total de 6.061 focos do ano (Figura 6), dessa forma, 56% do registro anual estava nesta classe. O pico para a tipologia foi em agosto, 936 focos, sendo que setembro foi o mês que mais se aproximou desse valor (759 focos). A Agricultura com Culturas Cíclicas acumulou cerca de 13% do total anual, ou seja, 818 registros no ano. Os maiores registros de Acc também foram em agosto (206 focos) e setembro (166 focos) (Figura 6).

No evento da La Niña 2007/2008, foram registrados 6.987 focos (54% do ano) na classe de Agropecuária, em que o mês de setembro se destacou no número de registros, com o total de 1.838 focos (Figura 6). A Vegetação Secundária obteve mais focos neste ano do que a Agricultura com Culturas Cíclicas, sendo a primeira com 1.410 registros e a segunda com 1.366, ambas representando cerca de 11% do total anual.

Na La Niña 2010/2011, a Agropecuária registrou 6.031 focos (55%), sendo o mês de agosto disparadamente o mais expressivo, com 2.105 registros, sendo que o segundo com mais acúmulo (setembro) apresentou menos da metade desse total (957 focos) (Figura 6). Agricultura com Culturas Cíclicas e Estepe figuraram entre os maiores registros, sendo Acc com 1.338 focos (427 em agosto) e E com 1.307 focos (947 em agosto) (Figura 6).

Para a Neutralidade 2003/2004, a Agropecuária registrou 14955 focos de calor (53% do total anual) em seu domínio, sendo novamente o mês de agosto com os maiores números de focos (4.498). A Vegetação Secundária foi a segunda classe com mais registros no ano, 2.994 (11% do total anual), sendo 848 em agosto e 621 em setembro. A classe de Reflorestamento (Rt) foi a terceira mais afetada (2.800 focos no ano) e, muito próximo a ela, a Agricultura com Culturas Cíclicas (2.723 focos no ano) (Figura 6).

Em 2013, na fase de Neutralidade, foram assinalados 4.273 focos em Agropecuária (54% do registro anual), em que 1.048 ocorreram no mês de agosto e valor próximo, 967, ocorreram em setembro. A Agricultura com Culturas Cíclicas representou cerca de 14% do total anual (1.085 focos), dos quais 270 ocorreram em agosto e 244 em setembro.

De forma semelhante aos focos de calor, os maiores registros de área queimada foram encontrados na classe de Agropecuária (Ag) (Figura 7).

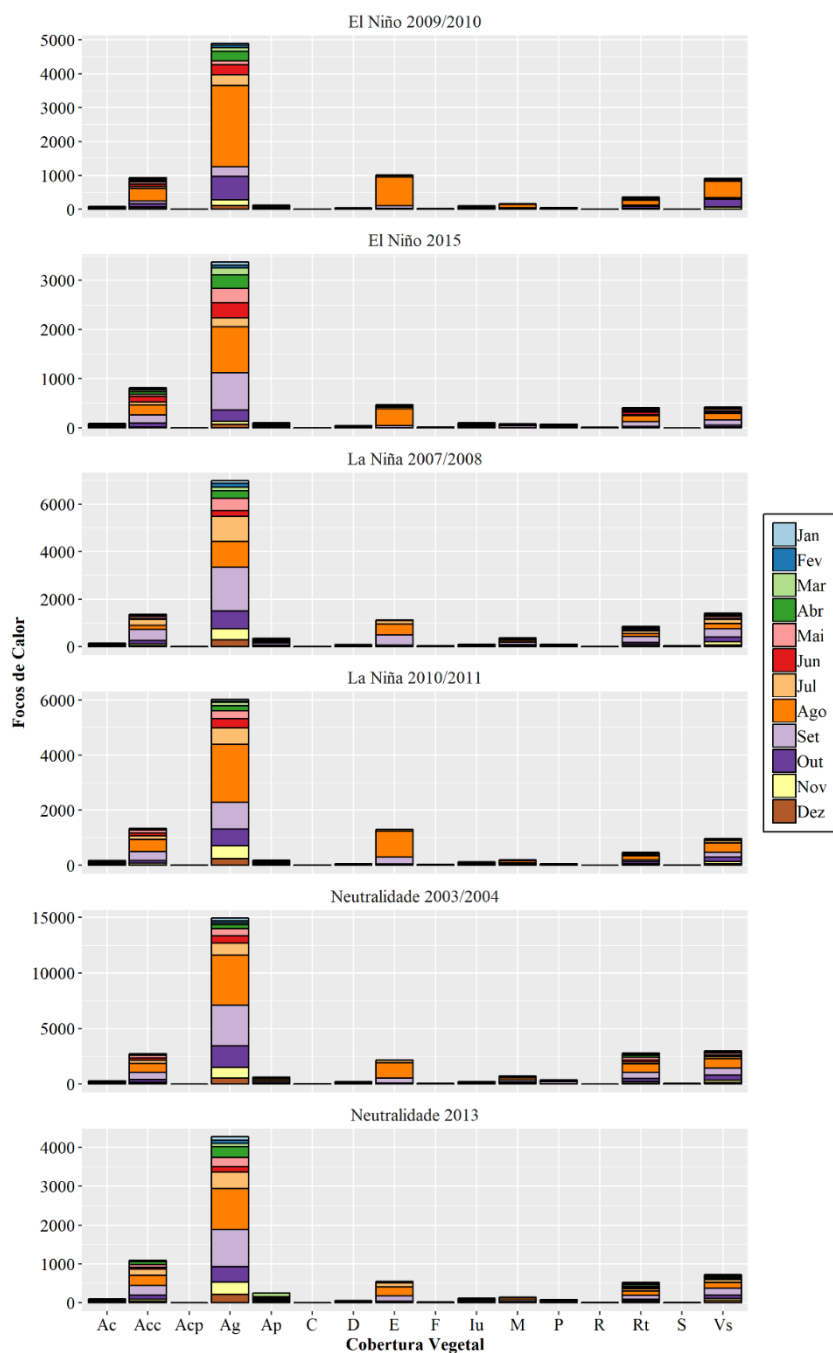


Figura 6. Focos de calor na Região Sul do Brasil de acordo com as classes de cobertura vegetal em eventos de El Niño, La Niña e Neutralidade.

5.3. Registros de área queimada

5.3.1. Extensão geral

O total de área queimada na Região Sul do Brasil para os seis anos avaliados foi de mais de 15 mil km² (Tabela 4). Com exceção da Neutralidade 2003/2004, os dois períodos de La Niña foram os que apresentaram os valores mais elevados de área queimada: 2.955,73 km² (La Niña 2010/2011) e 2.306,56 km² (La Niña 2007/2008). O Valor encontrado na La Niña 2010/2011 foi cerca de 77% maior que a área observada no El Niño 2015 (1.666,70 km²) e aproximadamente 37% mais do que o encontrado no El Niño

2009/2010 (2.152,67 km²). Já para a La Niña 2007/2008, foram 639,86 km² a mais que no período de 2015 e 153,89 km² a mais que no El Niño 2009/2010.

Assim como observado para os focos de calor, foram registrados picos de área queimada nos meses de agosto e setembro (Tabela 4). A La Niña de 2007/2008 foi o único evento em que o mês com valor mais elevado não foi agosto, e sim setembro. Os meses com menores registros foram os meses de Verão, sendo geralmente fevereiro o mês com menores áreas afetadas pelo fogo (Tabela 4).

No El Niño 2009/2010, o mês de agosto de 2009 registrou 936,74 km² de área queimada, valor muito elevado em relação aos outros meses, dessa forma a variação anual chegou a mais de 130% (Tabela 4). Setembro do período também se destacou com 215,09 km² de área registrada. Os meses de abril, maio e junho apresentaram valores bem próximos e em janeiro de 2010 ocorreu o menor valor (15,17 km²). Em 2015 (El Niño) novamente agosto foi o mais afetado pelo fogo (445,39 km²) (Tabela 4). A área queimada foi distribuída de forma mais uniforme entre os meses, e o segundo mês com maior área foi julho, com 310,84 km². dezembro de 2015, com apenas 9,05 km², foi um dos meses com menor registro em todo o período de estudo (Tabela 4).

A La Niña 2007/2008 apresentou distribuição de área queimada entre os meses mais uniforme que os dois anos de El Niño, tendo em vista seu menor coeficiente de variação em relação a média (Tabela 4). Para este ano, o mês de setembro foi o que registrou o maior valor (542,36 km²). Já na La Niña 2010/2011, a variação dos dados foi mais elevada por apresentar mês com 7,07 km² (janeiro), enquanto o mais elevado mês registrou 899,16 km² (agosto). setembro deste evento se destacou com 701,04 km², o segundo setembro com maior valor, abaixo apenas de setembro de 2003.

As áreas na Neutralidade 2003/2004 apresentaram grande variação ao redor da média, sendo o coeficiente de variação de 166,56% (Tabela 4). Os meses de agosto e setembro acumularam, juntos, mais de 70% de toda a área queimada do período. Agosto deste ano apresentou o maior valor mensal de todos os meses, com 2.311,82 km² de área afetada pelo fogo (Tabela 4). Por fim, a Neutralidade 2013 foi a que obteve menor dispersão dos valores mensais em torno da média, sendo agosto o mês de destaque com 311,54 km² de área queimada.

Tabela 4. Área queimada na Região Sul do Brasil em eventos de El Niño, La Niña e Neutralidade.

Mês	El Niño 2009/2010	El Niño 2015	La Niña 2007/2008	La Niña 2010/2011	Neutralidade 2003/2004	Neutralidade 2013	Total
Jan	15,17	131,18	88,11	7,07	32,22	34,90	308,66
Fev	110,08	16,11	27,59	26,21	29,31	12,81	222,11
Mar	67,91	55,88	76,31	67,28	29,79	77,66	374,83
Abr	154,08	64,30	109,47	42,09	103,41	164,74	638,09
Mai	153,13	129,38	146,60	230,50	168,30	152,15	980,06
Jun	154,44	123,21	301,03	228,26	209,30	51,88	1.068,12
Jul	120,99	310,84	277,37	343,25	485,27	241,31	1.779,01
Ago	936,74	445,39	331,49	899,16	2.311,82	311,54	5.236,14
Set	215,09	232,87	542,36	701,04	963,99	291,85	2.947,20
Out	140,09	111,48	258,67	183,02	97,83	150,66	941,75
Nov	43,70	37,00	105,98	164,20	120,91	210,81	682,60
Dez	41,25	9,05	41,57	63,65	35,80	45,03	236,36
Total	2.152,67	1.666,70	2.306,56	2.955,73	4.587,95	1.745,33	15.414,93

Estatística Descritiva

	El Niño 2009/2010	El Niño 2015	La Niña 2007/2008	La Niña 2010/2011	Neutralidade 2003/2004	Neutralidade 2013	
Média	179,39	138,89	192,21	246,31	382,33	145,44	1.284,58
DP ¹	235,13	125,25	146,04	268,72	636,81	98,39	1.404,42
CV% ²	131,07	90,18	75,98	109,10	166,56	67,65	109,33

¹ Desvio Padrão da Média; ² Coeficiente de Variação em Porcentagem.

5.3.2. Cobertura vegetal

Semelhante à contagem de focos de calor, as maiores extensões de área afetada pelo fogo foram sempre registradas para Agropecuária (Ag) (Figura 7). Além disso, na maior parte dos eventos, a Agricultura com Culturas Cíclicas (Acc) e a Estepe (E) foram as outras duas tipologias mais afetadas. Na maior parte dos eventos, a soma de Ag e Acc totalizaram mais de 70% da área queimada observada na Região Sul, exceto na Neutralidade 2003/2004.

No El Niño 2009/2010, a Agropecuária respondeu por 1.134,44 km² da área queimada observada para o período, o que corresponde a aproximadamente 50% do total deste evento (Figura 7). O mês mais afetado nesta classe foi agosto, com 292,99 km² de extensão de queima. A segunda tipologia com maior área queimada foi a Estepe com 493,99 km² no ano e quase todo o registro acumulado somente no mês de agosto de 2009 (466,44 km²) (Figura 7). A Classe de Agricultura com Culturas Cíclicas também representou cerca de 20% (421,77 km²) do total anual, sendo o maior registro novamente para agosto (135,21 km²). A Agropecuária no El Niño 2015 apresentou valor semelhante ao primeiro evento da fase quente, 1.141,19 km², porém o registro foi equivalente a cerca de 68% do valor total anual (Figura 7). agosto respondeu por 295,03 km² da área queimada, sendo setembro o mês mais próximo disso, com 178,44 km². A Agricultura com Culturas Cíclicas registrou 341,35 km², sendo julho e agosto os meses que acumularam as maiores áreas da classe: 94,35 km² e 93,88 km² (Figura 7).

Na La Niña 2007/2008, 61% do total do ano ocorreu em Agropecuária, ou seja, o equivalente a 1.408,15 km², com elevação de mais de 250 km² em relação aos anos de El Niño descritos (Figura 7). O mês de setembro de 2008 registrou 300,37 km², o maior valor encontrado dentre os meses em Agropecuária. A Agricultura com Culturas Cíclicas registrou 525,70 km² no evento (cerca de 23% do total anual) e setembro, com 132,35 km², foi o mês com maior acúmulo. Para o ano de La Niña 2010/2011 a área queimada em Agropecuária foi ainda mais elevada que o primeiro evento de La Niña. A classe registrou aproximadamente 62% do registro anual, dessa forma uma área de 1.825,77 km² (Figura 7). A área de 496,32 km² foi observada em Agropecuária em agosto, sendo setembro o segundo mês em concentração. Agora Agricultura com Culturas Cíclicas registrou 645,50 km² com maiores áreas em agosto e setembro.

O pico de área queimada em Agropecuária foi na Neutralidade 2003/2004. Foi registrado 1.850,74 km² nesse tipo de cobertura, sendo que elevado valor (761,58 km²) foi observado para o mês de agosto de 2003 (Figura 7). A vegetação de Estepe foi a segunda classe com maiores registros no ano: 1.453,58 km² (aproximadamente 32% do total anual). Deste valor total encontrado em Estepe, 1.073,12 km² foram registrados em agosto (Figura 7). Por fim, na Neutralidade 2013, 1.198,74 km² de área queimada foram observados em Agropecuária, sendo o ano com a melhor distribuição mensal dos registros nesta classe (Figura 7). Ainda assim, agosto foi o mês com maior registro na Agropecuária (223,72 km²). Mais de 376 km² de Agricultura com Culturas Cíclicas queimadas foram registrados nesse evento, dos quais 92,46 km² ocorreu em julho.

