

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
CENTRO ESTADUAL DE PESQUISAS EM SENSORIAMENTO REMOTO E
METEOROLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM SENSORIAMENTO REMOTO

BIBIANA SALVADOR CABRAL DA COSTA

USO DA ENERGIA RADIATIVA DO FOGO PARA ESTIMATIVA DO COEFICIENTE
DE CONSUMO DE BIOMASSA POR QUEIMA DE VEGETAÇÃO CAMPESTRE

PORTO ALEGRE

2012

BIBIANA SALVADOR CABRAL DA COSTA

USO DA ENERGIA RADIATIVA DO FOGO PARA ESTIMATIVA DO COEFICIENTE
DE CONSUMO DE BIOMASSA POR QUEIMA DE VEGETAÇÃO CAMPESTRE

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO COMO REQUISITO
PARCIAL PARA OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
MESTRE EM SENSORIAMENTO REMOTO,
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO
SUL – CENTRO ESTADUAL DE PESQUISAS EM
SENSORIAMENTO REMOTO E METEOROLOGIA,
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
SENSORIAMENTO REMOTO, ÁREA DE
CONCENTRAÇÃO: SENSORIAMENTO REMOTO E
GEOPROCESSAMENTO.

ORIENTADORA: PROFA. DRA. ELIANA LIMA DA
FONSECA

CO-ORIENTADORA: PROFA. DRA. TATIANA
MORA KUPLICH

PORTO ALEGRE

2012

Costa, Bibiana Salvador Cabral da

Uso da energia radiativa do fogo para estimativa do coeficiente de consumo de biomassa por queima de vegetação campestre. / Bibiana Salvador Cabral da Costa. - Porto Alegre : UFRGS/CEPSRM, 2012.

[97 f.] il.

Dissertação (Mestrado). - Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Centro Estadual de Pesquisas em Sensoriamento Remoto e Meteorologia. Programa de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto. Porto Alegre, RS - BR, 2012.

Orientadora: Eliana Lima da Fonseca

Coorientadora: Tatiana Mora Kuplich

1. Sensoriamento Remoto. 2. Queimada. 3. Campos. 4. Potência Radiativa do Fogo. 5. Coeficiente de Consumo de Biomassa I. Título.

Catálogo na Publicação
Biblioteca Geociências - UFRGS
Renata Cristina Grun CRB 10/1113

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO APROVADA PELA BANCA EXAMINADORA COMO
REQUISITO PARA O TÍTULO DE MESTRE EM SENSORIAMENTO REMOTO

BANCA EXAMINADORA:

Dra. Eliana Lima da Fonseca – Presidente da banca - orientadora / UFRGS, Porto Alegre, RS.

Dra. Tatiana Mora Kuplich – Co-orientadora / INPE-CRS, Santa Maria, RS.

Dra. Denise Cybis Fontana– Membro da banca / UFRGS, Porto Alegre, RS.

Dra. Alessandra Tomaselli Fidelis– Membro da banca / UNESP, Rio Claro, SP.

Dr. Nelson Jesuz Ferreira – Membro da banca / INPE, São José dos Campos, SP.

Aluna: Bibiana Salvador Cabral da Costa.

Porto Alegre, RS-Brasil, 17 de Agosto de 2012.

Aos meus pais, dedico.

AGRADECIMENTO

Quero agradecer à Dra. Eliana Lima da Fonseca, pela orientação, sugestões e confiança dadas durante a realização da dissertação.

À Dra. Tatiana Mora Kuplich, pelo incentivo e acompanhamento da trajetória acadêmica.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela bolsa de estudos concedida.

Aos professores e aos funcionários do Centro Estadual de Pesquisas em Sensoriamento Remoto e Meteorologia (CEPSRM) e da Pós-Graduação.

Aos colegas de curso e do CEPSRM.

À minha família, por tudo.

“É suficiente para mim que ele saiba encontrar para quê serve tudo aquilo que faz e o porquê daquilo que ele crê. Repito, o meu objeto não é, de nenhum modo, dar-lhe a Ciência, mas ensinar-lhe os meios de adquiri-la pela necessidade, de a avaliar exatamente pelo seu justo valor, e fazer com que ele ame a verdade acima de tudo”.

Jean-Jacques Rousseau – Emílio (1762)

RESUMO

No Rio Grande do Sul (RS), a prática de queimadas está relacionada principalmente com a renovação do pasto e agricultura. Embora o RS não seja o Estado com maior incidência de queimadas no Brasil, centenas de focos são identificados por dados de satélites anualmente. O uso de dados de sensores remotos para identificar focos de queimadas vem sendo utilizado há décadas, com o desenvolvimento de novos algoritmos. Uma técnica que vem sendo utilizada consiste na obtenção da Potência Radiativa do Fogo (PRF), a partir de dados de sensores remotos. A PRF é uma medida da energia radiante liberada no processo de queima de biomassa. Estudos demonstram que a PRF possui uma relação linear positiva com a biomassa em processo de combustão, permitindo gerar valores de coeficientes de consumo de biomassa. O conhecimento dos valores destes coeficientes pode determinar o total de biomassa queimada quando multiplicados pela PRF obtida por sensores remotos, no momento da passagem do satélite, em tempo quase real. A determinação dos coeficientes de consumo, por sua vez, depende da tipologia vegetal submetida à queima. Devido à pequena quantidade de dados sobre as queimadas no RS, o objetivo deste trabalho consiste em estimar o coeficiente de consumo de biomassa por queima de vegetação campestre no RS, através da utilização da Potência Radiativa do Fogo (PRF), obtida a partir de dados do sensor MODIS e dados de campo de biomassa. A área de estudo escolhida foi o município de André da Rocha, por possuir focos de queimadas identificados pelo MODIS (pelo produto MYD14 - *Thermal Anomalies/Fire products*), e dados sobre a quantidade de biomassa em áreas frequentemente queimadas. Também foram obtidos dados de experimentos *in situ* do comportamento do fogo em área campestre no RS. Foi identificada e quantificada a área queimada, a partir do uso de uma cena do satélite Landsat. A obtenção de dados de experimentos de campo e da cicatriz da área queimada permitiu a obtenção da taxa média de consumo de biomassa e a obtenção dos valores de PRF pelo produto MYD14 permitiu obter o valor da PRF média na área de estudo. Pela relação linear existente entre esses dois parâmetros, foi obtido o coeficiente médio de consumo de biomassa. O valor do coeficiente de consumo foi de 0,24 kg/MJ, resultado esse próximo do encontrado por outros autores. A metodologia utilizada neste trabalho difere da metodologia utilizada em trabalhos anteriores para a obtenção do coeficiente de consumo de biomassa. De qualquer maneira, o dado obtido é uma estimativa preliminar para novos estudos e experimentos em campo.

Palavras-chave: biomassa queimada, campos, potência radiativa do fogo, sensoriamento remoto, coeficiente de consumo de biomassa.

ABSTRACT

In Rio Grande do Sul (RS), the practice of burning is mainly related to the renewal of pasture and agriculture. Although the RS is not the state with the highest incidence of fires in Brazil, hundreds of fire focuses are identified by satellite data annually. The use of remote sensing data to identify burning areas has been used for decades with the development of new algorithms. One technique that has been used consists in obtaining the Fire Radiative Power (FRP) from remote sensing data. The FRP is a measure of the radiant energy released in the process of burning biomass. Studies have shown that the FRP has a positive linear relationship with the biomass in the combustion process, allowing to generate coefficient values biomass consumption. The knowledge of the values of these coefficients can determine the total biomass burned when multiplied by FRP obtained by remote sensors at the time of passage of the satellite, in near real time. The determination of the coefficients of consumption, in turn, depends on the type of plant subject to burning. Due to the small amount of data on fires in the RS, the objective of this study is to estimate the coefficient of biomass consumption by burning Campos grassland in RS, by using the FRP obtained from MODIS (from the product MYD14 - Thermal Anomalies / Fire products) and field biomass data. The chosen study area was André da Rocha, for having fires focus identified by MODIS and data from biomass often burned. Experiment data in situ of the fire behavior in *campos* grassland in RS were also been obtained. The scar burned area was identified and quantified from the use of a Landsat scene. Data of the field and the burned scar area allowed to obtain the average rate of consumption of biomass, and FRP values from MODIS allowed to obtain the average value of the FRP in the study area. The coefficient value was calculated from the linear relationship between these two parameters. The coefficient of consumption obtained was 0.24 kg/MJ, a result close to that found by other authors. The methodology used in this study differs from the method used in previous studies. Anyway the data is a preliminary estimate for new studies and field experiments.

Key-words: burn biomass, *campos* grasslands, fire radiative power, remote sensing, biomass consumption coefficient.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1. Propagação de uma queimada a partir do ponto de ignição (início da queima), e direção das frentes de fogo.	24
Figura 2.2. Janelas atmosféricas (em branco) e bandas de absorção (em preto) ao longo do espectro-eletromagnético.	29
Figura 2.3. Radiação de um corpo negro por uma cavidade.	30
Figura 2.4. Curva de radiação de um corpo negro.	33
Figura 2.5. Categorias de ecossistemas separados por regiões (números e letras) conforme a classificação adotada pelo <i>International Geosphere-Biosphere Program</i> (IGBP) e mapa de uso e cobertura do sensor AVHRR.	46
Figura 2.6. Taxa de emissão de aerossóis estimado por Ichoku e Kaufman (2005) para o MODIS e por Pereira (2009) para o GOES, nas três categorias de ecossistemas adotadas pelo IGBP no Brasil: (a) Brasil-Floresta, (b) Brasil-Cerrado, (c) América do Sul abaixo de 20° - latitude sul.	48
Figura 2.7. Classes de cobertura do solo (sigla indicada no Quadro 2.2) utilizadas para a obtenção dos coeficientes de consumo de biomassa.	51
Figura 2.8. Direção da varredura <i>Swath</i> do sensor MODIS.	52
Figura 2.9. Ocorrência de vegetação campestre nos Estados que compõem a região sul do Brasil (Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul).	58
Figura 2.10. Biomas existentes no Rio Grande do Sul (RS), conforme a classificação do IBGE (2004).	59
Figura 2.11. Regiões fitoecológicas do Rio Grande do Sul atualizadas no último mapeamento da vegetação (MMA, 2007).	61
Figura 2.12. Mapa dos remanescentes de vegetação do Rio grande do Sul.	63
Figura 3.1. Localização do Município de André da Rocha no Rio Grande do Sul, Brasil.	68
Figura 4.1. Representação esquemática do desenvolvimento da metodologia.	77
Figura 5.1. Localização de parte dos focos de calor obtidos pelo sensor MODIS (MYD14), em 04/09/2007, no RS e regiões adjacentes, e cena obtida do satélite Landsat, órbita-ponto 221-80, composição colorida falsa-cor RGB543, representados em coordenadas geográficas.	79
Figura 5.2. Focos de calor no município de André da Rocha, representados em coordenadas planas (UTM, fuso 22) e cena Landsat com composição colorida falsa cor RGB543 realçada.	80

Figura 5.3. Localização da área campestre com vestígios de cicatriz de queimada no município de André da Rocha (RS) e a região correspondente à área do pixel de 1km, representada pelo *buffer*, em cena Landsat com composição colorida falsa cor RGB543. 82

Figura 5.4. Área campestre mapeada no interior do buffer com vestígios de queimada, no município de André da Rocha, RS, em cena Landsat, com composição colorida falsa cor RGB543..... 83

LISTA DE TABELAS

Tabela 5.1. Valores para cada área e somatório total correspondente às áreas de campo, potência radiativa do fogo (<i>PRF</i>) e biomassa queimada (BQ).....	84
--	----

LISTA DE QUADROS

Quadro 2.1. Coeficientes de emissão de aerossol emitido por queimadas baseados na <i>ERF</i> , obtida pelo sensor MODIS, com campos de ventos em 850 mb, conforme metodologia utilizada por Ichoku e Kaufman (2005), utilizando as regiões da Figura 2.4.	47
Quadro 2.2. Classes de cobertura do solo, com tipo de combustível e coeficiente de consumo correspondente.	50
Quadro 2.3. Canais espectrais utilizados no algoritmo do MODIS para a detecção dos focos de calor e rejeição de falsos alarmes, respectivos comprimentos de onda e a descrição da finalidade de utilização de cada canal.	54
Quadro 4.1. Valores das variáveis utilizadas para os cálculos de consumo de biomassa e sobre a intensidade do fogo, obtidos de Fidelis et al. (2010a) e Heringer e Jacques (2002a).	74
Quadro 5.1. Valores utilizados para a obtenção da taxa média de consumo de biomassa (biomassa queimada total, tempo de consumo e raio) e valores da taxa média de consumo e <i>PRF</i> média, utilizados na equação para a obtenção do resultado final.	85

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

- AVHRR** – Advanced Very High Resolution Radiometer.
- BIRD** – Bi-Spectral Infrared Detection.
- COREDE** – Conselho Regional de Desenvolvimento do Rio Grande do Sul.
- CSIRO** – Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation.
- EOS** – Earth Observation Surface.
- ERF** – Energia Radiativa do Fogo.
- FEE** – Fundação de Economia e Estatística.
- GMT** – Greenwich Mean Time.
- GOES** – Geostationary Operational Environmental Satellite.
- HDF** – Hierarchical Data Format.
- HSRS** – Hot Spot Recognition Sensor.
- IBGE** – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística.
- IESB** – Instituto de Estudos Socioambientais do Sul da Bahia.
- IGBP** – International Geosphere-Biosphere Program.
- INPE** – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais.
- IPCC** – Intergovernmental Panel on Climate Change.
- LAADS** – Level 1 Atmosphere Archive and Distribution System.
- MAS** – Modis Airborne Simulator.
- MCTI** – Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação.
- MMA** – Ministério do Meio Ambiente.
- MODIS** – Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer.
- MRT** – Modis Reprojection Tools.
- MSG** – Meteosat Second Generation.
- NASA** – National Aeronautics and Space Administration.
- NOAA** – National Oceanic and Atmospheric Administration.
- RS** - Rio Grande do Sul.
- SC** – Santa Catarina.
- SCAR-B** – Smoke/Sulfate, Clouds and Radiation – Brazil.
- SCAR-C** – Smoke/Sulfate, Clouds and Radiation – Califórnia.
- SEPLAG** – Secretaria do Planejamento, Gestão e Participação Cidadã.
- SEVIRI** – Spinning Enhanced Visible Infrared Imager.
- SIG** – Sistema de Informações Geográficas.
- PR** – Paraná.

