



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA, INOVAÇÕES E COMUNICAÇÕES
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

sid.inpe.br/mtc-m21c/2018/07.16.18.37-TDI

**DESENVOLVIMENTO E IMPLEMENTAÇÃO DO CICLO
DIURNO DA QUEIMA DE BIOMASSA NO
PREP-CHEM-SRC: ANÁLISE DOS INVENTÁRIOS DE
EMISSÕES DE AEROSSÓIS NA AMÉRICA DO SUL**

Paula Resende Santos

Dissertação de Mestrado do
Curso de Pós-Graduação em
Sensoriamento Remoto, orientada
pelos Drs. Elisabete Caria Moraes,
e Gabriel Pereira, aprovada em 26
de julho de 2018.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34R/3RFAUM8>>

INPE
São José dos Campos
2018

PUBLICADO POR:

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE

Gabinete do Diretor (GBDIR)

Serviço de Informação e Documentação (SESID)

CEP 12.227-010

São José dos Campos - SP - Brasil

Tel.:(012) 3208-6923/7348

E-mail: pubtc@inpe.br

**COMISSÃO DO CONSELHO DE EDITORAÇÃO E PRESERVAÇÃO
DA PRODUÇÃO INTELECTUAL DO INPE (DE/DIR-544):****Presidente:**

Dr. Marley Cavalcante de Lima Moscati - Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CGCPT)

Membros:

Dra. Carina Barros Mello - Coordenação de Laboratórios Associados (COCTE)

Dr. Alisson Dal Lago - Coordenação-Geral de Ciências Espaciais e Atmosféricas (CGCEA)

Dr. Evandro Albiach Branco - Centro de Ciência do Sistema Terrestre (COCST)

Dr. Evandro Marconi Rocco - Coordenação-Geral de Engenharia e Tecnologia Espacial (CGETE)

Dr. Hermann Johann Heinrich Kux - Coordenação-Geral de Observação da Terra (CGOBT)

Dra. Ieda Del Arco Sanches - Conselho de Pós-Graduação - (CPG)

Silvia Castro Marcelino - Serviço de Informação e Documentação (SESID)

BIBLIOTECA DIGITAL:

Dr. Gerald Jean Francis Banon

Clayton Martins Pereira - Serviço de Informação e Documentação (SESID)

REVISÃO E NORMALIZAÇÃO DOCUMENTÁRIA:

Simone Angélica Del Ducca Barbedo - Serviço de Informação e Documentação (SESID)

André Luis Dias Fernandes - Serviço de Informação e Documentação (SESID)

EDITORAÇÃO ELETRÔNICA:

Marcelo de Castro Pazos - Serviço de Informação e Documentação (SESID)

Murilo Luiz Silva Gino - Serviço de Informação e Documentação (SESID)



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA, INOVAÇÕES E COMUNICAÇÕES
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

sid.inpe.br/mtc-m21c/2018/07.16.18.37-TDI

**DESENVOLVIMENTO E IMPLEMENTAÇÃO DO CICLO
DIURNO DA QUEIMA DE BIOMASSA NO
PREP-CHEM-SRC: ANÁLISE DOS INVENTÁRIOS DE
EMISSIONES DE AEROSSÓIS NA AMÉRICA DO SUL**

Paula Resende Santos

Dissertação de Mestrado do
Curso de Pós-Graduação em
Sensoriamento Remoto, orientada
pelos Drs. Elisabete Caria Moraes,
e Gabriel Pereira, aprovada em 26
de julho de 2018.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34R/3RFAUM8>>

INPE
São José dos Campos
2018

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Santos, Paula Resende.

Sa59d Desenvolvimento e implementação do ciclo diurno da queima de biomassa no PREP-CHEM-SRC: Análise dos inventários de emissões de aerossóis na América do Sul / Paula Resende Santos. – São José dos Campos : INPE, 2018.
xxii + 72 p. ; (sid.inpe.br/mtc-m21c/2018/07.16.18.37-TDI)

Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2018.
Orientadores : Drs. Elisabete Caria Moraes, e Gabriel Pereira.

1. Queimadas. 2. Emissões. 3. 3BEM-FRP. I.Título.

CDU 504.7:630*43(8)



Esta obra foi licenciada sob uma Licença [Creative Commons Atribuição-NãoComercial 3.0 Não Adaptada](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/).

This work is licensed under a [Creative Commons Attribution-NonCommercial 3.0 Unported License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/).

Aluno (a): **Paula Resende Santos**

Título: "DESENVOLVIMENTO E IMPLEMENTAÇÃO DO CICLO DIURNO DA QUEIMA DE BIOMASSA NO PREP-CHEM-SRC: ANÁLISE DOS INVENTÁRIOS DE EMISSÕES DE AEROSSÓIS NA AMÉRICA DO SUL"

Aprovado (a) pela Banca Examinadora
em cumprimento ao requisito exigido para
obtenção do Título de **Mestre** em
Sensoriamento Remoto

Dr. Yosio Edemir Shimabukuro


Presidente / INPE / São José dos Campos - SP

() Participação por Vídeo - Conferência

Aprovado () Reprovado

Dra. Elisabete Caria Moraes


Orientador(a) / INPE / São José dos Campos - SP

() Participação por Vídeo - Conferência

Aprovado () Reprovado

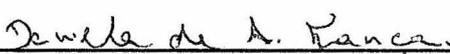
Dr. Gabriel Pereira


Orientador(a) / UFSJ / São João Del Rei - MG

() Participação por Vídeo - Conferência

Aprovado () Reprovado

Dra. Daniela de Azeredo França


Membro da Banca / CPTEC / São José dos Campos - SP

() Participação por Vídeo - Conferência

Aprovado () Reprovado

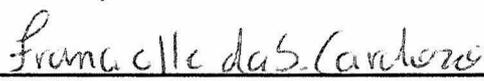
Dra. Fernanda Batista Silva


Membro da Banca / CPTEC / São José dos Campos - SP

() Participação por Vídeo - Conferência

Aprovado () Reprovado

Dra. Francielle da Silva Cardozo


Convidado(a) / UFSJ / São João Del Rei - MG

() Participação por Vídeo - Conferência

Aprovado () Reprovado

Este trabalho foi aprovado por:

() maioria simples

unanimidade

“A verdadeira viagem de descobrimento não consiste em procurar novas paisagens, mas em ter novos olhos”

Marcel Proust

Aos meus pais, Lúcio e Silvânia.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente gostaria de agradecer aos meus pais pelo apoio incondicional durante toda a minha vida e por serem os maiores incentivadores dos meus sonhos. Ao João pelo companheirismo e carinho que tornaram essa caminhada mais leve.

Agradeço também a Dra. Elisabete Caria Moraes e Dr. Gabriel Pereira pela confiança depositada em mim e pela paciência, dedicação e pelos ensinamentos dispensados a mim nesses dois anos e por serem, acima de tudo, grandes amigos.

À Dra. Francielle por me encorajar quando tudo parecia dar errado e pelos melhores conselhos. À Dra. Fernanda e a Dra. Daniela por não medir esforços para a materialização desse trabalho e pela disponibilidade de me ajudar com as dúvidas.

Aos colegas de turma do INPE pela companhia diária. À Natalia e a Priscila por compartilharem comigo tantos momentos bons nesses dois anos e a amizade que sempre levarei comigo. Aos amigos do LARAD, Bruno e Guilherme pelo incentivo e paciência.

Aos amigos de São João del-Rei e Entre Rios que sempre estiveram ao meu lado e que mesmo longe me fazem companhia, eu agradeço de coração!

Por fim, agradeço a todos que de alguma maneira contribuíram para a conclusão deste trabalho e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela concessão da bolsa de mestrado por meio do processo 131240/2016-1.

RESUMO

A fumaça emitida pela queima de biomassa é composta de uma ampla variedade de partículas e espécies de gases traços que influenciam a qualidade do ar e o clima. No Globo, estima-se que aproximadamente 350 milhões de hectares são queimados anualmente e que as emissões de Dióxido de Carbono (CO₂) resultantes deste processo são equivalentes a aproximadamente 10% das emissões provenientes de combustíveis fósseis. Neste contexto, esse trabalho tem como objetivo principal desenvolver uma metodologia acoplada ao modelo 3BEM_FRP que utiliza informações do tempo de duração das queimadas para diferentes tipos de uso e cobertura da terra para biomas da América do Sul com a finalidade de fornecer informações para a estimativa da FRE quando houver ausência de dados de FRP. O ciclo diurno das queimadas foi estimado utilizando a série temporal do produto *Wildfire Automated Biomass Burning Algorithm* (WFABBA) de 1997 a 2015 para os usos e cobertura do produto MCD12Q1 para cada bioma da América do Sul. Ainda, as estimativas de material particulado com diâmetro menor que 2,5µm (PM2.5) foram geradas no *Brazilian Biomass Burning Emission Model with fire radiative power (FRP) assimilation* (3BEM_FRP) acrescido do ciclo (C3BEM_FRP) para a América do Sul de 2003-2015 e comparadas com os inventários globais *Global Fire Assimilation System* (GFAS), *Quick Fire Emissions Dataset* (QFED), *Global Fire Emissions Database* (GFED) e *Fire Inventory from NCAR* (FINN). Em geral, o tempo médio de duração das queimadas para cada classe de uso de cobertura da terra do *International Geosphere-Biosphere Programme* (IGBP) varia de acordo com o bioma no qual está inserida, ou seja, cerca de 61% das queimadas na América do Sul duram em média entre 6 e 7 horas, enquanto que 17% duram em média entre 7 e 8 horas, 12% duram menos que 5 horas e aproximadamente 9% das queimadas duram mais que 9 horas. O C3BEM_FRP aumenta os valores de emissão de PM2.5 do C3BEM_FRP no cerrado em relação aos inventários baseados na contagem de focos de calor e área queimada (3BEM e FINN), resultando em uma melhor concordância com o que foi observado no experimento SAMBBA. Além disso, o C3BEM_FRP apresenta uma correlação de 0,86 com o GFAS o que indica que inventários que utilizam a mesma metodologia tendem a concordar espacialmente. O QFED é o único inventário que utiliza estimativas de FRP e aerossóis para obter as emissões oriundas da queima de biomassa e apresentou a menor correlação com o C3BEM_FRP ($r=0,58$). Porém, a comparação espacial do QFEDxC3BEM_FRP, indica, em muitos casos, uma variação das emissões entre *pixels* vizinhos, indicando que o QFED tende a compensar a ausência de informações a partir da distribuição do total emitido entre os dados detectados. Desta forma, pode-se concluir que o modelo C3BEM_FRP apresentou resultados consistentes com os inventários globais e sua maior vantagem é a viabilizar as estimativas de emissão quando há falta de informações do ciclo diurno da potência radiativa do fogo (FRP).

Palavras-chave: Queimadas. Emissões. 3BEM_FRP.

DEVELOPMENT AND IMPLEMENTATION OF THE FIRE DIURNAL CYCLE IN THE PREP-CHEM-SRC: ASSESSMENT OF THE AEROSOLS BIOMASS BURNING EMISSION INVENTORIES OVER SOUTH AMERICA

ABSTRACT

Smoke released in biomass burning is composed by a variety of particles and species of gases that can influence air quality and climate. Globally, it is estimated that 350 million hectares are burned annually and carbon dioxide (CO₂) emissions are equivalent for approximately 10% of emissions derived from fossil fuel. Thus, the main objective of this work is developing an approach for the 3BEM_FRP model using fire duration for different land use and land cover (LULC) types for the South American biomes in order to provide information for the estimation of Fire Radiative Energy (FRE) whenever the Fire Radiative Power (FRP) is insufficient to extract the diurnal cycle of the fires. The diurnal cycle was estimated using Wildfire Automated Biomass Burning Algorithm (WFABBA) product during 1997 – 2015 period for the LULC types of each South America biome. The Particulate Matter with diameter less than 2.5µm (PM_{2.5}) was estimated using the Brazilian Biomass Burning Emission Model with FRP assimilation (3BEM_FRP) included the diurnal cycle (C3BEM_FRP) to 2003-2015 period and covered the entire South America. Furthermore, the PM_{2.5} emissions estimation was evaluated with Global Fire Assimilation System (GFAS), Quick Fire Emissions Dataset (QFED), Global Fire Emissions Database (GFED) e Fire Inventory from NCAR (FINN) products. In general, the average duration of biomass burning for each class of International Geosphere-Biosphere Programme (IGBP) varies according to the biome, almost 61% of fires in South America presented a duration of 6 and 7 hours, while 17% presented values between 7 and 8 hours, 12% less than 5 hours and approximately 9% of fires in South America presented an activity that is longer than 9 hours. Moreover, the C3BEM_FRP increases the PM_{2.5} emission values in Cerrado compared with the inventories based on hot pixel and burned area (3BEM and FINN). In addition, the C3BEM_FRP presents a correlation of 0.86 with the GFAS which indicates that inventories that use the same the methodology have a tendency to agree spatially. The QFED is the only inventory that combine the FRP and aerosols estimated by satellite to obtain emissions from biomass burning and presented the lowest correlation with C3BEM_FRP ($r = 0.58$). However, the spatial assessment of QFEDxC3BEM_FRP indicates, in many cases, a variation of the emissions between neighboring pixels, indicating that the QFED tends to compensate the absence of information increasing the emission values in detected fire location data. Thus, we concluded that the model C3BEM_FRP presented consistent results with the global inventories and the highlight improvement is to make

feasible the emission estimation when there is a lack of information of the diurnal cycle of the fire radiative power (FRP).

Keywords: Biomass Burning. Air Pollution. 3BEM_FRP.

LISTA DE FIGURAS

Pág.

- Figura 2.1 - Ilustração dos processos de transferência de calor em uma queimada: (1) a condução é a primeira etapa do processo de transferência de calor durante a ignição, na qual o calor é transferido de molécula para molécula do combustível. (2) A radiação eletromagnética é a principal forma de transferência de calor, uma vez que os combustíveis localizados na frente da linha de fogo são aquecidos até conseguirem manter a pirólise contínua dos materiais próximos; (3) A convecção transporta o calor para cima do dossel..... 7
- Figura 3.1 - América do Sul e suas configurações de biomas propostos pelo IBGE (2004) e Olson et al. (2001) para o Brasil e demais países, respectivamente (3.1(A)). Mapa de uso e cobertura da terra do produto MCD12Q1 para a América do Sul (3.1(B))..... 12
- Figura 4.1 - Fluxograma da metodologia dividida em três blocos principais. O bloco I corresponde às estimativas do ciclo diurno das queimadas, o bloco II a utilização das informações do ciclo diurno das queimadas no modelo PREP-CHEM-SRC e o bloco III a comparação dos resultados obtidos no bloco II com inventários globais..... 26
- Figura 4.2 - Biomas da América do Sul e seus respectivos identificadores de classe de uso e cobertura da terra: Floresta Tropical e Subtropical Úmida (4.2 (A)); Savanas (4.2(B)); Caatinga (4.2(C)); Mata Atlântica (4.2(D))..... 28
- Figura 4.3 - Biomas da América do Sul e seus respectivos identificadores de classe de uso e cobertura da terra: Gramíneas Temperadas, Savanas e Vegetação Arbustiva (4.3 (A));

Floresta Temperada (4.3(B)); Campos de Altitude e Arbustos (4.3(C)).....	30
Figura 4.4 - Biomas da América do Sul e seus respectivos identificadores de classe de uso e cobertura da terra: Savanas Estépicas (4.4 (A)); Savanas Pantanosa (4.4(B)); Deserto (4.4(C)); Floresta Mediterrânea, Savana Lenhosa e Arbustos (4.4(D))...	32
Figura 4.5 - Ponto de grade centrado nas coordenadas - 3.437730°/46.263359° para o dia 13/10/2010 para o uso 30 (figura 4.2(A)).....	35
Figura 4.6 - Histograma da frequência de duração das queimadas para o uso Floresta Ombrófila Densa (23) do bioma Floresta Tropical e Subtropical.	37
Figura 5.1 – Distribuição da duração média das queimadas para a América do Sul para 2003.....	40
Figura 5.2 – Distribuição espacial das estimativas emissões de PM2.5 para a América do Sul de 2003 a 2008.....	43
Figura 5.3 - Emissão anual de PM2.5 para os países da América do Sul.....	45
Figura 5.4 – Emissão de PM2.5 por estado Brasileiro de 2003 a 2015.....	46
Figura 5.5 – Comparação dos valores de PM2.5 dos inventários globais para a série temporal de 2003 a 2015 para a América do Sul..	48
Figura 5.6 – Distribuição espacial de PM2.5 por inventário durante setembro de 2012 para a América do Sul.....	51
Figura 5.7 - Diferença entre inventários de emissão de PM2.5 para a América do Sul.....	53
Figura 5.8 - Coeficiente de correlação linear entre o C3BEM_FRP e os Inventários Globais para a grade em vermelho.....	56

LISTA DE TABELAS

	<u>Pág.</u>
Tabela 4.1 Classes IGBP-DIS do produto MCD12Q1	17
Tabela 4.2 - Coeficiente para o calculo da área do fogo por tipo de uso e cobertura da terra.....	38
Tabela 5.1 – Coeficiente de correlação resultante das regressões entre o C3BEM_FRP e os Inventários Globais para as grades demonstradas na Figura 5.7. As regressões não significativas de acordo com o Teste t de Student ($p > 0,05$) estão marcadas de vermelho.	55
Tabela A.1 – Descrição dos biomas da América do Sul propostos pelo IBGE e Olson et al. (2001) para o Brasil e demais países, respectivamente.....	67
Tabela B.1 – O tempo médio de duração das queimadas para as classes do produto MCD12Q1 reclassificado Figuras 4.2 4.3 e 4.4.....	69
Tabela C.1 – Porcentagem de emissão anual de PM2.5 para os países da América do Sul.....	71
Tabela C.2 – Porcentagem de emissão anual de PM2.5 para os biomas da América do Sul.....	72

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

3BEM	<i>Brazilian Biomass Burning Emission Model</i>
3BEM-FRP	<i>Brazilian Biomass Burning Emission Model with FRP assimilation</i>
AOT	<i>Aerosol Optical Thickness</i>
ATSR	<i>Along Track Scanning Radiometers</i>
CASA	<i>Carnegie-Ames-Stanford-Approach</i>
CCATT-BRAMS	<i>Coupled Aerosol and Tracer Transport model to the Brazilian developments on the Regional Atmospheric Modelling System</i>
FEER.v1	<i>Fire Energetics and Emissions Research version 1.0</i>
FINN	<i>Fire Inventory from NCAR</i>
FRE	<i>Fire Radiative Energy</i>
FRP	<i>Fire Radiative Power</i>
GEOS	<i>Goddard Earth Observing System Model</i>
GFAS	<i>Global Fire Assimilation System</i>
GFED	<i>Global Fire Emissions Database</i>
GOES	<i>Geostationary Operational Environmental Satellite</i>
IDL	<i>Interactive Data Language</i>
IGBP	<i>International Geosphere-Biosphere Programme</i>
LPDAAC	<i>Land Processes Distributed Active Archive Center</i>
MIR	<i>infravermelho médio</i>
MODIS	<i>Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer</i>
NASA	<i>National Aeronautics and Space Administration</i>
QFED	<i>Quick Fire Emissions Dataset</i>
SAMBBA	<i>South American Biomass Burning Analysis</i>
UW-Madison	<i>University of Wisconsin</i>
VCF	<i>Vegetation Continuous Fields</i>
VIRS	<i>Visible and Infrared Scanner (VIRS)</i>
WRF	<i>Weather Research and Forecasting model</i>
WRF-CHEM	<i>Weather Research and Forecasting model coupled with Chemistry</i>
WFAABA	<i>Wildfire Automated Biomass Burning Algorithm</i>

SUMÁRIO

	<u>Pág.</u>
1 INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Problema	4
1.2 Hipótese	4
1.3 Objetivos	5
1.3.1 Objetivo Geral.....	5
1.3.2 Objetivos Específicos	5
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	6
2.1 Características das Queimadas.....	6
2.2 Inventários de Queima de Biomassa	9
3 ÁREA DE ESTUDO	12
4 MATERIAIS E MÉTODOS	14
4.1 Materiais	14
4.1.1 MYD14 e MOD14 (<i>Collection 6</i>).....	14
4.1.2 WFABBA FIRE PRODUCT	15
4.1.3 MDC12Q1	16
4.1.4 PREP-CHEM-SRC	19
4.1.5 Inventários Globais.....	21
4.1.5.1 GFED	21
4.1.5.2 FINN	22
4.1.5.3 GFAS	23
4.1.5.4 QFED 2.2	24
4.2 Metodologia	25
4.2.1 Fluxograma da Metodologia.....	25
4.2.2 Reclassificação do Uso e Cobertura da Terra.....	26
4.2.3 Estimativa do Ciclo Diurno	33
4.2.3.1 Pré Processamento do GOES.....	33
4.2.3.2 Integração GOES	33
4.2.4 Implementação das informações do ciclo diurno no modelo 3BEM_FRP.....	37

5	RESULTADOS	40
5.1	Ciclo Diurno	40
5.2	Implementação no Modelo.....	42
5.3	Comparação de Inventários.....	47
5.3.1	Análise espacial dos Inventários	50
6	CONCLUSÃO	57
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	59
	ANEXO A.....	67
	ANEXO B.....	69
	ANEXO C.....	71

1 INTRODUÇÃO

A queima de biomassa é um fenômeno global e desempenha um papel fundamental na dinâmica terrestre e atmosférica. Estima-se que 350 milhões de hectares são queimados anualmente (GIGLIO et al., 2013) e que as emissões de dióxido de carbono (CO_2 , $0,9 \pm 0,5 \text{ GtC ano}^{-1}$) resultantes destas queimas sejam equivalentes em até 10% às emissões decorrentes da combustão de combustíveis fósseis ($9,0 \pm 0,5 \text{ GtC ano}^{-1}$) (LE QUÉRÉ et al., 2015). O fogo é amplamente utilizado como instrumento de manejo para estimular a rebrota de forragem para a pecuária, diminuir as pragas, remover os remanescentes agrícolas e está associado à mudanças do uso e cobertura da terra, principalmente nas regiões tropicais (COCHRANE, 2009; FANIN; VAN DER WERF, 2015; LE QUÉRÉ et al., 2015; ICHOKU et al., 2016).

Nas regiões tropicais, a variabilidade interanual das queimadas está relacionada principalmente com as variáveis climáticas, uma vez que o regime hidrológico influencia a quantidade de combustível disponível para queima, a intensidade e a duração da queimada (CHEN et al., 2013). Entretanto, a inflamabilidade florestal tem aumentado devido às atividades humanas como, por exemplo, a extração seletiva de madeira, fragmentação florestal e a frequência de queimadas em uma determinada área (CARMENTA et al., 2016).