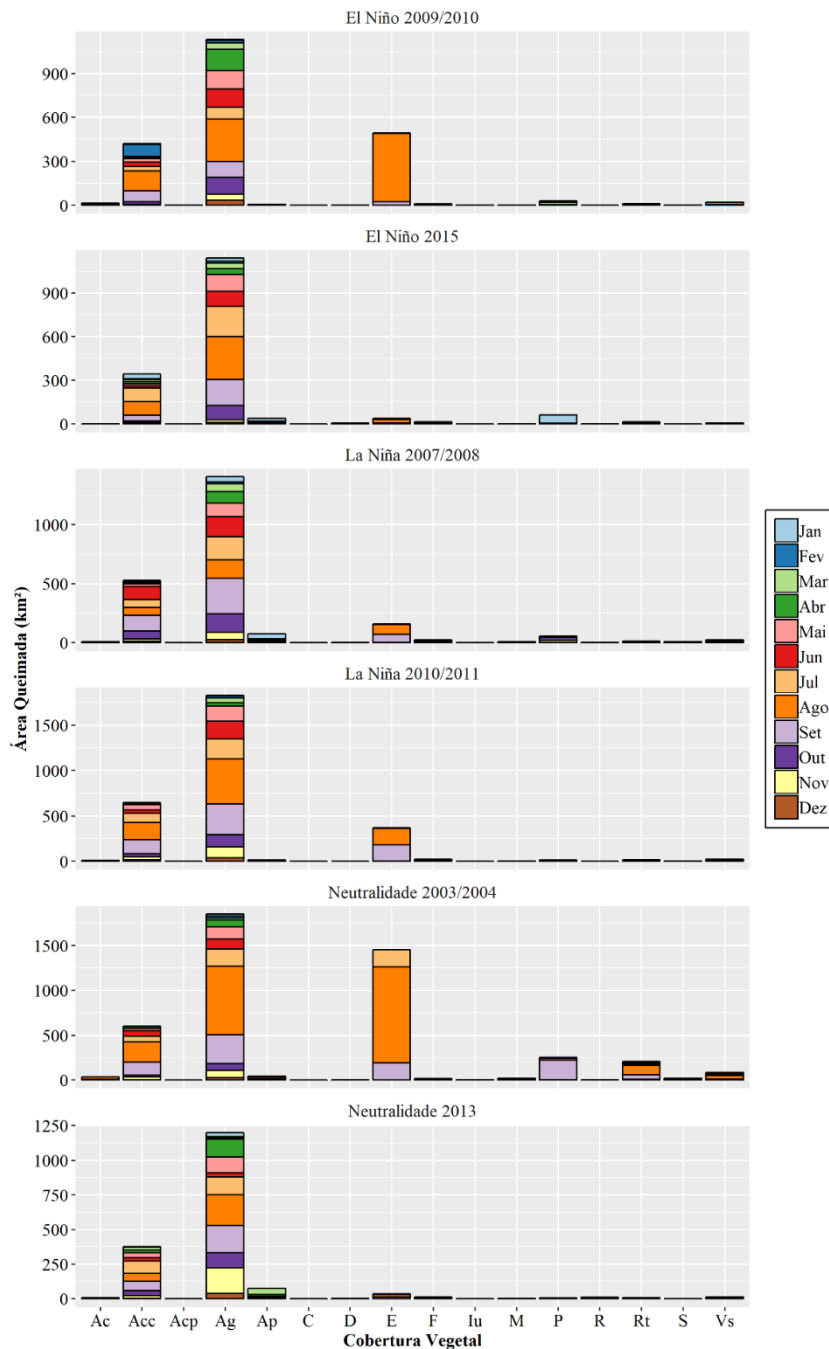


Figura 7. Área queimada na Região Sul do Brasil de acordo com a cobertura vegetal em eventos de El Niño, La Niña e Neutralidade.

5.4. Emissão de Carbono

Foram emitidos o total 8,3626 Tg de Carbono para a atmosfera nos seis anos de estudo. A Neutralidade 2003/2004 foi o evento com maior emissão em todo o período, registrando 3,0611 Tg em 12 meses (Figura 8). Com exceção deste ano, os períodos de La Niña foram os anos com maiores emissões, sempre superando os valores observados nos dois anos de El Niño avaliados. Na La Niña 2007/2008, a emissão foi mais que o dobro (1,5097 Tg) do valor de 0,6467 Tg encontrado no El Niño 2015 e 0,49 Tg mais elevado que o registrado no El Niño 2009/2010. O emitido pela queima na La Niña

2010/2011 (1,1236 Tg) foi aproximadamente 74% maior do que no El Niño 2015 e cerca de 10% maior que no El Niño 2009/2010

Para o El Niño 2009/2010, cerca de 49% das emissões foi observada em agosto, ou seja, 0,5 Tg, enquanto que 20% foi em outubro (0,2 Tg) (Figura 8). No El Niño de 2015 os meses de agosto e setembro acumularam os principais registros: 0,1865 Tg e 0,1125 Tg. Em setembro de 2007 foi observada a maior emissão da La Niña 2007/2008, com o total de 0,5872 Tg (Figura 8). O valor é cerca de 34 vezes superior ao observado no mês com menor emissão (janeiro de 2008), que registrou 0,0165 Tg. Na La Niña 2010/2011 o maior registro, 0,4918 Tg, se deu em agosto de 2010 e foi aproximadamente 59 vezes maior que os 0,0081 Tg observados em fevereiro de 2011.

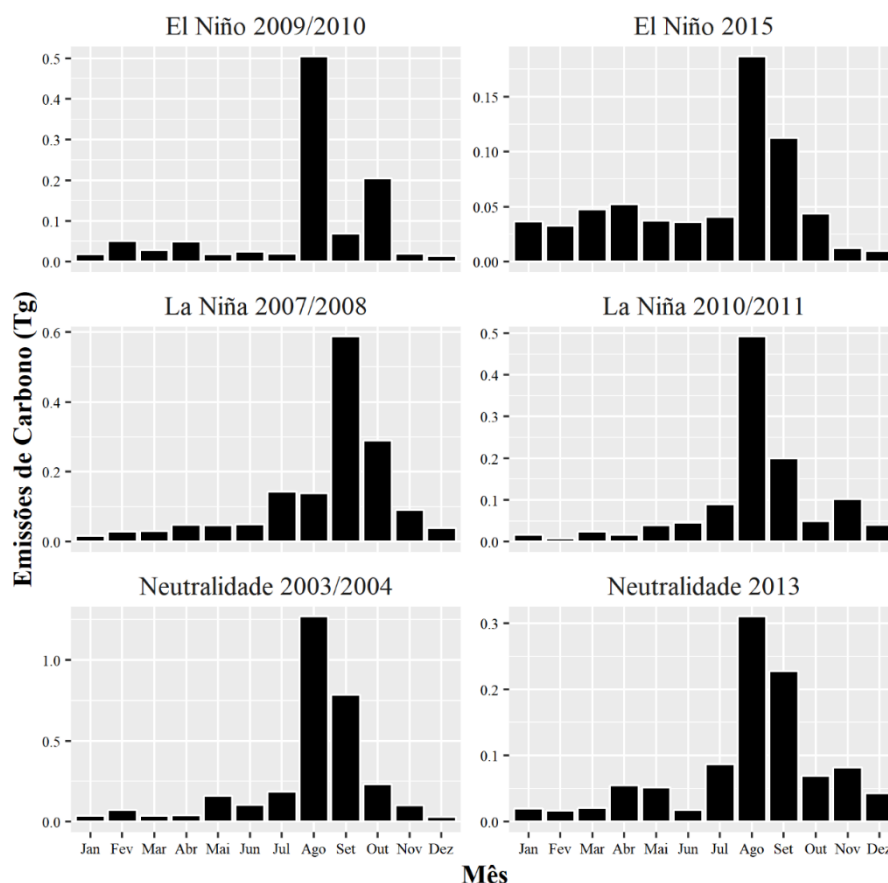


Figura 8. Emissões de carbono na Região Sul do Brasil em eventos de El Niño, La Niña e Neutralidade.

5.5. Densidade Kernel

No El Niño 2009/2010 as densidades Kernel Alta e Muito Alta podem ser observadas principalmente afastadas das regiões litorâneas e, na maior parte dos meses, ocorrendo especialmente ao Norte da área de estudo (Paraná) (Figura 9). Entretanto, em julho, agosto e setembro (Inverno/Primavera) é possível observar grandes áreas de densidades Alta e Muito Alta na região Centro-Leste, divisa entre os estados de Santa Catarina e Rio Grande do Sul.

A principal classe de vegetação com densidade kernel Muito Alta em 2009/2010 foi agropecuária (Ag) com mais de 26,7 mil km² somados nos 12 meses do período (Figura 9). A Segunda classe foi Estepe (>7,6 mil km²) e terceira foi Agricultura com Culturas Cíclicas (>7,4 mil km²). O mês de setembro foi o que registrou maiores extensões de

densidade Muito Alta (>8,6 mil km²), sendo que 3.180,77 km² estavam localizados na Estepe (Figura 9).

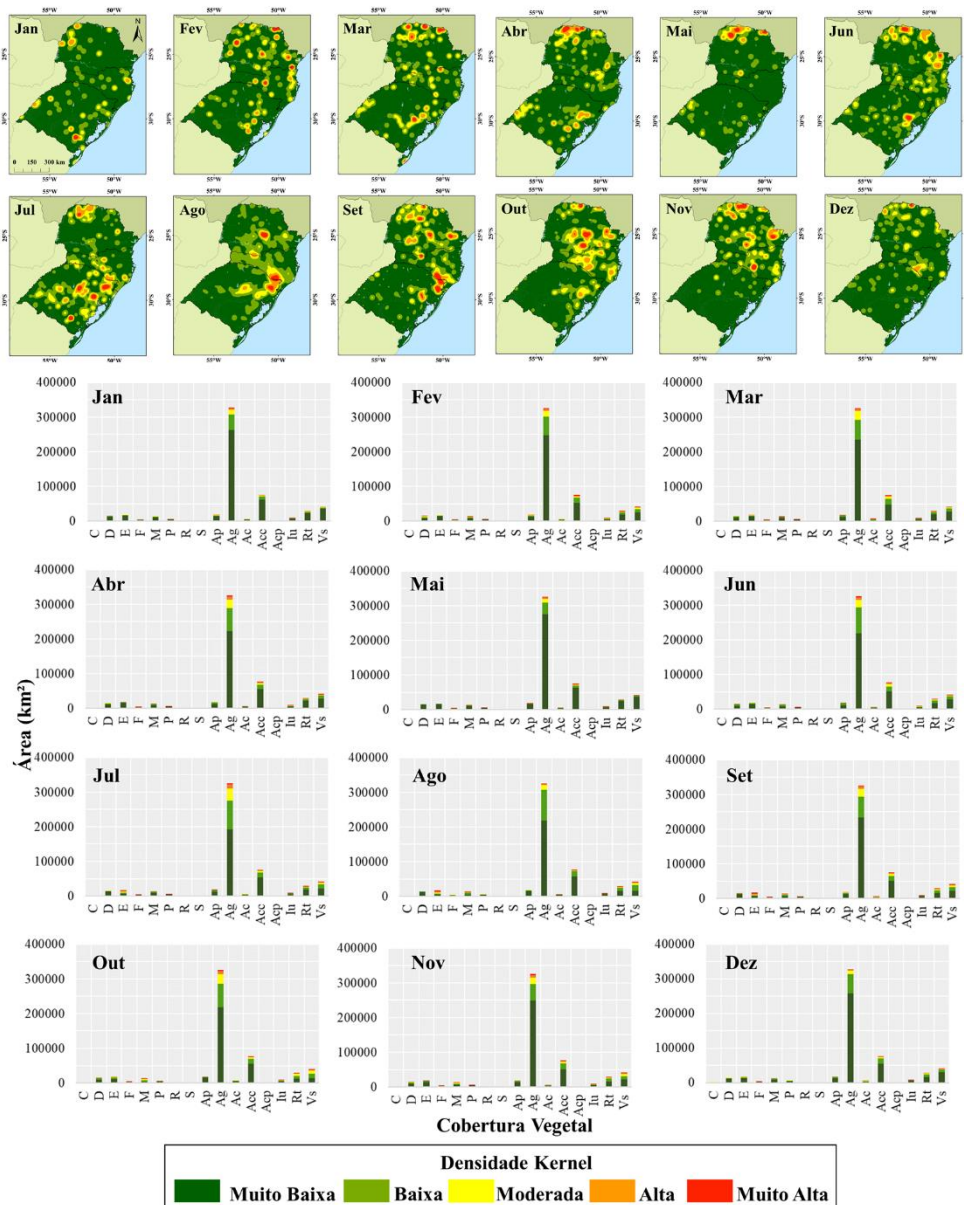


Figura 9. Densidades Kernel na Região Sul do Brasil e suas respectivas extensões de acordo com a cobertura vegetal no evento El Niño 2009/2010.

A distribuição das densidades na Região Sul do estudo no El Niño 2015 foi semelhante ao observado no 2009/2010 (Figura 10). A densidade Muito Alta foi observada principalmente ao Norte da área (Paraná), porém em meses como março, abril e maio também se distribuem pela região Sul (Rio Grande do Sul). Em junho e julho ocorreram grandes manchas de densidade Muito Alta e Alta ao Norte do Paraná. O Mês de agosto desse fenômeno registrou o principal acúmulo de densidade Muito Alta: mais de 6,1 mil km². A densidade Muito Alta desse agosto foi registrada principalmente em Estepe (1.944,77 km²) localizada na divisa entre Santa Catarina e Rio Grande do Sul (Figura 10).

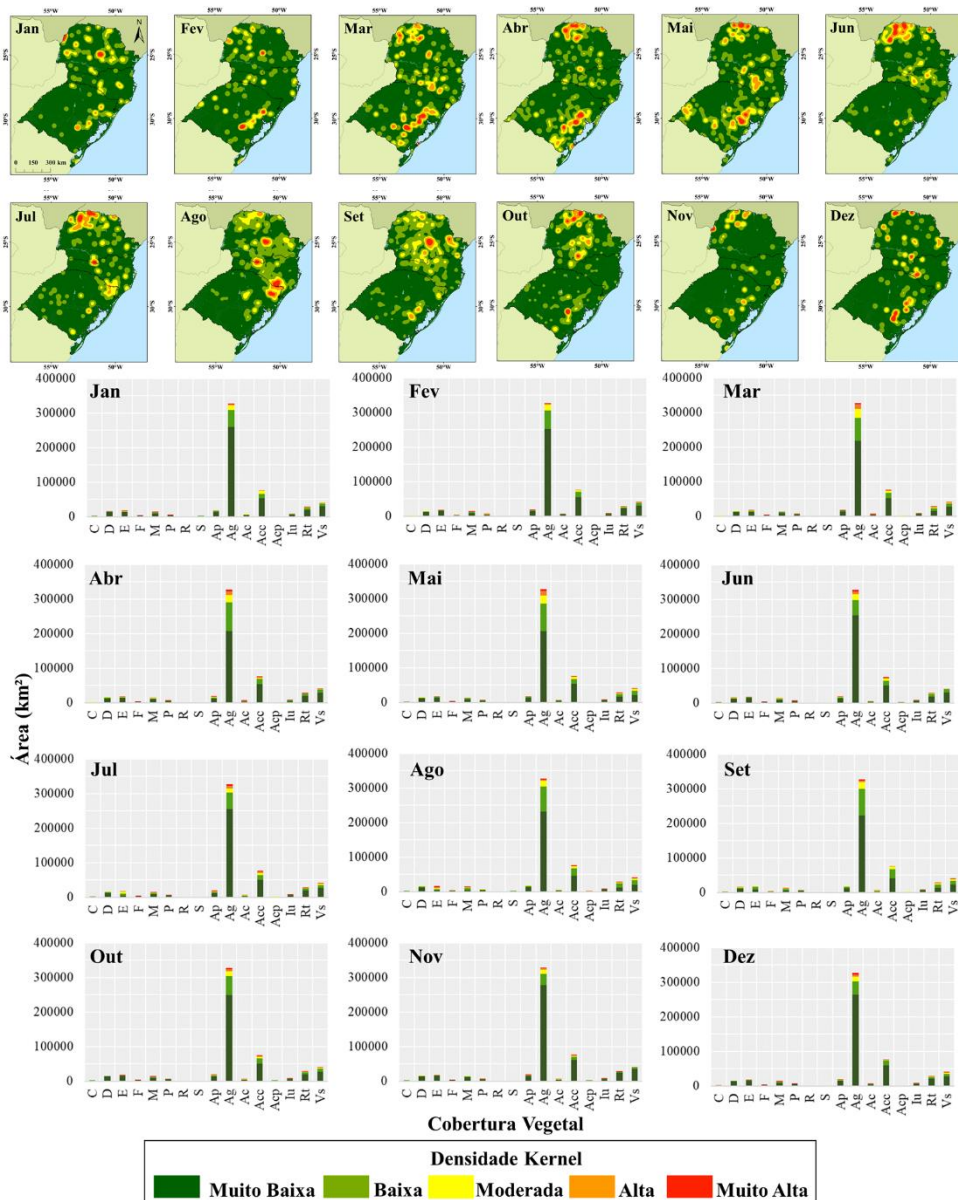


Figura 10. Densidades Kernel na Região Sul do Brasil e suas respectivas extensões de acordo com a cobertura vegetal no evento El Niño 2015.