PRF – Potência Radiativa do Fogo.

PROBIO – Projeto sobre a Biodiversidade.

TM – Temathic Mapper.

TM+ – Temathic Mapper Plus.

UFF – Universidade Federal Fluminense.

UFRGS – Universidade do Rio Grande do Sul.

UFRJ – Universidade Federal do Rio de Janeiro.

UTC – Universal Time Coordinate.

UTM – Universal Transversa de Mercator.

WFABBA – Wildfire Automated Biomass Burning Algorithm.

LISTA DE SÍMBOLOS

I – corresponde à intensidade do fogo (medida em kJ/s/m).

H – poder calorífico do fogo (medido em kJ/g).

w – o consumo de biomassa por área (medido em kg/m²).

r – taxa de espalhamento da frente de fogo (medida em m/s).

CO – monóxido de carbono.

N₂O – óxido nitroso.

CH₂O – composição média da biomassa.

CO₂ – dióxido de carbono.

H₂O – molécula de água.

K – kelvin.

°C – graus Celsius.

O₃ – ozônio.

M – intensidade da radiação emitida por um corpo negro.

σ – constante de Stefan-Boltzmann ($5,6697 \times 10^{-8} \text{W/m}^2\text{K}^4$).

T – temperatura em Kelvin.

λ_{max} – comprimento de onda da máxima emissão do corpo negro.

$\lambda_m T$ – representa uma constante igual a $2,898 \times 10^{-3} \text{m} \cdot \text{K}$.

$u(\lambda)$ – função de distribuição espectral.

π – pi.

k – constante de Boltzmann, cujo valor é $k = 1,38 \times 10^{-23} \text{J/K}$.

E – energia (dada em J).

h – constante de Planck, cujo valor é $6,626 \times 10^{-34} \text{J} \cdot \text{s}$.

f – frequência (dada em Hz).

c – velocidade da luz no vácuo ($c \cong 3 \times 10^8 \text{m/s}$).

L – radiância espectral ($\text{W/m}^3 \cdot \text{sr}$).

C_1 e C_2 – constantes da Lei de Planck ($c_1 = 2hc^2$ e $c_2 = hc/k$, sendo h a constante de Planck, e k a constante de Boltzmann).

ε – emissividade.

ρ – reflectância.

M_r – intensidade da radiação emitida por um corpo.

T_{cin} – temperatura cinética do objeto, em kelvin.

M_{biomassa} – quantidade de biomassa queimada (medida em kg).

A – área queimada (medida em m^2).

B – quantidade de biomassa por área (dada em kg/m^2).

α – fração de biomassa acima do solo.

β – fração de combustível que realmente queimou (eficiência da combustão).

M_x – massa emitida pela espécie pirogênica x .

EF_x – fator de emissão da espécie pirogênica x .

PRF – potência radiativa do fogo (dada em MJ/s).

ERF – energia radiativa do fogo (dada em MJ).

a – constante determinada a partir de uma relação linear (para a banda 21 do MODIS, $a = 3,0 \times 10^{-19}$, e para o HSRS MIR, $a = 3,3 \times 10^{-19}$, dada em $W/m^4 \cdot sr \cdot \mu m \cdot K^4$).

C_e – coeficiente de emissão da espécie x (dado em gramas de espécies pirogênicas por kg de biomassa queimada) e coeficiente de consumo de biomassa (dado em kg/MJ).

BC – taxa de biomassa consumida (em kg/s).

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1	20
INTRODUÇÃO	20
1.1. Problema	21
1.2. Hipótese	22
1.3. Objetivos	22
1.3.1. Objetivo geral	22
1.3.2. Objetivos específicos	22
CAPÍTULO 2	23
FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	23
2.1. Comportamento do fogo e variáveis envolvidas em uma queimada	23
2.2. Emissões causadas por queimadas	25
2.3. Princípios físicos em sensoriamento remoto e o infravermelho termal	27
2.4. Detecção de queimadas por sensoriamento remoto	35
2.5. Estimativa de emissões por queimadas utilizando o sensoriamento remoto	36
2.6. Potência Radiativa do Fogo	38
2.6.1. Derivação da PRF	39
2.6.2. Metodologias para derivar a PRF	40
2.6.2.1. Método BI-ESPECTRAL	40
2.6.2.2. Método MODIS	41
2.6.2.3. Método RADIÂNCIA ESPECTRAL	42
2.7. Coeficientes baseados na energia radiativa do fogo	45
2.7.1. Coeficientes de emissão	45
2.7.2. Coeficientes de consumo de biomassa	48
2.8. Sensor MODIS	51
2.8.1. Algoritmo MODIS para detecção de queimadas	53
2.8.2. MODIS –produto de anomalias termais	54
2.9. Vegetação no sul do Brasil	56
2.9.1. Vegetação do Rio Grande do Sul	58
2.9.1.1. Manejo do campo no RS – pastejo e fogo	63
2.9.1.2. Estudos em áreas queimadas no RS	67
CAPÍTULO 3	68
ÁREA DE ESTUDO	68
CAPÍTULO 4	71
MATERIAL E MÉTODOS	71
4.1. Período de estudo	71

4.2. Aquisição e processamento de dados de satélite para o cálculo da <i>PRF</i>	71
4.3. Aquisição e processamento de imagens para a identificação e quantificação da área queimada	72
4.4. Aquisição de dados de campo.....	73
4.5. Cálculo da biomassa queimada e <i>PRF</i> para a obtenção do coeficiente de consumo de biomassa.....	74
4.5.1. Biomassa queimada.....	74
4.5.2. Cálculo da <i>PRF</i>	75
4.6. Cálculo do coeficiente de consumo de biomassa.....	75
CAPÍTULO 5	78
RESULTADOS E DISCUSSÃO	78
5.1. Identificação dos focos de calor.....	78
5.2. Delimitação da área queimada	80
5.3. Biomassa queimada e <i>PRF</i>	82
5.4. Coeficiente de consumo de biomassa.....	85
CAPÍTULO 6	87
CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS	87
CAPÍTULO 7	89
REFERÊNCIAS.....	89

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

No Rio Grande do Sul (RS), a prática de queimadas ocorre principalmente em regiões campestres e está relacionada com a renovação do pasto e agricultura. Embora o RS não seja o estado com maior incidência de queimadas no Brasil, anualmente centenas de focos são identificados por satélites, conforme dados do Instituto Nacional de Pesquisas espaciais (INPE), e poucos estudos são realizados nessa região para estimar as emissões e o consumo de biomassa devido à queima da vegetação campestre.

Durante muito tempo o consumo de biomassa pelo fogo tem sido quantificado a partir de medidas *in situ*, e o cálculo da intensidade da frente de fogo (*fireline intensity*) tem sido utilizado para auxiliar no estudo da dinâmica da frente de fogo em diferentes tipos de vegetação. A energia liberada pelo fogo é uma variável importante para determinar a quantidade de biomassa queimada e as emissões de gases causadas pelas mesmas. Neste sentido, o interesse científico por este tema permitiu o desenvolvimento de algoritmos e programas de monitoramento e de detecção de queima de biomassa e focos de queimadas com a utilização de dados de sensores remotos (espaciais e aerotransportados).

A quantificação do consumo de biomassa, assim como as emissões causadas por queimadas, pode ser determinada por dados de sensores remotos quando se conhecem algumas variáveis que normalmente são obtidas no campo. Uma técnica que vem sendo muito utilizada consiste na obtenção da *Potência Radiativa do Fogo (PRF)* por dados de sensores remotos. A *PRF* é uma medida da energia radiante liberada por unidade de tempo pela queima de vegetação. O uso da *PRF*, obtida por sensores remotos, pode substituir as variáveis determinadas em campo, e pode ser relacionada diretamente com a taxa de vegetação consumida por unidade de tempo no processo da combustão, em tempo quase real. Porém, para utilizar esta relação entre energia do fogo e taxa de consumo de biomassa, é necessário conhecer o valor de um coeficiente, esse conhecido como coeficiente de consumo, que relaciona estas duas variáveis, obtido através de experimentação durante a queimada. O valor deste coeficiente, por sua vez, depende da tipologia vegetal submetida no processo da queima.

1.1. PROBLEMA

Diversos estudos vêm sendo realizados a fim de aprimorar as estimativas de queima de biomassa a partir da obtenção de dados de *PRF* por sensores remotos. Estudos demonstram que a *PRF* está relacionada com a intensidade do fogo (KAUFMAN et al, 1996; KAUFMAN et al., 1998a; KAUFMAN et al., 1998b) e é diretamente proporcional ao total de vegetação consumida por unidade de tempo (WOOSTER, 2002; WOOSTER et al., 2003; WOOSTER et al., 2005; PEREIRA, 2008; FREEBORN et al., 2008). A relação linear entre a *PRF* e a quantidade de vegetação consumida durante o processo de combustão permite a obtenção do valor de um coeficiente de consumo de biomassa que pode indicar a quantidade/taxa de vegetação consumida em tempo quase real quando multiplicado pela *PRF* (WOOSTER et al., 2005; PEREIRA, 2008; FREEBORN et al., 2008).

A determinação do coeficiente de consumo de biomassa depende da energia liberada durante o processo de combustão e da quantidade de vegetação consumida durante este processo (WOOSTER et al., 2005). O tipo de vegetação é uma variável importante para a obtenção deste coeficiente, visto que, dependendo dos fatores ambientais (teor de umidade, material combustível), a energia liberada pelo fogo e o tempo de combustão podem variar de um ecossistema a outro, fornecendo diferentes valores de coeficiente de consumo (WOOSTER et al., 2005; FREEBORN et al., 2008, PEREIRA, 2008; KAISER et al., 2012).

Nos campos do Rio Grande do Sul, as queimadas são utilizadas como alternativa de manejo para um melhor rendimento da pastagem (HERINGER; JACQUES, 2002a; HERINGER; JACQUES, 2002b). Devido a pouca informação existente no RS sobre queimadas e também a partir das informações apresentadas nos trabalhos citados, o problema desta dissertação é o de estabelecer o coeficiente de consumo de biomassa para a vegetação campestre do RS, a fim de determinar a taxa de queima de biomassa com o uso de dados de *PRF* oriundos de satélite.

1.2. HIPÓTESE

A utilização de dados de *PRF* obtidos a partir de sensores remotos e o conhecimento da taxa de biomassa queimada permitirão a obtenção do coeficiente de consumo de biomassa para a vegetação campestre natural do Rio Grande do Sul.

1.3. OBJETIVOS

1.3.1. OBJETIVO GERAL

O objetivo deste trabalho é estimar o coeficiente de consumo de biomassa por queima de vegetação campestre no RS, através da utilização da Potência Radiativa do Fogo (*PRF*), obtida a partir de dados do sensor *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer* (MODIS) e dados de campo de biomassa.

1.3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Obter a partir da literatura dados de experimentos de campo para a vegetação campestre do RS;
- Identificar e quantificar a área queimada com o uso de dados remotos;
- Quantificar a taxa de consumo de biomassa em área de vegetação campestre no RS;
- Obter a *PRF* a partir do produto de anomalias termais do sensor MODIS.

CAPÍTULO 2

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1. COMPORTAMENTO DO FOGO E VARIÁVEIS ENVOLVIDAS EM UMA QUEIMADA

Uma queimada pode ser definida como um processo de queima de biomassa, que ocorre tanto por razões naturais como antrópicas (FREITAS et al., 2005). A maior parte das queimadas ocorre nos trópicos, em países em desenvolvimento (ANDREAE, 1991). A ocorrência de fogo nos trópicos está relacionada, muitas vezes, com a prática de queima de pastagens para o rebrote da vegetação (criação de gado), abertura de áreas para a agricultura, desmatamento, entre outros, e são realizadas principalmente nos períodos secos (ANAYA et al., 2008; GUIMARÃES et al., 2007).

A queima de vegetação se caracteriza por possuir quatro estágios: ignição, chamas, brasas e extinção (WHELAN, 1995; FREITAS et al., 2005). Segundo esses autores, a ignição de uma queimada depende das condições ambientais e do teor de umidade da vegetação, pois o material úmido demora mais a pegar fogo (LIU, 2007). Após a ignição, ocorre o fogo propriamente dito, que corresponde ao estágio de chamas. O estágio de brasas ocorre após a passagem da frente de fogo, e, nesta fase, o material combustível continua queimando, até que ocorra a fase de extinção, que depende da quantidade de água e oxigênio disponível (FREITAS et al., 2005).