A recorrência das queimadas pode ocasionar a extinção da cobertura vegetal natural, o que acarreta riscos à biodiversidade e à dinâmica dos ecossistemas. As queimadas sem controle podem afetar as áreas de preservação permanente, reservas legais, matar animais silvestres e avançar sobre áreas urbanas e de culturas, gerando prejuízos sociais e econômicos (COCHRANE, 2009). Ademais, o aumento da temperatura do solo tem efeito direto nas propriedades físicas, químicas e biológicas do solo, ocasionando a eliminação de matéria orgânica, a diminuição do conteúdo de água e o aumento da erodibilidade do solo (ALCAÑIZ et al., 2018).

Os impactos provocados pelas queimadas não se restringem apenas às áreas atingidas pelo fogo, mas também se estendem por meio da poluição provocada pela fumaça carregada para outras regiões distantes do foco através do

transporte atmosférico (ICHOKU et al., 2016). As emissões resultantes da queima de biomassa são compostas por uma mistura de gases e partículas que podem de maneira direta ou indireta afetar o clima e a qualidade do ar. Nem toda combustão originada pela queima de biomassa é completa, emitindo além de CO₂, o monóxido de carbono (CO), o metano (CH₄), compostos orgânicos Voláteis (COVs) e materiais particulados (em inglês, *total particulate matter* – TPM), os quais estão relacionados à fuligem e afetam diretamente a saúde humana, ocasionando doenças que acometem o aparelho respiratório e cardiovascular. A partir da formação destes compostos, há a reação dos COVs com outras substâncias presentes na atmosfera e ocorre a formação de um dos gases responsáveis pelo efeito estufa, o ozônio troposférico (O₃) (HEILMAN et al., 2014; SOMMERS et al., 2014; GILMAN et al., 2015; REDDINGTON et al., 2015).

Os gases do efeito estufa liberados pelas queimadas possuem propriedades de atenuar fortemente a radiação eletromagnética, que modificam o balanço de energia e contribuem para o aquecimento global. Além disto, as plumas de fumaça inibem a convecção vertical e limitam a formação de nuvens, diminuindo os registros de precipitação. As queimadas também alteram o albedo da superfície, que influencia diretamente o balanço de radiação e, conseqüentemente, as trocas de energia da superfície com a atmosfera (BOWMAN et al., 2010; SOMMERS et al., 2014).

A emissão de CO₂ pelas queimadas perturbam o ciclo de carbono, uma vez que o aumento da frequência, extensão e temperatura das queimadas gera mudanças na estrutura e composição da vegetação e, por conseguinte, nos estoques e no potencial de sequestro de carbono. Além disto, sabe-se que grande parcela dos estoques de carbono nas florestas são perdidos permanentemente em muitas regiões, como a Amazônia, onde aproximadamente 90% dos desmatamentos utilizaram a queima de biomassa como etapa inicial de conversão do uso da terra (LIMA et al., 2012; HEILMAN et al., 2014).

Para modelar os impactos das queimadas na qualidade do ar e realizar uma análise confiável dos efeitos associados é necessário que as estimativas tenham uma boa acurácia espaço-temporal e sejam consistentes na determinação da massa total emitida (PEREIRA et al., 2016). Os dados estimados por sensores orbitais representam a principal fonte de informação para analisar as atividades de queima de biomassa e avaliar as emissões resultantes desse processo em escalas regionais e globais a partir da aquisição sistemática de dados (BOWMAN et al., 2010).

Vários inventários de emissões e ferramentas para estimar a massa de gás emitida pela queima da biomassa baseadas na contagem de focos de calor durante a passagem do satélite e/ou na área queimada foram desenvolvidos nas últimas décadas, tais como o *Global Fire Emissions Database* – GFED (VAN DER WERF et al., 2017), *Fire Locating and Monitoring of Burning Emissions* - FLAMBE (REID et al., 2009), *Fire Inventory from NCAR* - FINN (WIEDINMYER et al., 2010) e *Brazilian Biomass Burning Emission Model* - 3BEM (LONGO et al., 2010) e, recentemente, têm-se utilizado a Potência Radiativa do Fogo (em inglês, *Fire Radiative Power* - FRP) e a Energia Radiativa do Fogo (em inglês, *Fire Radiative Energy* – FRE) como dados de entrada em modelos como o 3BEM, na versão 3BEM_FRP (PEREIRA et al., 2009) e o *Global Fire Assimilation System* - GFAS (KAISER et al., 2012), com a finalidade de se obter inventários de emissões provenientes da queima de biomassa com menor incerteza associada.

A FRP corresponde à taxa de energia liberada por uma queimada e está diretamente relacionada ao consumo de combustível durante a queima. Dada a natureza discreta da aquisição dos dados de sensoriamento remoto, somente a FRP pode ser estimada diretamente pelo sensor, enquanto que a FRE pode ser estimada integrando sucessivas medições de FRP durante um determinado período de tempo (ICHOKU et al., 2012).

O sensor *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer* (MODIS), lançado em 1999 a bordo da plataforma Terra, foi o primeiro sensor orbital a estimar a FRP. Posteriormente, a FRP passou a ser estimada por sensores

geoestacionários, incluindo o Meteosat - SEVIRI e GOES – *Imager* (ICHOKU et al., 2012). As taxas de amostragem dos sensores orbitais não são suficientes para caracterizar completamente como as queimadas variam ao longo do curso do dia. Observações com uma resolução temporal muito maior estão disponíveis a partir de satélites geoestacionários, mas possuem limitações em sua resolução espacial, o que resulta em uma falha na detecção de queimadas de baixa intensidade. Como alternativa a estas limitações, as observações do ciclo diurno das queimadas oriundas de satélites geoestacionários podem ser combinadas com a FRP estimada por diversos sistemas de satélites com a finalidade de gerar estimativas mais confiáveis.

1.1 Problema

Os avanços na caracterização da queima de biomassa através do uso de sensoriamento remoto têm se mostrado fundamentais na análise da sua distribuição espacial, temporal, bem como na utilização das estimativas oriundas de dados orbitais como parâmetros de entrada na modelagem e, na avaliação climática da qualidade do ar. A atividade do fogo durante o curso do dia caracteriza o ciclo diurno da queimada, que varia tanto temporalmente como espacialmente. Satélites de órbita polar possuem baixa resolução temporal para representar com precisão o ciclo diurno das queimadas, enquanto que os satélites geoestacionários não cobrem certas regiões do globo e possuem resolução espacial grosseira, podendo omitir queimadas com baixo FRP. Devido a estas limitações atuais, inventários de emissões globais quase em tempo real ainda ignoram os possíveis efeitos do ciclo diurno do fogo sobre suas estimativas de emissão.

1.2 Hipótese

A utilização de informações do ciclo diurno das queimadas estimados a partir do satélite geoestacionário *Geostationary Operational Environmental Satellite* (GOES) para as classes de uso e cobertura do *International Geosphere-Biosphere Programme* (IGBP) podem auxiliar no aprimoramento das

estimativas das emissões associadas a queima de biomassa na ferramenta PREP-CHEM-SRC.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo Geral

Desenvolver uma metodologia acoplada ao modelo 3BEM_FRP que utiliza informações do tempo de duração das queimadas para diferentes tipos de uso e cobertura da terra para biomas da América do Sul com a finalidade de fornecer informações para a estimativa da FRE quando houver ausência de dados de FRP.

1.3.2 Objetivos Específicos

- (a) Estimar o ciclo diurno das queimadas utilizando como referência os dados do sensor GOES de 1997 a 2015.
- (b) Implementar as informações do ciclo diurno no modelo 3BEM_FRP.
- (c) Gerar emissões de material particulado 2.5 no modelo 3BEM_FRP após a implementação do ciclo utilizando como dado de entrada o MODIS e GOES.
- (d) Comparar os valores das emissões de material particulado 2.5 com a versão original do modelo 3BEM_FRP e os inventários globais FINN, GFED, QFED e GFAS.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Características das Queimadas

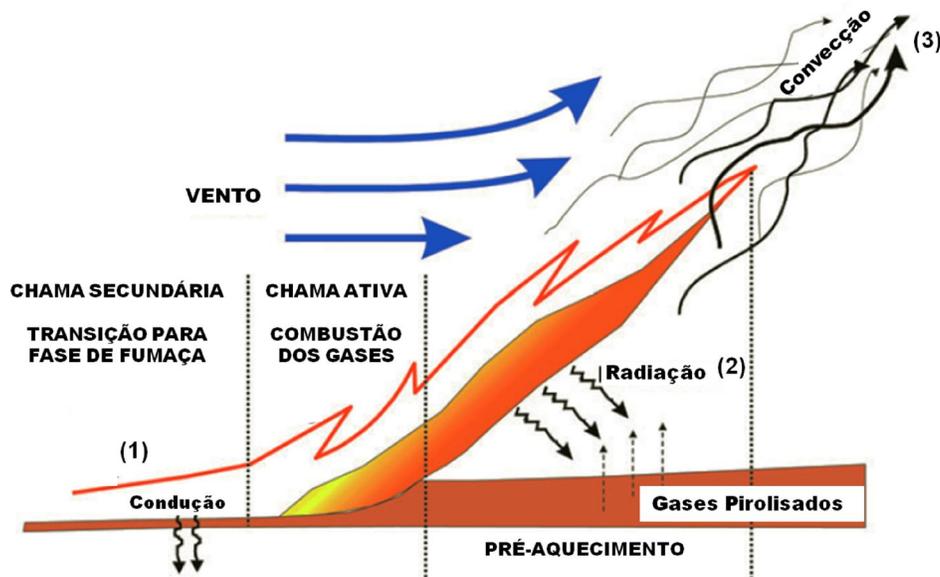
O fogo tem origem no processo de combustão, que requer uma fonte de ignição, combustível e oxigênio em proporções adequadas. No caso da queima da vegetação, os combustíveis são os compostos orgânicos (celulose e hemicelulose) derivados da biomassa vegetal (folhas, madeira, húmus, etc.), tendo como fonte de ignição as chamas, superfícies aquecidas, fagulhas e raios (fonte natural de ignição) (COCHRANE, 2009; CARDOZO, 2014; SOMMERS et al., 2014). As atividades humanas são as fontes de ignição que causam a maior parte das queimadas, geralmente relacionadas com a limpeza de áreas para a expansão agrícola e manejo de culturas agrícolas (CARMENTA et al., 2016).

A queima de substâncias orgânicas é dividida em três fases: pré-aquecimento, combustão dos gases e fase de fumaça (Figura 2.1). Na fase de pré-aquecimento ocorre um processo endotérmico no qual a temperatura do combustível aumenta e a água e outros constituintes voláteis são evaporados. Nesta fase também ocorre a decomposição térmica dos compostos orgânicos em gases voláteis, chamada de pirólise. A etapa de combustão dos gases inicia quando os combustíveis pirolizados atingem o ponto de ignição de calor, ou seja, a temperatura na qual um combustível (na presença de ar) deve ser aquecido para manter a pirólise contínua dos materiais próximos. A oxidação rápida dos gases produzidos pela pirólise resulta na combustão flamejante e, por esta razão, as alterações do fluxo de ar devido ao vento ou ao arranjo dos combustíveis influenciam fortemente a combustão. A terceira fase ocorre quando não há oxigênio suficiente para a combustão em chama e, assim, o combustível é transformado em carvão residual e cinzas, podendo ocorrer à eventual extinção do fogo. É nesta etapa que ocorre a maior liberação de fumaça e material particulado (COCHRANE, 2009).

Para que as queimadas se espalhem, é sempre necessário transferir quantidades adequadas de calor para os combustíveis próximos. A

transferência de calor pode ser realizada de três maneiras: condução, convecção e radiação (Figura 2.1). Além dos três mecanismos primários de transferência de calor, o transporte de massa de calor, na forma de brasas incandescentes, também ocorre durante a queima da vegetação. Se essas brasas entrarem em contato com combustíveis secos, poderão dar início a novas queimadas (COCHRANE, 2009).

Figura 2.1 - Ilustração dos processos de transferência de calor em uma queimada: (1) a condução é a primeira etapa do processo de transferência de calor durante a ignição, na qual o calor é transferido de molécula para molécula do combustível. (2) A radiação eletromagnética é a principal forma de transferência de calor, uma vez que os combustíveis localizados na frente da linha de fogo são aquecidos até conseguirem manter a pirólise contínua dos materiais próximos; (3) A convecção transporta o calor para cima do dossel.



Fonte: Adaptado de COCHRANE (2009)

A condução é a principal maneira de transferência de calor no começo de uma queimada, à medida que a ignição ocorre. Ainda, a transferência de calor por convecção ocorre quando o ar aquecido expande e sobe devido à sua densidade reduzida, transportando o calor para camadas atmosféricas adjacentes. Convecção é o principal método de transferência de calor vertical e pode aquecer copas de árvores próximas de uma queimada. O aquecimento do

ar próximo a uma queimada pode alterar a atividade fotossintética da vegetação, mesmo que ela não tenha sido atingida diretamente pelo fogo (SCHEPERS et al., 2014). Além disto, os ventos transportam gases e partículas oriundos do processo de combustão para a atmosfera. De acordo com Liu et al. (2014) os principais componentes emitidos pela queima de biomassa são o CO₂, CO e *black carbon* que representam, respectivamente, 71%, 5,5% e 0,24% da massa emitida por uma queimada (gramas de emissão/quilograma de combustível queimado) (COCHRANE, 2009)

A radiação controla as taxas de propagação do fogo para a maioria das queimadas. As queimadas emitem radiação termal em diferentes comprimentos de onda, atingindo o pico na região espectral do infravermelho médio (MIR). Nos comprimentos de onda do MIR, a emissão radiativa de uma queimada é até 10.000 vezes mais intensa do que a do ambiente circundante (XU et al., 2010).

O termo regime de fogo incorpora o conceito de que os ecossistemas são caracterizados por queimadas com padrões de comportamento, tempo e intervalos (BOND; KEELEY, 2005). As caracterizações do regime de fogo são importantes para uma compreensão ampla do papel do fogo na estrutura e função dos ecossistemas, além de auxiliar o planejamento estratégico em longo prazo e elucidar as alterações dos regimes de queimadas ao longo do tempo devido à influência das variáveis climáticas ou antrópicas.

Os regimes do fogo são descritos pela extensão, sazonalidade, frequência, intensidade e severidade da queimada. A extensão da queimada indica o tamanho médio da área atingida pelo fogo em um ecossistema durante determinado período de tempo; a sazonalidade do fogo descreve a época do ano em que as queimadas são mais comuns. Em grande parte da região tropical, as queimadas estão relacionadas à estação seca ou à períodos de seca incomum (por exemplo, *El Niño* ou *La Niña*). Entretanto, a frequência é definida como o intervalo entre incêndios em um determinado local. Sabe-se que a frequência de queimadas pode ter um forte impacto sobre os atributos do ciclo de vida, composição de espécies e estrutura da comunidade. A

intensidade do fogo corresponde à energia liberada por unidade área. A severidade do fogo refere-se ao impacto ecológico que as queimadas têm sobre os ecossistemas. Pode ser definida de muitas maneiras, mas é geralmente uma medida da mortalidade das plantas causada por uma queimada ou a quantidade de combustível consumido. A gravidade do incêndio é uma função tanto da intensidade (taxa de liberação de energia) quanto da duração de um incêndio (BOWMAN et al., 2010; REDDINGTON et al., 2015).

2.2 Inventários de Queima de Biomassa

Tradicionalmente, a quantidade de aerossóis e gases traços emitidos pela queima de biomassa é obtida a partir da seguinte Equação (2.1) (SEILER; CRUTZEN, 1980):

$$M=A.B. \alpha. \beta \quad (2.1)$$

em que M é a quantidade de biomassa queimada (g), A é a área queimada (m^2), B representa a densidade da biomassa em dado ecossistema ($g\ m^{-2}$), α é a fração de biomassa acima do solo e β é a eficiência da queima (sem unidade).

Uma boa acurácia dos dados de área queimada é essencial para determinar a emissão associada à queima de biomassa. Devido à variabilidade da resolução espacial dos sensores a bordo de diferentes satélites, a área queimada é particularmente difícil de ser estimada e erros podem ser introduzidos devido às características do algoritmo, características físicas do terreno, condições climáticas na área, tipo de vegetação e intensidade do fogo. Assim, estes aspectos tornam difícil a concepção de um algoritmo aplicável a todas as áreas e tipos de ecossistemas do mundo (ÁNGEL; ACEVEDO, 2012).

Produtos de fogo ativo têm sido utilizados para estimar a área queimada, partindo do pressuposto que cada foco está associado a uma queimada que cobre determinada área. A abordagem mais comum tem sido assumir que a área queimada é proporcional a contagens de *pixels* que contenham focos de queimadas (GIGLIO et al., 2006), como demonstrado na Equação 2.2:

$$A(i, t) = \omega N_F(i, t) \quad (2.2)$$

em que A representa a área queimada dentro de uma determinada região espacial (i), durante um período de tempo (t). N_F corresponde ao número de *pixels* observados dentro da mesma região durante o mesmo período de tempo e ω é uma constante que representa a área efetivamente queimada por *pixel* que contenha focos de calor.

Uma das alternativas para diminuir as incertezas na estimativa da biomassa queimada pelo método tradicional é utilizar a FRP. A FRP é uma medida discreta obtida pelo sensor e corresponde à taxa com que a energia é emitida pelo fogo na forma de radiação, cuja integração ao longo de um determinado período de tempo fornece uma estimativa do fluxo total de energia radiativa liberada durante o ciclo de vida da queimada (FRE) (WOOSTER, 2002; ICHOKU et al., 2012). Ao adaptar a Equação 2.1 para o uso da FRP, parâmetros como o fator combustível, eficiência de queima e a presença de umidade no solo e na vegetação não precisam ser considerados separadamente, uma vez que influenciam diretamente a energia irradiada pelas queimadas (PEREIRA et al., 2016).

Deste modo, tem-se que a FRP em MW é dada pela multiplicação entre a emissividade do fogo (ε), a constante de Stefan-Boltzmann (σ , $5,67 \times 10^{-8} \text{ J.s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$), o somatório das áreas fracionais (A_n) da enésima componente termal (em m^2) e da temperatura da enésima componente (T_n^4), dada em Kelvin (KAUFMAN et al., 1996), como descrito na Equação 2.3.

$$FRP = \varepsilon \cdot \sigma \cdot \sum_{i=1}^n A_n T_n^4 \quad (2.3)$$

Contudo, a Equação 2.3 só pode ser usada para calcular FRP se as temperaturas das n componentes variarem em escalas espaciais capazes de serem detectadas pelo instrumento.

As altas temperaturas associadas com os focos de calor resultam em um aumento acentuado da radiação emitida no MIR em comparação com o

background. Isso permite que sensores orbitais com canais centrados no MIR posicionados na janela atmosférica perto do comprimento de onda de 4 μm detectem queimadas que ocupam apenas uma pequena fração da área do *pixel* (ICHOKU et al., 2012). Deste modo, Wooster et al. (2005) propôs um método para estimar a FRP utilizando apenas uma banda espectral no MIR. A abordagem proposta por Wooster et al. (2005) baseia-se em aproximações das leis físicas que regem a emissão de radiação por queimadas, representado na equação 2.4:

$$FRP_{MIR} = \frac{A_{sat}}{a} \cdot \sigma \cdot \varepsilon \cdot \int_{\lambda_f}^{\lambda_i} B(\lambda, T) d\lambda - L_b \quad (2.4)$$

em que A_{sat} representa o tamanho do *pixel* (km^2), a é uma constante específica para cada sensor ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{sr}^{-1}\cdot\mu\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-4}$), σ é a constante de Stefan Boltzmann ($5,67 \times 10^{-8} \text{J}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-4}$) e ε a emissividade do fogo. L_b corresponde à radiância espectral do *background* calculada a partir dos 8 *pixels* vizinhos, e λ_i e λ_f representam o comprimento de onda inicial e final correspondentes a largura de banda do sensor, respectivamente.

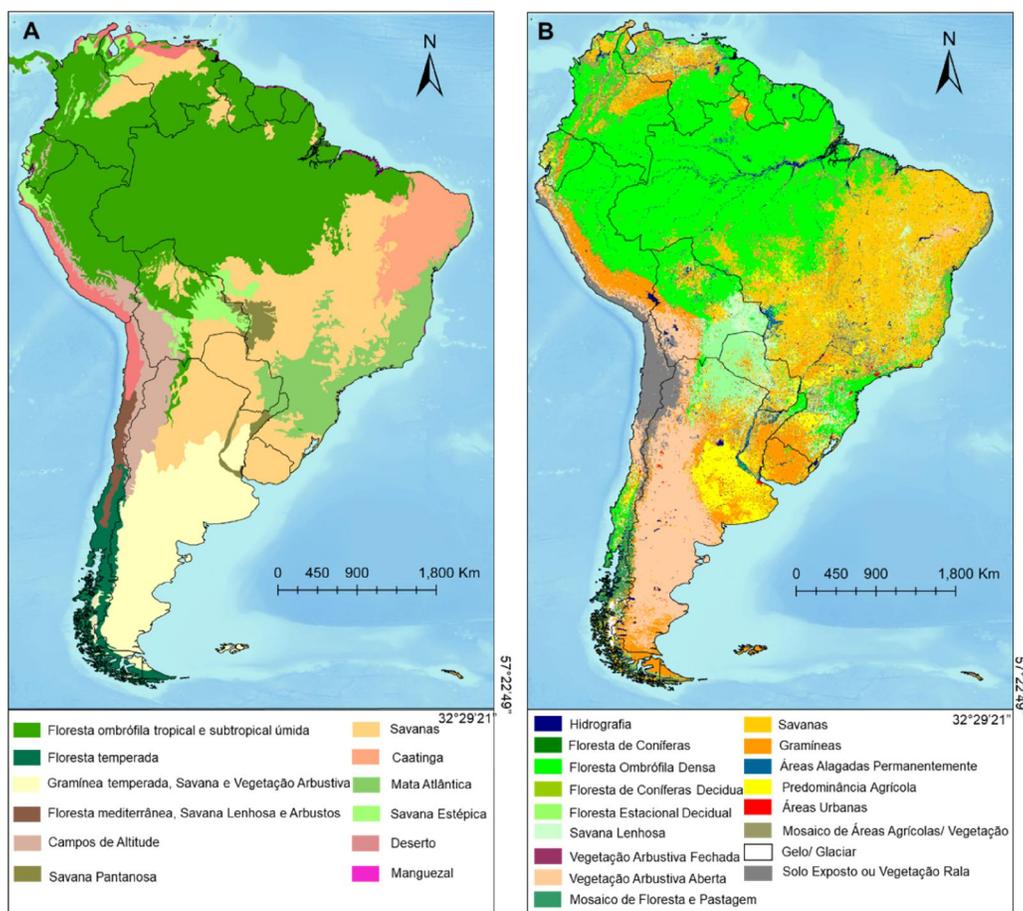
Um dos grandes problemas ao utilizar a FRP é determinar a área de fogo ativo, uma vez que a radiância de um *pixel* corresponde à radiância média de todos os objetos contidos neste elemento de resolução, cada qual com suas respectivas emissividades e temperatura. Neste sentido, a temperatura estimada nem sempre corresponde à temperatura real da queimada, mas a uma média das temperaturas tanto dos objetos que estão queimando, como o dos objetos que não estão queimando dentro de um elemento de resolução (PEREIRA et al., 2012).