A La Niña 2007/2008 foi o segundo evento que registrou maior extensão de densidade Kernel Alta (>196 mil km²) e Muito Alta (>53,7 km²) dentre os períodos avaliados, abaixo apenas da excepcional Neutralidade de 2003/2004. O mês de julho de 2008 foi o período do ano em que as densidades Alta e Muito alta mais assolaram a região, com 39.145,50 km² na primeira classe e 10.551,43 km² na segunda (Figura 11).

Em julho, o mês mais crítico citado anteriormente, a classe de Agropecuária registrou a maior extensão de densidade Muito Alta, cerca de 6,6 mil km² (Figura 11). Além disso, esse tipo de cobertura vegetal foi o que respondeu pela maior parcela de densidade Muito Alta na La Niña 2007/2008, com mais de 32,5 mil km² ao longo do evento climático. Depois de Ag, a Vegetação Secundária (Vs) foi segunda classe com maior registro de densidade Alta e Muito Alta nos 12 meses avaliados do evento.

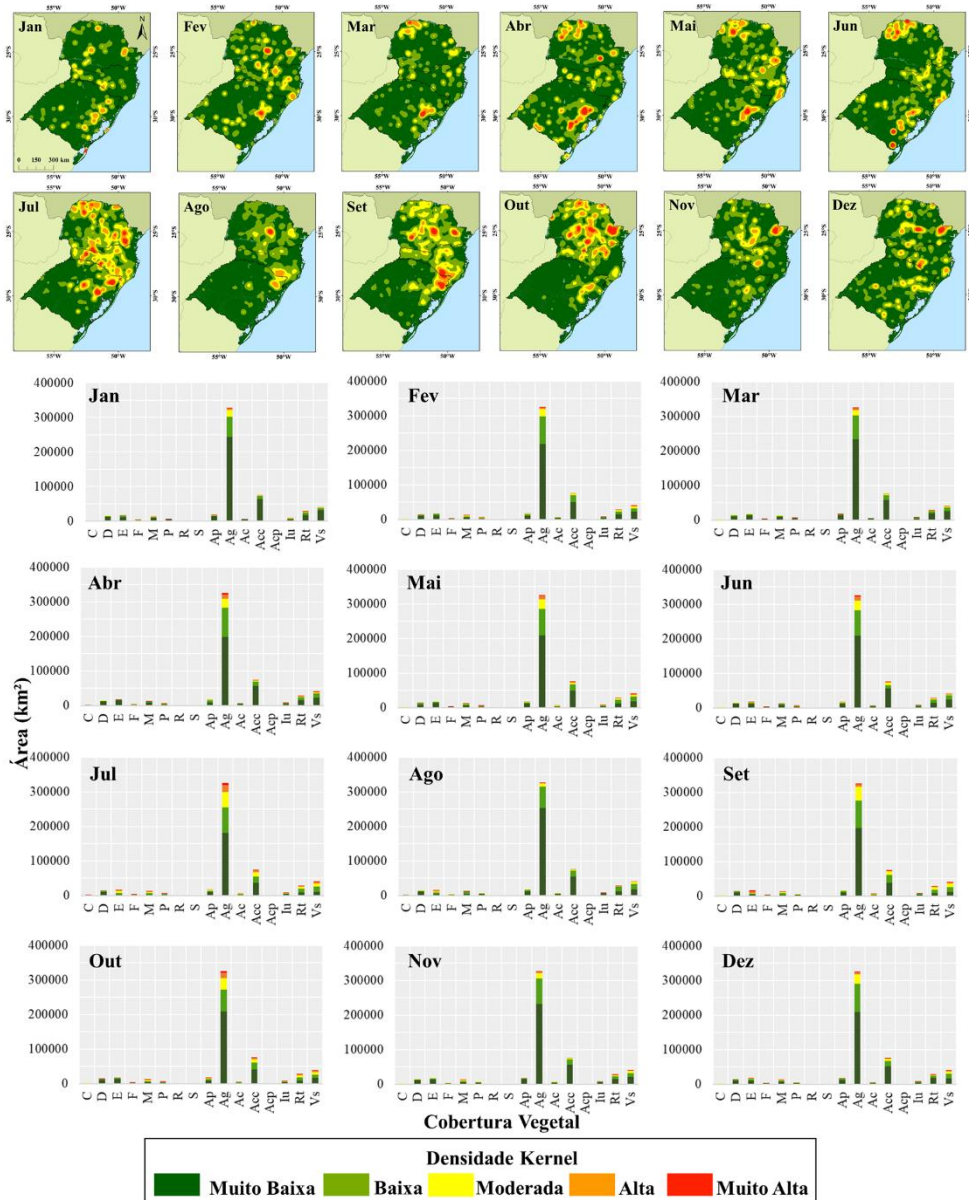


Figura 11. Densidades Kernel na Região Sul do Brasil e suas respectivas extensões de acordo com a cobertura vegetal no evento La Niña 2007/2008.

Na La Niña 2010/2011 o padrão espacial foi semelhante aos outros períodos avaliados, em que as maiores densidades são recorrentes na porção Norte da Região Sul (Figura 12). As densidades Alta e Muito alta aumentaram sua representatividade na porção Centro-Leste nos meses de agosto e setembro de 2010. Em agosto e setembro, meses com os maiores número de focos de calor no ano é possível observar que a densidade Muito Alta estava principalmente na classe de Estepe: 5.032,09 km² em agosto; e 3.112,52 km² em setembro. Em setembro a classe de Agricultura com Culturas Cíclicas foi a segunda em maior extensão de densidade Muito Alta, com mais de 1,2 mil km².

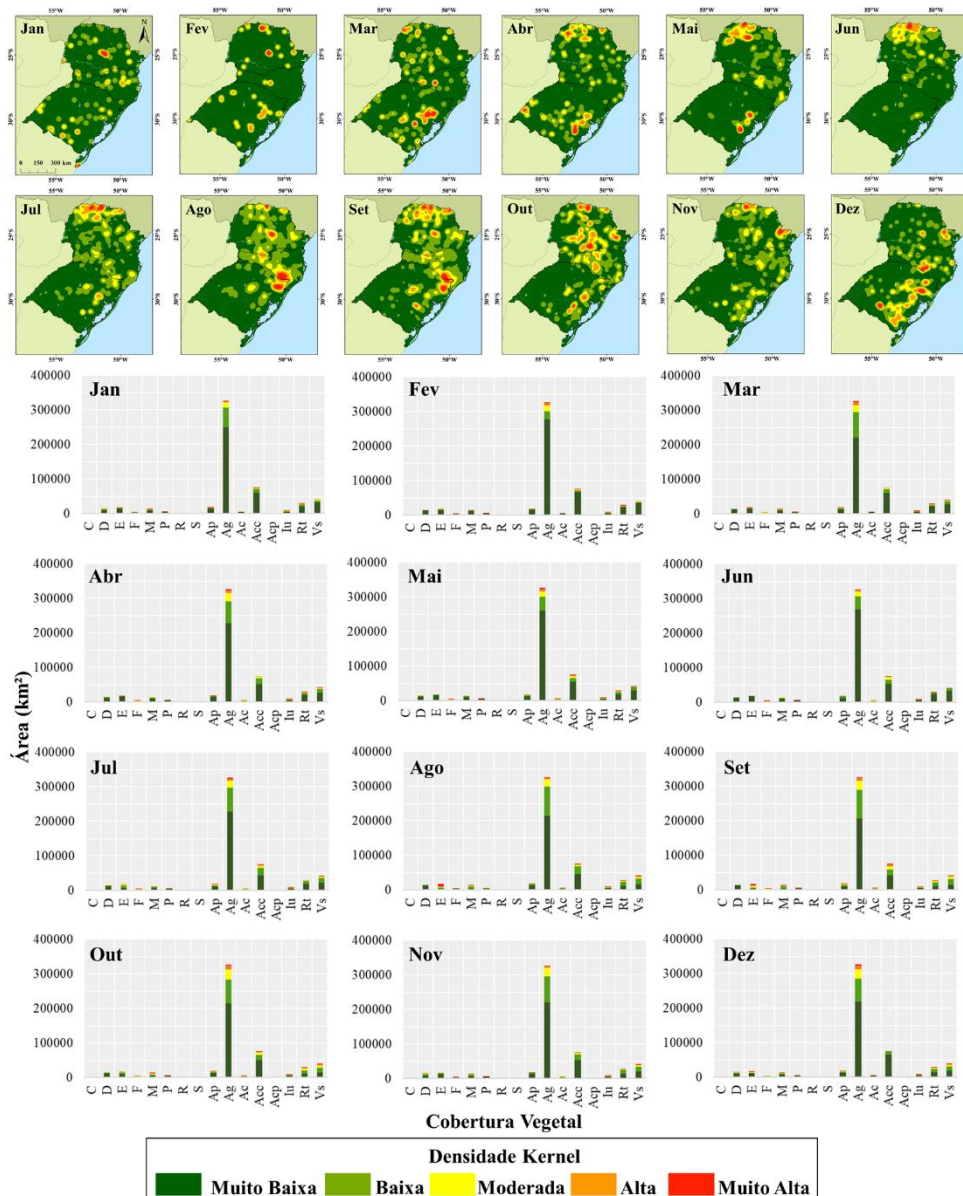


Figura 12. Densidades Kernel na Região Sul do Brasil e suas respectivas extensões de acordo com a cobertura vegetal no evento La Niña 2010/2011.

Na Neutralidade 2003/2004, evento com número excepcional de focos de calor quando comparado aos outros, as classes de densidade Alta e Muito Alta afetaram extensas porções da Região Sul (Figura 13). Somados os 12 meses do período, mais de 97,5 mil km² de densidade Muito Alta foi registrado e cerca de 316,4 mil km² de densidade Alta. Os meses de abril a outubro foram os mais críticos e as localidades Sul e Sudoeste da área de estudo (Rio Grande do Sul) foram as que menos sofreram com os ocorrência de focos. Do total da área de densidade Muito Alta registrada em 2003/2004 (97,5 mil km²), mais de 50% foi observada em Agropecuária (50,05 mil km²). O mês de outubro de 2003 foi o que apresentou maior área de densidade Muito Alta, 16.455,94 km², da qual 10.906,26 km² foram registrados em Agropecuária (Figura 13).

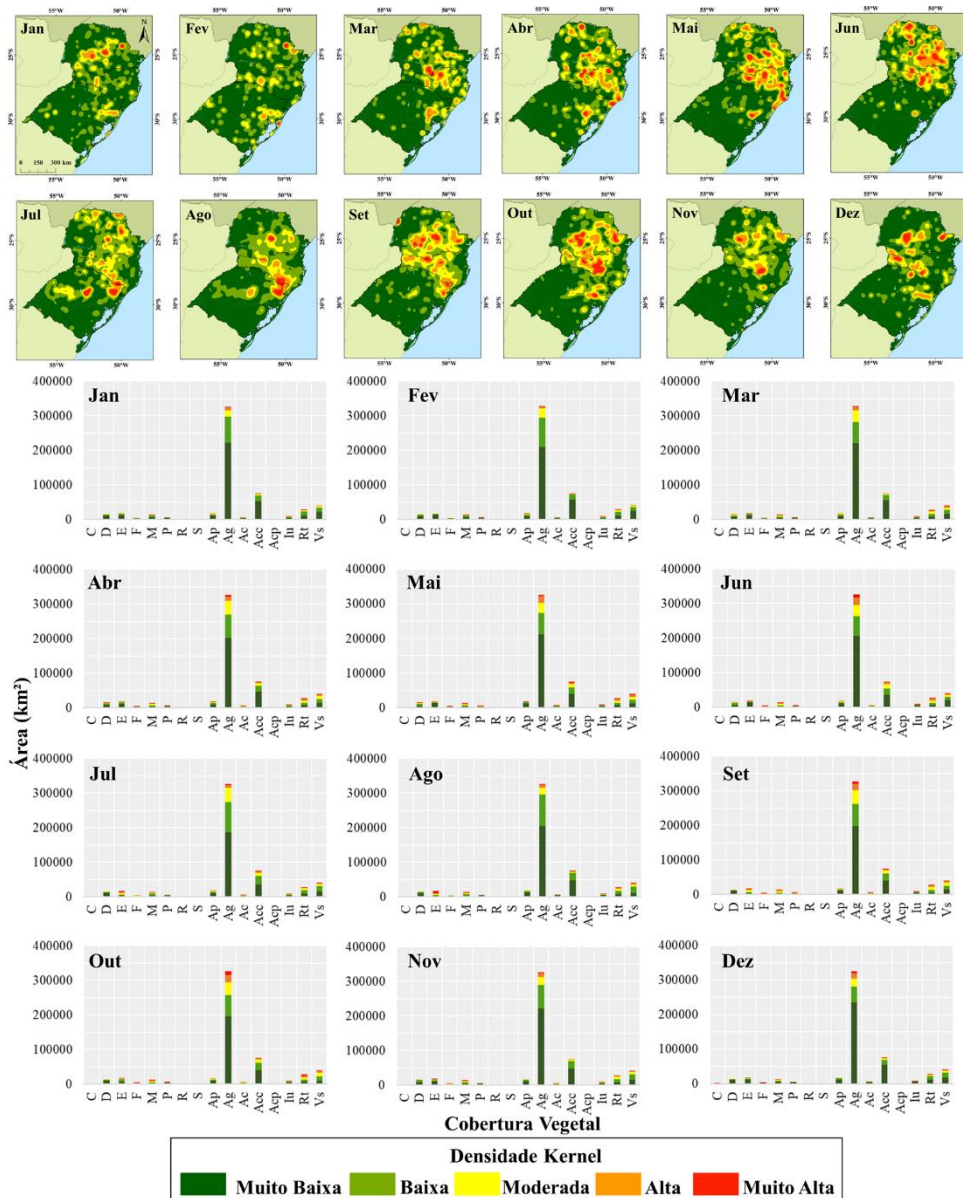


Figura 13. Densidades Kernel na Região Sul do Brasil e suas respectivas extensões de acordo com a cobertura vegetal no evento Neutralidade 2003/2004.