Em uma queimada, uma das variáveis mais importantes que afetam o comportamento do fogo é a quantidade de combustível disponível (*fuel load*) (WHELAN, 1995; TROLLOPE et al., 2002). Além disso, o comportamento do fogo pode variar devido à umidade do material combustível (*fuel moisture*), vento, umidade do ar, temperatura do ar, inclinação do terreno, entre outros (WHELAN, 1995; TROLLOPE et al., 2002; LIU, 2007).

Outro aspecto importante em queimadas é a propagação da frente de fogo. Uma queimada possui duas frentes de fogo, uma que se movimenta na mesma direção do vento (*heading fire*) e outra que se propaga na direção oposta ao vento (*backing fire*). Além disso, as chamas laterais (*flank fire*) podem se propagar nas duas direções (oposta ao vento ou em direção ao vento) (CHENEY; SULLIVAN, 2008), conforme a Figura 2.1.

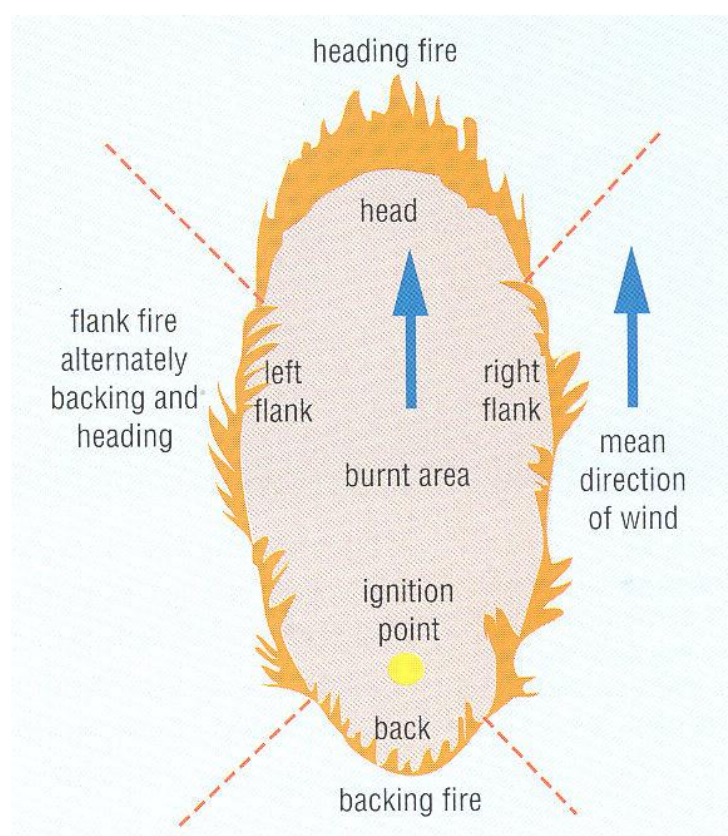


Figura 2.1. Propagação de uma queimada a partir do ponto de ignição (início da queima), e direção das frentes de fogo.

Fonte: *Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation (CSIRO, 2011)*.

Algumas variáveis de uma queimada podem ser medidas por experimentos no campo, como a taxa de espalhamento da frente do fogo (medida em m/s), o poder calorífico (*heat yield*) do material combustível (medido em J/g) e o consumo de biomassa por área (medido em g/m²). Essas três variáveis fornecem uma medida importante, a intensidade da frente do fogo (kW/m). A intensidade do fogo é uma medida que tem sido utilizada por

décadas e que fornece a taxa de emissão de calor do fogo por área (WOOSTER et al., 2005). A fórmula para o cálculo da energia do fogo é apresentada pela equação 2.1 (BYRAM, 1959, apud TROLLOPE et al., 2002).

$$I = H \times w \times r \quad (2.1)$$

onde I corresponde à intensidade do fogo (medida em kJ/s/m); H , o poder calorífico do fogo (medido em kJ/g); w , o consumo de biomassa por área (medido em kg/m²); r a taxa de espalhamento da frente de fogo (medida em m/s).

A intensidade do fogo, portanto, é uma grandeza que fornece a taxa de emissão de calor da frente de fogo. A componente radiante dessa emissão de energia é chamada de *Potência Radiativa do Fogo (PRF)* (WOOSTER et al., 2005).

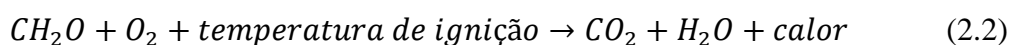
Outras variáveis importantes obtidas em estudos com queimadas e que são medidas em campo são: o tempo de residência do fogo (em segundos), a eficiência da combustão, a densidade de biomassa, a temperatura acima do solo, o conteúdo de umidade do material combustível, entre outras (FIDELIS et al., 2010; TROLLOPE et al., 2002). Essas variáveis são importantes para a determinação da quantidade de biomassa queimada e as emissões causadas pela queima (SEILER; CRUTZEN, 1980; ANDREAE; MERLET, 2001). O conhecimento da intensidade e severidade do fogo é importante para caracterizar as queimadas em diferentes ecossistemas e os efeitos na comunidade e plantas (FIDELIS et al., 2010a).

2.2. EMISSÕES CAUSADAS POR QUEIMADAS

A ocorrência de queimadas resulta na emissão global de 3.940 Tg[C]/ano, sendo os trópicos responsáveis por 87% das emissões globais de carbono, o que equivale à 3.440 Tg[C]/ano (ANDREAE, 1991). O interesse científico por este tema cresceu após a constatação de que as estimativas de emissões de gases pirogênicos por queima de biomassa eram equivalentes às emissões causadas por combustíveis fósseis, afetando amplas áreas no globo terrestre (SEILER; CRUTZEN, 1980). Segundo o *Intergovernmental Panel on Climate*

Change (IPCC, 2001) houve um aumento de concentração de diversos gases na atmosfera (CO_2 , CH_4 , N_2O), além de um acréscimo de $0,6^\circ\text{C}$ na temperatura do planeta durante o século vinte.

A reação química em uma queimada resulta, primariamente, na liberação de água e dióxido de carbono (equação 2.2, FREITAS et al., 2005), porém outros gases e aerossóis são emitidos para a atmosfera quando a combustão não é completa, como monóxido de carbono (CO), metano (CH_4) e outros hidrocarbonetos, além de óxido nitroso (N_2O), dióxido sulfúrico (SO_2) e também material particulado (ANDREAE, 1991). Estes produtos da combustão exercem importante papel no clima, na química da atmosfera e na ecologia regional e global do planeta (ANDREAE; MERLET, 2001). A reação química em uma queimada é apresentada de maneira simplificada pela equação 2.2, pois outros compostos são liberados no processo de queima (WHELAN, 1995; FREITAS et al., 2005).



onde CH_2O representa a composição média da biomassa.

A maior parte das emissões de gases e aerossóis provenientes de uma queimada ocorre nas fases de chamas e brasas. Na fase de chamas ocorre a maior parte da liberação de dióxido de carbono e água e também a liberação de monóxido de carbono; já na fase de brasas, é liberada a maior parte de gases traços e material particulado (FREITAS et al., 2005).

A presença desses gases na atmosfera, principalmente o dióxido de carbono, mas também moléculas de água são responsáveis pelo efeito estufa e o aumento dessas moléculas pode comprometer o balanço de energia do planeta, com efeitos no equilíbrio climático e biogeoquímico (FREITAS et al., 2005). Isso ocorre, pois o dióxido de carbono absorve parte da energia que é devolvida pela Terra ao espaço como radiação de ondas longas, sendo um dos principais gases responsáveis pela absorção da energia neste comprimento de onda. A radiação emitida de volta pela Terra para o espaço ocorre no comprimento de onda do infravermelho termal (JENSEN, 2009). Além disso, os aerossóis e o material particulado provenientes das queimadas pela combustão têm sido objetos de pesquisa por afetarem a química da atmosfera. Estudos que utilizam as queimadas para medir as emissões de fumaça e para determinar o consumo de vegetação e áreas afetadas pelo fogo são realizados para a elaboração e alimentação de dados em modelagens climáticas e ambientais e

se baseiam, na maior parte, em dados obtidos por sensores remotos (INPE, 2011a; LONGO et al., 2009).

A detecção de uma queimada por dados de sensores remotos é feita na região do infravermelho termal do espectro eletromagnético, a partir de sensores espaciais ou transportados (KAUFMAN et al., 1998a; WOOSTER, 2005; FRANÇA, 2000). Para a determinação do(s) comprimento(s) de onda que melhor caracteriza(m) uma queimada, é necessário conhecer os princípios físicos utilizados em sensoriamento remoto.

2.3. PRINCÍPIOS FÍSICOS EM SENSORIAMENTO REMOTO E O INFRAVERMELHO TERMAL

“Todos os objetos com temperatura acima do zero absoluto (0 Kelvin ou -273°Celsius) emitem energia eletromagnética, incluindo a água, a vegetação, o solo, as rochas e a superfície do Sol” (JENSEN, 2009, p.41). O Sol é utilizado como a fonte inicial da maioria da energia eletromagnética registrada pelos sistemas de sensoriamento remotos; esses, inclusive, recebem uma classificação relacionada com a energia que utilizam: os chamados sistemas passivos utilizam a luz solar; os sistemas ativos são aqueles que produzem a sua própria energia: é o caso de sistemas de RADAR, LIDAR, SONAR (JENSEN, 2009; NOVO, 2008).

A radiação emitida pelo sol ocorre como um espectro contínuo, em todos os comprimentos de onda, porém, grande parte da energia proveniente do Sol que chega à superfície da Terra, corresponde à faixa do espectro eletromagnético da luz visível. São as radiações azuis, verdes e uma parte das radiações vermelhas que trazem consigo cerca de 41% da energia solar, com comprimentos de onda entre 0,4 e 0,7 μm . (JENSEN, 2009; MOTA, 1981). Nesta região do espectro eletromagnético quase não ocorrem absorções pelos gases atmosféricos, ou seja, a atmosfera é praticamente transparente para esta faixa de energia que incide sobre a superfície terrestre (JENSEN, 2009; NOVO, 2008). A faixa do ultravioleta do espectro eletromagnético (comprimento de onda entre 0,2 e 0,4 μm), correspondente à radiação de alta energia proveniente do sol, contém 9% da energia total e é absorvida por gases como oxigênio (O₂) e ozônio (O₃), sendo esses gases atmosféricos essenciais para que

a radiação nociva para os seres vivos terrestres seja minimizada. Seguem-se as radiações infravermelhas, de 0,7 a 4 μm , contendo cerca de 50% da energia total. Esta radiação se produz de forma característica num corpo negro de temperatura igual a 6000 K, equivalente a 6273°C (temperatura da superfície do Sol) e convencionou-se chamá-la de radiação de comprimento de onda longo. Ela é em parte absorvida pelo vapor d'água e gás carbônico atmosféricos. Quando o ar encontra-se coberto de nuvens, o caráter do espectro muda completamente: o extremo infravermelho é completamente absorvido e o extremo ultravioleta é completamente dispersado (MOTA, 1981).

A radiação que a Terra emite de volta para o espaço, porém, ocorre em comprimentos de onda longos; “99% da energia emitida é contida na região do comprimento de onda de 4 a 10 μm ” (op.cit., p.73) correspondente ao infravermelho termal. Nessa faixa do espectro eletromagnético, como já foi citado, existem bandas de absorção de energia por gases como o dióxido de carbono (CO₂) e água (H₂O), mas com a contribuição de outros gases (como O₂, O₃, entre outros), a atmosfera torna-se praticamente fechada para determinados comprimentos de onda, devido à grande absorção de energia (JENSEN, 2009; NOVO, 2008). As faixas de comprimentos de onda do espectro eletromagnético que atravessam a atmosfera são chamadas de janelas atmosféricas, já aquelas correspondentes aos comprimentos de onda interagentes com a atmosfera (absorvidos pelos gases presentes na atmosfera) são chamadas de bandas de absorção (JENSEN, 2009; NOVO, 2008).

A Figura 2.2 representa as janelas atmosféricas ao longo do espectro eletromagnético. As regiões em preto representam as áreas que são completamente fechadas na atmosfera, ou seja, que não deixam a radiação eletromagnética passar devido à eficiência de absorção dos gases para estes comprimentos de onda (bandas de absorção). Nas faixas de comprimento de onda onde ocorrem as bandas de absorção, não há possibilidade de registros de alvos terrestres a partir de sistemas sensores passivos (NOVO, 2008). Na região do infravermelho termal do espectro eletromagnético existem duas faixas de comprimento de onda para as quais a atmosfera é mais transparente (3 a 5 μm e 8 a 14 μm) (JENSEN, 2009; NOVO, 2008; LILLESAND;KIEFER, 1972). Em relação a estudos de alvos terrestres, a faixa de comprimento de onda que varia de 3 a 5 μm é utilizada em sensoriamento remoto para o monitoramento de alvos quentes, como queimadas e atividades geotermiais. Já a faixa de comprimento de onda entre 8 a 14 μm é utilizada em sensoriamento remoto para o monitoramento de vegetação, solo e rocha (JENSEN, 2009).