Em alguns casos pode ocorrer saturação do *pixel*, gerando incertezas significativas nos valores derivados das áreas queimadas. Deste modo, ao interpretar a FRP isto deve ser levado em consideração, além do grau de opacidade atmosférica em 4 μm e a presença de nuvens, que podem causar um erro de omissão de 15% e 11% nas estimativas, respectivamente (ICHOKU et al., 2012).

3 ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo corresponde ao continente Sul-Americano e suas configurações de biomas propostos pelo IBGE (2004) e Olson et al. (2001) para o Brasil e demais países, respectivamente (descrição em ANEXO A). A América do Sul é formada por 15 países, e dada a sua extensão territorial há uma grande diversidade climática e biológica, cujas florestas ocupam aproximadamente 22% do seu território, representando cerca de 27% da cobertura florestal mundial.

Figura 3.1 - América do Sul e suas configurações de biomas propostos pelo IBGE (2004) e Olson et al. (2001) para o Brasil e demais países, respectivamente (3.1(A)). Mapa de uso e cobertura da terra do produto MCD12Q1 para a América do Sul (3.1(B)).



Fonte: Próprio Autor.

A heterogeneidade climática dessa região provém da atuação e o desenvolvimento de diferentes sistemas atmosféricos, condicionados pelas variações na latitude e formas de relevo variadas (REBOITA et al., 2010). Durante o inverno na América do Sul, os ventos alísios oriundos do Oceano Atlântico, na região nordeste do Brasil, transportam os poluentes emitidos pelas queimadas para oeste, que encontram a barreira topográfica da Cordilheira dos Andes. Os fluxos de ar que transportam os poluentes são forçados a se deslocar para a região sul e sudoeste ao encontrarem a barreira topográfica dos Andes, direcionando a fumaça para a Bolívia, Paraguai e Argentina, voltando-se para a direção do Oceano Atlântico. As correntes frias oriundas da região sul e sudoeste do continente fazem com que a massa de ar poluído retorne para região norte, passando pelas regiões mais populosas do Brasil. Este trajeto percorrido pela fumaça traz grandes implicações a população residente nestas áreas, pois estes gases somam-se a poluentes oriundos das atividades industriais e contribuem para as mudanças climáticas em diferentes escalas (FREITAS et al., 2005).

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Materiais

4.1.1 MYD14 e MOD14 (*Collection 6*)

Os produtos *Thermal Anomalies and Fire* - MOD14 e MYD14 são estimados pelo sensor MODIS a bordo da plataforma TERRA e AQUA, respectivamente. O satélite Terra começou a ser operado no ano de 2000, e possui uma órbita descendente, cruzando o equador às 10h30min e 22h30min. O satélite Aqua foi lançado em maio de 2002 e passa pelo Equador às 13h30min e 01h30min em sua órbita ascendente. Juntos, os satélites podem realizar até quatro aquisições diárias sobre uma mesma área (GIGLIO et al., 2016).

Os produtos são disponibilizados gratuitamente pela *National Aeronautics and Space Administration* (NASA) com 1km de resolução espacial e distribuídos pela *Land Processes Distributed Active Archive Center* (LPDAAC) (<https://lpdaac.usgs.gov/>). Com a finalidade de oferecer um produto global, o algoritmo MODIS objetiva identificar *pixels* que contenham um ou mais focos de queimadas durante a passagem do satélite. A temperatura de brilho é estimada nas bandas correspondentes aos comprimentos de onda de 4, 11 e 12 μm , enquanto as observações diurnas utilizam as bandas posicionadas em 0,65, 0,86, e 2,1 μm . Os *pixels* associados a fontes de calor industriais (por exemplo, siderúrgicas) recorrentes são prontamente isolados do resto usando análise de persistência. Assim, o algoritmo classifica cada *pixel* como sem informação, nuvem, água, não-fogo, fogo ou desconhecido.

A estimativa da FRP do MODIS baseia-se na abordagem proposta por Wooster et al. (2003), em que a FRP é:

$$FRP \approx \frac{A_{pix} \sigma}{a \tau_4} (l_4 - \bar{l}_{b4}) \quad (4.1)$$

em que A_{pix} é a área do *pixel* do MODIS (que varia em função do ângulo de varredura), σ é a constante de Stefan-Boltzmann ($5,6704 \times 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$), a é

uma constante específica para cada sensor (no caso do MODIS, é igual a $3,0 \times 10^{-9} \text{ W m}^{-2} \text{ sr}^{-1} \mu\text{m}^{-1} \text{ K}^{-4}$), τ_4 é a transmitância atmosférica em $4 \mu\text{m}$. O valor de l_4 e \bar{l}_{b4} correspondem a radiância do *pixel* do fogo e a radiância do *background* em $4 \mu\text{m}$, respectivamente.

Em relação à acurácia dos produtos, o algoritmo MODIS *Collection 6* foi atualizado com o objetivo de corrigir as limitações observadas no produto MODIS *Collection 5*, destacando-se principalmente os erros de inclusão relacionados a diferença de temperatura entre o *pixel* alvo e o *background* em regiões de expansão de desmatamento. O produto *Collection 6* foi validado utilizando imagens do sensor ASTER e apresentou erros de omissão de aproximadamente 10% e 5% para áreas de referência áreas que continham 140 e 250 *pixels* do ASTER, respectivamente (GIGLIO et al., 2016).

4.1.2 WFABBA FIRE PRODUCT

No início dos anos 80, surgiu a primeira geração de algoritmos de detecção de focos de calor através de imagens dos satélites GOES 4-7. O desenvolvimento desses algoritmos continuou à medida que novos satélites GOES foram lançados a partir do GOES-8, que alimentou um banco de dados de detecção de focos de calor a partir de meados dos anos 90 (XU et al., 2010).

Em 2000 passaram a utilizar o WFABBA, que é resultado de uma parceria entre a NOAA/ NESDIS/ STAR e UW-CIMSS, desenvolvido na *University of Wisconsin* (UW-Madison) com a finalidade de utilizar dados de satélites geostacionários para detectar e caracterizar a queima de biomassa. O algoritmo utiliza o sensor multiespectral *Imager* a bordo da série de satélites GOES, e fornece produtos a cada meia hora para o hemisfério ocidental com uma resolução espacial nominal de $4 \times 4 \text{ km}$ no NADIR. O sensor possui cinco bandas que cobrem o espectro eletromagnético do visível ao infravermelho termal, no entanto, o algoritmo utiliza bandas posicionadas no visível (disponível durante o dia), no infravermelho médio ($3,9 \mu\text{m}$) e infravermelho de ondas longas ($10,7 \mu\text{m}$) para estimar em tempo real a localização de focos e queimadas e sua FRP desde 2000 (XU et al., 2010).

O WFABBA é um algoritmo que utiliza os *pixels* vizinhos para identificar os *pixels* candidatos a focos de queimadas através de técnicas estatísticas, tais como média, desvio padrão e aproximações de histograma. Além disso, o algoritmo utiliza máscaras em regiões de deserto, costeiras e outras regiões que possuem alta reflectância a fim de eliminar falsas detecções (KOLTUNOV et al., 2012). Assim como os produtos de FRP dos sensores MODIS e SEVIRI, a FRP estimada através dos dados providos pelo sensor *Imager* é obtida através do método proposto por Wooster et al. (2003) (EQUAÇÃO 4.1). A constante é igual à $3,08 \cdot 10^{-9} \text{ W m}^{-2} \text{ sr}^{-1} \mu\text{m}^{-1} \text{ K}^{-4}$ (WOOSTER et al., 2005).

Os dados deste produto informam o ângulo de visada do satélite, a latitude, longitude, o tamanho do *pixel*, a temperatura de brilho, a FRP, o ecossistema associado ao foco de queimada e as “*fire flags*”. As “*fire flags*” são definidas como: (“0”) *pixel* de queimada processado, (“1”) *pixel* saturado, (“2”) *pixel* contaminado por nuvem, (“3”) alta probabilidade de *pixel* que contenha uma queimada, (“4”) média probabilidade de *pixel* que contenha uma queimada, (“5”) baixa probabilidade que o *pixel* contenha uma queimada (categoria representa o maior número de falsas detecções) (KOLTUNOV et al., 2012).

Embora o produto WFABBA possua uma alta frequência de observações, aproximadamente 5-10% dos focos detectados pelo sensor saturam quando o tamanho e temperatura do fogo superaram a sensibilidade do sensor próximo à banda posicionada em $3.9 \mu\text{m}$, inviabilizando a estimativa de FRP (PEREIRA et al., 2009).

4.1.3 MDC12Q1

O produto global MODIS *Land Cover Type product* (MCD12Q1) é produzido com dados oriundos dos sensores Aqua e Terra em uma resolução espacial de 500 m e está disponível de 2001 a 2013. Com a finalidade de gerar informações relacionadas ao estado atual ou a dinâmica do uso e cobertura da terra, o produto utiliza um conjunto de 17 classes definidas pelo *International Geosphere-Biosphere Programme Data and Information System* (IGBP-DIS) (LOVELAND; BELWARD, 1997), descritas na tabela 4.1 (FRIEDL et al., 2002).

Tabela 4.1 Classes IGBP-DIS do produto MCD12Q1

CLASSIFICAÇÃO IGBP	
Hidrografia	Oceanos, mares, lagos, reservatórios e rios. Podem ser de águas doce ou de água salgada.
Floresta de Coníferas	Predominância de vegetação Aciculifoliada com altura superior a 2 m e cobertura arbórea > 60%. A maioria das árvores permanecem verdes durante todo o ano. O dossel florestal sempre possui folhagem verde.
Floresta Ombrófila densa	Predominância de vegetação latifoliadas com altura superior a 2 m e cobertura arbórea > 60%. A maioria das árvores e arbustos permanecem verdes todo o ano. O dossel florestal sempre possui folhagem verde.
Floresta de Coníferas decidual	Predominância de vegetação lenhosa com altura superior a 2 m e cobertura arbórea > 60%. Consiste em comunidades sazonais de árvores aciculifoliadas, com um ciclo anual de períodos com ausência de folhas.
Floresta Estacional Decidual	Predominância de vegetação lenhosa com altura superior a 2 m e cobertura arbórea > 60%. Consiste em comunidades sazonais de árvores latifoliadas, com um ciclo anual de períodos com ausência de folhas.
Mosaico de Floresta e pastagem	Predominância de árvores com altura superior a 2 m e cobertura arbórea > 60%. Consiste em comunidades de árvores intercaladas com mosaicos de vegetação arbustiva fechada e aberta, savana, savana lenhosa e gramíneas.
Vegetação Arbustiva Fechada	Áreas com vegetação lenhosa com menos de 2 m de altura e cobertura arbustiva > 60%. A folhagem pode ser de folhas verdes ou de folha caduca.
Vegetação Arbustiva Aberta	Áreas com vegetação lenhosa com menos de 2 m de altura e com coberturas arbustiva variando entre 10% e 60%. A folhagem pode ser de folhas verdes ou de folhas caducas.
Savana Lenhosa	Áreas de vegetação herbácea e de florestas com cobertura arbórea variando entre 30% e 60%. A altura da floresta pode exceder 2 m.

(Continua)

Tabela 4.1 – Conclusão

Savana	Áreas de vegetação herbácea e de florestas com cobertura arbórea variando entre 10% e 30%. A altura da floresta pode exceder 2 m.
Áreas Alagadas Permanentemente	Áreas com a presença permanente de água e vegetação herbácea ou lenhosa. A vegetação pode estar presente em água salgada, salobre ou doce.
Predominância Agrícolas	áreas cobertas com culturas temporárias seguidas de colheita e um período de solo exposto.
Áreas urbanas	Áreas cobertas pela macha urbana.
Mosaico de áreas agrícolas/ vegetação	Áreas com um mosaico de terras cultivadas, florestas, mata e pastagens. Nenhum componente compreende mais de 60% da paisagem.
Gelo	Áreas sob cobertura de neve / gelo ao longo do ano.
Solo Exposto ou vegetação Rala	Áreas com solo exposto, areia, rochas ou neve. Estas áreas nunca têm mais de 10% de cobertura vegetal durante qualquer época do ano.

Fonte: Adaptada de FRIEDL et al. (2002).

O produto MCD12Q1 é gerado através de um algoritmo de classificação supervisionada, que utiliza a composição de 8 dias de dados de ambos os sensores MODIS. Este algoritmo apoia-se em um banco de dados de treinamento que foi desenvolvido utilizando imagens de alta resolução em conjunto com dados auxiliares. Também é fornecido ao classificador métricas anuais dos dados de reflectância bidirecional e temperatura da superfície (GRAY et al., 2018).

Ao analisar a acurácia do produto para o ano de 2005 para todas as classes, (GANGULY et al., 2010) encontrou uma exatidão de 74,8%, com a maioria das classes apresentando erro de omissão e inclusão menor que 30%. No entanto, classes como savana lenhosa, savana e vegetação arbustiva aberta apresentaram mais erros de omissão que as demais classes, enquanto que as classes mosaico de floresta e pastagem, savana lenhosa, savana, gramíneas, vegetação arbustiva fechada e mosaico de áreas agrícolas/ vegetação apresentaram maiores erros de inclusão. A análise da matriz de confusão indica uma confusão entre classes ecologicamente semelhantes como, por

exemplo, entre savanas e savanas lenhosas ou vegetação arbustiva aberta sendo classificada como vegetação arbustiva fechada, gramíneas e solo exposto/vegetação rala. Estes erros de classificação indicam que as confusões estão concentradas em classes que são similares, tanto funcionalmente como também em termos de suas propriedades espectro-temporais.

4.1.4 PREP-CHEM-SRC

A ferramenta PREP-CHEM-SRC foi desenvolvida no Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC/INPE) com o objetivo de estimar as emissões de gases traços e aerossóis com resolução espacial flexível e diversas projeções, que também servem como variável de entrada em modelos regionais e globais, como o *Coupled Chemistry-Aerosol-Tracer Transport model to the Brazilian developments on the Regional Atmospheric Modelling System* CCATT-BRAMS (FREITAS e SAULO R. et al., 2017), *Weather Research and Forecasting (WRF) model coupled with Chemistry* (WRF-CHEM, (GRELL et al., 2005) e o *Flow-following finite-volume Icosahedral Model* (FIM, BLECK et al., 2010). Atualmente, estão disponíveis no sistema do PREP-CHEM-SRC emissões de gases traços e aerossóis oriundos de áreas urbanas/ industriais, de fontes biogênicas, de queima de biomassa, de fontes vulcânicas, da utilização de biocombustíveis e da queima de resíduos agrícolas (FREITAS. et al., 2011).

As estimativas de gases traços e aerossóis oriundos da queima de biomassa no PREP-CHEM-SRC são produzidos utilizando o 3BEM (LONGO et al., 2010). No modelo 3BEM, para cada *pixel* de queimada detectado, a massa de gases emitidos é calculada através da seguinte equação:

$$M^{[n]} = \alpha_{veg} \cdot \beta_{veg} \cdot EF_{veg}^{[n]} \cdot a_{fire} \quad (4.2)$$

levando em consideração a quantidade de biomassa disponível para a queima acima do solo (α_{veg}), o fator de combustão (β), o fator de emissão (EF) para uma determinada espécie $[n]$ de cada tipo de vegetação e a área queimada

(a_{fire}) para cada evento de queima. A localização espacial dos focos de calor é cruzada com mapas anuais de uso da terra derivados pelo produto MODIS *Global Land Cover Product* (MCD12Q1) reamostrado para 1km para fornecer o fator de emissão e combustão baseados nos trabalhos de Ward et al. (1992) e Andreae e Merlet (2001), e a densidade de biomassa acima do solo estimada a partir de Olson et al. (2000) e Houghton et al. (2001). Já a área queimada de entrada no modelo é estimada a partir da localização de *pixels* que contenham focos de calor. Os focos de calor detectados pelo GOES WFABBA têm a área queimada estimada a partir dos *pixels* não saturados e sem nuvem que contenham focos de calor, onde é possível recuperar as características de queimada no *sub-pixel*. Para os focos detectados pelo GOES WFABBA que não possuem informações sobre o tamanho instantâneo da queimada, uma média de 0,14 km² é utilizada. Já para os focos de queimadas detectados pelo MODIS e SEVIRI, um valor médio de 0,22 km² para área queimada é utilizado (LONGO et al., 2010). O modelo inclui um algoritmo de filtro para evitar a dupla contagem do mesmo foco de queimada (LONGO et al., 2010).

A versão atualizada do 3BEM inclui a assimilação do FRP (PEREIRA et al., 2009), utilizado neste trabalho para a inclusão das estimativas do ciclo diurno. No 3BEM_FRP, a partir da assimilação da FRP estima-se a FRE e, por conseguinte, a emissão associada. A FRP estimada pelos diferentes sensores $\xi(lon, lat)$ em um determinado intervalo de tempo (t) é agrupada em uma grade (FRP_{grid}), resultante da convolução de uma máscara $\eta(\gamma, k)$, de tamanho M x N (colunas x linhas) sobre os valores de FRP (Equação 4.3).

$$FRP_{grid(lon, lat, t)} = \sum_{\gamma=-a}^{\alpha} \sum_{\kappa=-b}^{\beta} \eta(\gamma, k) \xi(lon + \gamma, lat + \kappa, t) \quad (4.3)$$

Deste modo, através da estimativa da FRP e seus respectivos horários de ocorrência para cada ponto de grade, a FRE é estimada pela seguinte equação 4.4:

$$FRE_{grid(lon,lat,t)} = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n (FRP_n + FRP_{n+1})(t_{n+1} - t_n) \quad (4.4)$$

em que a $FRE_{grid(lon,lat,t)}$ representa a energia radiativa em uma localização geográfica em termos de longitude e latitude de um ponto centrado em uma grade regular, t o intervalo de tempo entre as observações e n representa a enésima observação.

A massa de gás emitido é expressa pela equação 4.5, em que FEER corresponde ao produto *Fire Energetics and Emissions Research version 1.0* (FEER.v1) em (kg/MJ) (ICHOKU; ELLISON, 2014) e EF corresponde aos fatores de emissão de Andreae e Merlet (2001) e Yokelson et al. (2013) por espécie.

$$M^{[\epsilon]} = FRE_{grid(lon,lat,t)} \times FEER \times \frac{EF^{[\epsilon]}}{EF[TPM]} \quad (4.5)$$

O banco de dados de queimadas utilizado pelo PREP-CHEM-SRC é uma combinação do algoritmo WFABBA/GOES, dos produtos MOD14 e MYD14 do sensor MODIS e o produto de queimadas da Divisão de Satélites e Sistemas Ambientais (DSA) (SETZER et al., 1994) do INPE (LONGO et al., 2010). No modelo 3BEM_FRP, os valores de FRP estimados pelos sensores MODIS, *GOES Imager* /GOES e SEVERI/METEOSAT são agrupados de acordo com a hora de aquisição, cabendo ao usuário escolher quais destes sensores farão parte de sua análise.

4.1.5 Inventários Globais

4.1.5.1 GFED

O GFED4 segue a abordagem de Seiler e Crutzen (1980) (Equação 2.1), sendo complementada pelo modelo biogeoquímico *Carnegie-Ames-Stanford-Approach* (CASA), que calcula os fluxos de carbono. O fator de emissão

utilizado no modelo é resultado de uma compilação entre o trabalho de Andreae e Merlet (2001) e Akagi et al. (2011), enquanto que a quantidade de combustível disponível para queima é baseada no trabalho de Van Leeuwen et al. (2014) (2014) e Scholes et al. (2011).

Nesta versão, o GFED possui uma resolução espacial de 0,25° (cerca de 28 km), fornecendo dados mensais de 1997 a 2015 de fontes específicas (gramíneas e savanas, desmatamentos, florestas, queima de resíduos agrícolas e queimada em turfeiras). O produto, no entanto, fornece instruções para gerar estimativas a cada três horas ou diárias. As emissões geradas entre 2000 e 2015 são calculadas a partir da área queimada do *Global Burned Area Product* (MCD64A1) estimado pelo sensor MODIS, enquanto que as emissões entre 1997 e 2000 foram calculadas utilizando os sensores *Visible and Infrared Scanner* (VIRS) e *Along Track Scanning Radiometers* (ATSR) (VAN DER WERF et al., 2017).

A versão GFED4s inclui o cálculo de emissões de queimadas para cicatrizes pequenas para o período com disponibilidade de dados MODIS. Estas áreas são estimadas estatisticamente a partir da combinação dos produtos de área queimada (500 metros), focos ativos (1km) e de reflectância de superfície (500 metros) (VAN DER WERF. et al., 2017).

4.1.5.2 FINN

O FINN fornece dados de emissão diários com resolução espacial de 1km, estimados a partir de observações de focos de queimadas, de acordo com a equação 2.1. O FINN foi desenvolvido para ser compatível com qualquer dado de detecção de queimada disponível, porém, no modelo padrão é utilizado o MOD14 e MYD14 para obter a localização e o horário das queimadas. As observações feitas pelo sensor MODIS não cobrem diariamente as latitudes entre 30° N e 30°S e as aquisições nessas regiões são contabilizadas a cada 2 dias. Para compatibilizar estas lacunas com as aquisições diárias das regiões tropicais, assume-se que para cada queimada localizada na região equatorial, no dia seguinte a área desta queimada abrangerá metade do seu tamanho

original (WIEDINMYER et al., 2010). Devido à possibilidade de um mesmo foco ser registrado duas vezes pelos satélites Aqua e Terra, a cada dia o modelo exclui *pixels* com múltiplas detecções, assim como o 3BEM.

O modelo utiliza o MODIS *Land Cover Type* para 2005 com o padrão de 16 classes de uso da terra definido pelo IGBP e também o produto MODIS *Vegetation Continuous Fields* (VCF) (Coleção 3 para 2001) para identificar a densidade da vegetação em cada *pixel* com foco de queimada. Os valores referentes à quantidade de biomassa disponível para a queima acima do solo são baseados no trabalho de Hoelzemann et al. (2004) e o fator de emissão em Andreae e Merlet (2001) e Akagi et al. (2011). Para cada *pixel* identificado como queimada, o modelo estima que a área queimada seja igual 1 km², exceto para focos detectados em pastagens e savanas, para os quais é atribuída uma área de 0,75 km². Este valor de área queimada pode ainda ser alterado de acordo com o percentual de cobertura vegetal fornecido pelo produto VCF. Se, por exemplo, a um determinado *pixel* for atribuído uma área queimada de 1 km², mas este mesmo *pixel* possuir 50% de cobertura vegetal de acordo com os dados de VCF, a área queimada final atribuída é de 0,5 km² (WIEDINMYER et al., 2010).