Para a Neutralidade 2013, os meses de fevereiro e março apresentaram baixa concentração dos focos de calor, ou seja, os registros foram bem distribuídos na região como um todo (Figura 14). A região Norte da área de estudo novamente recebeu altas concentrações de focos de abril a dezembro. De julho a outubro, os núcleos de densidade Muito Alta foram registrados em diversas regiões do estado, sendo a Região Oeste do Rio Grande do Sul a menos afetada. Agropecuária foi a classe com maior extensão de densidade Muito Alta (>27,6 km² no ano), sendo que julho foi o mês que esse tipo de vegetação acumulou maior extensão da classe (5.348,57 km²) (Figura 14).

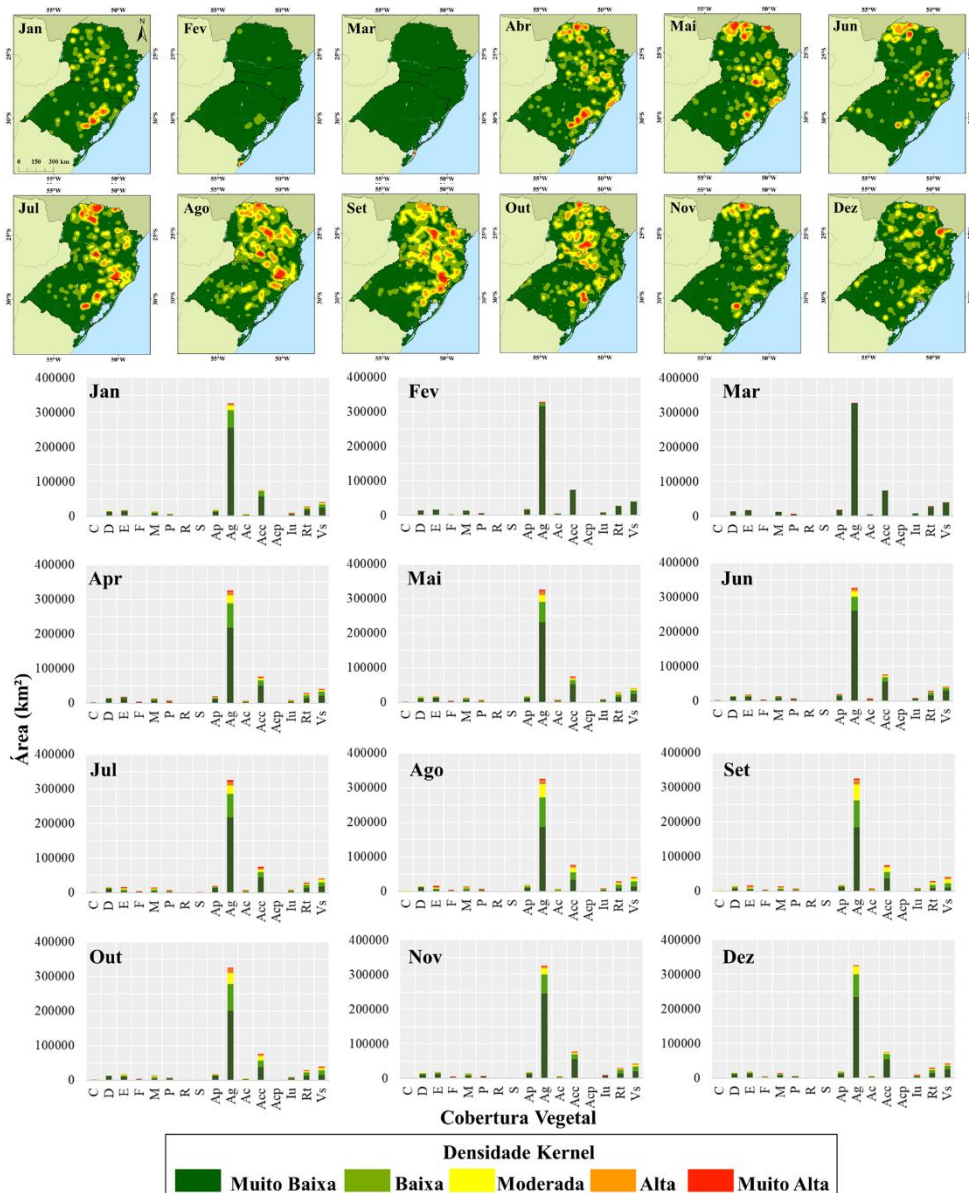


Figura 14. Densidades Kernel na Região Sul do Brasil e suas respectivas extensões de acordo com a cobertura vegetal no evento Neutralidade 2013.

5.6. Pressão Atmosférica e Vento

Em todas as fases do fenômeno ENOS foi observado o comportamento de elevação da pressão atmosférica na Região Sul do Brasil e no Sul do Oceano Atlântico (25°W – 45°W e 18°S – 45°S) dos meses com menos ocorrências de focos de calor e área queimada para os meses com mais ocorrências. Também foram observadas variações nas Correntes de Vento e aumento da velocidade do vento. Dessa forma, foram aqui comparadas a circulação atmosférica da área de estudo e adjacências nos meses com menos fogo e com mais fogo dos seis eventos avaliados.

Em janeiro de 2010 (El Niño), o mês com menos focos e área queimada, pode-se observar baixas pressões atmosféricas na Região Sul do Brasil (1.010 mb a 1.012 mb) e um anticiclone na região oceânica com 1.018 mb (Figura 15). Em contrapartida, no mês de agosto de 2009 a pressão na área de estudo varia de 1.016 mb a 1.018 mb e o referido anticiclone atinge 1.022 mb, além de se aproximar do continente. A região também recebe

predominantemente correntes de vento vindas do Nordeste no mês de agosto, enquanto que em janeiro as correntes são predominantemente de Leste. Os ventos também são intensificados em agosto quando comparados os vetores de janeiro.

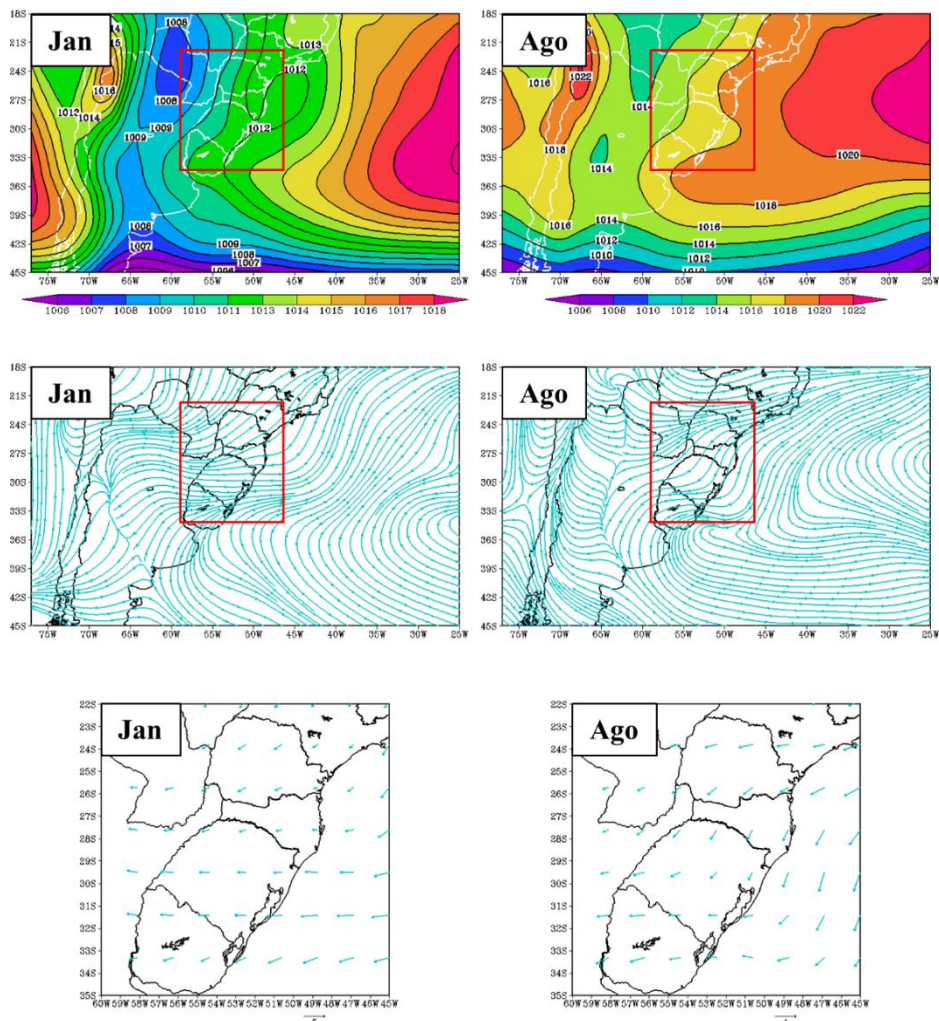


Figura 15. Pressão ao Nível Médio do Mar, Correntes e Vetores de Vento na Região Sul do Brasil no El Niño 2009/2010 no mês com menos fogo (Jan) e com mais fogo (Ago).

No El Niño 2015 o mês com menos focos de calor foi novembro, sendo agosto novamente o com mais registros. Neste evento, foram registradas baixas pressões no Sul do Brasil em novembro (1.009 mb a 1.013 mb) (Figura 16) e o anticiclone oceânico estava distante da costa continental. Em agosto do ano, foram observadas altas pressões na área de estudo (até 1.018 mb) e presença bem marcada do Anticiclone do Atlântico Sul, o qual registrou pressão atmosférica máxima de 1.024 mb. É possível observar que em novembro as Correntes de Vento adentram a região de estudo principalmente vindas do Leste (oceano), enquanto que em agosto as correntes são de Nordeste e depois sopram verticalmente para o Sul. Por vezes as velocidades de Vento em agosto quando comparadas a novembro foram mais elevadas.

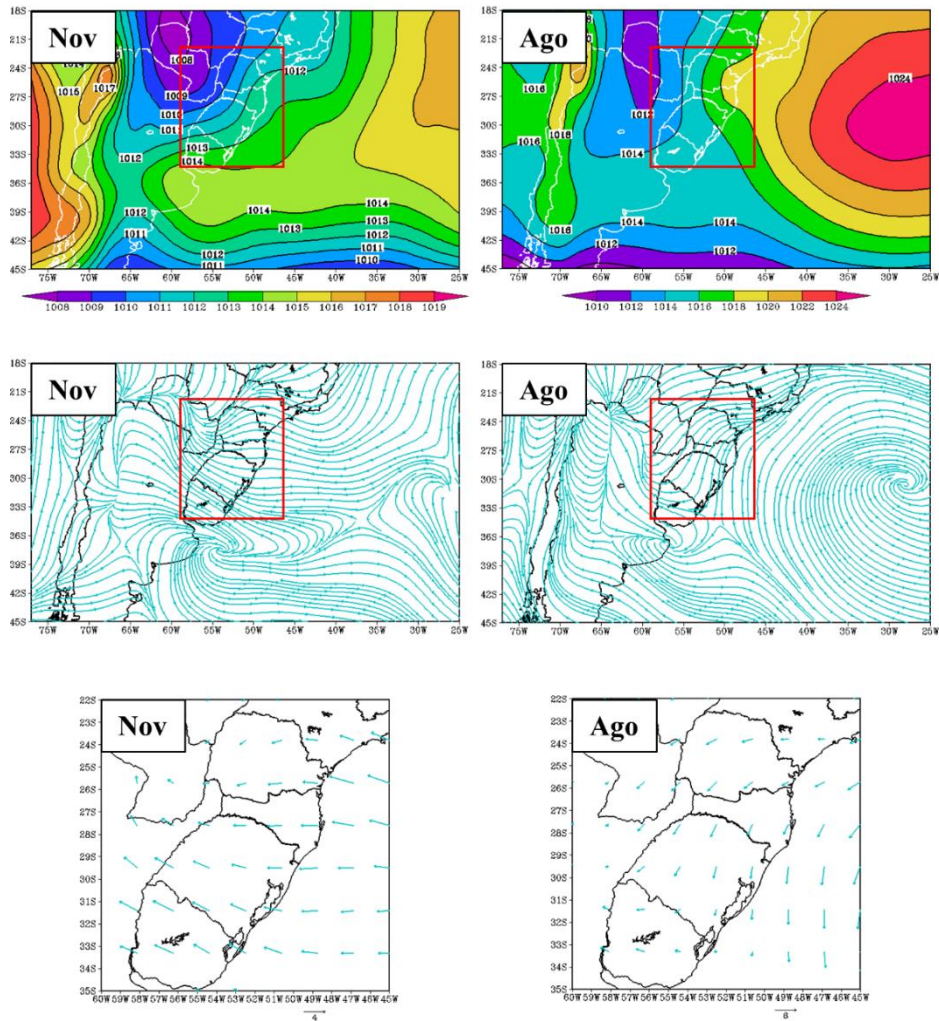


Figura 16. Pressão ao Nível Médio do Mar, Correntes e Vetores de Vento na Região Sul do Brasil no El Niño 2015 no mês com menos fogo (Nov) e com mais fogo (Ago).

Em janeiro de 2008 (La Niña) as pressões na área de estudo variaram de 1009 mb a 1.014 mb, sendo que em setembro de 2007 (mês com Mais focos e Área queimada) os registros foram de 1.014 mb a 1.018 mb, portanto altas pressões (Figura 17). Em setembro o anticiclone localizado no oceano se fez mais presente e atingiu 1.025 mb de pressão. As correntes de vento novamente adentraram pelo Leste no mês com menos focos e mais ao Nordeste no mês com mais focos e área queimada. A intensidade do vento dada pelo módulo dos vetores foi de certa forma semelhante.

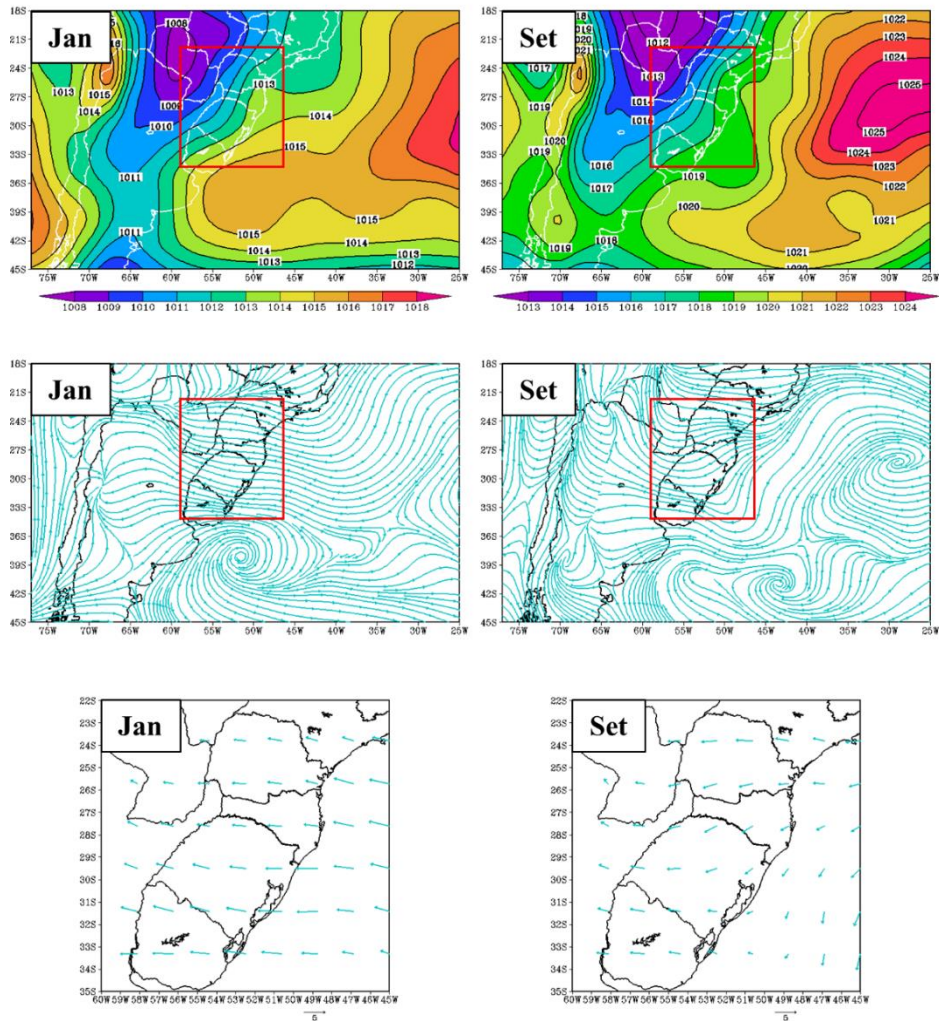


Figura 17. Pressão ao Nível Médio do Mar, Correntes e Vetores de Vento na Região Sul do Brasil na La Niña 2007/2008 no mês com menos fogo (Jan) e com mais fogo (Set).