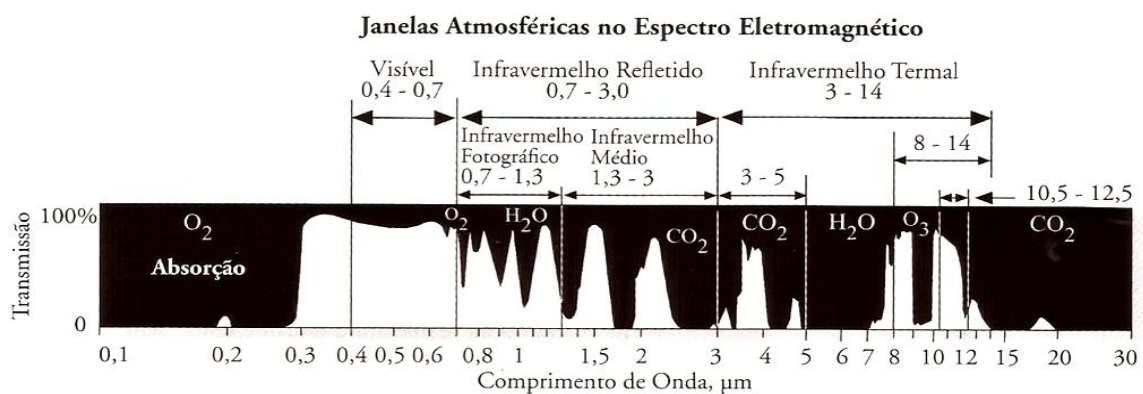


Figura 2.2. Janelas atmosféricas (em branco) e bandas de absorção (em preto) ao longo do espectro-eletromagnético.

Fonte: Adaptado de Jensen, 2009.

Para a compreensão de como a radiação eletromagnética é medida, uma vez que essa medida é essencial para o sensoriamento remoto, é necessário citar o caráter dual da radiação eletromagnética: de um lado o caráter ondulatório que descreve sua propagação; do outro, o caráter corpuscular que descreve sua interação com a matéria. No final do século XIX, mais precisamente em 1900, os estudos sobre a radiação térmica emitida por um corpo negro fez com que o físico alemão Max Planck propusesse uma natureza quântica para esta energia, resolvendo um problema que já vinha sendo exaustivamente investigado por outros cientistas de renome.

Quando radiação incide sobre um corpo opaco (oposto à transparente), em parte, ela é refletida, e o restante, absorvida. Corpos de cores claras refletem a maior parte da radiação incidente, enquanto corpos de cores escuras absorvem a maioria dela. Se um corpo opaco está em equilíbrio com sua vizinhança, a taxa de absorção da radiação deve ser igual à taxa de emissão — caso contrário, ele não estaria em equilíbrio térmico com sua vizinhança. (TIPLER, 1981).

Por ter comprimento de onda longo, a radiação térmica emitida por um corpo não é visível. À medida que aquecemos um corpo, a quantidade de energia emitida cresce e inclui comprimentos de onda cada vez menores.

Um corpo que absorve toda a energia incidente é chamado de corpo negro ideal, portanto, é um construto teórico. Na prática, um objeto com uma pequena cavidade se aproxima do comportamento de um corpo negro, no sentido de que a radiação incidente tem pouca chance de sair antes de ser totalmente absorvida (Figura 2.3).

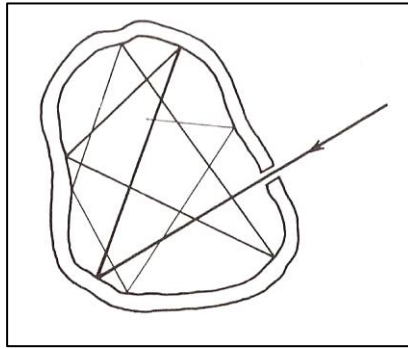


Figura 2.3. Radiação de um corpo negro por uma cavidade.
Fonte: Adaptado de Eisberg e Resnick (1979).

Em 1789, o físico austríaco Josef Stefan (1835-1893) encontrou uma relação empírica entre a potência por unidade de área (M) irradiada por um corpo negro e sua temperatura absoluta (T):

$$M = \sigma T^4 \quad (2.3)$$

onde σ é uma constante de proporcionalidade, $\sigma = 5,6703 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$ chamada de constante de Stefan-Boltzmann — outro físico austríaco, Ludwig Boltzmann (1844-1906), encontrou os mesmos resultados cerca de cinco anos mais tarde, razão pela qual a relação (2.3) é conhecida como lei de Stefan-Boltzmann.

Segundo esta Lei, a potência por unidade de área (M) emitida por um corpo negro depende exclusivamente da temperatura (quarta potência da temperatura absoluta) e não de qualquer outra característica do objeto.

O mesmo é verdade para a distribuição espectral da radiação emitida por um corpo negro. Seja $M(\lambda) d\lambda$ a potência emitida por unidade de área com comprimento de onda entre λ e $d\lambda$. A Figura 2.4 mostra a função distribuição espectral $M(\lambda)$ para vários valores de T . O comprimento de onda para o qual a distribuição apresenta um máximo varia inversamente com a temperatura:

$$\lambda_m \text{ proporcional à } \frac{1}{T} \quad \text{ou} \quad \lambda_m T = \text{constante} = 2,898 \times 10^{-3} \text{ m.K} \quad (2.4)$$

Este resultado é conhecido como lei de deslocamento de Wien — físico alemão Wilhelm Wien (1864-1928) — e a constante é denominada constante de dispersão de Wien.

O cálculo da função distribuição envolve o cálculo da densidade de energia das ondas eletromagnéticas em uma cavidade com o comportamento de um corpo negro. A potência irradiada para fora é proporcional à densidade de energia por unidade de volume da cavidade. E, ao mesmo tempo à distribuição espectral da energia na cavidade. De acordo com a teoria clássica, a função distribuição espectral $u(\lambda)$, onde λ representa o comprimento de onda da radiação correspondente, é dada por:

$$u(\lambda) = 8\pi kT\lambda^{-4} \quad (2.5)$$

que é conhecida como lei de Rayleigh -Jeans (atribuída ao trabalho conjunto dos físicos ingleses Lord Rayleigh ou John William Strutt (1842-1919) e Sir James Jeans (1877-1946), sendo k a constante de Boltzmann, cujo valor é $k = 1,38 \times 10^{-23}$.

Apesar de confirmar teoricamente os resultados experimentais para comprimentos de onda grandes, a teoria falhava para comprimentos de onda menores — fato esse conhecido como catástrofe do ultravioleta.

Enfim, em 1900, o físico alemão Max Planck, conseguiu uma equação que se ajustava à curva teórica da Figura 2.4, propondo, de forma inesperada, que a energia (E) associada a cada frequência (f) não poderia ser contínua, mas discreta, ou seja, que pudesse assumir somente valores discretos: $0, E, 2E, \dots nE$, sendo E dada por:

$$E = hf \quad (2.6)$$

onde h é uma constante (constante de Planck) cujo valor é $6,626 \times 10^{-34}$ J.s.

Valendo-se da relação conhecida entre frequência (f) e comprimento de onda (λ),

$$f\lambda = c \quad (2.7)$$

onde c é a velocidade da luz no vácuo ($c \cong 3 \times 10^8$ m/s), pode-se substituir o valor da frequência (f) na equação 2.6, obtendo-se:

$$E = \frac{hc}{\lambda} \quad (2.8)$$

c é o valor da velocidade da luz (radiação eletromagnética) e λ o comprimento de onda da radiação.

Em outras palavras, Planck demonstrou em seus estudos que a energia irradiada por um corpo negro é expressa em pacotes discretos de energia (chamados quanta ou fóton), introduzindo novos conceitos à física clássica (CARUSO; OGURI, 2006; EISBERG; RESNICK, 1979).

Aplicando os resultados de Planck, para a radiação de um corpo negro, é possível observar que a energia de um corpo emissor é inversamente proporcional ao seu comprimento de onda, ou seja, quanto maior a energia irradiada, menor o comprimento de onda. A lei de radiação de Planck para um corpo negro fornece a radiância espectral em função do comprimento de onda e da temperatura, conforme a seguinte equação (2.9):

$$L_{\lambda} = \frac{c_1}{\lambda^5 (e^{c_2/\lambda T} - 1)} \quad (2.9)$$

onde $c_1 = 2hc^2$ e $c_2 = hc/k$, sendo h a constante de Planck, já referida, e k a constante de Boltzmann, cujo valor é $k = 1,38 \times 10^{-23}$ J/K.

A lei de Planck, aplicada em casos limites (baixas frequências ou comprimentos de onda longos e altas frequências ou comprimentos de onda curtos) reproduz, respectivamente, a lei de Rayleigh-Jeans e a lei de deslocamento de Wien (CARUSO; OGURI, 2006).

Na natureza, nenhum corpo é um emissor perfeito, porém o sol é considerado um corpo negro a uma temperatura de 6.000K (5.727°C); através da Figura 2.4, correspondente à lei de Planck (Equação 2.9), é possível verificar que grande parte da radiação solar encontra-se na parte visível do espectro (JENSEN, 2009; NOVO, 2008). Nesse caso, o comprimento de onda equivale a 0,46 μ m, que corresponde ao espectro do visível. A Terra, por sua vez, possui uma temperatura média de 300K (27°C) e sua máxima emissão ocorre no comprimento de onda do termal, a 9,67 μ m (comprimento de onda dominante) (JENSEN, 2009; NOVO, 2008; LILLESAND; KIEFER, 1972). Analisando a temperatura de uma queimada/objeto no ponto vermelho, a literatura sugere que a mesma tenha temperatura

em torno de 800K (523°C), quando considerada como um corpo negro, representada na Figura 2.4 como um objeto no ponto de vermelho. Aplicando a equação da Lei de deslocamento de Wien (Equação 2.4), uma queimada tem sua máxima emissão no comprimento de onda do termal (3,62 μ m). (JENSEN, 2009; NOVO, 2008).

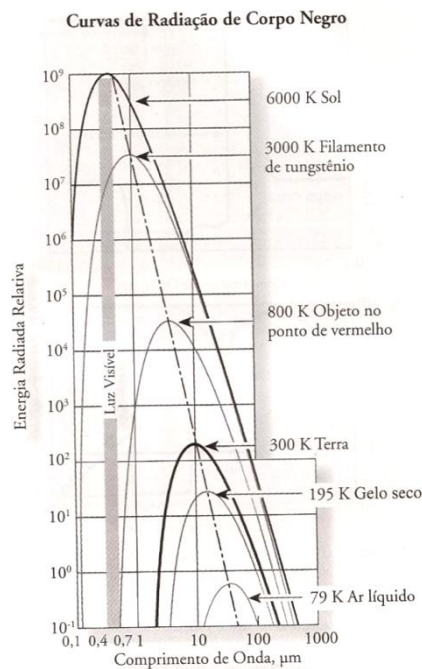


Figura 2.4. Curva de radiação de um corpo negro.

Fonte: Adaptado de Jensen, 2009.

A Lei de deslocamento de Wien fornece, a partir da curva de radiação de um corpo negro (Figura 2.4), o local do espectro onde devem ser realizadas as observações por sensores remotos. A energia irradiada pelos corpos e que chega aos sensores, porém, não é exatamente a energia que foi irradiada pelo corpo. Segundo Jensen (2009), o mundo não é composto de corpos negros irradiadores e sim de corpos que irradiam seletivamente. A razão entre a radiação real emitida por um corpo do mundo real que irradia seletivamente e um corpo negro à mesma temperatura, fornece a emissividade do corpo em questão (água, solo, vegetação, etc.). A emissividade (ϵ) de todos os corpos que irradiam seletivamente varia entre zero e um, sendo que, somente um corpo negro pode ter emissividade igual a um (JENSEN, 2009; NOVO, 2008).

A importância do conhecimento do valor da emissividade justifica-se a partir da Lei da Radiação de Kirchoff, pela qual a emissividade espectral de um objeto, na região do

infravermelho do espectro eletromagnético (termal), é igual à sua absorptância espectral, e que a transmitância é praticamente nula (JENSEN, 2009). Com isso, a interação do fluxo radiante espectral com o terreno é demonstrada pela Equação 2.10.

$$1 = \rho_{\lambda} + \varepsilon_{\lambda} \quad (2.10)$$

onde ρ_{λ} corresponde à reflectância e ε_{λ} corresponde à emissividade.

Através desta relação pode-se concluir que bons absorvedores são bons emissores e bons reflectores são maus emissores. Sendo assim, devido à relação inversa entre a reflectância e a emissividade, a equação (2.10) explica como os objetos são observados no infravermelho termal. Bons emissores aparecem claros em uma imagem, enquanto que maus emissores aparecem escuros em uma imagem no infravermelho termal (JENSEN, 2009).

Além disso, a emissividade faz com que a temperatura radiante aparente do objeto seja diferente de sua temperatura cinética verdadeira, ou seja, o fluxo radiante de um objeto no mundo real a uma dada temperatura não é igual ao fluxo radiante de um corpo negro à mesma temperatura (JENSEN, 2009).

O conhecimento da emissividade de um objeto torna possível modificar a lei de Stefan-Boltzmann (equação 2.3), aplicada a um corpo negro, fazendo com que ela se ajuste ao fluxo radiante espectral dos materiais do mundo real (JENSEN, 2009), conforme a equação a seguir (2.11):

$$M_r = \varepsilon \sigma T_{cin}^4 \quad (2.11)$$

onde M_r , intensidade da radiação emitida por um corpo no mundo real; ε , a emissividade do objeto; σ , a constante de Stefan-Boltzmann, $\sigma = 5,6697 \times 10^{-8} W/m^2.K^4$; T_{cin} , a temperatura cinética do objeto, em kelvin.

No entanto, os sistemas de sensoriamento remoto no infravermelho termal registram a temperatura radiante aparente de um objeto no terreno, e não a temperatura cinética verdadeira (JENSEN, 2009; NOVO, 2008). A relação entre as duas se dá a partir da emissividade. A temperatura radiante pode ser obtida como sendo igual à raiz na quarta da emissividade vezes a temperatura cinética verdadeira. Segundo Jensen (2009), a emissividade

deve ser levada em conta quando se calcula a temperatura radiante do objeto, para que não haja subestimação da temperatura cinética verdadeira.