4.1.5.3 GFAS

O GFAS é uma ferramenta utilizada para estimar emissões globais diárias através das observações de FRP, que tem sido quantitativamente associada à taxa de combustão e a taxa de emissão de aerossóis de uma queimada. As emissões são estimadas em uma grade regular de 0,5° pela versão 1.0 do GFAS e são distribuídas desde 2003, tendo a FRP estimada pelos produtos de fogo ativo do sensor MODIS (KAISER et al., 2012).

O modelo estima a FRP (FRP_{GFAS}) para cada célula da grade através da Equação 4.6:

$$FRP_{GFAS} = \frac{\sum_k \sum_{ik \in j} F_{ik} \cdot \cos^2(\theta_{ik})}{\sum_k \sum_{ik \in j} A_{ik} \cdot \cos^2(\theta_{ik})} \quad (4.6)$$

em que F_i corresponde a FRP observada pelo sensor, A_i a área do *pixel*, θ corresponde o ângulo zenital do sensor para *pixels* com observações válidas. Se F_i for igual a 0, não há registros de queimadas. Na equação, os índices i e k representam o *pixel* i do produto do satélite k (MOD14 ou MYD14) (KAISER et al., 2012).

A FRP é corrigida para a cobertura de nuvem parcial e para as lacunas de observação, assim, quando há falhas nos dados, o modelo assume a persistência da queimada. Sinais oriundos de atividades vulcânicas, atividades industriais e chamas de gás são eliminados por uma máscara regularmente atualizada (HEIL et al., 2010).

Após estimar a FRP para cada célula da grade, a FRP_{GFAS} é convertida para a taxa de combustão de matéria seca com fatores de conversão dependentes do ecossistema, que se baseiam em uma intercomparação com GFED (HEIL et al., 2010). A taxa de combustão da matéria seca é então escalonada linearmente para derivar os fluxos constituintes de 40 gases de traços e aerossóis, utilizando os fatores de emissão extraídos de Andreae e Merlet (2001).

4.1.5.4 QFED 2.2

O *Quick Fire Emissions Dataset* (QFED) foi desenvolvido para atender as necessidades do *Goddard Earth Observing System Model* (GEOS) nas áreas de modelagem de constituintes atmosféricos e assimilação de dados de queima de biomassa com altas resoluções espaciais ($0.1^\circ \times 0.1^\circ$) e temporais, disponibilizada em tempo quase real. O QFED baseia-se na abordagem de FRP através dos produtos MODIS de focos de calor (MYD14 e MOD14) e MODIS *Geolocation products* (MOD03 e MYD03). A localização dos focos de calor são utilizadas para determinar o tipo de vegetação (IGBP) e atribuir a FRP à classe de vegetação correspondente. Além disto, o QFED utiliza o método de correção de nuvens do GFAS.

As emissões (em $\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$) do QFED são calculadas a partir da equação 4.7:

$$E_s(i, j) = \frac{\sum_m \alpha_m \sum_b EF_{b,s} \cdot FRP_{m,b}(i, j)}{\sum_m A_m(i, j)} \quad (4.7)$$

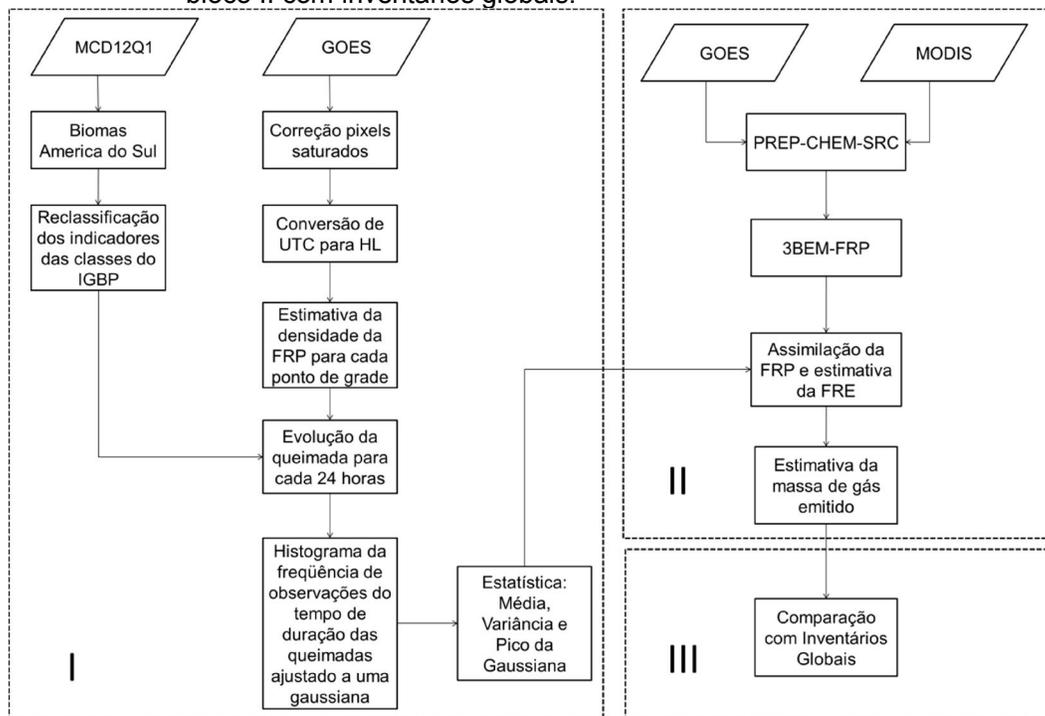
onde, o índice m denota um dos produtos de fogo MODIS, A_m corresponde aos *pixels* corrigidos para a presença de nuvens e agrupados para cada ponto da grade de posição (i, j) e α_m e EF são o coeficiente de emissão e o fator de emissão (ANDREAE e MERLET, 2001), respectivamente. Os coeficientes de emissão do QFED 2.2 contribuem para melhorar a concordância entre os valores modelados da espessura óptica do aerossol (em inglês, *aerosol optical thickness* – AOT) pelo GEOS e aqueles estimados por satélites. Portanto, para ajustar o AOT do modelo às observações por satélites, o QFED utiliza coeficientes que variam por bioma e são estimados utilizando valores regionais médios de AOT derivados do produto NNR-AOT do MODIS para regiões do globo definidas por (ICHOKU et al., 2008). A metodologia para o cálculo desses valores está disponível em Darmanov e da Silva (2013).

4.2 Metodologia

4.2.1 Fluxograma da Metodologia

O fluxograma da metodologia aplicada é dividido em três blocos principais (bloco I, bloco II e bloco III). O primeiro bloco consiste na estimativa do ciclo diurno para os usos e cobertura de terra associados aos biomas da América do Sul para a série temporal de 1997 a 2015. As estatísticas extraídas do ciclo diurno das queimadas na primeira etapa foram implementadas no modelo PREP-CHEM-SRC (bloco II). Na terceira etapa (bloco III), as estimativas da massa de gás emitido geradas no PREP-CHEM-SRC são comparadas com inventários globais.

Figura 4.1 - Fluxograma da metodologia dividida em três blocos principais. O bloco I corresponde às estimativas do ciclo diurno das queimadas, o bloco II a utilização das informações do ciclo diurno das queimadas no modelo PREP-CHEM-SRC e o bloco III a comparação dos resultados obtidos no bloco II com inventários globais.



Fonte: Próprio Autor.

4.2.2 Reclassificação do Uso e Cobertura da Terra

Com a finalidade de analisar o ciclo diurno das queimadas por tipo de uso e cobertura da terra para cada bioma, as classes do IGBP do produto MCD12Q1 foram reclassificadas para a série temporal de 2001 a 2013 com uma resolução de 0,072°. A resolução de 0,072°, corresponde a 2 vezes a resolução nominal do GOES ao nadir, e foi escolhida com a finalidade de evitar que o mesmo foco caia em duas grades distintas. Ao fim do processo de reclassificação, os identificadores das classes do IGBP passaram a variar de acordo com o bioma (FIGURA 4.2; 4.3 e 4.4).3

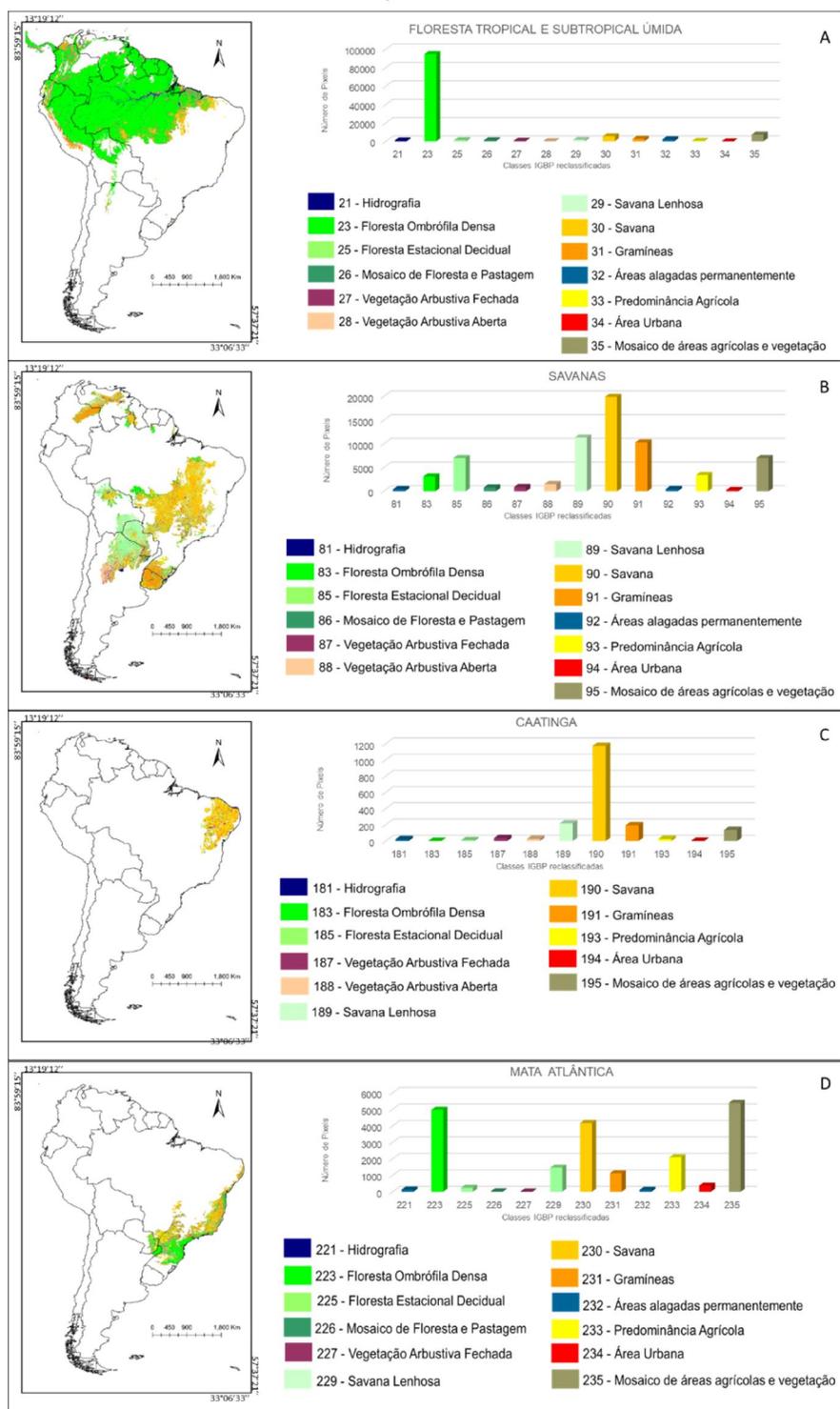
O bioma Floresta Tropical e Subtropical Úmida (Figura 4.2 (A)) ocupa cerca de 42% da América do Sul, com a predominância da classe Floresta Ombrófila

Densa (23). Esse bioma corresponde ao bioma Amazônia no Brasil e está condicionado à ocorrência da classe Savanas (30) de maneira disjunta.

O bioma Savanas (Figura 4.2(B)) no Brasil corresponde ao Cerrado, que se estende à sul para o Paraguai e Uruguai ocupando aproximadamente 24% do continente sul americano. No Brasil a principal classe é Savanas (90) enquanto que no Paraguai há a predominância da classe Savana Lenhosa (89) e no Uruguai a classe Gramíneas (91).

A caatinga está localizada no semiárido Nordeste com vegetação predominante de Savanas (190), seguido por Gramíneas (191) e Savana Lenhosa (189). A Mata Atlântica abrange a costa leste, sudeste e sul do Brasil com a predominância das classes Floresta Ombrófila Densa (223) e Mosaico de Áreas Agrícolas e Vegetação (235).

Figura 4.2 - Biomas da América do Sul e seus respectivos identificadores de classe de uso e cobertura da terra: Floresta Tropical e Subtropical Úmida (4.2 (A)); Savanas (4.2(B)); Caatinga (4.2(C)); Mata Atlântica (4.2(D)).

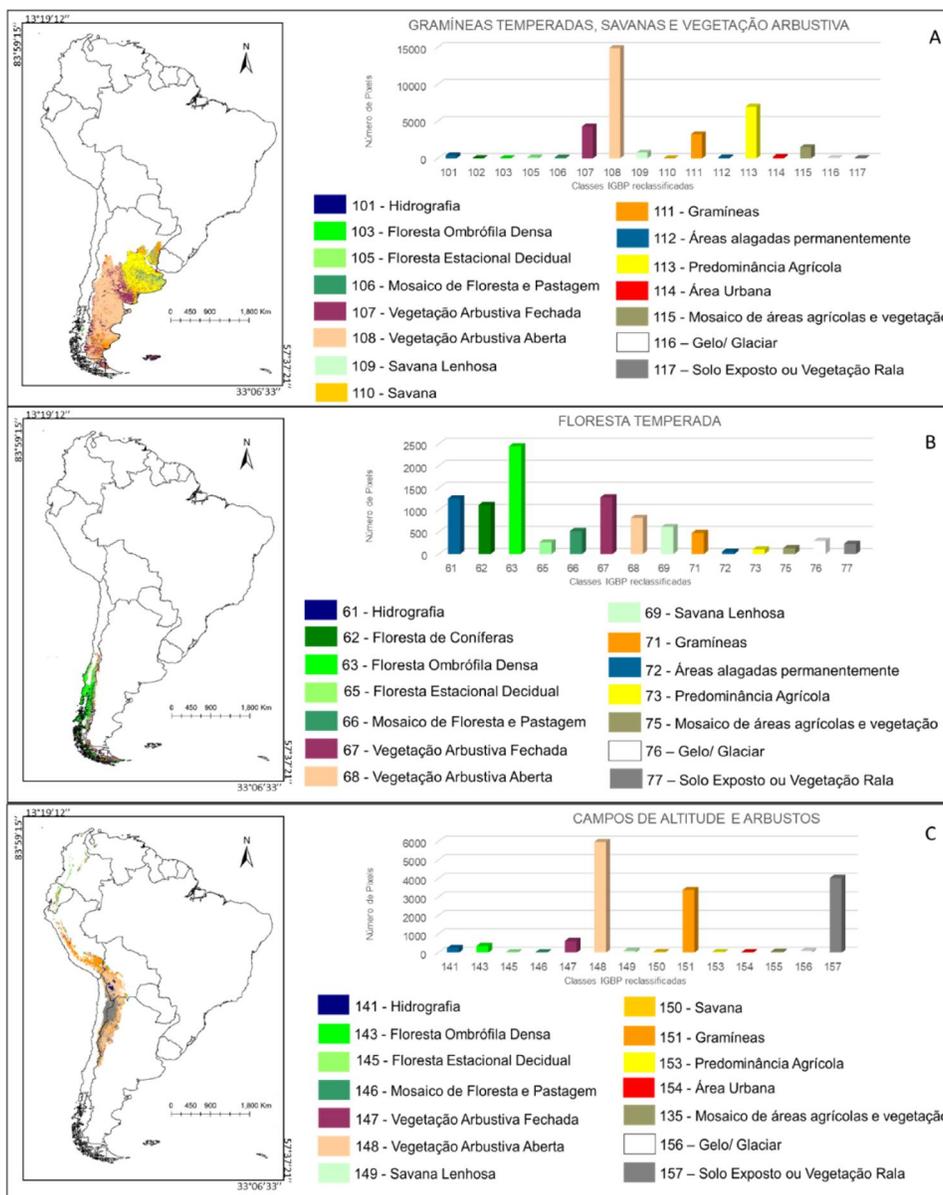


Fonte: Próprio Autor.

A região localizada ao sul da Argentina no bioma Gramíneas Temperadas, Savanas e Vegetação (Figura 4.3 (A)) em sua maioria tem como predominância as classes Vegetação Arbustiva Aberta (108), Predominância Agrícola (113) e Vegetação Arbustiva Fechada (107) que ocupam cerca de 45%, 21% e 13% do bioma, respectivamente.

Juntos, os biomas Floresta Temperada (Figura 4.3(B)) e Campos de Altitude e Arbustos (Figura 4.3(C)) ocupam 8% do território da América do Sul. A vegetação predominante no bioma Floresta Temperada é a classe Floresta Ombrófila Densa (63), enquanto que no bioma Campos de Altitude e Arbustos predomina a classe Vegetação Arbustiva Aberta (148).

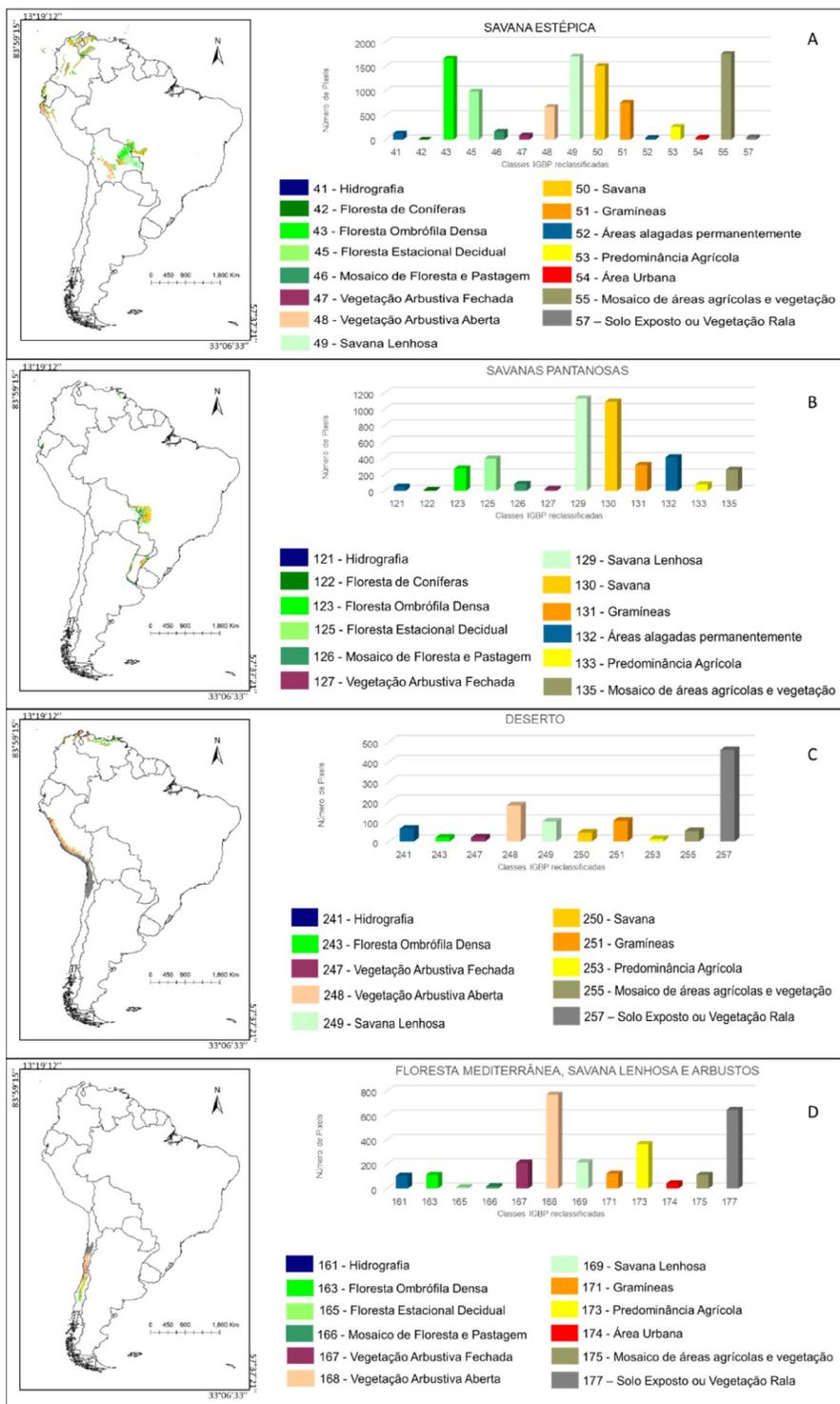
Figura 4.3 - Biomas da América do Sul e seus respectivos identificadores de classe de uso e cobertura da terra: Gramíneas Temperadas, Savanas e Vegetação Arbustiva (4.3 (A)); Floresta Temperada (4.3(B)); Campos de Altitude e Arbustos (4.3(C)).



Fonte: Próprio Autor.

O bioma Savanas Estépicas (Figura 4.4 (A)) está localizado na Bolívia, mas também ocorre de maneira esparsa no Equador, Colômbia e Venezuela. As classes Savana (51), Savana Lenhosa (49), Predominância Agrícola (55) e Floresta Ombrófila Densa (43) são predominantes neste bioma. Localizado na região do Pantanal, no bioma Savanas Pantanosa (Figura 4.4(B)) ocorre principalmente as classes Savana (130) e Savana Lenhosa (129). Embora os biomas Deserto (Figura 4.4(C)) e Floresta Mediterrânea, Savana Lenhosa e Arbustos (Figura 4.4(D)) tenham pouca ocorrência de focos de queimadas, foram incluídos na análise devido a necessidade de implementar ao modelo 3BEM_FRP informações de ciclo para toda a América do Sul.

Figura 4.4 - Biomas da América do Sul e seus respectivos identificadores de classe de uso e cobertura da terra: Savanas Estépicas (4.4 (A)); Savanas Pantanosas (4.4(B)); Deserto (4.4(C)); Floresta Mediterrânea, Savana Lenhosa e Arbustos (4.4(D)).



Fonte: Próprio Autor.