Na La Niña 2010/2011, fevereiro (menos fogo) registrou baixas pressões na Região Sul do Brasil (1.010 mb a 1.013 mb), em contrapartida no mês de agosto (mais fogo) foram observadas pressões na região de 1.020 até 1.021 mb (Figura 18). O anticiclone oceânico atingiu 1.023 mb em agosto, em contrapartida chegou apenas a 1.018 mb em fevereiro. O Vetor de Velocidade de Vento foi mais elevado principalmente no Norte da Região Sul (Paraná).

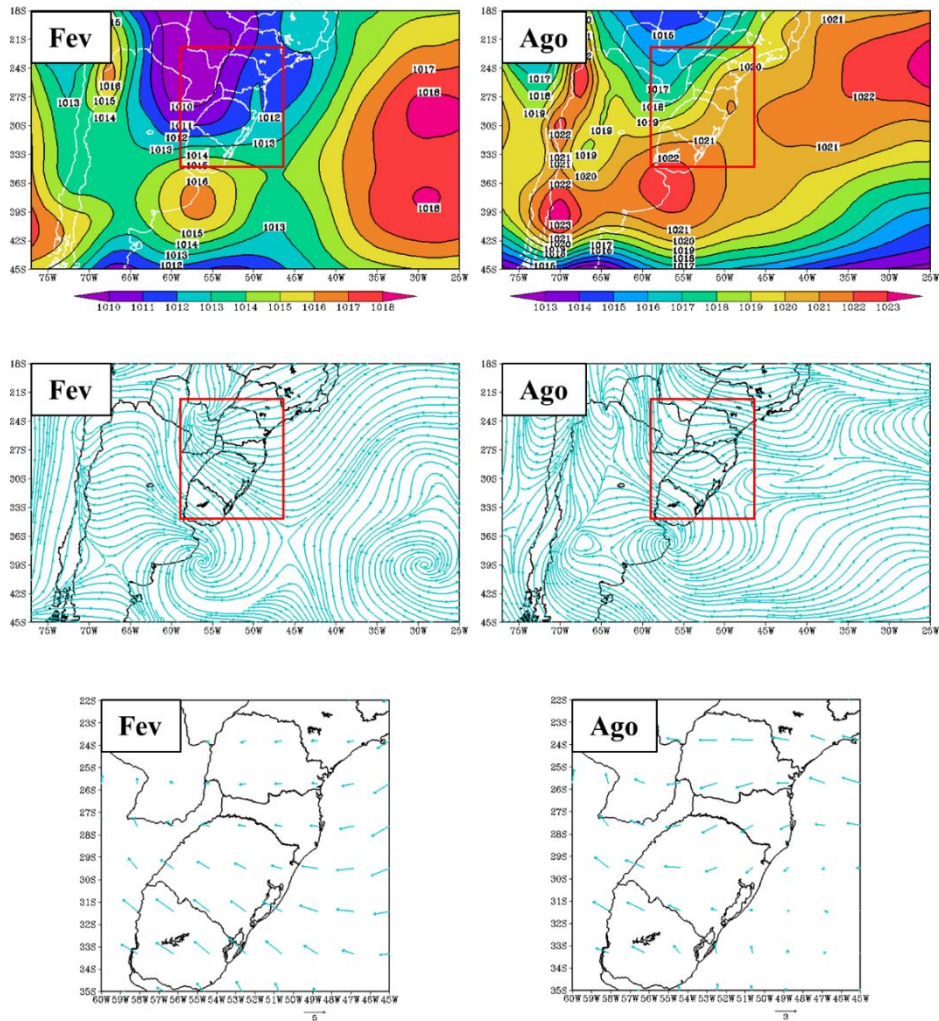


Figura 18. Pressão ao Nível Médio do Mar, Correntes e Vetores de Vento na Região Sul do Brasil na La Niña 2010/2011 no mês com menos fogo (Fev) e com mais fogo (Ago).

Para a Neutralidade 2003/2004, o mês com menos focos e área queimada (fevereiro de 2004) registrou pressões variando entre 1.011 mb e 1.014 mb na área de estudo (Figura 19). Em agosto de 2003 houve uma grande região com pressão de até 1.021 mb, a maior registrada na superfície da área de estudo. O Anticiclone em agosto foi mais intenso (1022 mb) quando comparado com fevereiro (1.018 mb). No mês de agosto pode-se observar, por meio das Correntes de Vento, um forte Anticiclone entre na interface continente/oceano (Figura 19). Os ventos foram mais intensos em fevereiro, porém provavelmente carregando alta umidade provida do Oceano Atlântico.

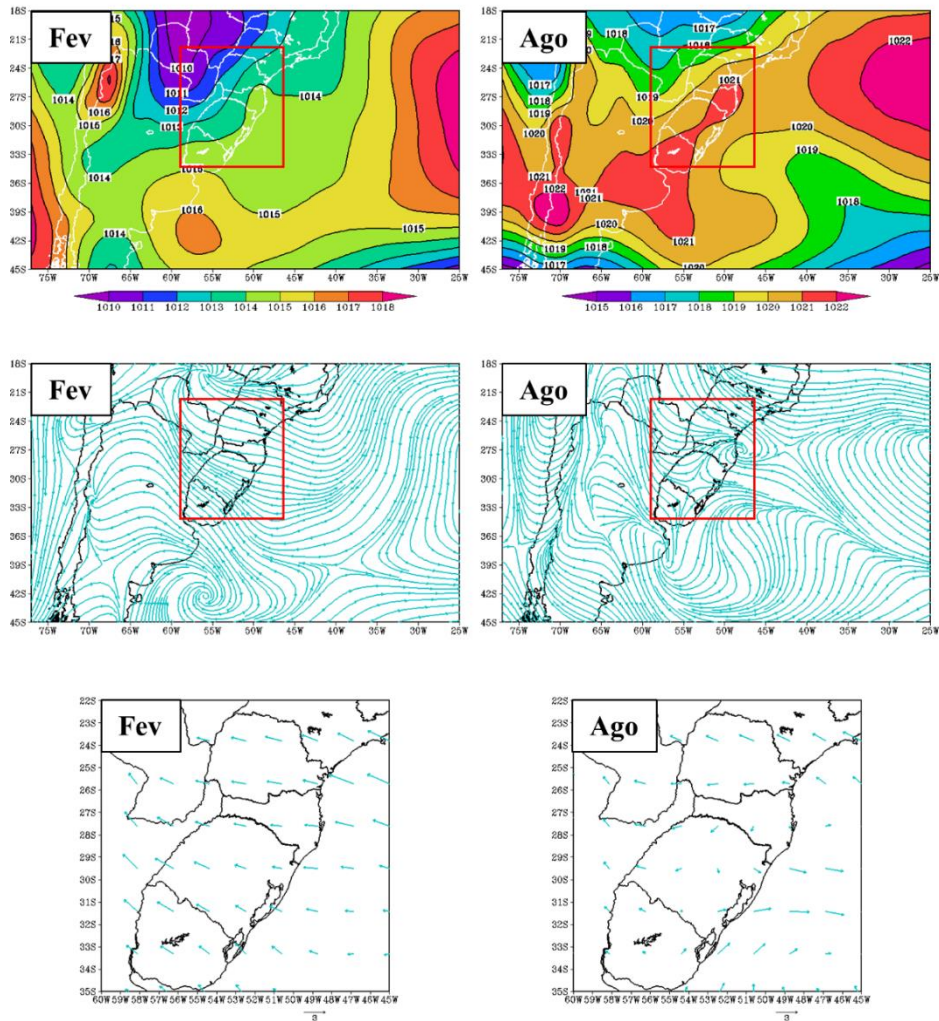


Figura 19. Pressão ao Nível Médio do Mar, Correntes e Vetores de Vento na Região Sul do Brasil na Neutralidade 2003/2004 no mês com menos fogo (Fev) e com mais fogo (Ago).

Por fim, o evento de Neutralidade 2013 também assinalou baixas pressões no mês com menos focos e área queimada – fevereiro – com valores de 1.010 a 1.012 mb, enquanto que agosto registrou valores de 1.018 mb em maior parte da Região Sul do Brasil (Figura 20). Também é possível observar uma alta pressão (1.020 mb) na região do Uruguai e limite com o Rio Grande do Sul. O Anticiclone do Atlântico do Sul avançou com sua alta pressão de 1.022 mb em direção ao continente no mês de agosto. A intensidade dos ventos foi semelhante na região.

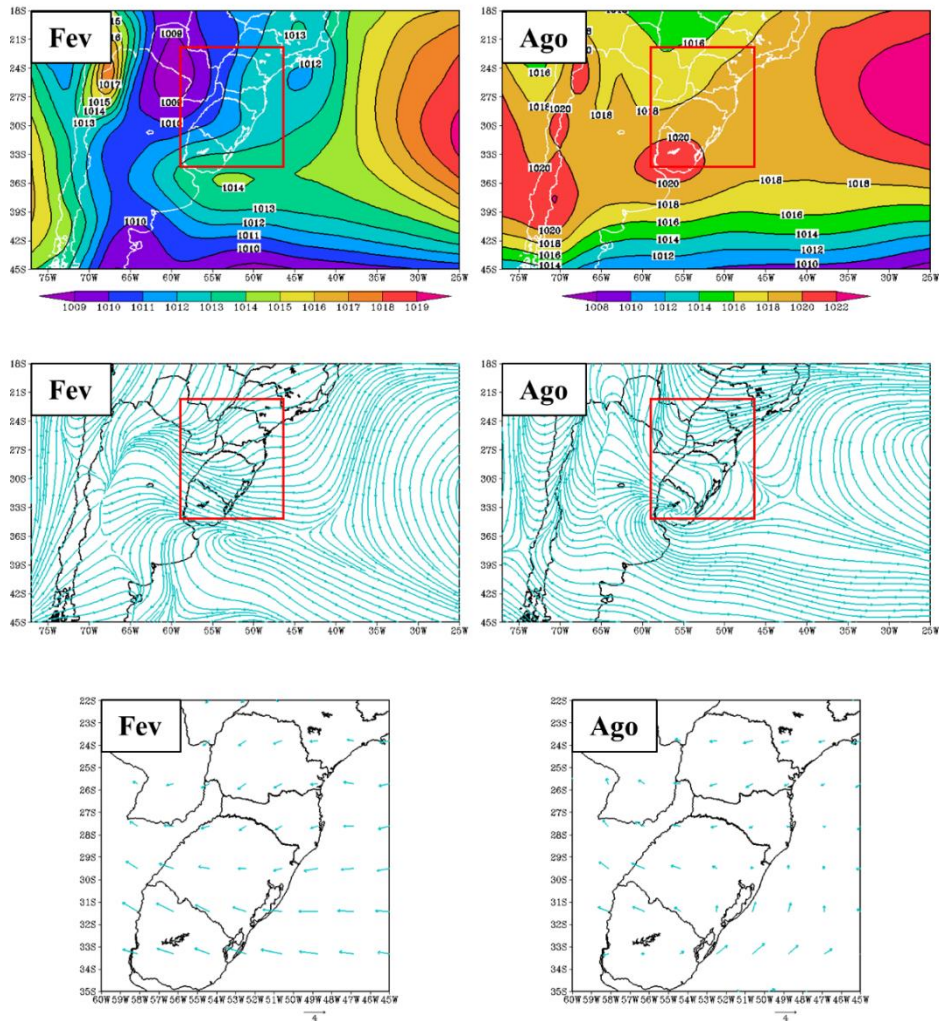


Figura 20. Pressão ao Nível Médio do Mar, Correntes e Vetores de Vento na Região Sul do Brasil na Neutralidade 2013 no mês com menos fogo (Fev) e com mais fogo (Ago).

6 CORRELAÇÃO DE SPEARMAN

A Correlação de Spearman ao nível de 95% de confiança demonstrou que as variáveis apresentaram correlações positivas e negativas, sendo que em diferentes casos não houve correlação significativa (Figura 21). As correlações entre as temperaturas do ar (Tmax, Tmin e Tmed) e as variáveis de fogo (FC e AQ) apresentaram comportamento idêntico em todas as fases do fenômeno ENOS, sendo sempre negativas e significativas. A precipitação (Prec) e a velocidade do vento (U10) apresentaram correlações negativas e positivas entre as duas variáveis de fogo, apesar de em alguns casos o valor não ser significativo.

Todas as temperaturas do ar apresentaram correlação negativa e significativa em relação aos focos de calor e área queimada no El Niño 2009/2010 (Figura 21). Dessa forma, os meses mais frios apresentaram maiores registros dessas duas variáveis de fogo. As correlações entre as temperaturas do ar e a precipitação também demonstraram que as variáveis se relacionam de forma proporcional, em que a queda de temperatura pode influenciar na diminuição das chuvas. Os níveis de precipitação e a ocorrência de focos e

área queimada foram inversamente proporcionais (-0,07 e -0,32), indicando a influência do aumento de chuvas e a diminuição do fogo.

Em 2009/2010, a correlação mais forte de área queimada se deu com evapotranspiração (ETo), atingindo o valor de -0,77. Isso indica que o fogo foi menor em meses em que a evapotranspiração foi mais elevada. A correlação entre Prec e ETo (0,55) indica que a segunda é mais elevada em meses que a precipitação é maior. Outra correlação significativa e forte foi entre área queimada (AQ) e água no solo (AS), -0,56, demonstrando que o ressecamento das camadas superficiais do solo na região influenciou no aumento de área queimada nesse período.