2.4. DETECÇÃO DE QUEIMADAS POR SENSORIAMENTO REMOTO

Conforme Setzer et al. (2007), a detecção de queimadas por sensoriamento remoto possui dois tipos: detecção de focos ativos (com a presença do fogo); e o das áreas queimadas, onde se observam as cicatrizes deixadas pelo fogo após a sua extinção.

A detecção de focos ativos por sensores remotos ocorre na faixa do infravermelho, com comprimento de onda próximo a 4 μ m (WOOSTER et al., 2005; FRANÇA, 2000). Esta faixa de comprimento de onda é a que melhor caracteriza uma queimada (WOOSTER et al., 2005; FRANÇA, 2000), como evidenciado pela aplicação das leis físicas de Stefan-Boltzman e a Lei de deslocamento de Wien (JENSEN, 2009, NOVO, 2008).

Atualmente os principais sensores utilizados para a detecção de focos ativos possuem diferentes resoluções espaciais e temporais, sendo assim é possível detectar queimadas em diferentes horários (desde que as mesmas possuam temperatura suficiente para sensibilizar o sensor). O Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) possui programas de monitoramento de queimadas (disponíveis em: <http://sigma.cptec.inpe.br/queimadas/>; <http://www.dpi.inpe.br/proarco/bdqueimadas/>), no qual são disponibilizados os focos de queima para o Brasil e América do Sul. Dentre os sensores utilizados destacam-se o *Geostationary Operational Environmental Satellite* (GOES), *Advanced Very High Resolution Radiometer* (AVHRR), MODIS (TERRA e AQUA). Os sensores utilizados pelo INPE possuem alta resolução temporal (diária), o que permite obter pelo menos 16 detecções diárias (SISMANOGLU; SETZER, 2005), porém são sensores de baixa resolução espacial, que varia de 1km a 4km. Devido à resolução espacial dos sensores, muitas vezes, a localização exata dos focos pode variar entre um satélite e outro (INPE, 2011a).

Dependendo da resolução espacial do pixel do sensor e levando em consideração as diferentes fases e características de uma queimada, a detecção feita por dados de sensores remotos indica a localização dos focos, que podem ser menores do que a área do pixel, ou então conter vários focos em um pixel. Segundo dados de validações em campo, é

possível detectar queimadas que possuam frentes de fogo de aproximadamente 30x1m para os satélites de órbita polar como o *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA) e os satélites TERRA e AQUA; e o dobro do tamanho para os geoestacionários como o (GOES) e o *Meteosat Second Generation* (MSG) (INPE, 2011b).

Outros sensores foram desenvolvidos para a detecção de focos de calor, como o *Hot Spot Recognition Sensor* (HSRS) do satélite *Bi-Spectral Infrared Detection* (BIRD), o *Spinning Enhanced Visible Infrared Imager* SEVIRI, do Meteosat, entre outros. No sítio do centro de monitoramento global de fogo (em <http://www.fire.uni-freiburg.de/>), podem ser obtidas informações sobre os principais sensores e programas de monitoramento de queimadas. Os dados obtidos por sensores remotos são importantes para auxiliar na determinação, localização de focos de queimadas, além do desenvolvimento de metodologias para a estimativa de biomassa queimada e as emissões causadas pela mesma.

2.5. ESTIMATIVA DE EMISSÕES POR QUEIMADAS UTILIZANDO O SENSORIAMENTO REMOTO

As informações obtidas por aeronaves, satélites e dados terrestres foram, por muito tempo, utilizadas apenas para indicar focos de queimadas e não apresentavam estimativas eficazes sobre a quantidade de vegetação queimada e as emissões liberadas no processo de combustão (WOOSTER et al., 2003; ICHOKU; KAUFMAN, 2005).

Segundo Roberts et al. (2005) e Ichoku e Kaufman (2005), a estimativa sobre a quantidade de biomassa queimada a partir de dados de sensoriamento remoto é derivada, indiretamente, da Equação 2.12 (SEILER; CRUTZEN, 1980):

$$M_{biomassa} = A \times B \times \alpha \times \beta \quad (2.12)$$

onde $M_{biomassa}$ representa a quantidade de biomassa queimada (medida em kg); A , a área queimada (medida em m²); B , a quantidade de biomassa por área (dada em kg/m²); α a fração de biomassa acima do solo em relação à quantidade de biomassa por área; β a fração de combustível que realmente queimou (eficiência da combustão).

As variáveis da Equação 2.12 normalmente são obtidas por dados de sensores remotos (como a área queimada e também a partir de mapas de vegetação para o conhecimento do tipo de vegetação onde o foco foi detectado) e por medições em campo ou a partir de inventários realizados com diferentes tipos de vegetação submetida à queima. Estes inventários podem ser obtidos em relatórios disponibilizados pelo Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI, 2002), no caso do Brasil, que segue as instruções de relatórios do Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (*Intergovernmental Panel on Climate Change – IPCC*) com dados para o Cerrado e áreas agrícolas.

A partir da Equação 2.12, algoritmos e produtos de sensoriamento remoto de detecção de área queimada (focos de calor) foram desenvolvidos a fim de estimar as emissões de gases e aerossóis para a atmosfera (ICHOKU; KAUFMAN, 2005). Os dados sobre a quantidade de biomassa queimada ($M_{biomassa}$) podem ser utilizados para determinar a quantidade de gases e aerossóis emitidos para a atmosfera, quando relacionados com fatores de emissões de diferentes espécies vegetais (ICHOKU; KAUFMAN, 2005). O fator de emissão é um número que fornece diretamente a quantidade de emissão de um dado composto químico em função da quantidade de biomassa queimada (FREITAS et al., 2005).

Resultados de diversas pesquisas científicas, desenvolvidas para quantificar as emissões de gases por queima de biomassa, foram reunidos por Andreae e Merlet (2001); a partir destes dados, os referidos autores publicaram em um único artigo, fatores de emissão de diferentes compostos químicos para diferentes tipos de vegetação. Esses fatores de emissão, quando multiplicados por $M_{biomassa}$ (obtida pela Equação 2.12), fornecem a quantidade de aerossóis e gases traços emitidos para a atmosfera (ICHOKU; KAUFMAN, 2005), conforme a Equação 2.13 (ANDREAE; MERLET, 2001):

$$M_x = EF_x \times M_{biomassa} \quad (2.13)$$

onde M_x representa a massa emitida pela espécie pirogênica x , EF_x (dada em gramas de espécies pirogênicas por quilograma de matéria seca/biomassa queimada) representa o fator de emissão da espécie pirogênica x .

Mesmo que se tenha boa precisão na determinação dos fatores de emissão, não é possível afirmar o mesmo para a determinação da quantidade de biomassa efetivamente queimada ($M_{biomassa}$) a partir de dados de sensores remotos, principalmente pela dificuldade de

obtenção das variáveis da Equação 2.12 (B , α e β) (ICHOKU; KAUFMAN, 2005). Uma técnica que vem sendo muito utilizada para quantificar a biomassa queimada com dados de sensores remotos, consiste em utilizar a *Potência Radiativa do Fogo (PRF)*.

2.6. POTÊNCIA RADIATIVA DO FOGO

A *PRF* é uma medida da energia radiante liberada por unidade de tempo pela queima de vegetação, devido à oxidação do carbono (ROBERTS et al., 2005). O conceito da energia liberada pelo fogo com o uso de dados de sensores remotos foi introduzido por Kaufman et al. (1996, 1998a, 1998b) que, em contrapartida às técnicas utilizadas em sensoriamento remoto para detectar os focos de queima, propôs um método capaz de quantificar a energia irradiada durante o processo de combustão, que pode ser relacionada com a intensidade do fogo e a taxa de consumo de biomassa (WOOSTER, 2002; WOOSTER et al., 2003).

O uso da *PRF* na estimativa de emissões de gases, aerossóis e material particulado por queimadas possui vantagens em relação ao uso dos métodos tradicionais. A *PRF* (dada em megawatts – MW ou MJ/s) é uma medida da potência do fogo, que pode ser relacionada com $M_{biomassa}$ (Equação 2.12), sem a dependência do uso das variáveis A , B , α e β , e pode ser utilizada para derivar a taxa de queima da vegetação e das emissões de gases e aerossóis em tempo quase real, diferentemente de métodos que utilizam áreas queimadas, que dependem das variáveis da Equação 2.12, e que só podem ser determinados quando o fogo cessa (ICHOKU; KAUFMAN, 2005).

A integração temporal da *PRF* permite gerar a *Energia Radiativa do Fogo (ERF)* (ROBERTS et al., 2005; WOOSTER et al., 2005; WOOSTER et al., 2003). A *ERF* (dada em megajoules - MJ) pode ser definida como a parte da energia química liberada na queima de biomassa emitida como radiação no processo de combustão (WOOSTER et al., 2003). Estudos utilizando a *PRF/ERF* foram propostos por diversos autores, com diferentes metodologias. A *PRF/ERF* tem como princípio as leis que regem a faixa da radiação infravermelha, como a Lei de Stefan-Boltzmann, a Lei de deslocamento de Wien e a Lei de Planck. Os dados de *PRF/ERF* são obtidos por sensores remotos na faixa do infravermelho

médio do espectro eletromagnético (equivalente a $4\mu\text{m}$). Nesta faixa de comprimento de onda, a intensidade radiante do fogo é maior (WOOSTER et. al, 2005). Além disso, esta técnica visa prover um melhoramento nas estimativas de gases e aerossóis liberados no processo de combustão e a quantidade de biomassa efetivamente queimada (WOOSTER et al., 2003; PEREIRA, 2008).

2.6.1. DERIVAÇÃO DA PRF

A energia emitida por um pixel possui n componentes termais, devido à diferença de fases do fogo, que por sua vez possuem diferentes temperaturas e áreas dentro do pixel (WOOSTER et al., 2003; WOOSTER et al., 2005). Para cada pixel de fogo, o total da *PRF* emitida por todos os componentes termais em um pixel, pode ser calculado a partir da Equação 2.14.

$$PRF_{VERDADEIRA} = A_{sampl} \varepsilon \sigma \sum_{i=1}^n A_n T_n^4 \quad (2.14)$$

onde $PRF_{VERDADEIRA}$ representa a *PRF* (W); A_{sampl} , a área do pixel de fogo (m^2); ε , a emissividade; σ , a constante de Stefan-Boltzmann ($5,67 \times 10^{-8} \text{W/m}^2 \cdot \text{K}^4$); A_n , a fração da área do pixel de cada componente; T_n^4 , a temperatura de cada componente.

A Equação 2.14, porém, é inapropriada para ser analisada por imagens de satélite, pois as resoluções espaciais das mesmas não são capazes de resolver cada componente termal da equação presente no pixel (RIGGAN et al., 2004, apud ROBERTS et al., 2005), além disso, conforme Wooster et al. (2003), a Equação 2.14 descreve a emissão total da *PRF* ao longo do espectro eletromagnético, o que em imagens de satélite não ocorre, pois as mesmas normalmente detectam somente uma faixa (região) de comprimento de onda.

As queimadas, quando observadas do espaço pelos sensores remotos, geralmente são muito menores do que um pixel e a temperatura de brilho do pixel que emite radiação do fogo é significativamente menor do que a temperatura verdadeira emitida (WOOSTER et al., 2005). Para derivar a *PRF* e resolver os problemas de detecção de queimadas em sensores espaciais, métodos foram desenvolvidos a fim de resolver problemas de queimadas em nível de subpixel.

2.6.2. METODOLOGIAS PARA DERIVAR A PRF

A derivação da *PRF* pode ser feita com a utilização de duas bandas espectrais, como no método proposto por Dozier (1981), ou com a utilização de uma banda espectral, centrada no infravermelho médio (aproximadamente 4 μ m), como na metodologia utilizada por Kaufman et al. (1996; 1998b) e Wooster et al. (2003).

Os métodos mais comuns utilizados para derivar a *PRF* são apresentados a seguir, e consistem basicamente em três metodologias. A metodologia apresentada por Kaufman et al. (1996; 1998b), que introduziu o conceito de *PRF* com o uso de dados de sensores remotos e realizou os experimentos com o sensor *Modis Airborne Simulator*; uma adaptação da metodologia apresentada por Dozier (1981), pela qual é possível extrair a *PRF*; e a metodologia introduzida por Wooster et al. (2003), usando o conceito de radiância espectral. A diferença entre os métodos se dá pela aplicação conveniente de diferentes sensores existentes e suas características (resoluções).

2.6.2.1. MÉTODO BI-ESPECTRAL

Para resolver o problema Equação 2.14 e obter a *PRF*, pesquisadores têm utilizado uma metodologia desenvolvida por Dozier (1981), chamada de método bi-espectral, capaz de relacionar as medidas obtidas por satélite no infravermelho e a energia emitida em todos os comprimentos de onda (WOOSTER et al., 2005). O uso do método bi-espectral para a derivação da *ERF*, entretanto, é relativamente novo (WOOSTER et al., 2003).

O método bi-espectral, inicialmente foi proposto por Dozier (1981) para caracterizar a temperatura e a área do fogo com a utilização de duas bandas espectrais na região do infravermelho (infravermelho médio - MIR e infravermelho termal - TIR). O método foi desenvolvido com a utilização das bandas 3 e 4 do sensor AVHRR. A utilização deste método possibilita calcular a temperatura e a área em nível de subpixel dessa emissão, que pode ser reproduzida em dois canais espectrais (WOOSTER et al., 2005). A partir da obtenção da temperatura individual e da área no subpixel, não é necessário utilizar a componente multitermal da Equação 2.14, assumindo assim que $n=1$ (WOOSTER et al.,

2003; WOOSTER et al., 2005; ROBERTS et al., 2005). Com esta adaptação na equação é possível obter a *PRF* (WOOSTER et al., 2003; WOOSTER et al., 2005; ROBERTS et al., 2005).