4.2.3 Estimativa do Ciclo Diurno

4.2.3.1 Pré Processamento do GOES

Os dados WFABBA disponibilizados em formato ASCII foram processados com a finalidade de eliminar *pixels* de baixa confiabilidade (flag 2, 3, 4 e 5). Nesta etapa também foram corrigidos os *pixels* saturados (*flag*=1) utilizando método proposto por PEREIRA (2013), uma vez que remover todos esses *pixels* pode fazer com que importantes eventos de queima de biomassa sejam ignorados. O método proposto é fundamentado na premissa de que a radiância espectral emitida na banda centrada em 3,9 μm (MIR) é linearmente proporcional à FRP emitida (FRP_{MIR}). A radiância espectral emitida (M_λ) é estimada através da Equação de Planck (equação 4.8), onde C_1 e C_2 são constantes ($3,74 \times 10^8 \text{ W.m}^{-2}$ e $1,44 \times 10^4 \mu\text{m.K}$, respectivamente); λ é o comprimento de onda (μm), T é a temperatura em Kelvin;

$$M(\lambda, T) = \frac{1}{\lambda^5} \times \frac{C_1}{e^{\left(\frac{C_2}{\lambda T}\right)} - 1} \quad (4.8)$$

$$FRP_{MIR} = \frac{Ag}{a} \sigma \int_{3,76}^{4,03} M(\lambda, T) d\lambda - M_b \quad (4.9)$$

Os valores da M_λ são substituídos na equação 4.7 em que Ag representa a área do *pixel* do sensor Imager/Goes; a é a constante baseada na resposta espectral na banda referente ao MIR disponível em Wooster et al. (2005); M_b é a emitância radiante para o *background*, integrada nos comprimentos de onda da banda utilizada.

4.2.3.2 Integração GOES

Os dados do GOES são fornecidos no Tempo Universal Coordenado (em inglês, *Universal Coordinated Time* - UTC) e, dada a extensão territorial de

alguns biomas, como a Amazônia que engloba 3 fusos horários, há a necessidade de convertê-los para a hora local (HL).

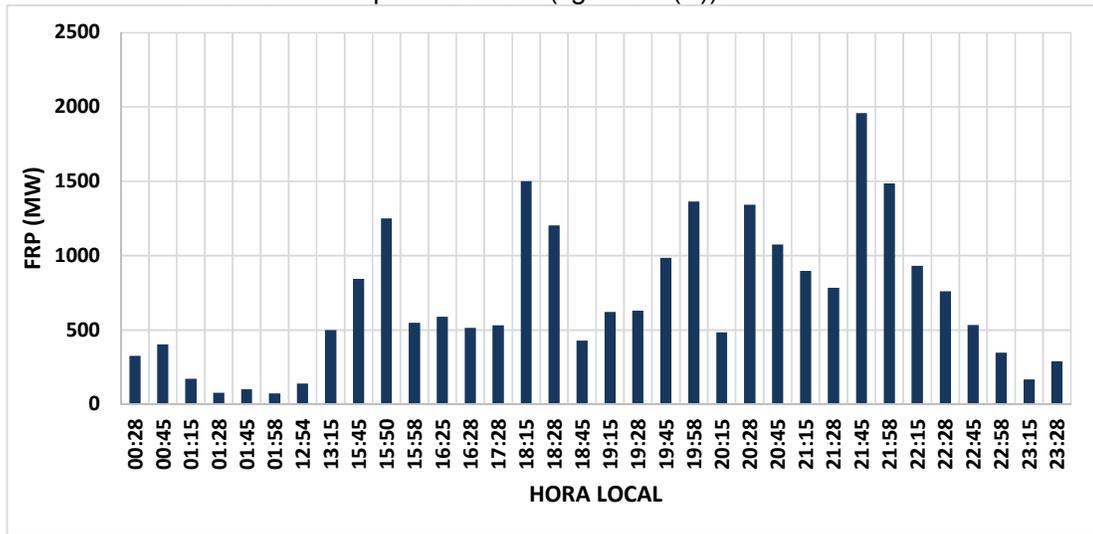
Foi estimado a partir dos dados GOES de 1997 a 2015 em HL a densidade de FRP ($FRP_{goes}(lon + x, lat + y)$) para cada ponto da grade a partir de uma máscara de convolução $n(x, y)$ de 8km x 8km, que resultou no agrupamento dos focos de queimadas e seus respectivos valores de FRP em uma grade para o passo de tempo de 15 min ($FRP_{grade(lon, lat, t)}$), expresso na equação 4.10.

$$FRP_{grade(lon, lat, t)} = \sum_{x=-\alpha}^{\alpha} \sum_{y=-\beta}^{\beta} n(x, y) FRP_{goes}(lon + x, lat + y, t) \quad (4.10)$$

A grade resultante é definida para todos os pontos na qual a máscara de tamanho M x N sobrepõem completamente a imagem da área de estudo. Nesta etapa, os dados saturados do GOES corrigidos foram incluídos na análise.

Os arquivos resultantes da equação (4.10) foram agrupados para cada dia da série temporal (1997-2015) para verificar a evolução temporal dos focos de queimadas durante 24 horas e o tipo de uso e cobertura da terra correspondente (Figura 4.5).

Figura 4.5 - Ponto de grade centrado nas coordenadas -3.437730°/46.263359° para o dia 13/10/2010 para o uso 30 (figura 4.2(A)).



Fonte: Próprio Autor.

Com a finalidade de gerar histogramas com a frequência de observações do tempo de duração das queimadas, os histogramas da distribuição de frequências dos focos de queimadas ao longo do dia para a série temporal foram agrupados de acordo com o uso e cobertura da terra.

Os histogramas com a frequência de observações do tempo de duração das queimadas foram ajustados a partir de uma gaussiana utilizando a equação 4.11 através de um programa em *Interactive Data Language* (IDL).

$$f(x) = A_0 e^{\frac{-z^2}{2}} \quad (4.11)$$

$$z = \frac{X - A_1}{A_2} \quad (4.12)$$

em que A_0 é a altura da Gaussiana, A_1 é o centro da Gaussiana, A_2 é o desvio padrão. Com a finalidade de comparar a distribuição da amostra observada

com a distribuição de probabilidade esperada utilizou-se um teste Qui-Quadrado (χ^2) descrito como na Equação 4.13:

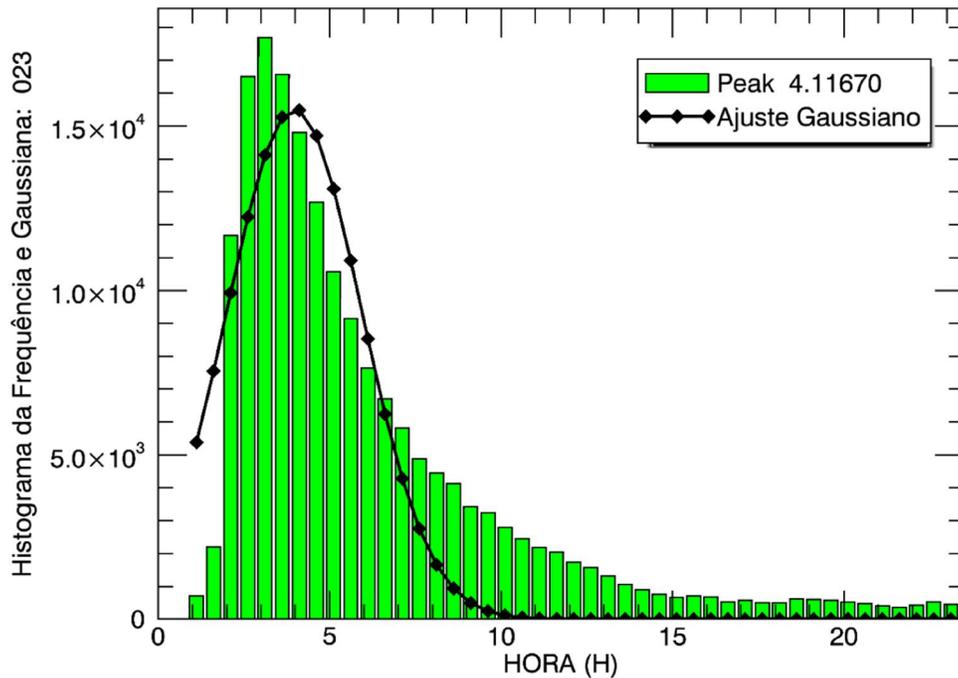
$$\chi^2 = \sum \frac{(O - E)^2}{E} \quad (4.13)$$

onde O é a frequência observada para cada classe e E a frequência esperada para cada classe.

Se as frequências observadas diferirem significativamente das frequências esperadas, os valores obtidos no teste qui-quadrado será grande e o ajuste será ruim. Essa situação exige a rejeição da hipótese de que as frequências observadas são uma aproximação precisa da distribuição de frequência esperada (H_0).

Se a H_0 é aceita, gera um arquivo contendo o histograma ajustado para uma gaussiana com a frequência de observações do tempo de duração das queimadas e o uso do solo associado (como demonstrado na figura 4.6), além das estatísticas de média, variância e o pico da gaussiana.

Figura 4.6 - Histograma da frequência de duração das queimadas para o uso Floresta Ombrófila Densa (23) do bioma Floresta Tropical e Subtropical.



Fonte: Próprio Autor.

O tempo médio de duração das queimadas é associado ao produto MCD12Q1 reclassificado para os anos de 2001-2013.

4.2.4 Implementação das informações do ciclo diurno no modelo 3BEM_FRP

O modelo 3BEM_FRP lê os arquivos contendo informações dos produtos MYD14, MOD14 e WFABBA, que são recortados espacialmente para a América do Sul. Nesta etapa, se o produto WFABBA conter *pixels* saturados do produto (*flag=1*), os arquivos são corrigidos utilizando a metodologia descrita na seção 4.2.3.1, excluindo também os *pixels* de baixa confiabilidade (*flag 2, 3, 4 e 5*).

A partir da posição central da grade, na qual os *pixels* de foco de calor são agrupados (Equação 4.3), o modelo associa ao uso e cobertura da terra do

produto MCD12Q1 a média e o desvio padrão do ciclo diurno das queimadas obtido através da metodologia apresentada na seção 4.2.3.2 e calcula a área queimada e a área em processo de combustão (Fsize). A Fsize é calculada através da multiplicação da FRP por um coeficiente (tabela 4.2) obtido a partir de estudos da relação entre o tamanho da área do fogo e a potência radiativa do fogo para diferentes usos e coberturas da terra (PEREIRA, 2013).

Tabela 4.2 - Coeficiente para o cálculo da área do fogo por tipo de uso e cobertura da terra.

Vegetação herbáceo arbustiva	$2,2 \times 10^{-4} \text{km}^2$
Floresta Ombrófila; Floresta decidual; Floresta semi-decidual	$2,1 \times 10^{-4} \text{km}^2$
Áreas Agrícolas	$2,6 \times 10^{-4} \text{km}^2$
Pastagem e Gramíneas	$2,9 \times 10^{-4} \text{km}^2$

Fonte: Pereira (2013)

Com base nos valores de FRP os *pixels* de foco de calor são agrupados a partir dos seus respectivos horários de ocorrência e para cada ponto da grade estima-se a FRE utilizando a equação 4.3. No entanto, se o número de observações de *pixels* de calor for igual a 1, o tempo total de queima corresponde à média do ciclo diurno das queimada associada ao produto MCD12Q1 reclassificado para os anos de 2001-2013. Ressalta-se que para os anos posteriores à 2013, utiliza-se o mapa deste ano, uma vez que não existe produtos para anos recentes.

Durante a integração dos valores de FRP, se a queimada não persistir nas próximas 4 horas é considerada a existência de uma nova queima, e uma nova integração dos valores de FRP é iniciada. O modelo 3BEM_FRP considera que a queimada inicia uma hora e meia antes do primeiro foco e finaliza uma hora e meia após o último foco, acrescentando esse tempo a integração da FRE.

Os dados de FRP integrados em função do tempo foram multiplicados pelo produto FEER.v1 (ICHOKU; ELLISON, 2014) para calcular TPM. A metodologia

adotada pelo FEER parte da premissa que a massa total de aerossol emitida pode ser relacionada linearmente com a FRE:

$$M_{TPM} = C_e \cdot FRE \quad (4.14)$$

onde M_{TPM} é a massa de aerossol emitido e C_e (kg/MJ) é o coeficiente de emissão, que relaciona diretamente a energia radiativa de uma queimada à emissão de aerossóis. O produto FEER fornece o C_e apenas para o cálculo do total emissões de TPM de 1 em 1 grau.

Assim, um arquivo contendo as informações da latitude e longitude do *pixel* central da grade, Fsize e a massa do material particulado total para cada evento de queima de biomassa é gerado. O PREP-CHEM-SRC utiliza a localização e o tipo de uso e cobertura da terra associada para converter o TPM para outros tipos de gases através dos fatores de emissão propostos por Andreae e Merlet (2001) e Yokelson et al. (2013). O Fsize é utilizado para o cálculo da injeção de plumas na assimilação com o CATT-BRAMS.

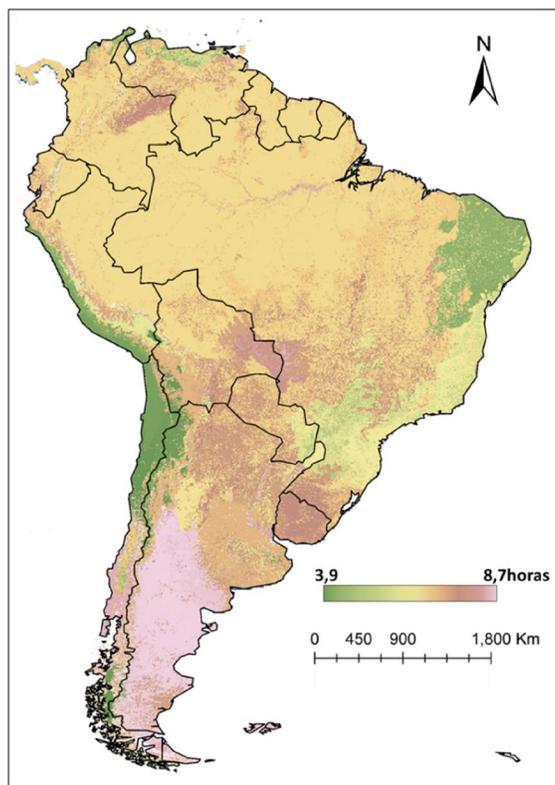
Os valores anuais de emissão recorrentes da queima de biomassa obtidos através 3BEM_FRP com inclusão dos valores do ciclo diurno das queimadas (C3BEM_FRP) foram comparados com os valores dos inventários globais. Além disto, realizou-se uma comparação espacial dos inventários globais para setembro de 2012 quando ocorreu *South American Biomass Burning Analysis* (SAMBBA) a fim de intercomparar e avaliar esses inventários. O SAMBBA foi um experimento aerotransportado utilizando a aeronave da *Facility for Airborne Atmospheric Measurements* (FAAM) para caracterizar os impactos da emissões de queima de biomassa na qualidade do ar, previsão numérica do tempo e no clima da região da Floresta Amazônica e parte do cerrado.

5 RESULTADOS

5.1 Ciclo Diurno

O tempo médio de duração das queimadas é apresentado na figura 5.1. Cerca de 61% das queimadas na América do Sul duram em média entre 6 e 7 horas, enquanto que 17% duram em média entre 7 e 8 horas e aproximadamente 12% duram menos que 5 horas e 9% duram mais que 9 horas (Anexo B).

Figura 5.1 – Distribuição da duração média das queimadas para a América do Sul para 2003.



Fonte: Próprio Autor.

No bioma Floresta Tropical e Subtropical (Figura 4.2 (A)), localizado na região da Amazônia, a classe Floresta Ombrófila Densa (23) que ocupa cerca de 80% do bioma tem queimadas que duram em média 6 horas, enquanto que a

mesma classe localizada no bioma Savanas (Figura 4.2(B)) queima cerca de 30 minutos a mais. Neste bioma, as classes Gramíneas (31), Predominância Agrícola (33), Mosaico de áreas agrícolas/ Vegetação (35) duram em média 6,75, 6,73 e 6,07 horas, respectivamente.

No bioma Savanas (Figura 4.2(B)) as classes predominantes Savana Lenhosa (89) e Savana (90) queimam em média 6,29 e 6,31 horas. A classe Gramíneas (91), localizada principalmente no Rio Grande do Sul e Uruguai, queima em média 7,13 horas, cerca de 22 min a mais que a mesma classe situada na região da Amazônia. Ao passo que o tempo médio de duração das queimadas nas classes Predominância agrícola (93) e Mosaico de Áreas Agrícolas e Vegetação (95) no bioma Savanas se assemelham aos encontrados no bioma Floresta Tropical e Subtropical, queimando em média 6,83 e 6,88 respectivamente.

Na Mata Atlântica (Figura 4.2(D)) a classe Floresta Ombrófila Densa (223) queima em média 5,96 horas, ou seja, tempo médio próximo aos dos valores encontrados para a mesma classe no bioma Floresta Tropical e Subtropical. A classe Savana (230), encontrada principalmente nas áreas limítrofe com o bioma Savanas, queimam em média 5,89 horas. Nesse bioma, as classes Predominância agrícola (233) e Mosaico de Áreas Agrícolas e Vegetação (235) queimam em média 6,35, 5,30 e 5,62, nesta ordem.

O bioma Caatinga é majoritariamente coberto pela classe Savanas (190) que queimam em média 4,70 horas. Dentre os biomas brasileiros, as classes Gramíneas (191), Mosaico de Áreas Agrícolas e Vegetação (195) e Predominância agrícola (193) na Caatinga possuem o menor tempo médio de duração, com queimadas que duram em média 4,63, 4,16 e 4,76 horas, respectivamente.

O tempo médio de duração das queimadas no bioma Gramíneas Temperadas, Savanas e Vegetação Arbustiva (Figura 4.3(B)), localizada ao sul da Argentina, são os maiores da América do Sul. As classes predominantes, Vegetação Arbustiva Fechada (107) e Vegetação Arbustiva Aberta (108) queimam em média 8,37 e 8,53 horas, respectivamente. Neste bioma, as Gramíneas (111)

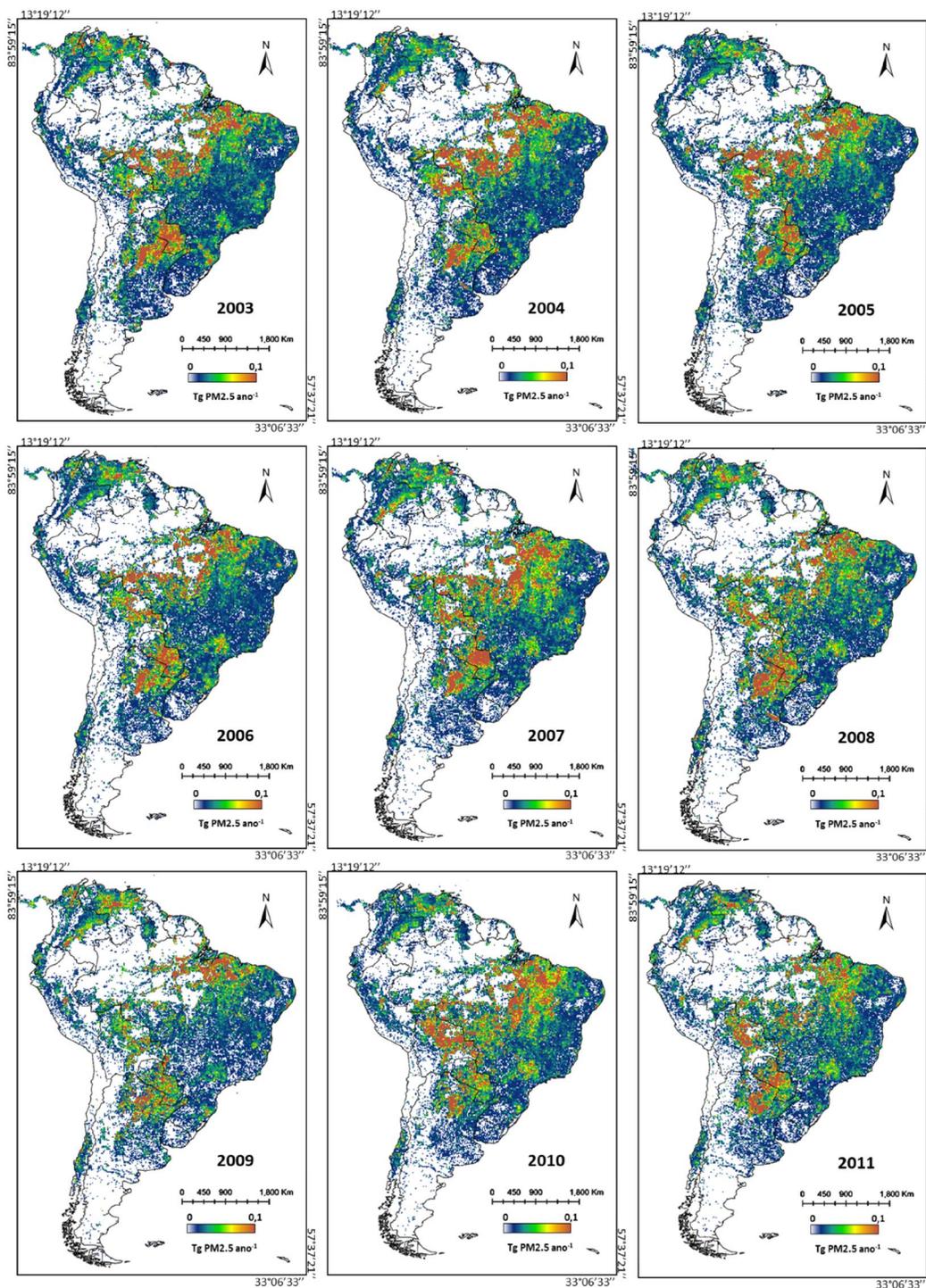
queimam em média 6,94, enquanto que nas áreas de Predominância agrícola (113) há a ocorrência de queimadas que duram em média 6,64 horas. Na região Andino-Patagônica, extensas áreas de florestas nativas foram convertidas em plantações de árvores não-nativas (espécies exóticas como pinus), mais susceptíveis as queimadas do que as florestas nativas, fornecendo combustíveis para queimadas mais severas (VEBLEN et al., 2011)

A classe Floresta Estacional Decidual (45) está situada na Bolívia no bioma Savanas Estépica (Figura 4.4 (A)), em uma região adjacente ao Pantanal, com queimadas que duram em média 7,30 h. Nesse bioma, a classe Savana Lenhosa (49) queima em média 6,95 horas. A influência da variabilidade climática no nesse bioma está provavelmente ligada à mudanças nas temperaturas da superfície do oceano Atlântico que podem ter uma forte influência sobre a variabilidade da umidade e os regimes de fogo nesta área. Nas últimas décadas, as ocorrências de precipitação convectiva acima da média no Atlântico Norte resultaram em subsidência para o sul, sobre a Amazônia e o Atlântico Sul. A influência direta disso, é um deslocamento da circulação de Hadley e migração para o norte da Zona de Convergência Intertropical, resultando na redução da precipitação através do Atlântico Equatorial e, posteriormente, na redução da umidade o oeste e sul da Amazônia, aumentando a ocorrência de queimadas (POWER et al., 2016).