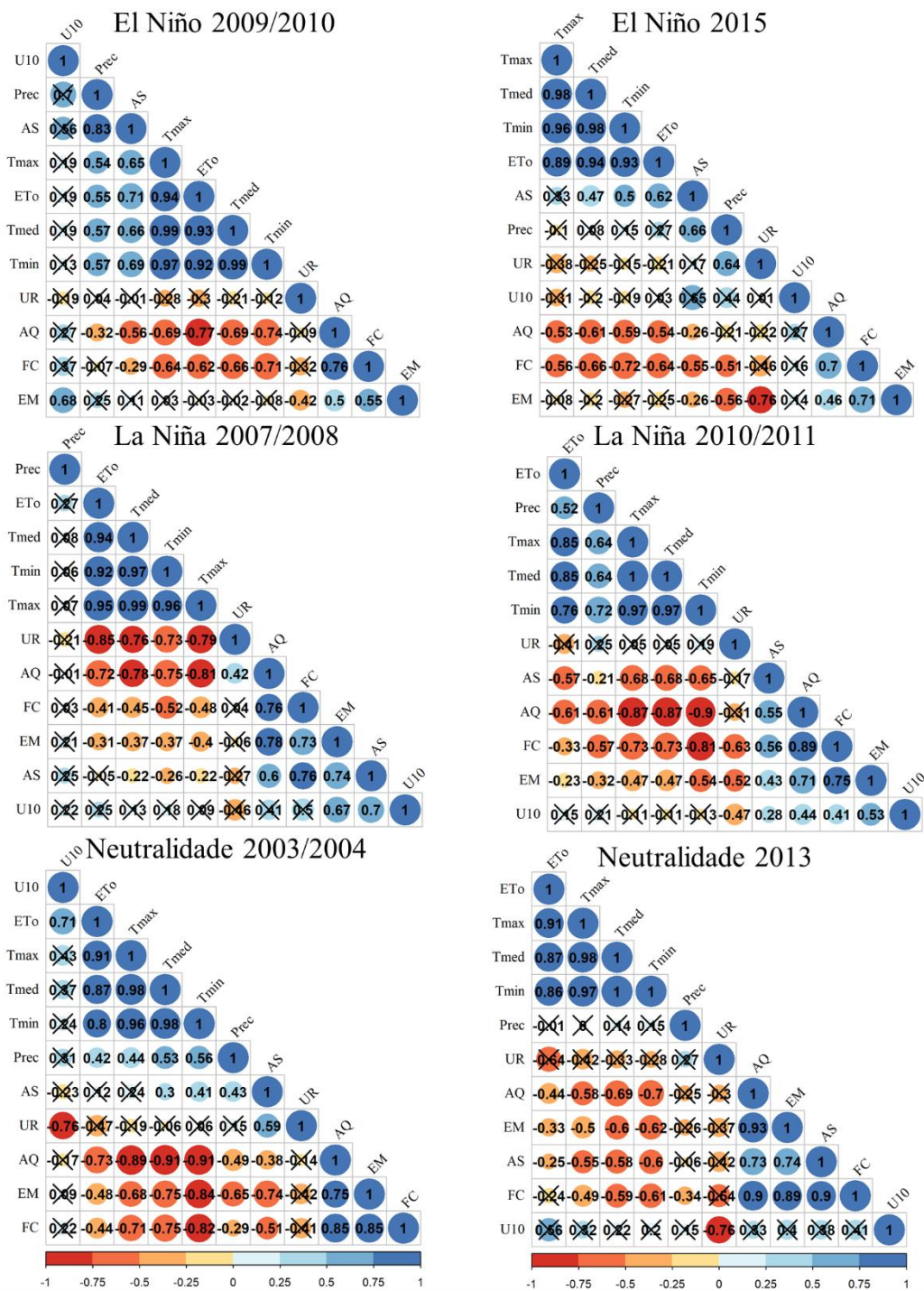
O El Niño 2015 apresentou comportamento semelhante das correlações observadas no evento de 2009/2010 (Figura 21). Novamente as correlações entre temperatura do ar e fogo foram negativas, sendo -0,72 a correlação mais forte observada dentre as variáveis, que ocorreu com os focos de calor e a temperatura mínima do ar. A precipitação, a água no solo e a umidade relativa do ar novamente apresentaram correlações inversamente proporcionais com os focos e área queimada. Para os focos de calor, a correlação com a precipitação foi de -0,51 e com a água no solo foi de -0,55 (Figura 21). O aumento do fogo foi proporcional ao aumento da velocidade do vento (correlação de 0,16 com os focos e 0,27 com a área queimada).

No período La Niña 2007/2008, a correlação entre focos de calor e precipitação foi muito baixa, próxima de zero (0,03). O mesmo ocorreu entre área queimada e precipitação, sendo a correlação de -0,01 (Figura 21). Os focos de calor e água no solo apresentaram correlação positiva de 0,76, pois essa variável ambiental apresentou aumento na média da Região Sul de abril a agosto de 2008. De forma semelhante, a correlação entre AQ e AS foi positiva na ordem de 0,6. As correlações de fogo e velocidade do vento foram mais fortes nesse ano do que nos dois anos de El Niño, sendo de 0,5 para focos de calor e 0,41 para área queimada.

No evento La Niña 2010/2011, a correlação entre focos de calor e precipitação foi de -0,57, enquanto que entre área queimada e a variável foi de -0,61 (Figura 21). Os focos de calor e a umidade relativa do ar (UR) também apresentaram valor significativo nesse período, uma correlação de -0,63. O valor indica que o aumento dos focos de calor acompanhou a diminuição da umidade relativa do ar ao longo do ano. Para a velocidade do vento, assim como no evento de 2007/2008, a La Niña 2010/2011 apresentou correlação significativa e positiva com as duas variáveis de fogo. Os valores foram de 0,41 para focos e velocidade do vento e de 0,44 para área queimada e velocidade do vento.

Na Neutralidade 2003/2004 os produtos de fogo e água no solo apresentaram correlações significativas e negativas. A correlação foi -0,51 entre focos de calor e a variável, enquanto que entre a área queimada e a variável foi de -0,38. A correlação entre o fogo e a umidade relativa do ar também foi negativa no evento. A correlação entre área queimada e precipitação foi de -0,49, enquanto que para focos de calor foi de -0,29. A velocidade do vento apresentou correlações positivas

Por fim, na Neutralidade 2013 a correlação dos focos de calor e precipitação foi novamente negativa (-0,34), assim como a da área queimada e precipitação (-0,25). As correlações dos produtos de fogo e da velocidade de vento foram novamente positivas, porém não significativas. Entre focos de calor e água no solo a correlação foi positiva (0,9) e também entre área queimada e água no solo (0,73).



AQ = Área Queimada; EM = Emissões; ETo = Evapotranspiração de Referência; FC = Focos de Calor; Prec = Precipitação; UR = Umidade Relativa do Ar; AS = Água no Solo; Tmax = Temperatura Máxima do Ar; Tmed = Temperatura Média do Ar; Tmin = Temperatura Mínima do Ar; U10 = Velocidade do Vento a 10 m de altura do solo

Figura 21. Correlação de Spearman entre variáveis meteorológicas e de fogo na Região Sul do Brasil em anos de El Niño, La Niña e Neutralidade. Obs: valores assinalados com um X não são estatisticamente significativos ao nível de 95% de confiança.

7 TESTE DE MANN KENDALL

No Paraná, as áreas colhidas de Cana de Açúcar e de Soja entre 1990 e 2018 apresentaram tendência positiva de acordo com o teste de Mann Kendall a 5% de significância (Figura 22). A Cana de Açúcar no estado obteve um vertiginoso crescimento de menos de 2 mil km² em 1990 para mais de 6 mil km² em 2018. Da mesma forma, a Soja passou de pouco mais de 20 mil km² em 1990 para mais de 50 mil km² em 2018.

A área colhida da cultura da Cana no Rio Grande do Sul e em Santa Catarina sofreu decréscimo no período avaliado, contudo sem apresentar tendência pelo teste de Mann Kendall a 5% de significância (Figura 22). A cultura do milho também foi muito reduzida nos dois estados, dando espaço para as áreas cultivadas com Soja, que apresentaram tendência de crescimento entre 1990 e 2018.

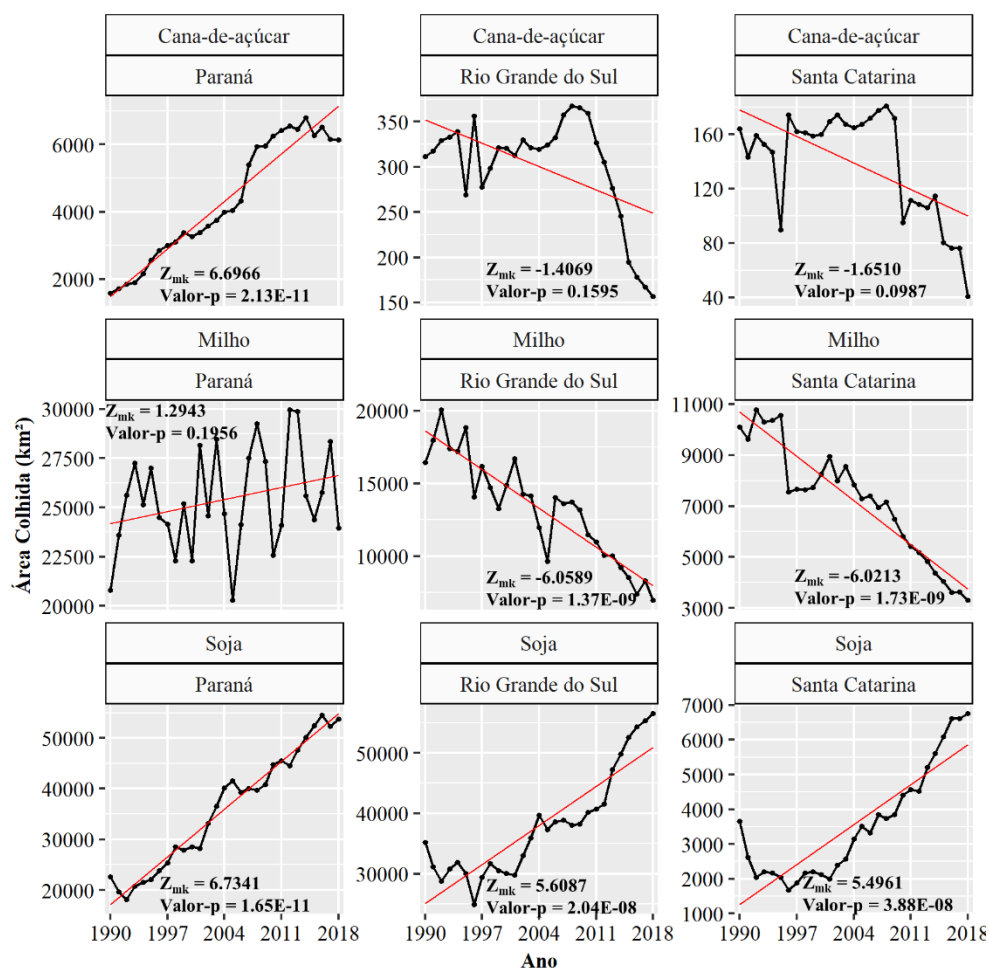


Figura 22. Teste de Mann Kendall da área colhida de Cana de Açúcar, Milho e Soja entre 1990 e 2018 nos estados da Região Sul do Brasil.

8 DISCUSSÃO

Conforme observado por Goodrick & Hanley (2009) no estado da Florida (Estados Unidos da América), o único modo de variabilidade atmosférico correlacionado à grandes

alterações no regime de incêndios da região em questão foi o ENOS. Os autores apontaram que, assim como no presente estudo, a área queimada por incêndios na Florida é maior na fase fria e menor na fase quente do fenômeno. Em anos de La Niña a precipitação na Região Sul é drasticamente reduzida em comparação aos anos de El Niño, o que facilita a ignição e propagação dos incêndios pelo ressecamento das coberturas vegetais. Os incêndios na América do Sul estão associados às fases do ENOS, mas a ignição está ligada também a uso do solo e atividades antrópicas como manejo de pastagens e de culturas agrícolas (FAO, 2007), além de características do terreno.

De acordo com metodologia adotada para o estado brasileiro do Espírito Santo por Eugenio et al. (2016), altitudes entre 0 m e 1200 m representam riscos extremo, muito alto e alto de fogo. O fato corrobora o menor número de focos encontrado em altitudes muito elevadas da Região Sul do Brasil. Além disso, para os autores citados, a face Norte de orientação de vertentes também representa risco extremo de fogo. A predominância de incêndios na face Norte foi observada no presente estudo e também apontada no estado brasileiro do Rio de Janeiro, em que cicatrizes de queima estavam principalmente nessa face de exposição (SANTOS et al., 2018). Também foi diagnosticado, com base em registros pretéritos, o maior risco de fogo na face Norte das vertentes de um parque nacional no estado brasileiro de Minas Gerais (TORRES et al., 2017).

Em relação à atmosfera e uso do solo, na Mata Atlântica no estado do Rio de Janeiro houve o aumento do número de focos de calor pela elevação da pressão atmosférica no continente e no Atlântico Sul, sendo que as maiores contagens estavam sempre em áreas cobertas por agricultura e pastagens (ANDRADE et al., 2019). Em estados da Amazônia Brasileira, o maior número e densidade de focos ocorre em áreas próximas de rodovias movimentadas e em coberturas vegetais com influência antrópica como pastagem e culturas agrícolas (BARBOSA et al., 2018; SILVA JÚNIOR et al., 2019).

Uma relevante modificação social na agropecuária subsidiada por programas do governo brasileiro ocorre desde a década de 1990: a troca do sistema de preparo do solo convencional pelo sistema de plantio direto na palha (EMBRAPA, 2019). O plantio direto é um sistema conservacionista em que não há o revolvimento do solo e o terreno se mantém coberto pela palhada do cultivo anterior (SALTON; HERNANI; FONTES, 1998). Nesse sistema de produção, a queima dos resíduos culturais é descartada, o que reduz a possibilidade do alastramento do fogo acidental. A área sob plantio direto na Região Sul do Brasil aumentou em cerca de 40% em 11 anos, indo de mais de 84 mil km² no ano de 2006 para mais de 118 mil km² em 2017 (IBGE, 2006; IBGE, 2017).

Porém, mesmo com o crescimento do plantio direto, o incremento contínuo da área colhida de culturas agrícolas temporárias, como a Cana-de-Açúcar no estado do Paraná, poderá representar aumento no número e extensão de incêndios. O fogo poderá ocorrer por condições climáticas apropriadas (La Niña), cobertura vegetal altamente inflamável e pela falta de prevenção e controle do fogo que se alastrará por propriedades.

Devido a fragmentação da paisagem, as florestas do Sul do Brasil estão em contato direto com áreas de agricultura – com culturas como Cana-de-açúcar – e pecuária. O fogo em florestas não ocorre somente devido ao desmatamento de grandes áreas, mas também pela falta de controle dos incêndios que ocorrem principalmente em pastagens (CANO-CRESPO et al., 2015). O fogo em florestas da Mata Atlântica em regeneração prejudica sua resiliência, biodiversidade e formação de biomassa (SANSEVERO et al., 2017). Com isso, o estoque de Carbono nas florestas é afetado pelo fogo. A emissão de Carbono é muito mais elevada em anos mais secos condicionados pelo ENOS em comparação a anos sem influência do fenômeno, sendo que essas emissões causam perdas econômicas principalmente por acelerarem as mudanças climáticas (DE MENDONÇA et al., 2004).

Com a maior queima de biomassa em anos de La Niña no Sul do país, as emissões de Carbono foram mais elevadas. Na Índia o pico de emissão entre 2005 e 2015 ocorreu no ano mais seco na região, sendo o ano com maior área de floresta queimada por incêndios (MANOJKUMAR; SRIMURUGANANDAM, 2019). A soma da área queimada de todos os tipos de florestas naturais (C, D, F e M) no Sul do Brasil foi 70% maior nos eventos de La Niña quando comparados eventos de El Niño. Dessa forma, foi observado também que a emissão de Carbono em La Niña foi 58% superior em relação ao emitido em El Niño.