A utilização do método bi-espectral funciona melhor com dados de alta resolução espacial, pois quando utilizada com sensores de média e baixa resolução espacial, pode apresentar alguns erros, como a mistura dos sinais nos dois canais espectrais (WOOSTER et al., 2003; ROBERTS et al., 2005). Quando são utilizados sensores de média e baixa resolução espacial, como o MODIS e o GOES, o tamanho das queimadas também influencia nos erros assumidos no método bi-espectral. Nesse sentido, quando utilizados sensores com baixa resolução espacial, grandes queimadas são mais bem caracterizadas quando utilizado este método, principalmente pela influência do sinal de *background*, determinado pelos pixels vizinhos ao da queimada e estimados pelo canal do infravermelho termal (TIR), que conforme Wooster et al. (2003), pode ocasionar grandes erros em pequenas queimadas, pelo fato de o ambiente ao redor da queimada fornecer mais informação que a própria queimada.

2.6.2.2. MÉTODO MODIS

Kaufman et al. (1996) introduziram o conceito de *PRF*, com o uso do sensor *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer* (MODIS), que permite gerar dados capazes de serem relacionados diretamente com a intensidade do fogo e com o total de vegetação consumida por unidade de tempo, utilizando apenas uma banda espectral, centrada no canal 4 μ m (banda 21 do MODIS).

Os primeiros experimentos com *PRF* propostos por Kaufman et al. (1996, 1998a, 1998b, 1998c) foram realizados com a utilização do sensor *Modis Airborne Simulator* (MAS), através do projeto *Smoke/Sulfate, Clouds, and Radiation - Brazil* (SCAR-B) e *Smoke/Sulfate, Clouds, and Radiation - Califórnia* (SCAR-C). Os dados obtidos por estes experimentos foram utilizados para estabelecer a relação entre as propriedades termais do fogo, taxa de consumo da biomassa e cicatrizes deixadas pelo fogo, além da emissão de aerossóis e gases traços (KAUFMAN et al., 1996; KAUFMAN et al., 1998c; KAUFMAN et al., 2003). A componente radiante da energia emitida é a *PRF* que é baseada na relação semi-empírica entre a *PRF* e a radiância espectral obtida pelo sensor (JUSTICE et al., 2006;

WOOSTER et al., 2003). A Equação 2.15, obtida por Kaufman et al. (1998b), é uma equação global inserida no algoritmo do produto MODIS para o cálculo da *PRF* e mostra as variáveis utilizadas para a obtenção da *PRF* no canal 4 μ m (banda 21) do sensor MODIS.

$$PRF = (4,34 \times 10^{-19} MWK^{-8} km^{-2})(T_4^8 - T_{4b}^8)A_{pix} \quad (2.15)$$

onde *PRF* (em MW) corresponde ao pixel do poder radiativo do fogo; T_4 (em K) é a temperatura de brilho do pixel de fogo, no canal 3,96 μ m (4 μ m) e T_{4b} corresponde à temperatura de brilho ao redor do pixel de fogo no canal 3,96 μ m (4 μ m) e A_{pix} corresponde à área total do pixel (em km²).

O algoritmo desenvolvido neste método é aplicável somente neste sensor. O uso desta metodologia requer ajustes no algoritmo para poder ser aplicado com os dados de outros sensores (WOOSTER et al., 2003). A principal vantagem deste método em relação ao método bi-espectral se deve à utilização de apenas uma banda espectral para caracterizar o foco de queimada e a área de entorno, removendo os problemas de mistura dos sinais, além de diminuir as incertezas referentes à região de entorno da área da queimada (*background*) (WOOSTER et al., 2005). Outra questão se refere às distorções ocorridas na área do pixel fora do nadir, que pode chegar a 4 km nas bordas (SETZER et al., 2007). Para resolver esta questão, a equação é multiplicada pela área real do pixel.

2.6.2.3. MÉTODO RADIÂNCIA ESPECTRAL

Wooster et al. (2003) propuseram um método para derivar a *PRF* a partir do conceito de radiância espectral no infravermelho médio (MIR), com a utilização do *Hot Spot Recognition Sensor* (HSRS) a bordo do Satélite *Bi-Spectral Infrared Detection* (BIRD), um microsatélite desenvolvido para identificar focos de calor na resolução espacial de 370m. A metodologia proposta por Wooster et al (2003) foi testada em focos de calor que continham três fases (resfriamento, brasas e chamas) e é baseada nas leis físicas que regem o infravermelho termal e pode ser aplicada para outros sensores. Os dados obtidos foram comparados com os dados obtidos das imagens do sensor MODIS do satélite TERRA.

A metodologia se baseia na teoria de que a radiância espectral $L(\lambda)$ emitida por um corpo negro a um comprimento de onda (λ) é dada pela função de Planck (Equação 2.16),

e pode ser aproximada sobre uma faixa particular de temperatura (Equação 2.17, WOOSTER; ROTHERY, 1997, apud WOOSTER et al., 2003). Wooster et al. (2003) demonstraram que a relação entre a radiância espectral e a temperatura emitida pela queima de vegetação se aproximada à lei de Stefan-Boltzmann, ou seja, é proporcional à quarta potência da temperatura emitida (T^4), no comprimento de onda $4\mu\text{m}$. Com isso, foi observado que a relação entre a *PRF* medida em todos os comprimentos de onda e a radiância espectral em $4\mu\text{m}$ é constante na faixa de temperatura de aproximadamente 600K a 1500K.

$$L(\lambda, T) = \frac{C_1}{\lambda^5 \left(\exp\left(\frac{C_2}{\lambda T}\right) - 1 \right)} \quad (2.16)$$

$$L(\lambda) = aT^b \quad (2.17)$$

onde L corresponde à radiância espectral; λ corresponde ao comprimento de onda (medido em m); T , é a temperatura (em K); C_1 e C_2 são constantes já referidas; a e b são constantes derivadas empiricamente, e que dependem do comprimento de onda e faixa de temperatura utilizada.

Neste sentido, assumindo a faixa de temperatura ($\sim 600\text{K}$ - $\sim 1500\text{K}$) é possível obter a radiância espectral para n componentes termais (devido à relação entre T^4 e MIR), a partir da Equação 2.18 (WOOSTER et al., 2003):

$$L_{IVM} = \varepsilon_{IVM} a \sum_{i=1}^n A_n T_n^4 \quad (2.18)$$

onde L_{IVM} representa a radiância espectral do pixel de fogo e ε_{IVM} , a emissividade, no infravermelho médio; a , a constante ($\text{W/m}^4 \cdot \text{sr} \cdot \mu\text{m} \cdot \text{K}^4$) determinada a partir de uma relação linear (para a banda 21 do MODIS, $a = 3,0 \times 10^{-19}$, e para o HSRS MIR, $a = 3,3 \times 10^{-19}$); A_n , a fração da área do pixel de cada componente termal; T_n^4 , a temperatura de cada componente termal.

Assim, a relação entre a *PRF* e MIR é dada pela equação 2.19, que é uma junção das Equações 2.14 e 2.18 (WOOSTER et al., 2003):

$$ERF_{IVM} = \frac{A_{\text{sampler}} \varepsilon \sigma}{a \varepsilon_{IVM}} L_{IVM,F} \quad (2.19)$$

onde L_{IVM} representa a radiância no infravermelho médio do pixel de fogo.

Como $L_{IVM,F}$ representa a radiância espectral somente do pixel de fogo, quando os dados de sensores remotos são analisados, a radiância espectral pode ser obtida pela subtração dos pixels vizinhos do pixel de fogo, pelo pixel de fogo. Além disso, se os pixels de fogo se comportam como corpos cinza, então $\varepsilon = \varepsilon_{IVM}$, que segundo Wooster et al (2003), é uma suposição que pode ser atualizada quando se tem dados precisos das chamas. Assim, o método da radiância espectral no infravermelho médio resulta em duas equações, uma para o MODIS e uma para o BIRD (Equação 2.20 e Equação 2.21, respectivamente).

$$MODIS_{ERF\ IVM} = 1,89 \times 10^7 (L_{IVM} - L_{IVM,viz}) \quad (2.20)$$

$$BIRD_{ERF\ IVM} = 5,93 \times 10^5 (L_{IVM} - L_{IVM,viz}) \quad (2.21)$$

onde $ERF\ IVM$ é a energia radiativa no infravermelho médio; L_{IVM} é a radiância espectral do pixel de fogo e $L_{IVM,viz}$ corresponde à radiância espectral no infravermelho médio dos pixels vizinhos.

O método da radiância espectral, que assim como o método MODIS utiliza apenas uma banda espectral para derivar a PRF , em $4\mu\text{m}$, tem como principais diferenças em relação ao método MODIS, o uso da radiância espectral ao invés da temperatura de brilho (utilizada no algoritmo do MODIS). Além disso, a equação utilizada no algoritmo do método da radiância espectral é linear, o que torna o método menos suscetível a erros (WOOSTER et al., 2005).

Esta metodologia possibilita que a PRF seja derivada a partir de sensores com baixa resolução espacial, como os geostacionários (ROBERTS et al., 2005), sendo este método utilizado no algoritmo do sensor SEVIRI para medir a PRF . Além disso, o método desenvolvido por Wooster et al. (2003), tem sido utilizado para a determinação de biomassa queimada, como em experimentos realizados por Wooster et al. (2003), Roberts et al. (2005), Wooster et al. (2005), Freeborn et al. (2008) e Pereira (2008).

A derivação da PRF pelos métodos apresentados anteriormente, tem sido utilizada para a determinação de relações entre os valores de PRF e as emissões de fumaça para a atmosfera e também entre a biomassa queimada. Essas relações têm gerado coeficientes que podem ser utilizados para determinar as emissões de fumaça e a biomassa queimada em tempo quase real (a partir de sensores com alta resolução temporal), como

demonstrado em estudos realizados por Ichoku e Kaufman (2005); Wooster et al. (2005); Pereira, 2008; Freeborn et al. (2008).

2.7. COEFICIENTES BASEADOS NA ENERGIA RADIATIVA DO FOGO

A *PRF* tem sido utilizada para caracterizar queimadas e focos de calor, sendo objeto de estudo para o desenvolvimento de algoritmos para uso em diferentes sensores. A partir das emissões causadas pelas queimadas e do consumo de biomassa e, considerando a heterogeneidade dos sistemas terrestres, o desenvolvimento de metodologias tem proporcionado a obtenção de coeficientes que podem ser utilizados diretamente com a *PRF*, tanto para a derivação de dados de emissão de fumaça para a atmosfera, como de consumo de biomassa, sem a necessidade do uso de dados de campo (ICHOKU; KAUFMAN, 2005; WOOSTER et al., 2005).

2.7.1. COEFICIENTES DE EMISSÃO

A obtenção da *PRF* permite a determinação de coeficientes de emissão de fumaça a partir de queimadas. Ichoku e Kaufman (2005) propuseram uma metodologia com dados baseados na *PRF* do sensor MODIS, que permitiu gerar um coeficiente de emissão de fumaça para diferentes regiões do planeta (Figura 2.5; Quadro 2.1). Para a América do Sul, foram definidos três coeficientes de emissão, para três regiões, que englobam vários ecossistemas. Utilizando a mesma metodologia, Pereira (2008) estimou os coeficientes de emissão para o sensor *Wildfire Automated Biomass Burning Algorithm* (WFABBA) do *Geostationary Operational Environmental Satellite* (GOES), nas mesmas regiões propostas por Ichoku e Kaufman (2005) (Figura 2.6). A partir das estimativas de área queimada e da emissão de fumaça, Pereira (2008) gerou o fator de emissão de cada gás para diferentes ecossistemas, com a utilização dos fatores de emissão propostos por Andreae e Merlet (2001).

A relação entre a *PRF* e a taxa de emissão de fumaça utilizada por Ichoku e Kaufman (2005) e Pereira (2008), é dada pela Equação 2.22 (ICHOKU; KAUFMAN, 2005):

$$M_x = C_e \times PRF \quad (2.22)$$

onde M_x representa a massa emitida pela espécie x , C_e (dado em gramas de espécies pirogênicas por kg de biomassa queimada) representa o coeficiente de emissão da espécie x .