5.2 Implementação no Modelo

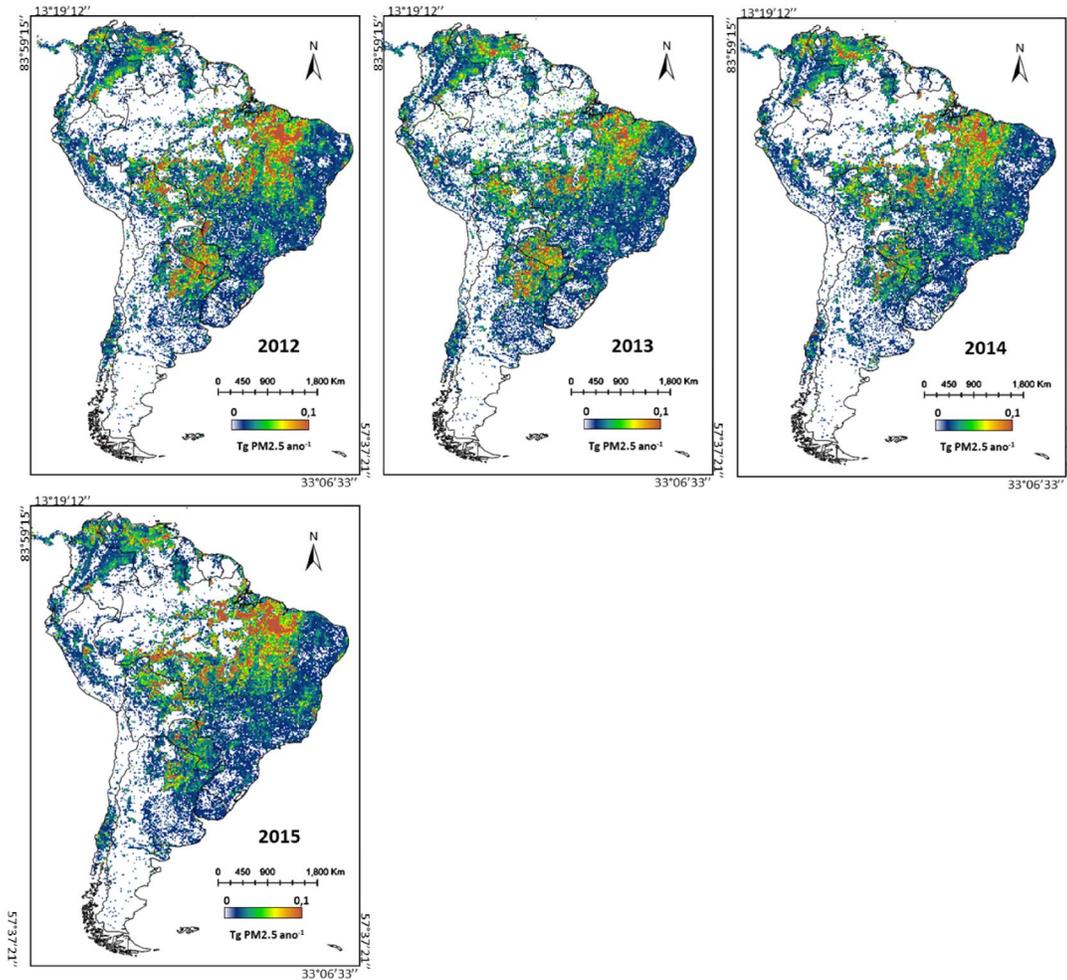
A figura 5.2 exibe a distribuição espacial das emissões de Material Particulado (PM2.5) em teragramas para a América do Sul de 2003 a 2015 com a inclusão do ciclo diurno nas estimativas. Em geral, para toda a série histórica, o arco do desmatamento, localizado na região limítrofe entre o Cerrado e a Amazônia, apresentou os maiores registros de emissões de PM2.5 (ANEXO C – Tabela C.2). De acordo com CHEN (2013), dados obtidos por satélites mostram que o número de queimadas na Amazônia está positivamente relacionado com as taxas de desmatamento.

Figura 5.2 – Distribuição espacial das estimativas emissões de PM2.5 para a América do Sul de 2003 a 2008.



(Continua)

Figura 5.2 - Conclusão

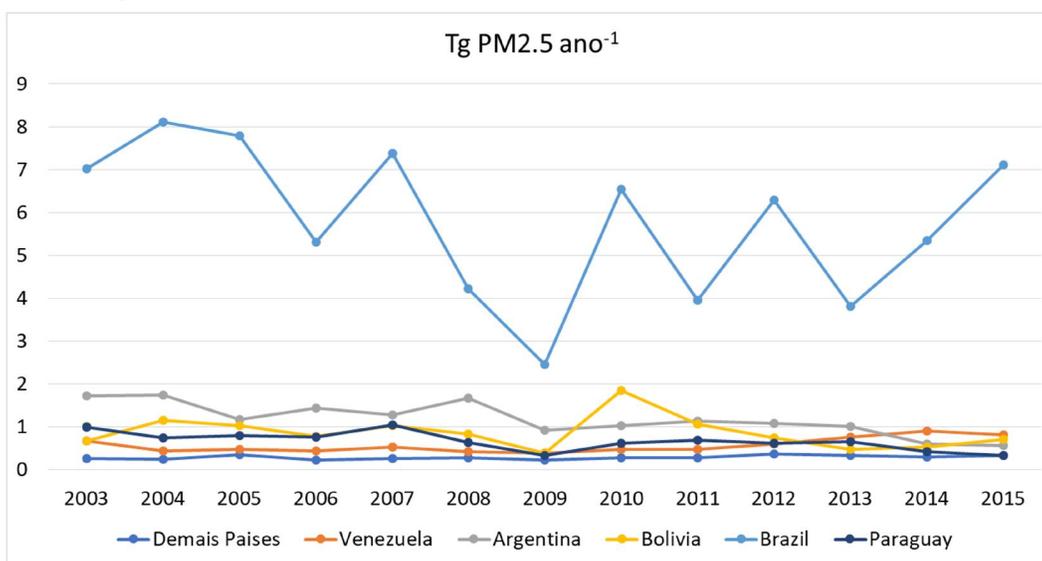


Fonte: Próprio Autor.

Na região central da Amazônia não há ocorrência de emissões por ser uma região pouco habitada, onde dificilmente há a ignição natural de uma queimada uma vez que altos índices de umidade e as copas densas tornam a floresta resistente a propagação do fogo. No entanto, a exploração florestal impulsionada pelas atividades humanas pode deixar a floresta mais inflamável, surgindo um regime do fogo resultante tanto das mudanças climáticas como do manejo da terra (COCHRANE; BARBER, 2009).

Dentre os países da América do Sul, o Brasil é o país que mais emite PM2.5 oriundos da queima de biomassa, correspondendo a 60% das emissões totais (2003-2015) para o continente. Para todos os anos em análise, as emissões de PM2.5 no território brasileiro superaram o somatório das emissões dos outros países da América do Sul (Figura 5.3).

Figura 5.3 - Emissão anual de PM2.5 para os países da América do Sul.

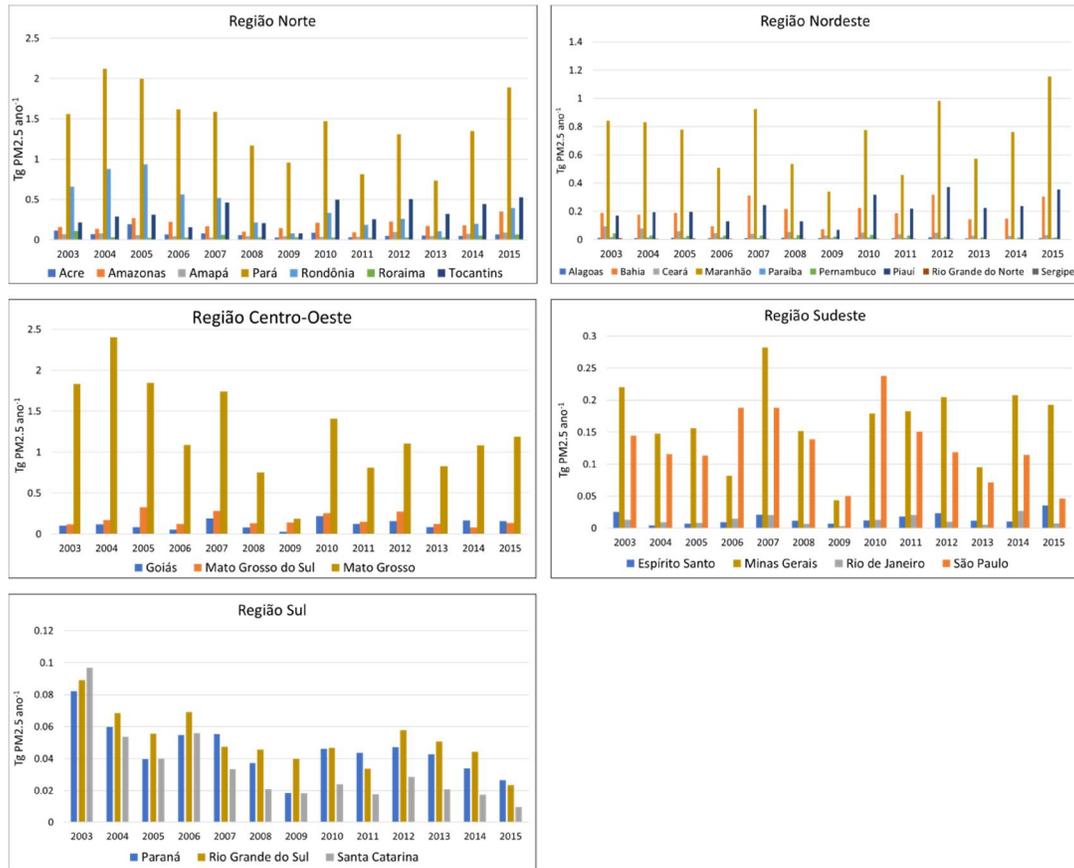


Fonte: Próprio Autor.

Os estados brasileiros que mais emitem PM2.5 são o Pará, Mato Grosso, Maranhão, Rondônia, Tocantins e Piauí, respectivamente (Figura 5.4). Durante os anos em análise, o Pará emitiu em média 1,4 Tg PM2.5 ano⁻¹ com emissões associadas principalmente à porção norte do estado. As emissões deste estado ao longo da série temporal superam as emissões de países como a Argentina, Bolívia e Paraguai, que emitiram em média 1,1 Tg PM2.5 ano⁻¹, 0,9 Tg PM2.5 ano⁻¹ e 0,6 Tg PM2.5 ano⁻¹, nesta ordem. O segundo estado com os maiores registros de PM2.5 foi o Mato Grosso, cujas emissões corresponderam em média a 1,3 Tg PM2.5 ano⁻¹. De acordo com o PRODES, Pará e Mato Grosso são os estados com as maiores taxas de desmatamento e, segundo Reddington (2015), as emissões de PM no Brasil possuem uma correlação

positiva com as taxas anuais de desmatamento mapeadas pelo PRODES ($r = 0,68$ a $0,97$, $P < 0,05$).

Figura 5.4 – Emissão de PM2.5 por estado Brasileiro de 2003 a 2015.



Fonte: Próprio Autor.

Os estados com os maiores registros de emissão de PM2.5 na região sudeste foram Minas Gerais e São Paulo. Minas Gerais emitiu em média $0,17$ Tg PM2.5 ano⁻¹, com maior concentração de emissões associadas às regiões do Vale do Mucuri e Jequitinhonha. Nesta região há uma expansão da atividade silvicultural uma vez que o carvão vegetal é a principal fonte de energia para produzir o aço no Brasil (LEITE et al., 2012). Enquanto as emissões em São Paulo corresponderam em média a $0,13$ Tg PM2.5 ano⁻¹. São Paulo é o maior produtor de cana-de-açúcar do Brasil, e embora seja comum durante a colheira

queimar a palhada para facilitar colheita, esta prática está diminuindo nos últimos anos com novas legislações vigentes (MATAVELI, 2014).

Piauí e Bahia foram os estados do Nordeste que apresentaram maiores taxas de emissões de PM_{2.5}, ambos contabilizaram em média 0,2 Tg PM_{2.5} ano⁻¹. A distribuição espacial das emissões nestes estados está relacionada à porção central do Piauí e na região do MATOPIBA. Nesta região, políticas públicas voltadas para a modernização agrícola aliadas à necessidade de expansão da fronteira agrícola fazem com que haja uma maior conversão da sua cobertura vegetal para estes fins. Deste modo, o fogo é utilizado para remover a vegetação natural e para o manejo das culturas, seja para queimar resíduos ou estimular a rebrota para a forragem (PIVELLO, 2011).

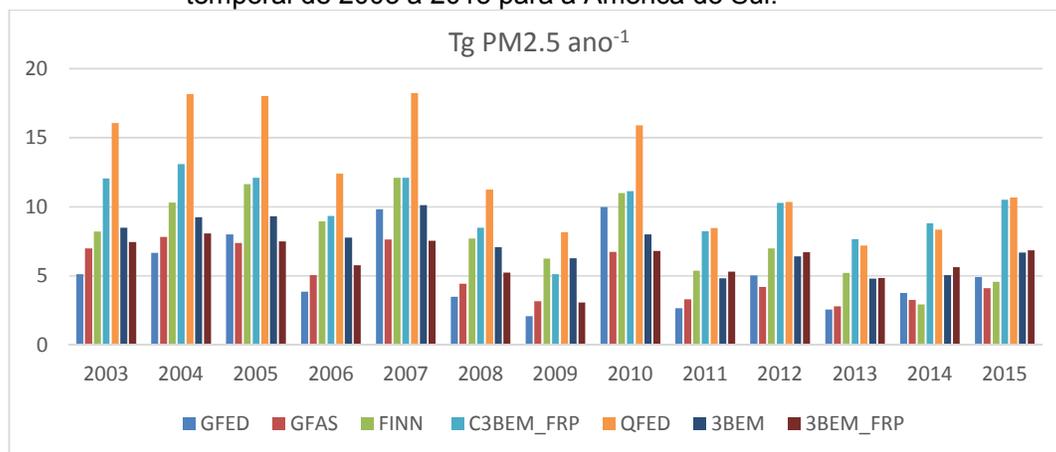
Embora o Brasil seja o país que mais contribui para o total de emissões para a América do Sul, a distribuição espacial das emissões indica uma concentração alta de PM_{2.5} principalmente no sul da Bolívia, norte da Argentina e oeste do Paraguai. A vegetação predominante nesta região é a floresta estacional decidual (85) na região do Charco, que queima em média 6 horas. Esta região é quente e seca e, assim como o Cerrado, é propensa a queimadas tanto de origem natural e antrópica. Sistemas agrícolas modernos avançaram sobre esta região e constituem uma ameaça aos ecossistemas naturais do Charco.

5.3 Comparação de Inventários

Todos os produtos de emissões retratam padrões temporais similares, com o aumento e diminuição das emissões ocorrendo nos mesmos anos (Figura 5.5). De maneira geral, todos os inventários utilizam produtos do sensor MODIS e a contagem de *pixels* de focos de calor desses produtos pode influenciar na tendência temporal das emissões. No entanto, nota-se diferenças em relação aos valores estimados de PM_{2.5} que podem ser explicadas pela metodologia adotada por estes produtos. Todos os inventários utilizam uma abordagem usando fatores de emissão extraídos da literatura para multiplicar estimativas de biomassa queimada a partir de observações de satélite: I) de FRP (GFAS, 3BEM_FRP e C3BEM_FRP); II) área queimada (GFED); III) focos de calor

(3BEM e FINN); IV) Método híbrido (QFED, que utiliza medições da espessura ótica da coluna de aerossóis).

Figura 5.5 – Comparação dos valores de PM2.5 dos inventários globais para a série temporal de 2003 a 2015 para a América do Sul.



Fonte: Próprio Autor.

O 3BEM_FRP original subestima as emissões de PM2.5 em relação ao 3BEM_FRP com o Ciclo das queimadas (C3BEM_FRP) uma vez que quando não há informações sobre a duração da queimada (apenas uma detecção), o C3BEM_FRP utiliza o tempo médio da queimada para determinada região. Esta característica do C3BEM_FRP pode ter um impacto positivo nas estimativas das emissões quando se opta por gerar as emissões utilizando somente os produtos de focos de calor do MODIS. Para a América do Sul, o MODIS pode ter até 4 aquisições diárias, o que é insuficiente para caracterizar o tempo de duração de uma queimada e, por conseguinte, subestimar as estimativas de FRE. Além disso, a cobertura de nuvens frequente na Amazônia dificulta a aquisição de dados fazendo com que a inclusão do ciclo colabore para melhorar as estimativas nesta região.

Embora o GFAS, 3BEM_FRP e o C3BEM_FRP utilizem a FRP como dado de entrada nos inventários, o GFAS possui estimativas de PM2.5 menores. Os maiores valores do 3BEM_FRP e o C3BEM_FRP em relação ao GFAS pode estar associado à utilização do GOES e, além disso, o GFAS foi concebido para

corresponder ao GFED, apresentando emissões semelhantes a este inventário. O GFED subestima em até 55% as emissões na América do Sul, principalmente as emissões resultantes de pequenas queimadas (RANDERSON et al., 2012). O GFED utiliza o produto de área queimada do MODIS (MCD64A1) que, segundo Cardozo (2014), tem boa aplicabilidade quando a queimada tem área maior de 2km², portanto com limitações para detectar pequenas queimadas.

As abordagens baseadas em FRP ou na detecção de focos de calor contribuem para diminuir as incertezas relacionadas à detecção de pequenas queimadas uma vez que até mesmo queimadas abrangendo 10⁻³ a 10⁻⁴ da área de um *pixels* podem ser detectados a partir da órbita polar ou geoestacionária (MOTA; WOOSTER, 2018).

O FINN e o 3BEM utiliza uma abordagem baseada detecção de focos de calor e pode capturar melhor a variabilidade espacial e temporal em regiões com maior ocorrência de pequenas queimadas, resultando em emissões de PM2.5 na América do Sul maiores que o GFED e GFAS, porém menores que o C3BEM_FRP. Por utilizar a detecção de focos de calor, o FINN estima o máximo de área queimada a 4,8 km² e o 3BEM em 0,22 km² para o MODIS e em 0,14km² para o GOES quando não há informações sobre o tamanho instantâneo da queimada, o que pode ocasionar diferenças entre os inventários. Diferente dos demais inventários, o FINN utiliza os produtos do MODIS LULC e VCF para identificar o tipo e densidade da vegetação queimada e a determinação do tipo de ecossistema pode variar significativamente de um produto de dados de cobertura terrestre para outro (WIEDINMYER et al., 2010).

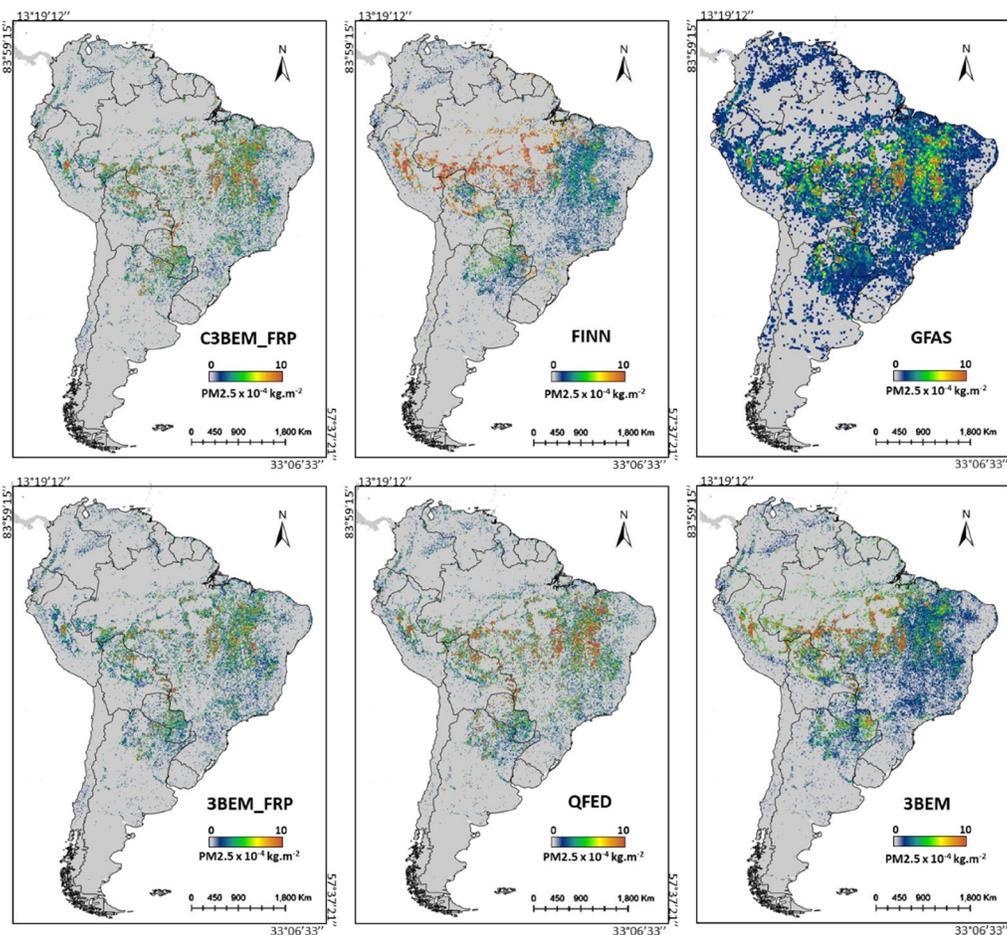
Em relação ao C3BEM_FRP, o QFED superestimou os valores de emissões de PM2.5 para a América do Sul. Os maiores valores observados no QFED podem estar relacionados ao fato que dentre os inventários analisados, o QFED é o único inventário que utiliza tanto medições de FRP como de aerossóis para estimar as emissões oriundas da queima de biomassa. Além disto, os coeficientes de emissão utilizados no QFED para melhorar a

concordância entre os valores modelados de AOT pelo GEOS e aqueles estimados por satélites podem influenciar na massa total de gases emitidos.

5.3.1 Análise espacial dos Inventários

A distribuição espacial das emissões de PM_{2.5} para setembro de 2012 quando ocorreu o experimento SAMBBA evidencia a diferença entre os inventários utilizados neste trabalho (Figura 5.6). O 3BEM_FRP apresenta uma distribuição espacial das emissões similar ao C3BEM_FRP, uma vez que ambos utilizam fatores de emissão iguais e os dados do GOES e MODIS de entrada. Embora o QFED utilize o método híbrido, a distribuição espacial das emissões de PM_{2.5} se assemelham com o do C3BEM_FRP e 3BEM_FRP.