Provocar incêndio no Brasil é crime de perigo comum previsto pelo código penal instituído em 1940, sendo que a pena aumenta em um terço se o incêndio for provocado em lavoura, pastagem, mata ou floresta. O uso do fogo em vegetação no Brasil é proibido desde 1965 pela lei federal 4.771, conquanto a legislação permitia o uso devidamente justificado em práticas agropastoris e florestais tomadas medidas de precaução. Em 1998 provocar incêndio em mata ou floresta se tornou crime ambiental no Brasil, com as sanções previstas na lei federal 9.605.

A lei de 1965 que proibia o uso do fogo em vegetação foi revogada pela lei federal 12.651 de 2012, porém as condições de proibição e possível uso foram mantidas, ainda com alguns acréscimos de exceções. De acordo com o a lei de 2012, os órgãos públicos ou privados deverão elaborar, atualizar e implantar planos para o combate aos incêndios florestais. Os resultados encontrados no presente estudo fornecem relevante informação para a elaboração de tais planos. A referida lei também prevê que a política deverá observar cenários de mudanças climáticas e potenciais aumentos de risco de ocorrência de incêndios florestais.

Por fim, é importante salientar que grande parte do fogo registrado no presente estudo ocorreu em vegetação de campos naturais (Estepe). Evidências históricas demonstram que o fogo periódico (juntamente com o pastoreio de grandes animais) é um elemento importante na manutenção da estrutura natural dos campos do Sul do Brasil (JESKE-PIERUSCHKA et al., 2010; FIDELIS; PIVELLO, 2011). Entretanto, apesar da importância do elemento, políticas de manejo em áreas de campos naturais da América do Sul limitam-se a prevenir e extinguir o fogo (BAHÍA; ZALBA, 2019).

Por meio do presente estudo, foi observado que o fogo é drasticamente reduzido em anos de El Niño na cobertura de Estepe, o que pode estar alterando o regime natural do bioma. A extinção do fogo nos campos do Sul do Brasil por alterações no clima ou ação direta do homem pode modificar a composição e estrutura da vegetação natural, fazendo com que esses ecossistemas sejam gradativamente substituídos por florestas tropicais e subtropicais (JESKE-PIERUSCHKA et al., 2013).

9 CONCLUSÃO

Evidências no trabalho indicam que o regime anual de incêndios na Região Sul do Brasil é afetado pela variabilidade atmosférica sazonal e também por alterações na circulação atmosférica impostas pelo fenômeno ENOS. Os registros de focos de calor e área queimada dos anos investigados demonstram que, na região, os eventos de La Niña apresentam maiores registros de incêndios quando comparados aos de El Niño.

A variação meteorológica sazonal, associada com a cobertura vegetal do solo, determina a ocorrência de incêndios na Região Sul do Brasil. Independente da fase do fenômeno ENOS, os incêndios ocorrem principalmente nos meses de transição entre o Inverno e Primavera. A flutuação anual do fogo na região está correlacionada,

principalmente, à redução da pluviosidade e da umidade relativa do ar em conjunto com a elevação da pressão atmosférica e o aumento da velocidade de vento.

A principal alteração na região dada pelo ENOS e que tem influência sob os incêndios é no total de chuva acumulada anualmente, que é menor na La Niña em relação aos de El Niño. Desse modo, os incêndios em anos da fase fria são mais frequentes e extensos do que em anos da fase quente, inclusive em florestas primárias úmidas da Mata Atlântica.

A porção Norte da área de estudo (Paraná) e a centro-Leste (Santa Catarina) são as principais regiões com densidade muito alta de incêndios ao longo do ano, sendo áreas prioritárias para prevenção e controle do fogo. As principais vegetações afetadas pelos focos e área queimada no Sul do Brasil são Agropecuária, Agricultura com Culturas Cíclicas e Estepe.

10 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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

ANDRADE, C. F.; DUARTE, J. B.; BARBOSA, M. L. F.; DE ANDRADE, M. D.; DE OLIVEIRA, R. O.; DELGADO, R. C.; PEREIRA, M. G.; BATISTA, T. S.; TEODORO, P. E. Fire outbreaks in extreme climate years in the State of Rio de Janeiro, Brazil. **Land Degradation and Development**, v. 30, n. 11, p. 1379–1389, 2019.

ARAGÓ, P.; JUAN, P.; DÍAZ-AVALOS, C.; SALVADOR, P. Spatial point process modeling applied to the assessment of risk factors associated with forest wildfires incidence in Castellón, Spain. **European Journal of Forest Research**, v. 135, n. 3, p. 451–464, 2016.

ARAÚJO, F. M. de; FERREIRA, L. G.; ARANTES, A. E. Distribution Patterns of Burned Areas in the Brazilian Biomes: An Analysis Based on Satellite Data for the 2002–2010 Period. **Remote Sensing**, v. 4, n. 7, p. 1929–1946, 2012.

ARMENTERAS-PASCUAL, D.; RETANA-ALUMBREROS, J.; MOLOWNY-HORAS, R.; ROMAN-CUESTA, R. M.; GONZALEZ-ALONSO, F.; MORALES-RIVAS, M. Characterising fire spatial pattern interactions with climate and vegetation in Colombia. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 151, n. 3, p. 279–289, 2011.

BAHÍA, R.; ZALBA, S. Changes in grassland bird communities and breeding success after a fire in the Argentinian Pampas. **Biodiversity and Conservation**, n. 0123456789, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s10531-019-01850-4>>.

BARBOSA, M. L. F.; COLL, R.; TEODORO, P. E.; PEREIRA, M. G.; CORREIA, T. P.; MENDONÇA, B. A. F. de; RODRIGUES, R. de Á. Occurrence of fire foci under different land uses in the State of Amazonas during the 2005 drought. **Environment, Development and Sustainability**, p. 1–14, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s10668-018-0157-4>>.

BEDIA, J.; HERRERA, S.; MANUEL, J.; BENALI, A.; BRANDS, S.; MOTA, B.; MANUEL, J. Agricultural and Forest Meteorology Global patterns in the sensitivity of burned area to fire-weather : Implications for climate change. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 214–215, p. 369–379, 2015. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.agrformet.2015.09.002>>.

BUSETTO, L.; RANGHETTI, L.; WASSER, L. **MODISstp: A Tool for Automating Download and Preprocessing of MODIS Land Products Data**, 2019. . Disponível em: <<https://cran.r-project.org/web/packages/MODISstp/index.html>>.

CANO-CRESPO, A.; OLIVEIRA, P. J. C.; BOIT, A.; CARDOSO, M.; THONICKE, K. Forest edge burning in the Brazilian Amazon promoted by escaping fires from managed pastures. **Journal of Geophysical Research: Biogeosciences**, v. 120, n. 10, p. 2095–2107, 2015.

CAÚLA, R. H.; DE OLIVEIRA-JÚNIOR, J. F.; DE GOIS, G.; DELGADO, R. C.; PIMENTEL, L. C. G.; TEODORO, P. E. Nonparametric Statistics Applied to Fire Foci Obtained by Meteorological Satellites and Their Relationship to the MCD12Q1 Product in the State of Rio de Janeiro, Southeast Brazil. **Land Degradation and Development**, v. 28, n. 3, p. 1056–1067, 2017.

CAÚLA, R. H.; OLIVEIRA-JÚNIOR, J. F.; LYRA, G. B.; DELGADO, R. C.; HEILBRON FILHO, P. F. L. Overview of fire foci causes and locations in Brazil based on meteorological satellite data from 1998 to 2011. **Environmental Earth Sciences**, v. 74, n. 2, p. 1497–1508, 2015.

CHEN, S.; ZHA, X. Effects of the ENSO on rainfall erosivity in the Fujian Province

of southeast China. **Science of the Total Environment**, v. 621, p. 1378–1388, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.10.090>>.

CHIODI, A. M.; HARRISON, D. E. Global seasonal precipitation anomalies robustly associated with El Niño and La Niña events - an OLR perspective. **Journal of Climate**, v. 28, n. 15, p. 6133–6159, 2015.

CLEMENTE, S. dos S.; OLIVEIRA JÚNIOR, J. F. de; LOUZADA, M. A. P. Focos de Calor na Mata Atlântica do Estado do Rio de Janeiro. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 32, n. December, p. 669–677, 2017.

COSTA, B. S. C.; FONSECA, E. L. The Use of Fire Radiative Power to Estimate the Biomass Consumption Coefficient for Temperate Grasslands in the Atlantic Forest Biome. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 32, n. 2, p. 255–260, 2017. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0102-77862017000200255&lng=en&tlng=en>.

CPTEC/INPE - CENTRO DE PREVISÃO DE TEMPO E ESTUDOS CLIMÁTICOS/INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS. **El Niño e La Niña**. Disponível em: <<http://enos.cptec.inpe.br>>. Acesso em: 19 mar. 2018.

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 MENDONÇA, M. J. C.; VERA DIAZ, M. D. C.; NEPSTAD, D.; SEROA DA MOTTA, R.; ALENCAR, A.; GOMES, J. C.; ORTIZ, R. A. The economic cost of the use of fire in the Amazon. **Ecological Economics**, v. 49, n. 1, p. 89–105, 2004.

EMBRAPA - EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Sumula da X reunião técnica de levantamento de solos. **SNLCS. Série Miscelânea**, n. 1, p. 83, 1979.

EMBRAPA - EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Sistema de Plantio Direto de milho**. Disponível em: <https://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/milho/arvore/CONTAG01_72_59200523355.html>. Acesso em: 11 out. 2019.

EUGENIO, F. C.; DOS SANTOS, A. R.; FIEDLER, N. C.; RIBEIRO, G. A.; DA SILVA, A. G.; DOS SANTOS, Á. B.; PANETO, G. G.; SCHETTINO, V. R. Applying GIS to develop a model for forest fire risk: A case study in Espírito Santo, Brazil. **Journal of Environmental Management**, v. 173, p. 65–71, 2016.

FAO - FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION. **FAO Irrigation and Drainage Paper: No. 56**. [s.l: s.n.]

FAO - FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION. **Fire Management and Global Assessment**Roma, 2007. .

FIDELIS, A.; PIVELLO, V. Deve-se usar o fogo como instrumento de manejo no Cerrado e Campos Sulinos? **Biodiversidade Brasileira**, v. 1, n. 2, p. 12–25, 2011. Disponível em: <<http://www.icmbio.gov.br/revistaeletronica/index.php/BioBR/article/view/102>>.

FIGUEIREDO, G. K. D. A.; BRUNSELL, N. A.; HIGA, B. H.; ROCHA, J. V.; LAMPARELLI, R. A. C. Correlation maps to assess soybean yield from EVI data in Paraná State, Brazil. **Scientia Agricola**, v. 73, n. 5, p. 462–470, 2016. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0103-90162016000500462&lng=en&tlng=en>.

FONSECA, M. G.; ANDERSON, L. O.; ARAI, E.; SHIMABUKURO, Y. E.; XAUD, H. A. M.; XAUD, M. R.; MADANI, N.; WAGNER, F. H.; ARAGÃO, L. E. O. C. Climatic and Anthropogenic drivers of northern Amazon fires during the 2015/2016 El Niño event. **Ecological Applications**, v. 12, n. 10, p. 3218–3221, 2017.

FONTANA, D. C.; JUNGES, A. H.; BREMM, C.; SCHAPARINI, L. P.; MENGUE, V. P.; PAULA, A.; WAGNER, L.; CARVALHO, P. NDVI and meteorological data as indicators of the Pampa biome natural grasslands growth. **Bragantia**, p. 1–11, 2018.

GELCER, E.; FRAISSE, C. W.; ZOTARELLI, L.; STEVENS, F. R.; PERONDI, D.; BARRETO, D. D.; MALIA, H. A.; ECOLE, C. C.; MONTONE, V.; SOUTHWORTH, J. Influence of El Niño-Southern oscillation (ENSO) on agroclimatic zoning for tomato in Mozambique. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 248, p. 316–328, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2017.10.002>>.

GGWEATHER - GOLDEN GATE WEATHER SERVICES. **El Niño and La Niña Years and Intensities**. Disponível em: <<https://ggweather.com/enso/oni.htm>>. Acesso em: 10 maio. 2019.

GIGLIO, L. **MODIS Collection 6 Active Fire Product User's Guide Revision A**, 2015. .

GIGLIO, L.; BOSCHETTI, L.; ROY, D.; HOFFMAN, A. A.; HUMBER, M. **Collection 6 MODIS Burned Area product User Guide**, 2016. .

GIGLIO, L.; RANDERSON, J. T.; VAN DER WERF, G. R.; ANDELA, N. **Global Fire Emissions Database**. Disponível em: <<https://www.globalfiredata.org/index.html>>. Acesso em: 3 mar. 2019.

GOODRICK, S. L.; HANLEY, D. E. Florida wildfire activity and atmospheric teleconnections. **International Journal of Wildland Fire**, v. 18, n. 4, p. 476, 2009.

GRIMM, A. M.; BARROS, V. R.; DOYLE, M. E. Climate Variability in Southern South America Associated with El Niño and La Niña Events. **Journal of Climate**, v. 13, n. 1, p. 35–58, 2000. Disponível em: <<http://journals.ametsoc.org/doi/abs/10.1175/1520-0442%282000%29013%3C0035%3ACVISSA%3E2.0.CO%3B2>>.

HIJMANS, R. J.; ET TEN, J. Van. **Raster: Geographic Data Analysis and Modeling**, 2019. . Disponível em: <<https://cran.r-project.org/web/packages/raster/index.html>>.

HOLSINGER, L.; PARKS, S. A.; MILLER, C. Weather, fuels, and topography impede wildland fire spread in western US landscapes. **Forest Ecology and Management**, v. 380, p. 59–69, 2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.foreco.2016.08.035>>.

HOTT, M. C.; DE CARVALHO, L. M. T.; ANTUNES, M. A. H.; DOS SANTOS, P. A.; ARANTES, T. B.; DE RESENDE, J. C.; DA ROCHA, W. S. D. Vegetative growth of grasslands based on hyper-temporal NDVI data from the Modis sensor. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 51, n. 7, p. 858–868, 2016.

IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Censo Agropecuário 2006: Brasil, Grandes Regiões e Unidades da Federação** IBGE, 2006. . Disponível em: <http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/economia/agropecuaria/censoagro/agri_familiar_2006_2/default.shtm>.

IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Mapeamento de recursos naturais do Brasil escala 1:250.000: Documentação Técnica Geral** Rio de Janeiro, 2018. .

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Mapa de Vegetação do Brasil**. Disponível em: <ftp://geofp.ibge.gov.br/informacoes_ambientais/vegetacao/mapas/brasil/vegetacao.pdf>. Acesso em: 24 abr. 2018a.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Mapa de Biomas e de Vegetação**. Disponível em: <<https://ww2.ibge.gov.br/home/presidencia/noticias/21052004biomashtml.shtm>>.

Acesso em: 25 jul. 2019b.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Manual Técnico da Vegetação Brasileira**. 2. ed. [s.l: s.n.]

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Censo Agropecuário 2017: Resultados Preliminares** IBGE, 2017. .