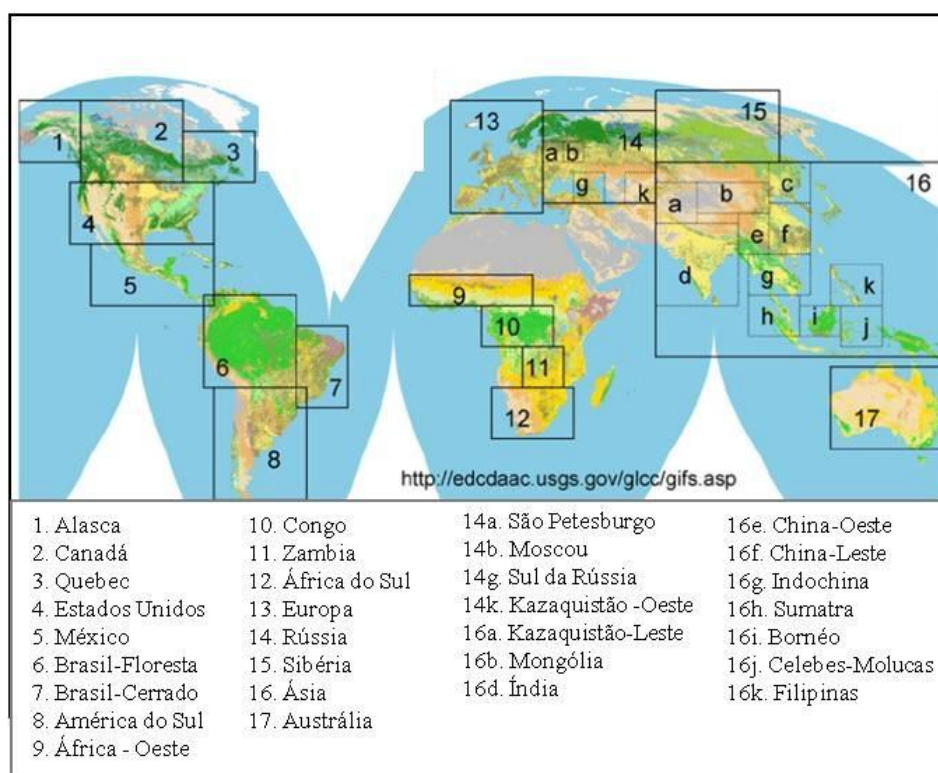


Figura 2.5. Categorias de ecossistemas separados por regiões (números e letras) conforme a classificação adotada pelo *International Geosphere-Biosphere Program* (IGBP) e mapa de uso e cobertura do sensor AVHRR.

Fonte: Modificado de Ichoku e Kaufman (2005).

Região	Descrição	Coefficientes de emissão de Material Particulado (MP)
	Região de savana e campos	
Brasil - Cerrado	Cerrado, região de savana	0,048
América do Sul	Abaixo de 20°S	0,061
Oeste da África	Região Oeste da África	0,059
Zambia	África do Sul	0,076
	Região de floresta tropical	
Bornéio	Ilha da Indonésia	0,079
Brasil - Floresta	Floresta tropical, Brasil	0,063
Celebes e Molucas	Ilhas, Indonésia	0,068
Congo	Floresta tropical, África	0,048
	Região de Floresta Boreal	
Alasca	Região do Alasca	0,020
Canadá	Abaixo de 70°N (menos Quebec)	0,020
Quebec	Quebec e oeste de Ontário	0,020
Sibéria	Norte da Sibéria (60°N)	0,057
	Região de Terras cultiváveis/Vegetação Natural	
Moscou	Moscou e região de entorno	0,100
sul da Rússia	Região sul da Rússia	0,084
São Petesburgo	São Petesburgo e região de entorno	0,104
	SEM CLASSIFICAÇÃO	
Europa	Europa (menos a Rússia)	0,056
Leste do Cazaquistão	Região leste do Cazaquistão	0,018
Mongólia	Mongólia	0,033
Filipinas	As Filipinas	0,127

Quadro 2.1. Coeficientes de emissão de aerossol emitido por queimadas baseados na *ERF*, obtida pelo sensor MODIS, com campos de ventos em 850 mb, conforme metodologia utilizada por Ichoku e Kaufman (2005), utilizando as regiões da Figura 2.5.

Fonte: Modificado de Ichoku e Kaufman (2005).

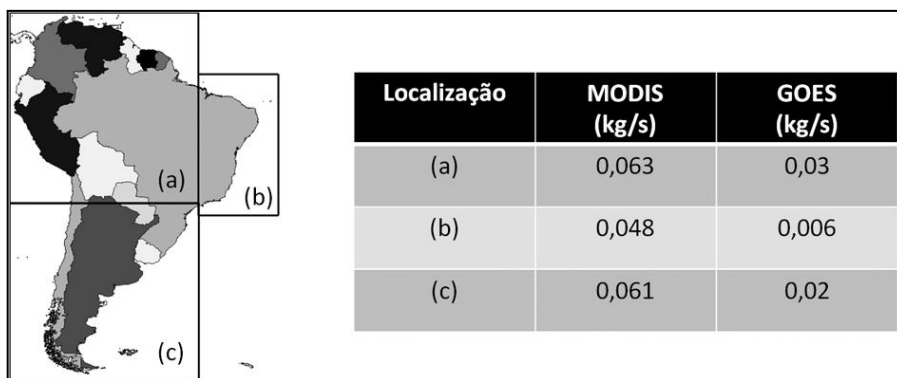


Figura 2.6. Taxa de emissão de aerossóis estimado por Ichoku e Kaufman (2005) para o MODIS e por Pereira (2009) para o GOES, nas três categorias de ecossistemas adotadas pelo IGBP no Brasil: (a) Brasil-Floresta, (b) Brasil-Cerrado, (c) América do Sul abaixo de 20° - latitude sul.

Fonte: Pereira et al. (2010).

Estes coeficientes são importantes para os modelos que estimam a emissão de gases e aerossóis com dados de sensores remotos. O processo de combustão, porém, depende do tipo de vegetação que está sendo consumida pelo fogo (LONGO et al., 2009; ICHOKU; KAUFMAN, 2005).

2.7.2. COEFICIENTES DE CONSUMO DE BIOMASSA

Os resultados obtidos por experimentos realizados por Kaufman et al. (1998a; 1998b); Wooster (2002), Wooster et al. (2003), Wooster et al. (2005); Roberts et al. (2005); Freeborn et al. (2008); Pereira (2008), utilizando a energia do fogo, sugeriram uma relação linear entre a taxa de consumo de biomassa e a *PRF*, com a utilização de diferentes sensores.

Wooster (2002) realizou o primeiro experimento *in situ* para examinar a relação entre o consumo de biomassa e a *PRF*, primeiramente verificada por Kaufman et al. (1996, 1998a). A relação linear obtida no experimento realizada por Wooster (2002) entre o consumo de biomassa e a *PRF* serviu de base para novos experimentos e a derivação de coeficientes baseados no consumo de biomassa e a *PRF*.

O primeiro coeficiente foi gerado por Wooster et al (2005), a partir do uso de espectrorradiômetro e com experimento montado em campo. A metodologia utilizada para a derivação da *PRF* pelo experimento com o espectrorradiômetro, em relação ao consumo de biomassa, foi a do método da radiância espectral (WOOSTER et al., 2003).

Utilizando a mesma metodologia proposta por WOOSTER (2005), Freeborn et al. (2008) e Pereira (2008), obtiveram coeficientes de consumo de biomassa para outras espécies vegetais localizadas em outras regiões.

A partir da relação linear existente entre a *PRF* e a queima de biomassa, verificada com diferentes espécies vegetais, os dados de experimentos *in situ* com a *PRF* e o consumo de biomassa, realizados por Wooster et al. (2005), Freeborn et al. (2008) e Pereira (2008), resultaram na determinação de coeficientes de consumo de biomassa que, quando multiplicados pela *PRF* (ou *ERF*), indicam a quantidade de biomassa consumida pelo fogo, conforme a Equação 2.23 (WOOSTER et al., 2005):

$$BC = C_e \times PRF \quad (2.23)$$

onde *BC* representa a taxa de biomassa consumida (em Kg/s), C_e (em kg/MJ) representa o coeficiente de consumo de biomassa e *PRF* (dada em MJ/s) representa a potência radiativa do fogo.

A metodologia utilizada para obter os coeficientes de consumo de biomassa foi a desenvolvida por Wooster (2003), a partir do método de radiância espectral. O coeficiente estimado por Wooster et al. (2005) foi de 0,368 kg/MJ ($\pm 0,015$ kg/MJ); o por Freeborn et al. (2008) foi de 0,453 kg/MJ ($\pm 0,068$ kg/MJ); e por Pereira (2008) foi de 0,949 kg/MJ. A diferença dos valores entre esses coeficientes se deve a diferentes espécies vegetais utilizadas nos experimentos, em diferentes países. O coeficiente obtido por Pereira (2008) se refere a diferentes tipologias vegetais campestres obtidas no território brasileiro (região do Cerrado, e em São José dos Campos).

O coeficiente de consumo de biomassa determinado por Wooster et al. (2005), tem sido utilizado como um coeficiente universal para a obtenção do consumo de biomassa por dados de satélite. Conforme Kaiser et al.(2012), o sensor MODIS pode ignorar pequenas queimadas e não contém correção atmosférica implementada no produto, o que faz com que as medidas de biomassa queimada obtidas a partir da relação entre a *PRF* —obtida do sensor,

e do coeficiente estimado por Wooster et al. (2005), possam ser bem maiores do que a calculada.

Para resolver essa questão, Kaiser et al. (2012), apresentam um valor universal de coeficiente de consumo, utilizado na primeira versão do *Monitoring Atmospheric Composition and Climate* (MACC) project, do *Global Fire Assimilation System* (GFAS), que monitora queimadas e emissões por satélites. O valor desse coeficiente é de 1,37 kg/MJ. Atualmente, existem oito valores de coeficientes de consumo utilizados pelo MACC, baseados em oito classificações de uso e cobertura da terra que cobrem todo o continente. Esses coeficientes foram derivados a partir de regressões lineares entre a *PRF* mensal, assimilada do GFAS (versão1), e as taxas combustão de matéria seca do *Global Fire Emission Database* (GFED versão 3.1) (HEIL et al., 2010; KAISER et al., 2011). Esses valores são expressos no Quadro 2.2 e a distribuição das classes de cobertura do solo está representada na Figura 2.7.

Classe de cobertura do solo	Abreviatura	Coeficiente de consumo (kg/MJ)	Tipo de combustível
Savana	SA	0,78	SA
Savana com solo orgânico	SASO	0,26	SASO
Agricultura	AG	0,29	AG
Agricultura com solo orgânico	AGSO	0,13	AGSO
Floresta tropical	FT	0,96	FT
Turfa	TURFA	5,87	TURFA
Floresta extratropical	FE	0,49	FE
Floresta extratropical com solo orgânico	FESO	1,55	FESO

Quadro 2.2. Classes de cobertura do solo, com tipo de combustível e coeficiente de consumo correspondente.

Fonte: modificado de Kaiser et al. (2012).

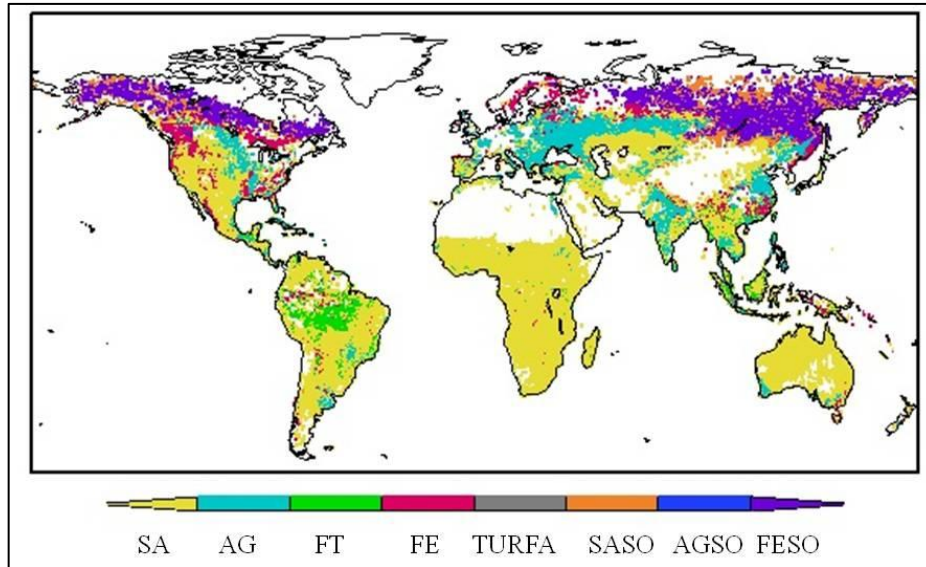


Figura 2.7. Classes de cobertura do solo (sigla indicada no Quadro 2.2) utilizadas para a obtenção dos coeficientes de consumo de biomassa.

Fonte: modificado de Heil et al. (2010).

2.8. SENSOR MODIS

O sensor MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*) faz parte do programa *Earth Observation Surface* (EOS) da *National Aeronautics and Space Administration* (NASA) e está a bordo dos satélites TERRA e AQUA, lançados em 18 de dezembro de 1999 e quatro de maio de 2002, respectivamente (NASA, 2011a).

O satélite TERRA possui órbita polar, heliosíncrona de 99 minutos, e cruza o equador às 10 horas e 30 minutos no sentido Norte-Sul (órbita descendente) e às 22 horas e 30 minutos (NASA, 2011b). A plataforma TERRA teve como missão inicial incrementar o conhecimento do ciclo do carbono e energia no sistema climático da Terra (NASA, 2011c).

O Satélite AQUA possui órbita quase polar, heliosíncrona, de 99 minutos e cruza o equador às 13 horas e 30 minutos no sentido Sul-Norte (órbita ascendente) e à 01 hora e 30 minutos (NASA 2011d). O satélite foi desenvolvido para recolher dados sobre o ciclo da água da Terra, como a evaporação nos oceanos, precipitação e umidade do solo e vapor d'água na atmosfera e nuvens (NASA, 2011e).

As plataformas TERRA e AQUA estão localizadas a 705 km de altitude. Os produtos do sensor MODIS originários da plataforma TERRA recebem a denominação MOD, e os dados são obtidos no período diurno; enquanto que os produtos originários da plataforma AQUA recebem a denominação MYD e os dados são obtidos no período noturno. O sensor MODIS pode captar até quatro imagens diárias em latitudes médias, devido às trajetórias descendentes e ascendentes das plataformas TERRA e AQUA, que cruzam o equador duas vezes ao dia cada uma (NASA, 2011f).