Figura 5.6 – Distribuição espacial de PM2.5 por inventário durante setembro de 2012 para a América do Sul.



Fonte: Próprio Autor.

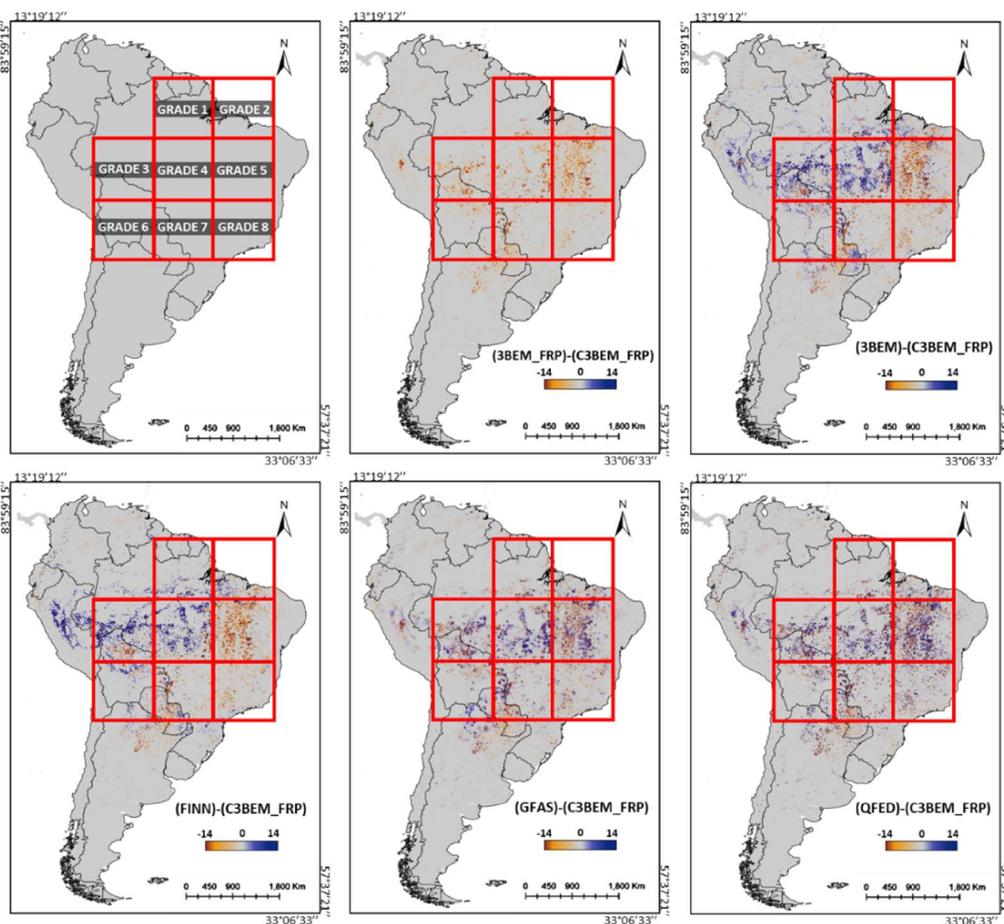
O GFAS apresenta baixos valores de emissões distribuídos no Brasil, como maior intensidade no arco do desmatamento e próximo ao Maranhão, Tocantins e Pará. O produto do GFAS é distribuído com uma resolução de $0,5^\circ$ e para realizar a comparação com os demais inventários os valores de emissão foram interpolados para $0,1^\circ$, o que faz com que aparentemente os valores de emissão deste inventário pareça maior que os demais, porém, ressalta-se que a interpolação dos dados de PM2.5 manteve a quantidade de massa estimada, não alterando seu total mensal.

O 3BEM e o FINN utilizam a abordagem de focos de calor para estimar as emissões. Ambos diferenciam dos demais inventários por apresentar os

maiores valores de emissão associados à região da Amazônia e menores para o Cerrado.

As diferenças entre o C3BEM_FRP e os inventários globais é apresentado na figura 5.7. A América do Sul foi separada em quadrículas nas quais foram verificadas as correlações entre os inventários. Em relação ao 3BEM_FRP, o C3BEM_FRP aumenta a intensidade das emissões para todas as grades analisadas, principalmente na grade 5 onde está localizado a região do MATOPIBA, onde o fogo é comumente empregado para remover a vegetação natural. O aumento das emissões para o C3BEM_FRP é esperado uma vez que o ciclo diurno das queimadas fornece informação para integrar a FRP quando há ausência de dados de satélite nas horas subsequentes ao início da queimada.

Figura 5.7 - Diferença entre inventários de emissão de PM2.5 para a América do Sul.



Fonte: Próprio Autor.

Tanto o 3BEM como o FINN superestimam as emissões na Amazônia e subestimam no cerrado em relação ao C3BEM_FRP. Durante o experimento do SAMBBA, as maiores cargas de aerossóis associados à queima de biomassa foram observadas no arco do desmatamento e também na região de expansão de soja no Cerrado Brasileiro. As emissões adquiridas durante o SAMBBA indicam que os inventários baseados na contagem de focos de calor e área queimada geralmente subestimam o carregamento de fumaça da região central para a região leste da Floresta Amazônica (perto dos estados de Mato Grosso e Tocantins) (PEREIRA et al., 2016). Deste modo, o aumento dos valores de emissão de PM2.5 do C3BEM_FRP no cerrado em relação ao 3BEM e FINN indicam uma melhor concordância das estimativas utilizando o ciclo, algo detectado no experimento SAMBBA.

O GFAS superestima as emissões em relação ao C3BEM_FRP no arco do desmatamento, enquanto que na grade 5, localizada no cerrado, as emissões são subestimadas próximo ao Tocantins e Maranhão. As emissões de PM2.5 do inventário QFED, de maneira geral, apresentam valores maiores em relação ao C3BEM_FRP, com exceção em alguns pontos da grade 5. A comparação espacial do QFEDxC3BEM_FRP, indica, em muitos casos, uma variação das emissões entre *pixels* vizinhos, indicando que o QFED tende a compensar a ausência de informações a partir da distribuição do total emitido entre os dados detectados (Figura 5.5).

O C3BEM_FRP tem maiores estimativas de emissão na grade 7, próximo ao Paraguai, em relação aos demais inventários. Nesta região, as queimadas duram em média 6,3 horas e as queimadas são comumente utilizadas para abrir espaço para a criação de gados e agricultura. Além disto, o C3BEM_FRP aumenta as estimativas associadas à queima da cana de açúcar em São Paulo na grade 8 em relação ao FINN, 3BEM_FRP e 3BEM.

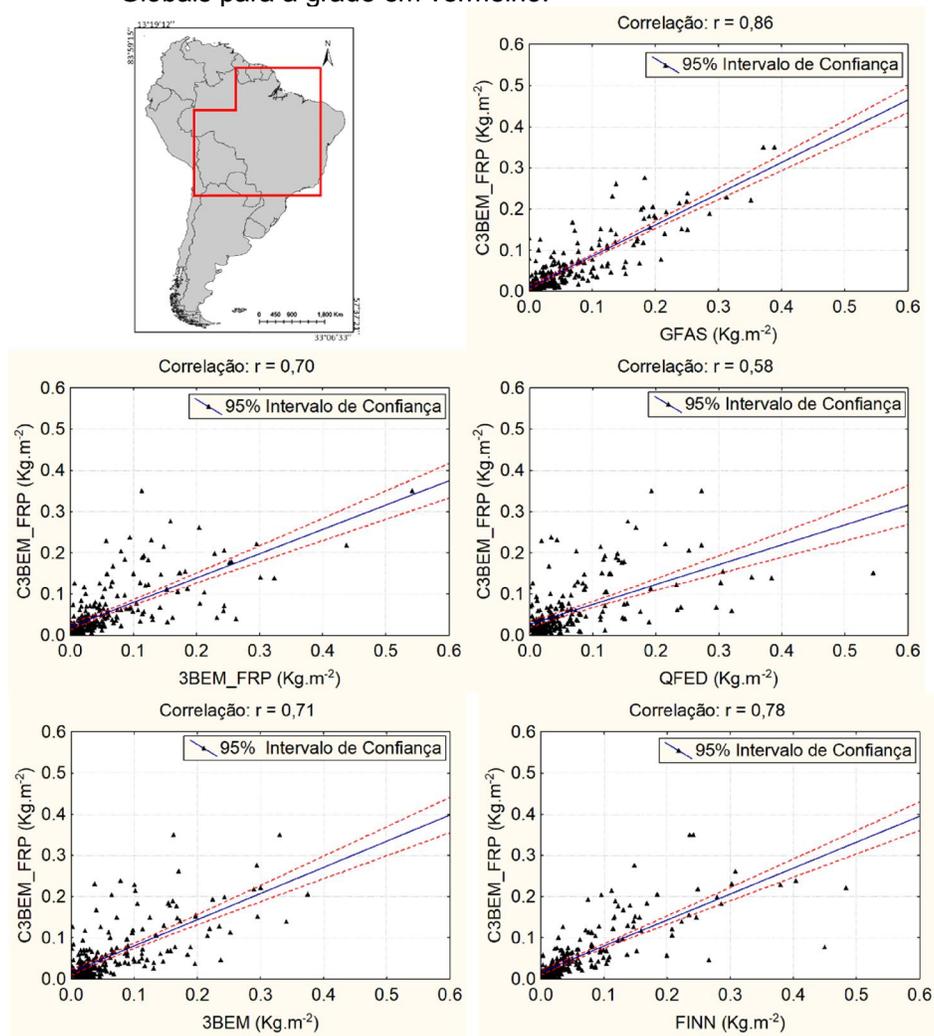
A correlação para as grades descritas na figura 5.7 estão na Tabela 6.1. Para todas as grades, o FINN apresentou correlação positiva significativa, com a melhor correlação associada à grade 4. O GFAS apresenta os melhores valores de correlação com o C3BEM_FRP, exceto para as grades 2 e 8. Além do GFAS, o 3BEM_FRP, QFED e 3BEM não apresentaram correlação significativa na grade 8. Essa grade engloba a região sudeste, onde as emissões estão associadas principalmente à queima da palhada da cana de açúcar e ao norte de Minas Gerais, na qual a queimada está associada à expansão da atividade silvicultural.

Tabela 5.1 – Coeficiente de correlação resultante das regressões entre o C3BEM_FRP e os Inventários Globais para as grades demonstradas na Figura 5.7. As regressões não significativas de acordo com o Teste t de Student ($p > 0,05$) estão marcadas de vermelho.

	FINN	GFAS	3BEM_FRP	QFED	3BEM
G1	0,61	0,86	0,67	0,39	0,36
G2	0,49	0,33	0,43	0,13	0,40
G3	0,77	0,84	0,66	0,24	0,65
G4	0,80	0,85	0,63	0,45	0,65
G5	0,54	0,83	0,34	0,41	0,56
G6	0,56	0,41	0,45	-0,12	0,42
G7	0,70	0,53	0,58	0,34	0,35
G8	0,67	0,35	0,19	0,14	0,12

Embora o C3BEM_FRP apresente diferenças significativas quando comparados por região aos inventários (Tabela 5.1), ao analisar para uma grade (Figura 5.8), há uma correlação linear significativa. O maior valor de correlação é encontrado entre o C3BEM_FRP e o GFAS que pode indicar que inventários que utilizam a mesma abordagem para estimar emissões tendem a concordar espacialmente. O C3BEM_FRP apresenta uma correlação de 0,70 com o 3BEM_FRP e de 0,71 com o 3BEM. A menor correlação encontrada na análise é entre o C3BEM_FRP e o QFED, que mesmo apresentando uma distribuição espacial similar ao C3BEM-FRP possui valores de emissão superiores (Figura 5.5). O C3BEM_FRP apresentou uma correlação de 0,78 em relação ao FINN, entretanto, ao analisar os valores de correlação encontrados na Tabela 5.1, apenas a grade 4 apresenta correlação superior a 0,78.

Figura 5.8 - Coeficiente de correlação linear entre o C3BEM_FRP e os Inventários Globais para a grade em vermelho.



Fonte: Próprio Autor.

6 CONCLUSÃO

O processo de queima de biomassa modifica o albedo da superfície, o balanço de radiação e a composição química da atmosfera e ainda pode ter impactos negativos nos ciclos hidrológicos e biogeoquímicos. As emissões resultantes da queima de biomassa podem controlar a variabilidade e aumentar a concentração de gases traços e aerossóis, especialmente nos trópicos. Por outro lado, as mudanças climáticas podem gerar condições de secas extremas, que resultam no aumento da frequência e severidade das queimadas.

Deste modo, a previsão precisa da variabilidade espacial e temporal das emissões resultantes da queima de biomassa é crucial para a compreensão do sistema terrestre, bem como para o entendimento do impacto da mudança do uso da terra na qualidade do ar e clima. A maioria dos inventários de queima de biomassa disponíveis atualmente baseiam-se na contagem de pixels de calor, estimativa de área queimada ou FRP derivados de sensores remotos. Os métodos baseados na FRP apresentam vantagem em relação aos demais uma vez que a FRP refere-se diretamente à taxa de consumo de combustível, que é proporcional às emissões de fogo. Além disso, a eficiência de queima e a presença de umidade no solo e na vegetação influenciam diretamente a energia irradiada pelas queimadas, sem a necessidade de considerar esses parâmetros separadamente.

Neste trabalho, foi desenvolvida uma metodologia acoplada ao modelo 3BEM_FRP que utiliza informações do tempo de duração das queimadas para diferentes tipos de uso e cobertura da terra para biomas da América do Sul com a finalidade de fornecer informações para a estimativa da FRE quando houver ausência de dados de FRP. O tempo médio de duração das queimadas para cada classe de uso e cobertura da terra do IGBP varia de acordo com o bioma no qual estão inseridas. Cerca de 61% das queimadas na América do Sul duram em média entre 6 e 7 horas, enquanto que 17% duram em média entre 7 e 8 horas. Enquanto que aproximadamente 12% duram menos que 5 horas e 9% duram mais que 9 horas.

As informações do tempo médio de duração das queimadas para cada classe de uso de cobertura da terra do IGBP são inseridas nos mapas do produto MCD12Q1 de 2001 a 2013. O último ano série histórica do produto MCD12Q1 é 2013, assim, o mapa do tempo médio de duração das queimadas de 2013 serve como referência para gerar inventários após esse ano, o que é uma limitação do método e pode constituir uma fonte de incerteza.

As emissões geradas pelo 3BEM_FRP após a inclusão do ciclo possui padrões temporais similares com os inventários globais GFAS, GFED, QFED e FINN. As emissões obtidas no C3BEM_FRP são bem correlacionadas com o GFAS indicando que inventários que utilizam a mesma abordagem tendem a concordar espacialmente. Além disto, o C3BEM_FRP apresenta maiores valores de emissão no Cerrado em relação ao 3BEM e ao FINN indicando uma melhor concordância das estimativas utilizando o ciclo com o experimento SAMBBA. O C3BEM_FRP aumentou em média 60% as emissões do 3BEM_FRP. Os maiores registros de emissão de PM_{2.5} gerados pelo C3BEM_FRP estão associados ao arco do desmatamento, localizado na região limítrofe entre o Cerrado e a Amazônia.

O modelo 3BEM_FRP considera que a queimada inicia uma hora e meia antes do primeiro foco e finaliza uma hora e meia após o último foco e para estudos futuros e sugere-se uma análise sobre o impacto desta inferência nas estimativas das emissões. Também sugere-se a realização de uma análise do impacto da resolução da grade na integração da FRP e consequentemente nas estimativas das emissões. Além disto, espera-se utilizar o 3BEM_FRP ciclo para assimilar as emissões de gases traços e aerossóis no modelo CCATT-BRAMS.

Por fim, pode-se concluir que o modelo C3BEM_FRP apresentou resultados consistentes com os inventários globais e sua maior vantagem é a viabilizar as estimativas de emissão quando há falta de informações do ciclo diurno da FRP.

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

AKAGI, S. K.; YOKELSON, R. J. WIEDINMYER, C.; ALVARADO, M. J.; REID, J. S.; KARL, T.; CROUNSE, J. D.; WENNERBERG, P. O. Emission factors for open and domestic biomass burning for use in atmospheric models.

Atmospheric Chemistry and Physics, v. 11, 2011.

ALCAÑIZ, M.; OUTEIRO, L.; FRANCOS, M.; ÚBEDA, X. Effects of prescribed fires on soil properties: a review. **Science of the total environment**, v.

613/614, p. 944–957, 2018.

ANDREAE, M. O.; MERLET, P. Emission of trace gases and aerosols from biomass burnin. **Global Biogeochemistry**, v. 15, p. 955–966, 2001.

ÁNGEL, S. P.; ACEVEDO, J. A. A. Evaluation of the causes of error in the mcd45 burned-area product for the savannas of northern South America.

DYNA, v. 79, n. 176, p.35-44, 2012.

BLECK, R.; BENJAMIN, S.; LEE, J.; MACDONALD, A. E. On the use of an adaptive, hybrid-isentropic vertical coordinate in global atmospheric modeling.

Monthly Weather Review, v. 138, n. 6, p. 2188–2210, 2010.

BOND, W. J.; KEELEY, J. E. Fire as a global “herbivore”: the ecology and evolution of flammable ecosystems. **Trends in Ecology and Evolution**, v. 20, n. 7, p. 387–394, 2005.

BOWMAN, D. M. J. S.; BALCH, J. K.; ARTAXO, P.; BOND, W. J.; CARLSON, J. M.; COCHRANE, M. A.; ANTONIO, C. M. D.; DEFRIES, R. S.; DOYLE, J. C.; HARRISON, S. P.; JOHNSTON, F. H.; KEELEY, J. E.; KRAWCHUK, M. A. Fire in the Earth system. **Science**, v. 481, n. 2009, p. 481–485, 2010.

CARDOZO, F. D. S. **Estimativas de áreas queimadas para o estado de Rondônia e suas implicações na modelagem do balanço de radiação**. 2014. 133p. Tese (Doutorado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2014.

CARMENTA, R.; BLACKBURN, G. A.; DAVIES, G.; DE SASSI, C.; LIMA, A.; PARRY, L.; TYCH, W.; BARLOW, J. Does the establishment of sustainable use reserves affect fire management in the humid tropics. **Plos One**, v. 11, n. 2, p. 1–19, 2016.

CHEN, Y.; MORTON, D. C.; JIN, Y.; COLLATZ, G. J.; KASIBHATLA, P. S.; VAN DER WERF, G. R.; DEFRIES, R. S.; RANDERSON, J. T. Long-term

trends and interannual variability of forest, savanna and agricultural fires in south america. **Carbon Management**, v. 4, n. 6, p. 617–638, 2013.

COCHRANE, M. A. **Tropical fire ecology: climate change, land use and ecosystem dynamics**. Chichester, UK: Praxis Publishing, 2009.

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

DARMENOV, A. S.; SILVA, A. **The Quick Fire Emissions Dataset (QFED)**: documentation of versions 2 . 1 , 2 . 2 and 2 . 4. Washington: NASA, 2013. (Technical report series on Global Modeling and Data Assimilation, 32).

FANIN, T.; VAN DER WERF, G. R. Relationships between burned area, forest cover loss, and land cover change in the brazilian amazon based on satellite data. **Biogeosciences**, v. 12, n. 20, p. 6033–6043, 2015.

FREITAS, S. R.; LONGO, K. M.; ALONSO, M. F.; PIRRE, M.; MARECAL, V.; GRELL, G.; STOCKLER, R.; MELLO, R. F.; SÁNCHEZ GÁCITA, M. Prep-chem-src - 1.0: a preprocessor of trace gas and aerosol emission fields for regional and global atmospheric chemistry models. **Geoscientific Model Development**, v. 4, n. 2, p. 419–433, 2011.

FREITAS, S. R.; LONGO, K. M.; DIAS, M. A. F. S.; DIAS, P. L. S. Emissões de queimadas em ecossistemas da américa do sul. **Estudos Avançados**, v. 19, n. 53, p. 167–185, 2005.

FREITAS, S. R.; LONGO, K. M.; SILVA DIAS, M. A. F.; CHATFIELD, R.; SILVA DIAS, P.; ARTAXO, P.; ANDREAE, M. O.; GRELL, G.; RODRIGUES, L. F.; FAZENDA, A.; PANETTA, J. The coupled aerosol and tracer transport model to the brazilian developments on the regional atmospheric modeling system (catt-brams) – part 1: model description and evaluation. **Atmospheric Chemistry and Physics**, v. 9, n. 8, p. 2843–2861, 2009.

FREITAS, S. R. et al. The brazilian developments on the regional atmospheric modeling system (brams 5.2): an integrated environmental model tuned for tropical areas. **Geoscientific Model Development**, v. 10, n. 1, p. 189–222, 2017.

FRIEDL, M. A.; MCIVER, D. K.; HODGES, J. C. F.; ZHANG, X.; MUCHONEY, D.; STRAHLER, A. H.; WOODCOCK, C. E.; GOPAL, S.; SCHNEIDER, A.; COOPER, A.; BACCINI, A.; GAO, F.; SCHAAF, C. Global land cover mapping from modis: algorithms and early results. **Remote Sensing of Environment**, v. 83, p. 287–302, 2002.

GANGULY, S.; FRIEDL, M. A.; TAN, B.; ZHANG, X.; VERMA, M. Land surface phenology from modis: characterization of the collection 5 global land cover dynamics product. **Remote Sensing of Environment**, v. 114, n. 8, p. 1805–1816, 2010.

GIGLIO, L.; RANDERSON, J. T.; VAN DER WERF, G. R. Analysis of daily, monthly, and annual burned area using the fourth-generation global fire emissions database (GFED4). **Journal of Geophysical Research: Biogeosciences**, v. 118, n. 1, p. 317–328, 2013.

GIGLIO, L.; SCHROEDER, W.; JUSTICE, C. O. The collection 6 modis active fire detection algorithm and fire products. **Remote Sensing of Environment**, v. 178, p. 31–41, 2016.

GIGLIO, L.; VAN DER WERF, G. R. ; RANDERSON, J. T. ; COLLATZ, G. J. ; KASIBHATLA, P. Global estimation of burned area using modis active fire observations. **Atmospheric Chemistry and Physics Discussions**, v. 5, n. 6, p. 957–974, 2006.

GILMAN, J. B.; LERNER, B. M.; KUSTER, W. C.; GOLDAN, P. D.; WARNEKE, C.; VERES, P. R.; ROBERTS, J. M.; DE GOUW, J. A.; BURLING, I. R.; YOKELSON, R. J. Biomass burning emissions and potential air quality impacts of volatile organic compounds and other trace gases from fuels common in the us. **Atmospheric Chemistry and Physics**, v. 15, n. 24, p. 13915–13938, 2015.