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Tabela 5457 - Área plantada ou destinada à colheita, área colhida, quantidade produzida, rendimento médio e valor da produção das lavouras temporárias e permanentes**. Disponível em: <<https://sidra.ibge.gov.br/tabela/5457#resultado>>. Acesso em: 5 out. 2019a.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Vegetação Brasileira 1:5.000.000**. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/geociencias/cartas-e-mapas/informacoes-ambientais/10872-vegetacao.html?=&t=downloads>>. Acesso em: 5 abr. 2019b.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Produção Agrícola Municipal**. Disponível em: <<https://sidra.ibge.gov.br/tabela/5457>>. Acesso em: 11 out. 2019c.

INPE - INSTITUTO BRASILEIRO DE PESQUISAS ESPACIAIS. **Banco de Dados de Queimadas**. Disponível em: <<http://www.inpe.br/queimadas/bdqueimadas/>>. Acesso em: 25 mar. 2019.

JESKE-PIERUSCHKA, V.; FIDELIS, A.; BERGAMIN, R. S.; VÉLEZ, E.; BEHLING, H. Araucaria forest dynamics in relation to fire frequency in southern Brazil based on fossil and modern pollen data. **Review of Palaeobotany and Palynology**, v. 160, n. 1–2, p. 53–65, 2010. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.revpalbo.2010.01.005>>.

JESKE-PIERUSCHKA, V.; PILLAR, V. D.; DE OLIVEIRA, M. A. T.; BEHLING, H. New insights into vegetation, climate and fire history of southern Brazil revealed by a 40,000 year environmental record from the State Park Serra do Tabuleiro. **Vegetation History and Archaeobotany**, v. 22, n. 4, p. 299–314, 2013.

JIMÉNEZ-MUÑOZ, J. C.; MATTAR, C.; BARICHIVICH, J.; SANTAMARÍA-, A. Record-breaking warming and extreme drought in the Amazon rainforest during the course of El Niño 2015 – 2016. **Nature Scientific Reports**, p. 1–7, 2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1038/srep33130>>.

KOCHI, I.; DONOVAN, G. H.; CHAMP, P. A.; LOOMIS, J. B. The economic cost of adverse health effects from wildfire-smoke exposure: a review. **International Journal of Wildland Fire**, v. 19, n. 7, p. 803–817, 2010.

KÖPPEN, W. Das geographische System der Klimate. **Handbuch der Klimatologie**, p. 7–30, 1936.

KOUSKY, V. E.; KAGANO, M. T.; CAVALCANTI, I. F. A. A review of the Southern Oscillation: oceanic-atmospheric circulation changes and related rainfall anomalies. **Tellus**, v. 36A, n. 5, p. 490–504, 1984.

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**, v. 198, n. August, p. 173–184, 2017. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.atmosres.2017.08.013>>.

LEUCHTENBERGER, C.; DE OLIVEIRA, Ê. S.; CARIOLATTO, L. P.; KASPER, C. B. Activity pattern of medium and large sized mammals and density estimates of *Cuniculus paca* (Rodentia: Cuniculidae) in the Brazilian Pampa. **Brazilian Journal of Biology**, v. 6984, p. 1–9, 2018. Disponível em:

<http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1519-69842018005006101&lng=en&tlng=en>.

MANOJKUMAR, N.; SRIMURUGANANDAM, B. Assessment of gaseous emissions and radiative forcing in Indian forest fires. **International Journal of Environmental Studies**, v. 76, n. 4, p. 541–557, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1080/00207233.2019.1596387>>.

MATZENAUER, R.; VIANA, D. R.; BUENO, A. C.; MALUF, J. R. T.; CARPENEDO, C. B. O fenômeno ENOS e o regime de chuvas no Rio Grande do Sul. **Agrometeoros**, v. 25, p. 323–331, 2017. Disponível em: <<http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/cbdv.200490137/abstract>>.

MCLEOD, A. I. **Kendall: Kendall rank correlation and Mann-Kendall trend test**, 2011. Disponível em: <<https://cran.r-project.org/web/packages/Kendall/index.html>>.

MIRANDA, C. de S.; PARANHO FILHO, A. C.; POTT, A. Changes in vegetation cover of the Pantanal wetland detected by vegetation index: a strategy for conservation. **Biota Neotropica**, v. 18, n. 1, p. 1–6, 2018. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1676-06032018000100202&lng=en&tlng=en>.

MITCHELL, M. G. E.; SUAREZ-CASTRO, A. F.; MARTINEZ-HARMS, M.; MARON, M.; MCALPINE, C.; GASTON, K. J.; JOHANSEN, K.; RHODES, J. R. Reframing landscape fragmentation's effects on ecosystem services. **Trends in Ecology and Evolution**, v. 30, n. 4, p. 190–198, 2015.

MMA - MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. **Folder Pampa - Conhecimentos e Descobertas frente e verso**. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/biomas/pampa>>. Acesso em: 10 ago. 2018.

MORAIS, Y. C. B.; ARAÚJO, M. S. B.; MOURA, M. S. B.; GALVÍNIO, J. D.; MIRANDA, R. Q. Análise do Sequestro de Carbono em áreas de Caatinga do Semiárido Pernambucano. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 32, n. 4, p. 585–599, 2017.

MORENO RUIZ, J. A.; GARCÍA LÁZARO, J. R.; DEL ÁGUILA CANO, I.; 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 Sensing**, v. 6, n. 1, p. 815–840, 2013.

MUKAKA, M. M. Statistics corner: A guide to appropriate use of correlation coefficient in medical research. **Malawi Medical Journal**, v. 24, n. 3, p. 69–71, 2012.

NADPOROZHSKAYA, M. A.; CHERTOV, O. G.; BYKHOVETS, S. S.; SHAW, C. H.; MAKSIMOVA, E. Y.; ABAKUMOV, E. V. Recurring surface fires cause soil degradation of forest land: A simulation experiment with the EFIMOD model. **Land Degradation & Development**, p. 1–11, 2018. Disponível em: <<http://doi.wiley.com/10.1002/ldr.3021>>.

NASA - NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION. **MODIS - Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer: about**. Disponível em: <<https://modis.gsfc.nasa.gov/about/>>. Acesso em: 23 abr. 2018.

NASA - NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION. **Earth Data**.

NERY, J. T.; CARFAN, A. C. Re-analysis of pluvial precipitation in southern Brazil. **Atmosfera**, v. 27, n. 2, p. 103–115, 2014. Disponível em: <[http://dx.doi.org/10.1016/S0187-6236\(14\)71104-X](http://dx.doi.org/10.1016/S0187-6236(14)71104-X)>.

NOAA - NATIONAL OCEANIC AND ATMOSPHERIC ADMINISTRATION. **Frequent asked questions about El Niño and La Niña**. Disponível em: <http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ensofaq.shtml#>

general>. Acesso em: 12 jul. 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>>. Acesso em: 13 jul. 2018.

OKUMURA, Y. M.; DINEZIO, P.; DESER, C. Evolving Impacts of Multiyear La Niña Events on Atmospheric Circulation and U.S. Drought. **Geophysical Research Letters**, v. 44, n. 22, p. 11,614-11,623, 2017.

OVERBECK, G. E.; VÉLEZ-MARTIN, E.; SCARANO, F. R.; LEWINSOHN, T. M.; FONSECA, C. R.; MEYER, S. T.; MÜLLER, S. C.; CEOTTO, P.; DADALT, L.; DURIGAN, G.; GANADE, G.; GOSSNER, M. M.; GUADAGNIN, D. L.; LORENZEN, K.; JACOBI, C. M.; WEISSER, W. W.; PILLAR, V. D. Conservation in Brazil needs to include non-forest ecosystems. **Diversity and Distributions**, v. 21, n. 12, p. 1455–1460, 2015.

PADILLA, M.; STEHMAN, S. V.; RAMO, R.; CORTI, D.; HANTSON, S.; OLIVA, P.; ALONSO-CANAS, I.; BRADLEY, A. V.; TANSEY, K.; MOTA, B.; PEREIRA, J. M.; CHUVIECO, E. Comparing the accuracies of remote sensing global burned area products using stratified random sampling and estimation. **Remote Sensing of Environment**, v. 160, p. 114–121, 2015. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2015.01.005>>.

PARISIEN, M.-A. A.; MORITZ, M. A. Environmental controls on the distribution of wildfire at multiple spatial scales. **Ecological Monographs**, v. 79, n. 1, p. 127–154, 2009. Disponível em: <<http://www.esajournals.org/doi/abs/10.1890/07-1289.1>>.

PAULA, G. M.; STRECK, N. A.; LANGNER, J. A.; BARBOSA, D. C.; HELDWEIN, A. B.; FERRAZ, S. E. T.; BURIOL, G. Série histórica secular de brilho solar e suas relações com os modos de variabilidade ENOS e ODP em Santa Maria-RS. **Engenharia Agrícola**, v. 35, n. 3, p. 494–505, 2015. Disponível em: <<https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84940883202&doi=10.1590%2F1809-4430-Eng.Agríc.v35n3p494-505%2F2015&partnerID=40&md5=178a82eadf938a80db35b88325baadd6>>.

PENALBA, O. C.; RIVERA, J. A. Precipitation response to El Niño/La Niña events in Southern South America - Emphasis in regional drought occurrences. **Advances in Geosciences**, v. 42, n. 2005, p. 1–14, 2016.

PIERCE, D. **Ncdf home page: A netcdf package for R**, 2013. . Disponível em: <<http://cirrus.ucsd.edu/~pierce/netcdf/>>.

R CORE TEAM. **A language and environment for statistical computing** Vienna, 2018. . Disponível em: <<https://www.r-project.org/>>.

RAMPELOTTO, P. H.; RIGOZO, N. R.; DA ROSA, M. B.; PRESTES, A.; FRIGO, E.; SOUZA ECHER, M. P.; NORDEMANN, D. J. R. Variability of rainfall and temperature (1912-2008) parameters measured from Santa Maria (29°41'S, 53°48'W) and their connections with ENSO and solar activity. **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, v. 77, p. 152–160, 2012. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jastp.2011.12.012>>.

RIBEIRO, M. C.; METZGER, J. P.; MARTENSEN, A. C.; PONZONI, F. J.; HIROTA, M. M. The Brazilian Atlantic Forest: How much is left, and how is the remaining forest distributed? Implications for conservation. **Biological Conservation**, v. 142, n. 6, p. 1141–1153, 2009. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.biocon.2009.02.021>>.

RUFFAULT, J.; MORON, V.; TRIGO, R. M.; CURT, T. Daily synoptic conditions associated with large fire occurrence in Mediterranean France: evidence for a wind-driven

- fire regime. **International Journal of Climatology**, v. 37, n. 1, p. 524–533, 2016.
- SALTON, J. C.; HERNANI, L. C.; FONTES, C. Z. **Sistema Plantio Direto**. Brasília: EMBRAPA, 1998.
- SANSEVERO, J. B. B.; PRIETO, P. V.; SÁNCHEZ-TAPIA, A.; BRAGA, J. M. A.; RODRIGUES, P. J. F. P. Past land-use and ecological resilience in a lowland Brazilian Atlantic Forest: implications for passive restoration. **New Forests**, v. 48, n. 5, p. 573–586, 2017.
- SANTOS, C. A. C. dos; MELO, M. M. M. S.; BRITO, J. I. B. de. Tendências de Índices de Extremos Climáticos para o Estado do Amazonas e suas Relações com a TSM dos Oceanos Tropicais Trends in Climate Extremes Indices for the State of Amazonas and its Relationship with SST of Tropical Oceans. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 31, n. 1, p. 1–10, 2016.
- SANTOS, J. F. C. dos; GLERIANI, J. M.; VELLOSO, S. G. S.; DE SOUZA, G. S. A.; DO AMARAL, C. H.; TORRES, F. T. P.; MEDEIROS, N. D. G.; DOS REIS, M. Wildfires as a major challenge for natural regeneration in Atlantic Forest. **Science of The Total Environment**, 5 set. 2018. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S004896971833434X?via%3Dihub>>. Acesso em: 7 set. 2018.
- SILVA JÚNIOR, L. A. S. da; DELGADO, R. C.; PEREIRA, M. G.; TEODORO, P. E.; SILVA JUNIOR, C. A. da. Fire dynamics in extreme climatic events in western amazon. **Environmental Development**, n. December 2018, p. 1–12, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.envdev.2019.06.005>>.
- SILVERMAN, B. W. **Density estimation for statistics and data analysis**. [s.l.: s.n.]v. 37
- TASKER, K. A.; ARIMA, E. Y. Fire regimes in Amazonia: The relative roles of policy and precipitation. **Anthropocene**, v. 14, p. 46–57, 2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.ancene.2016.06.001>>.
- TERASSI, P. M. de B.; OLIVEIRA-JÚNIOR, J. F. De; GÓIS, G. De; GALVANI, E. Variabilidade do Índice de Precipitação Padronizada na Região Norte do Estado do Paraná Associada aos Eventos de El Niño-Oscilação Sul Standardized Precipitation Index Variability in the Northern Region of Paraná State Associated with the El Niño - Southe. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 33, p. 11–25, 2018.
- TORRES, F. T. P.; SIQUEIRA, R. G.; MOREIRA, G. F.; LIMA, G. S.; MARTINS, S. V.; VALVERDE, S. R. Risk mapping of fires in vegetation in the Serra do Brigadeiro State Park (MG) and surroundings. **Revista Árvore**, v. 41, n. 4, p. 1–9, 2017.
- USGS - UNITED STATES GEOLOGICAL SERVICE. **Earth Explorer - Home**. Disponível em: <<https://earthexplorer.usgs.gov/?>>. Acesso em: 10 jun. 2019.
- UT - THE UNIVERSITY OF TEXAS AT AUSTIN. **BrazilMetData_1980-2013**. Disponível em: <<https://utexas.app.box.com/v/Xavier-et-al-IJOC-DATA?page=1>>. Acesso em: 22 set. 2018.
- VAN DER WERF, G. R.; RANDERSON, J. T.; GIGLIO, L.; VAN LEEUWEN, T. T.; CHEN, Y.; ROGERS, B. M.; MU, M.; VAN MARLE, M. J. E.; MORTON, D. C.; COLLATZ, G. J.; YOKELSON, R. J.; KASIBHATLA, P. S. Global fire emissions estimates during 1997-2016. **Earth System Science Data Discussions**, v. 9, p. 697–720, 2017.
- WAHIDUZZAMAN, M.; OLIVER, E. C. J.; WOTHERSPOON, S. J.; HOLBROOK, N. J. A climatological model of North Indian Ocean tropical cyclone genesis, tracks and landfall. **Climate Dynamics**, v. 49, n. 7–8, p. 2585–2603, 2017.
- WEI, T.; SIMKO, V. **corrplot: Visualization of a Correlation Matrix**, 2017. . Disponível em: <<https://cran.r-project.org/web/packages/corrplot/index.html>>.

WICKHAM, H. **ggplot2: Create Elegant Data Visualisations Using the Grammar of Graphics**, 2016. Disponível em: <<https://cran.r-project.org/web/packages/ggplot2/index.html>>.

XAUD, H. A. M.; MARTINS, F. da S. R. V.; DOS SANTOS, J. R. Tropical forest degradation by mega-fires in the northern Brazilian Amazon. **Forest Ecology and Management**, v. 294, p. 97–106, 2013.

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.

ZHANG, Z.; FENG, Z.; ZHANG, H.; ZHAO, J.; YU, S.; DU, W. Spatial distribution of grassland fires at the regional scale based on the MODIS active fire products. **International Journal of Wildland Fire**, v. 26, n. 3, p. 209–218, 2017.