GRELL, G. A.; PECKHAM, S. E.; SCHMITZ, R.; MCKEEN, S. A.; FROST, G.; SKAMAROCK, W. C.; EDER, B. Fully coupled “online” chemistry within the wrf model. **Atmospheric Environment**, v. 39, n. 37, p. 6957–6975, 2005.

GRAY, J.; SULLA-MENASHE, D.; FRIEDL, M. A. User Guide to Collection 6 Modis Land Cover Dynamics (MCD12Q2) product. p. 1–18, 2018.

HEIL, A; KAISER, J. W.; VAN DER WERF, G. R.; WOOSTER, M. J.; SCHULTZ, M. G.; VAN DER GON, H. D. **Assessment of the real-time fire emissions (GFASv0) by MACC**. Berkshire: ECMWF, 2010. (ECMWF Technical memorandum, 628).

HEILMAN, W. E.; LIU, Y.; URBANSKI, S.; KOVALEV, V.; MICKLER, R. Wildland fire emissions, carbon, and climate: plume rise, atmospheric transport, and chemistry processes. **Forest Ecology and Management**, v. 317, p. 70–79, 2014.

HOELZEMANN, J. J.; SCHULTZ, M. G.; BRASSEUR, G. P.; GRANIER, C.; SIMON, M. Global wildland fire emission model (GWEM): evaluating the use of global area burnt satellite data. **Journal of Geophysics**, v. 109, 2004.

HOUGHTON, R. A.; LAWRENCE, K. T.; HACKLER, J. L.; BROWN, S. The spatial distribution of forest biomass in the Brazilian Amazon: a comparison of estimates. **Global Change Biology**, v. 7, n. 7, p. 731–746, 2001.

ICHOKU, C.; ELLISON, L. Global top-down smoke-aerosol emissions estimation using satellite fire radiative power measurements. **Atmospheric Chemistry and Physics**, v. 14, n. 13, p. 6643–6667, 2014.

ICHOKU, C.; ELLISON, L. T.; YUE, Y.; WANG, J.; KAISER, J. W. Fire and smoke remote sensing and modeling uncertainties: case studies in northern sub-Saharan Africa. In: RILEY, K.; WEBLEY, P.; THOMPSON, M. (Eds.). **Natural hazard uncertainty assessment: modeling and decision support**. [S.l.]: AGU, 2016. p. 215–230.

ICHOKU, C.; GIGLIO, L.; WOOSTER, M. J.; REMER, L. A. Global characterization of biomass-burning patterns using satellite measurements of fire radiative energy. **Remote Sensing of Environment**, v. 112, n. 6, p. 2950–2962, 2008.

ICHOKU, C.; KAHN, R.; CHIN, M. Satellite contributions to the quantitative characterization of biomass burning for climate modeling. **Atmospheric Research**, v. 111, p. 1–28, 2012.

KAISER, J. W.; HEIL, A.; ANDREAE, M. O.; BENEDETTI, A.; CHUBAROVA, N.; JONES, L.; MORCRETTE, J. J.; RAZINGER, M.; SCHULTZ, M. G.; SUTTIE, M.; VAN DER WERF, G. R. Biomass burning emissions estimated with a global fire assimilation system based on observed fire radiative power. **Biogeosciences**, v. 9, n. 1, p. 527–554, 2012.

KOLTUNOV, A.; USTIN, S. L.; PRINS, E. M. On timeliness and accuracy of wildfire detection by the goes wf-abba algorithm over California during the 2006 fire season. **Remote Sensing of Environment**, v. 127, p. 194–209, 2012.

LE QUÉRÉ, C. et al. Global carbon budget 2015. **Earth System Science Data**, v. 7, n. 2, p. 349–396, 2015.

LEITE, M. E.; ALMEIDA, J. W. L.; SILVA, R. F. Análise espaço-temporal do eucalipto no norte de Minas Gerais nos anos de 1986, 1996 e 2010. **Geotextos**, v. 8, n. 2, p. 59–74, 2012.

LIMA, A.; SILVA, T. S. F.; ARAGÃO, L. E. O. E. C.; FEITAS, R. M.; ADAMI, M.; FORMAGGIO, A. R.; SHIMABUKURO, Y. E. Land use and land cover changes determine the spatial relationship between fire and deforestation in the Brazilian Amazon. **Applied Geography**, v. 34, p. 239–246, 2012.

- LIU, Y.; GOODRICK, S.; HEILMAN, W. Wildland fire emissions, carbon, and climate: wildfire-climate interactions. **Forest Ecology and Management**, v. 317, p. 80–96, 2014.
- LONGO, K. M.; FREITAS, S. R.; ANDREAE, M. O.; SETZER, A.; PRINS, E.; ARTAXO, P. The coupled aerosol and tracer transport model to the brazilian developments on the regional atmospheric modeling system (catt-brams)-part 2: model sensitivity to the biomass burning inventories. **Atmospheric Chemistry and Physics**, v. 10, n. 13, p. 5785–5795, 2010.
- LOVELAND, T. R.; BELWARD, A. S. The igbp-dis global 1km land cover data set, discover: first results. **International Journal of Remote Sensing**, v. 18, n. 15, p. 3289–3295, 1997.
- MATAVELI, G. A. V. **Análise da influência do ângulo de visada e do background na estimativa da potência radiativa do fogo**. 2014. 101p. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2014.
- MOTA, B.; WOOSTER, M. J. A new top-down approach for directly estimating biomass burning emissions and fuel consumption rates and totals from geostationary satellite fire radiative power (FRP). **Remote Sensing of Environment**, v. 206, p. 45–62, 2018.
- OLSON, D. M.; DINERSTEIN, E.; WIKRAMANAYAKE, E. D.; BURGESS, N. D.; POWELL, G. V. N.; UNDERWOOD, E. C.; D'AMICO, J. A.; ITOUA, I.; STRAND, H. E.; MORRISON, J. C.; LOUCKS, C. J.; ALLNUTT, T. F.; RICKETTS, T. H.; KURA, Y.; LAMOREUX, J. F.; WETTENGEL, W. W.; HEDAO, P.; KASSEM, K. R. Terrestrial ecoregions of the world: a new map of life on Earth. **Bioscience**, v. 51, n. 11, p. 933, 2001.
- OLSON, J. S.; WATTS, J. A.; ALLISON, L. J. **Majorworld ecosystem complexes ranked by carbon in live vegetation: a database (revised november 2000)**. Oak Ridge, Tennessee (USA): Oak Ridge National Laboratoy, 2000.
- PEREIRA, G. **Estimativa e assimilação das emissões de gases traços e aerossóis de queimadas em modelos de química atmosférica**. 2013. 125p. Tese (Doutorado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2013.
- PEREIRA, G.; CARDOZO, F. S.; SILVA, F. B.; MORAES, E. C.; FERREIRA, N. J.; FREITAS, S. R.; SHIMABUKURO, Y. E.; BREUNIG, F. M.; VIANA, D. R. Determinação e modelagem da taxa de consumo de biomassa queimada. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 27, n. 1, p. 13–22, 2012.

- PEREIRA, G.; FREITAS, S. R.; MORAES, E. C.; FERREIRA, N. J.; SHIMABUKURO, Y. E.; RAO, V. B.; LONGO, K. M. Estimating trace gas and aerosol emissions over south america: relationship between fire radiative energy released and aerosol optical depth observations. **Atmospheric Environment**, v. 43, n. 40, p. 6388–6397, 2009.
- PEREIRA, G.; SIQUEIRA, R.; ROSÁRIO, N. E.; LONGO, K. L.; FREITAS, S. R.; CARDOZO, F. S.; KAISER, J. W.; WOOSTER, M. J. Assessment of fire emission inventories during the south american biomass burning analysis (sambba) experiment. **Atmospheric Chemistry and Physics**, v. 16, n. 11, p. 6961–6975, 2016.
- PIVELLO, V. R. The use of fire in the cerrado and amazonian rainforests of brazil: past and present. **Fire Ecology**, v. 7, n. 1, p. 24–39, 2011.
- POWER, M. J.; WHITNEY, B. S.; POWER, M. J.; WHITNEY, B. S.; MAYLE, F. E.; NEVES, D. M.; BOER, E. J. DE. Fire, climate and vegetation linkages in the bolivian chiquitano seasonally dry tropical. **Philosophical Transactions B**. 2016.
- RANDERSON, J. T.; CHEN, Y.; VAN DER WERF, G. R.; ROGERS, B. M.; MORTON, D. C. Global burned area and biomass burning emissions from small fires. **Journal of Geophysical Research: Biogeosciences**, v. 117, n. 4, 2012.
- REBOITA, M. S.; GAN, M. A.; ROCHA, R. P.; AMBRIZZI, T. Regimes de precipitação na América do Sul: uma revisão bibliográfica. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 25, n. 2, p. 185–204, 2010.
- REDDINGTON, C. L.; BUTT, E. W.; RIDLEY, D. A.; ARTAXO, P.; MORGAN, W. T.; COE, H.; SPRACKLEN, D. V. Air quality and human health improvements from reductions in deforestation-related fire in brazil. **Nature Geoscience**, v. 8, n. 10, p. 768–771, 2015.
- REID, J. S.; HYER, E. J.; PRINS, E. M.; WESTPHAL, D. L.; ZHANG, J.; WANG, J.; CHRISTOPHER, S. A.; CURTIS, C. A.; SCHMIDT, C. C.; ELEUTERIO, D. P.; RICHARDSON, K. A.; HOFFMAN, J. P. Global monitoring and forecasting of biomass-burning smoke: description of and lessons from the fire locating and modeling of burning emissions (flambe) program. **IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing**, v. 2, n. 3, p. 144–162, 2009.
- SCHEPERS, L.; HAEST, B.; VERAVERBEKE, S.; SPANHOVE, T.; BORRE, J. VANDEN; GOOSSENS, R. Burned area detection and burn severity assessment of a heathland fire in belgium using airborne imaging spectroscopy (apex). **Remote Sensing**, v. 6, n. 3, p. 1803–1826, 2014.

SCHOLES, R. J.; ARCHIBALD, S.; VON MALTITZ, G. Emissions from fire in sub-Saharan Africa: the magnitude of sources, their variability and uncertainty. **Global Environment**, v. 15, p. 53–63, 2011.

SEILER, W.; CRUTZEN, P. J. Estimates of gross and net fluxes of carbon between the biosphere and the atmosphere from biomass burning. **Climatic Change**, v. 2, n. 3, p. 207–247, 1980.

SETZER, A. W.; PEREIRA, M. C.; PEREIRA, A. C. Satellite studies of biomass burning in Amazonia: some practical aspects. **Remote Sensing Reviews**, v. 10, n. 1–3, p. 91–103, 1994.

SOMMERS, W. T.; LOEHMAN, R. A.; HARDY, C. C. Wildland fire emissions, carbon, and climate: science overview and knowledge needs. **Forest Ecology and Management**, v. 317, p. 1–8, 2014.

UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY. Modis land cover product user guide: user guide for the modis land cover type product (mcd12q1). 2013.

Disponível em:

<https://lpdaac.usgs.gov/sites/default/files/public/modis/docs/MCD12Q1_UserGuide_07302013.pdf>.

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 1997-2015. **Earth System Science Data Discussions**, p. 1–43, 2017.

VAN LEEUWEN, T. T. et al. Biomass burning fuel consumption rates: a field measurement database. **Biogeosciences**, v. 11, n. 24, p. 7305–7329, 2014.

VEBLEN, T. T.; HOLZ, A.; PARITSIS, J.; RAFFAELE, E.; KITZBERGER, T.; BLACKHALL, M. Adapting to global environmental change in patagonia: what role for disturbance ecology? **Austral ecology**, v. 36, n. 8, p. 891–903, 2011.

WARD, E.; SUSOTT, R.; KAUFMAN, J.; BABBIT, R.; CUMMINGS, D.; DIAS, B.; HOLBEN, B.; KAUFMAN, Y. RASMUSSEN, R.; SETZER, A. Smoke and fire characteristics for cerrado and deforestation burns in Brazil: base-b experiment. **Journal of Geophysics**, v. 97, n. 13, p. 14601–14619, 1992.

WIEDINMYER, C.; AKAGI, S. K.; YOKELSON, R. J.; EMMONS, L. K.; AL-SAAD, J. A.; ORLANDO, J. J.; SOJA, A. J. The fire inventory from ncar (FINN): a high resolution global model to estimate the emissions from open burning. **Geoscientific Model Development Discussions**, v. 3, n. 4, p. 2439–2476, 2010.

WOOSTER, M. J. Small-scale experimental testing of fire radiative energy for quantifying mass combusted in natural vegetation fires. **Geophysical Research Letters**, v. 29, n. 21, p. 21–24, 2002.

WOOSTER, M. J.; ROBERTS, G.; PERRY, G. L. W.; KAUFMAN, Y. J. Retrieval of biomass combustion rates and totals from fire radiative power observations: frp derivation and calibration relationships between biomass consumption and fire radiative energy release. **Journal of Geophysical Research Atmospheres**, v. 110, n. 24, p. 1–24, 2005.

WOOSTER, M. J.; ZHUKOV, B.; OERTEL, D. Fire radiative energy for quantitative study of biomass burning: derivation from the bird experimental satellite and comparison to modis fire products. **Remote Sensing of Environment**, v. 86, n. 1, p. 83–107, 2003.

XU, W.; WOOSTER, M. J.; ROBERTS, G.; FREEBORN, P. New goes imager algorithms for cloud and active fire detection and fire radiative power assessment across north, South and Central America. **Remote Sensing of Environment**, v. 114, n. 9, p. 1876–1895, 2010.

YOKELSON, R. J. et al. Coupling field and laboratory measurements to estimate the emission factors of identified and unidentified trace gases for prescribed fires. **Atmospheric Chemistry and Physics**, v. 13, n. 1, p. 89–116, 2013.

ANEXO A

Tabela A.1 – Descrição dos biomas da América do Sul propostos pelo IBGE e Olson et al. (2001) para o Brasil e demais países, respectivamente.

Floresta ombrófila tropical e subtropical úmida	Caracterizados por baixa variabilidade na temperatura anual e altos níveis de precipitação (>2000 mm)	A composição florestal é dominada por espécies de árvores semi-perenes e perenes. Solos ácidos e pobres em nutrientes. Possui uma das maiores diversidades de espécies terrestres
Savana Estépica	Altas temperaturas durante o ano e alta variabilidade na precipitação interanual	Árvores de folha caducifólias. Na estação seca, as árvores perdem suas folhas durante a estação seca e, como consequência, há o desenvolvimento de vegetação rasteira
Floresta temperada	Ampla variação de temperatura e precipitação	A floresta tem quatro camadas: um dossel, árvores maduras mais baixas, arbustos e gramíneas e outras plantas herbáceas
Savanas	Temperatura tropical com precipitação variando de 900-1500 mm por ano	As gramíneas dominam a composição das espécies deste bioma, com vegetação arbórea espaçada. São conhecidos pela complexidade dos habitats e pelos níveis excepcionalmente elevados de endemismo e diversidade
Gramínea temperada, savana e vegetação arbustiva	Clima subtropical frio, com as quatro estações do ano bem definidas.	Gramíneas dominam a paisagem, geralmente desprovida de vegetação arbórea (exceto nas zonas ripárias)
Savana Pantanosa	Clima tropical continental com chuvas concentradas no verão e estiagem no inverno	Plantas e animais adaptados aos regimes hidrológicos únicos, com o alagamento das planícies durante o inverno. Nestas regiões podem ser encontradas grandes diversidades de aves aquáticas migratórias.
Campos de altitude	Clima tropical, subtropical e temperado	Este tipo de habitat inclui arbustos e gramíneas adaptadas a condições de baixas temperaturas, alta umidade e intensa luz solar
Floresta mediterrânea, savana lenhosa e arbustos	Verões quente e secos e invernos úmidos	Animais e plantas adaptados aos verões quentes com pouca chuva

(Continua)

Tabela A.1 – Conclusão

Manguezais	Sujeito ao regime de marés	Ecosistema costeiro, de transição entre os ambientes terrestre e marinho, característico de regiões tropicais e subtropicais, sujeito ao regime das marés. Os manguezais possuem solos salgados e encharcados abrigam muitas espécies de animais aquáticos.
Deserto	Temperaturas extremas e precipitação anuais menor que 250 mm	Sua vegetação é constituída por gramíneas e pequenos arbustos espaçados. Estas plantas evoluíram para minimizar a perda de água. A biodiversidade animal é igualmente bem adaptada, composta predominantemente por roedores, por répteis e por insetos
Mata Atlântica	O clima possui ampla variabilidade devido sua extensão ao longo da costa brasileira	Predominam as florestas estacionais semi-decíduais e as florestas ombrófilas densas e mistas (com araucária)
Caatinga	O clima apresenta longa estação seca e irregularidade pluviométrica, com precipitação anual média entre 400 e 600 mm	Predominam savanas estépicas

ANEXO B

Tabela B.1 – O tempo médio de duração das queimadas para as classes do produto MCD12Q1 reclassificado Figuras 4.2 4.3 e 4.4.

CLASSE	HORA	CLASSE	HORA	CLASSE	HORA
21	7,42	82	5,75	148	6,62
22	7,48	83	6,48	149	9,09
23	6,07	84	5,45	151	5,72
24	7,25	85	6,90	157	3,83
25	7,10	86	6,11	163	5,12
26	6,47	87	6,10	166	4,27
27	6,14	88	5,91	167	7,87
28	7,29	89	6,29	169	6,46
29	6,42	90	6,31	171	6,10
30	6,39	91	7,13	173	6,44
31	6,75	92	6,21	174	6,06
32	6,51	93	6,83	175	5,00
33	6,73	94	5,95	181	6,09
34	5,22	95	6,88	183	5,30
35	6,07	97	5,59	185	6,74
37	8,37	101	8,41	186	4,34
41	6,92	103	8,22	187	5,84
43	6,77	105	5,29	188	4,62
45	7,30	107	8,37	189	5,51
46	6,61	108	8,53	190	4,70
47	5,72	109	7,04	191	4,63
48	6,98	110	5,42	193	4,16
49	6,95	111	6,94	194	4,71
50	6,28	112	6,76	195	4,76
51	6,24	113	6,64	197	3,96
52	7,19	114	8,90	201	7,82
53	7,03	115	5,90	203	6,93
54	6,22	121	6,28	205	10,50
55	6,19	122	7,22	212	8,77
57	6,38	123	7,44	213	8,78

(Continua)

Tabela B.1 – Conclusão

CLASSE	HORA	CLASSE	HORA	CLASSE	HORA
61	8,95	124	6,96	215	7,33
62	5,82	125	7,26	221	4,75
63	7,61	126	7,24	223	5,96
65	7,03	127	6,58	225	5,68
66	6,57	129	7,29	226	5,81
67	9,72	130	6,77	228	5,03
68	6,60	131	5,90	229	6,13
69	7,42	132	7,69	230	5,89
71	9,02	133	5,26	231	6,35
73	5,56	134	3,75	232	6,11
75	6,03	135	7,55	233	5,30
77	6,55	143	11,17	234	5,68
81	6,39	147	8,58	235	5,62

ANEXO C

Tabela C.1 – Porcentagem de emissão anual de PM2.5 para os países da América do Sul.

PAÍSES AMÉRICA DO SUL	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
Guiana Francesa	0.03	0.03	0.04	0.04	0.03	0.07	0.10	0.06	0.05	0.11	0.08	0.05	0.06
Guiana	0.27	0.12	0.13	0.11	0.08	0.09	0.32	0.13	0.22	0.36	0.30	0.42	0.46
Suriname	0.15	0.06	0.05	0.08	0.04	0.11	0.18	0.06	0.10	0.16	0.14	0.09	0.13
Venezuela	5.61	3.32	3.94	4.70	4.41	5.04	7.56	4.34	5.92	5.82	10.20	10.56	7.92
Argentina	14.63	13.43	9.77	15.61	10.65	20.04	18.36	9.23	14.24	10.62	13.65	7.11	5.51
Bolívia	5.61	8.91	8.58	8.42	8.49	9.99	7.56	16.77	13.52	7.36	6.46	6.22	6.87
Brasil	59.45	62.66	65.69	57.71	61.63	50.49	49.58	59.39	50.11	62.45	51.90	62.98	69.48
Chile	0.56	0.71	0.81	0.77	0.73	1.47	1.21	0.59	1.43	0.83	0.72	1.00	0.75
Equador	0.21	0.25	0.33	0.26	0.21	0.21	0.73	0.17	0.41	0.42	0.70	0.31	0.33
Paraguai	8.43	5.70	6.72	8.20	8.69	7.55	6.76	5.48	8.58	6.12	8.88	4.91	3.22
Peru	1.02	0.63	1.51	1.09	1.08	1.35	1.78	1.52	1.31	1.75	2.47	1.49	1.56
Uruguai	0.09	0.12	0.06	0.08	0.05	0.16	0.12	0.07	0.13	0.07	0.11	0.07	0.10
Colômbia	3.94	4.05	2.38	2.93	3.91	3.42	5.74	2.19	3.99	3.93	4.38	4.79	3.59

Tabela C.2 – Porcentagem de emissão anual de PM2.5 para os biomas da América do Sul.

Bioma	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
Floresta Ombrófila tropical e subtropical úmida	45.3	49.7	52.6	46.5	42.7	36.4	42.7	39.5	34.7	40.2	36.7	45.1	50.8
Savanas Estépica	3.9	5.3	3.6	4.3	4.9	4.9	4.4	6.6	5.1	3.5	4	4.2	4
Floresta Temperada	0.3	0.4	0.5	0.5	0.5	1.2	0.8	0.3	1	0.6	0.3	0.5	0.6
Savanas	35.4	32.7	31.4	35.7	38.7	41.8	37.7	41.2	46.2	42.4	45.5	40	33.6
Gramínea Temperada, Savana e Vegetação Arbustiva	2.3	1.3	1.3	1.7	0.8	2.3	2	0.8	1.4	1.1	1.9	1.1	1.1
Savanas Pantanosas	1.4	2.6	2.7	2.3	2.6	3.7	3.5	3.4	2.5	3.4	2.1	0.9	2
Campos de Altitude	0.5	0.3	0.4	0.3	0.2	0.3	0.4	0.4	0.3	0.4	0.5	0.3	0.3
Floresta Mediterrânea, Savana Lenhosa e Arbustos	0.2	0.3	0.3	0.2	0.2	0.3	0.4	0.3	0.4	0.2	0.3	0.5	0.2
Caatinga	3.3	2.5	2.7	2.6	3	3.5	3.3	3.2	3.3	3.6	3.7	3.3	4.2
Mangue	0.2	0.1	0.1	0.2	0.2	0.2	0.2	0.1	0.2	0.2	0.3	0.2	0.2
Mata Atlântica	7.3	4.9	4.4	5.6	6.2	5.4	4.5	4.3	5	4.3	4.7	3.9	3