O MODIS faz um imageamento total da cobertura terrestre a cada 1-2 dias, e adquire dados em 36 bandas espectrais, que fornecem informações sobre a superfície terrestre, oceanos e atmosfera (NASA, 2011g). O sensor possui um scanner óptico de varredura transversal, sendo a largura da área observada (*cross-track* ou *swath*) de 2330 km e o comprimento (*along-track*) depende dos instantes de início e fim da obtenção da imagem, podendo ultrapassar 5000 km (NASA, 2006). Este tipo de varredura é designado como *whiskbroom-scanner* ou *cross-tracking-scanner* (Figura 2.8).

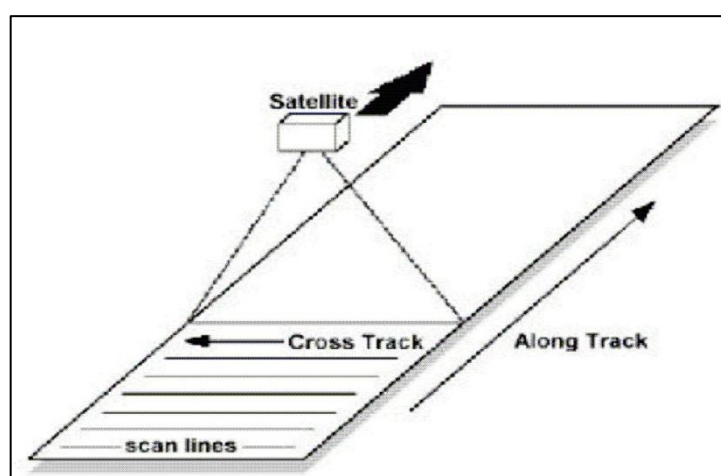


Figura 2.8. Direção da varredura *Swath* do sensor MODIS.

Fonte: NASA (2006)

Além disso, o MODIS é utilizado para monitorar mudanças em larga escala, contribuindo para estudos sobre o ciclo do carbono. Os dados gerados pelo MODIS podem ser utilizados para auxiliar em modelos que medem as emissões causadas por gases e aerossóis, como o dióxido de carbono, por exemplo, e como eles afetam a física e química da atmosfera (JUSTICE et al., 2006).

2.8.1. ALGORITMO MODIS PARA DETECÇÃO DE QUEIMADAS

As fases de chamas e calor latente (brasas) presentes em uma queimada possuem diferentes intensidades de energia, temperatura e taxas de emissão (de fumaça) (JUSTICE et al., 2006). A diferenciação entre essas duas fases pode ser feita com a utilização de dados de sensores remotos, a partir de bandas espectrais centradas no infravermelho, porém, a distinção só é possível se a temperatura do fogo variar significativamente entre as mesmas. Estudos baseados em dados de sensores remotos sugerem que a temperatura da fase de chamas é em torno de $1000\text{K} \pm 200\text{K}$, e a temperatura das brasas (calor latente, brasas) é de $600\text{K} \pm 100\text{K}$ (JUSTICE et al., 2006).

O MODIS possui três canais espectrais capazes de detectar uma ou as duas fases. Os canais estão centrados nos comprimentos de onda $1,65\mu\text{m}$; $2,13\mu\text{m}$ e $3,95\mu\text{m}$ ($4\mu\text{m}$). Em um pixel pode haver áreas sem fogo, áreas com brasas e áreas com chamas. O canal $1,65\mu\text{m}$ do MODIS é sensível à energia do fogo (1000K), porém não é muito sensível à detecção de energia de regiões com brasas. O canal $2,13\mu\text{m}$ é sensível às duas fases, porém este canal espectral satura a uma reflectância de 0,8, o que corresponde a menos de 1% em um pixel de 500m com focos de calor (com chamas). O canal $4\mu\text{m}$ é sensível a estas duas fases e é cinco vezes mais sensível à energia termal emitida pelas chamas do que por brasas, além disso, este canal é sensível a focos de queimadas menores que 10^{-4} do pixel de fogo (JUSTICE et al., 2006).

Para a detecção dos focos de calor, o algoritmo do MODIS utiliza as temperaturas de brilho dos canais $4\mu\text{m}$ e $11\mu\text{m}$. No canal $4\mu\text{m}$, o sensor MODIS possui duas bandas espectrais, que correspondem às bandas 21 e 22, sendo as duas utilizadas no algoritmo de detecção de focos de calor. A diferença entre as duas bandas está no nível de saturação. A banda 21 satura em uma temperatura próxima de 500K e a banda 22 satura em uma temperatura próxima a 331K (JUSTICE et al., 2002; JUSTICE et al., 2006;). Segundo Justice et al. (2006), a banda 22 produz menos ruídos que a banda 21 e também produz menos erros que a segunda; por este motivo a banda 22 é utilizada sempre que possível, a não ser que ocorra saturação do sinal devido à temperatura ou os dados sejam perdidos, então a banda 21 é utilizada.

O canal $11\mu\text{m}$ é derivado da banda 31, a qual possui saturação em torno de 400K . Para a detecção de nuvens e construção das máscaras de nuvens, é utilizada a banda 32,

centrada no canal 12 μ m. Da mesma maneira as bandas 1 e 2, centradas no canal do vermelho e infravermelho próximo, respectivamente, com resolução de 250m, porém agregadas à 1km, são utilizadas para rejeitar falsos alarmes e criar máscaras de nuvens. A banda 7, centrada no canal 2,1 μ m e com resolução de 500m agregada à 1km é utilizada para rejeitar falsos alarmes induzidos por corpos d'água, conforme mostra o Quadro 2.3 (GIGLIO, 2010).

Canal espectral	Comprimento de onda (μ m)	Descrição
1	0,65	Rejeição de falsos alarmes por reflexo solar, áreas costeiras; máscara de nuvens
2	0,86	Rejeição de falsos alarmes por superfícies claras, reflexo solar, áreas costeiras; máscara de nuvens
7	2,1	Rejeição de falsos alarmes (reflexo solar e áreas costeiras)
21	3,96	Canal com alta variação (devido à saturação) para detecção de fogo e caracterização
22	3,96	Canal com baixa variação (devido à saturação) para detecção de fogo e caracterização
31	11	Deteção de focos de calor, máscara de nuvens
32	12	Máscaras de nuvens

Quadro 2.3. Canais espectrais utilizados no algoritmo do MODIS para a detecção dos focos de calor e rejeição de falsos alarmes, respectivos comprimentos de onda e a descrição da finalidade de utilização de cada canal.

Fonte: Modificado de Justice et al. (2006).

2.8.2. MODIS – PRODUTO DE ANOMALIAS TERMAIS

Dentre os produtos de sensoriamento remoto capazes de gerar dados sobre a energia do fogo, o sensor MODIS possui o produto de Anomalias Termiais e Fogo (*MODIS Thermal Anomalies/Fire products*) (NASA, 2011h). Os dados do MODIS são disponibilizados pelas plataformas TERRA e AQUA, com duas observações diárias para cada plataforma. Os dados gerados pela TERRA são obtidos no período diurno; e os dados gerados pela AQUA, no período noturno, totalizando quatro observações diárias em latitudes médias (NASA, 2011f).

Este é o mais básico produto onde focos ativos de calor e outras anomalias termais, como atividades vulcânicas, são identificados. Este produto cobre uma área de aproximadamente 2340 x 2030 km, em *along-scan* (largura do imageamento) e *along track* (direção/comprimento do imageamento), respectivamente, e possui resolução espacial a nadir de 1 km (GIGLIO, 2010). Contém os seguintes componentes: máscara com pixels de focos de calor e outros pixels (água, cobertura de nuvens); nível de qualidade dos pixels detectados como focos de calor, potência radiativa do fogo, entre outros.

Os objetivos deste produto estão relacionados à detecção de mudanças do estado físico da vegetação, e na liberação de gases durante o processo da queima. Esses objetivos visam conduzir modelos regionais de emissões e transporte de gases traços e química da atmosfera (GIGLIO, 2010).

Existem atualmente três formas de disponibilização dos dados: por observações diárias: *Thermal Anomalies/Fire 5-Min L2 Swath 1km* (MOD14/TERRA; MYD14/AQUA), de nível dois, *Thermal Anomalies/Fire Daily L3 Global 1km* (MOD14A1/TERRA, MYD14A1/AQUA) de nível três; ou em composições de oito dias *Thermal Anomalies/Fire 8-Day L3 Global 1km* (MOD14A2/TERRA, MYD14A2/AQUA), de nível três; todos com resolução espacial de 1 km. Além disso, o produto de nível 2 (L2) possui imageamento de cinco minutos (órbita *Swath*), e os dados são disponibilizados em forma de grânulos (*granules*), que pode ser definido como um segmento sem projeção dos dados *Swath*, característico dos produtos MODIS de nível 0, 1 e 2 (GIGLIO, 2010). Já os produtos de nível 2G, 3, 4 possuem projeção sinusoidal e são disponibilizados em forma de *Tiles* (quadrados de aproximadamente 10° x 10°). Como características estão: detecções de ocorrência de fogo, e o cálculo da potência radiativa do fogo (MW). Para a detecção dos focos de calor são utilizadas principalmente as bandas 21e 22, ambas no intervalo de 3,92-3,98 µm.

O cálculo da *PRF* pelo MODIS é dado pela equação 2.24, proposta por Kaufman et al. (1996, 1998b), porém, conforme adequações realizadas no algoritmo, não é mais necessário multiplicar pela área real do pixel para a obtenção da *PRF*, a partir da coleção cinco (GIGLIO; JUSTICE, 2006).

$$PRF = 4,34 \times 10^{-19} (T_4^8 - T_{4b}^8) \quad (2.24)$$

onde *PRF* (medida em MW) corresponde ao pixel do poder radiativo do fogo; T_4 (K) é a temperatura de brilho do pixel de fogo, no canal 3,96 µm e T_{4b} corresponde à temperatura de brilho ao redor do pixel de fogo.

2.9. VEGETAÇÃO NO SUL DO BRASIL

A vegetação da região sul do Brasil é caracterizada pela ocorrência de vegetação florestal e campestre (IBGE, 1992; TEIXEIRA et al., 1986) e contempla os estados do Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul. Em relação à vegetação florestal, esta é composta pela Mata Atlântica, Floresta com Araucária e Floresta Estacional; que correspondem às formações Floresta Ombrófila Densa, Floresta Ombrófila Mista, e Floresta Estacional, respectivamente, conforme a classificação do IBGE (1992). Em relação aos campos sulinos (campos subtropicais), esses pertencem a dois biomas, o bioma Pampa e o bioma Mata Atlântica (IBGE, 2004). Os campos do bioma Pampa são encontrados na metade sul do Rio Grande do Sul, e são semelhantes aos campos encontrados no pampa Uruguaio e Argentino (BEHLING, et al., 2009; BOLDRINI, 2009); e os campos do bioma Mata Atlântica são encontrados no planalto Sul brasileiro, principalmente em Santa Catarina e Rio Grande do Sul, e formam mosaicos de campo e floresta (BOLDRINI, 2009; KERN, 1997a; OVERBECK et al., 2007; PILLAR, 2003). Estes campos também são conhecidos como Campos de Cima da Serra.

A nomenclatura oficial utilizada pelo Instituto brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 1992) adota os termos savana e estepe para se referir aos campos no sul do Brasil (TEIXEIRA et al., 1986). Alguns autores, porém, contestam essa denominação, preferindo utilizar simplesmente a terminologia *Campos* (PILLAR e QUADROS, 1997; MARCHIORI, 2004; BOLDRINI, 1997). A justificativa está no fato que o termo estepe se refere a campos semi-áridos, sob um clima temperado frio, onde as baixas precipitações impedem o crescimento de vegetação florestal, e são campos baixos com um único estrato (OVERBECK et al., 2009).

“O termo savana é inadequado, pois se refere a um tipo de vegetação que possui um misto de espécies herbáceas e lenhosas, em estratos distintos, em regiões tropicais e com precipitação marcadamente sazonal” (WALKER, 2001, apud OVERBECK et al., 2007, p. 104), sendo os termos Campo Limpo (sem componente lenhoso) e Campo Sujo (campo com arbustos) muitas vezes utilizados (BEHLING et al., 2009, OVERBECK et al., 2007); porém são termos para fitofisionomias do Cerrado. Devido a esta contradição clima/nomenclatura, a denominação *Campos* para se referir às formações campestres do sul do Brasil seria mais adequada.

A ocorrência de formações vegetais no sul do Brasil reflete a influência do clima nessa região. O clima úmido favorece o desenvolvimento de florestas, fato já observado por naturalistas como Lindman (1906) e Rambo (1956). A associação entre a existência de um clima úmido (ombrófilo) e a grande extensão de vegetação campestre na região sul do Brasil, principalmente no Estado do Rio Grande do Sul, foi verificada por Lindman (1906) durante sua visita ao Estado no final de 1800. Lindman verificou os campos presentes nessas regiões eram relictos de um clima mais seco. A denominação *Campos* foi primeiramente proposta por Lindman (1906) e enfatizada posteriormente por Rambo (1956).

Behling et al. (2009), Behling (1997); Behling e Pillar (2007) descrevem a evolução do clima e da vegetação no sul do Brasil, a partir de dados palinológicos. Os dados, obtidos por datações radiocarbônicas, mostram que no Pleistoceno tardio (datado entre 14 a 10 milhões de anos antes do presente), o clima era seco e frio e formado predominantemente por vegetação campestre (BEHLING; PILLAR, 2007; BEHLING et al. 2009), imprimindo características de verdadeira estepe à vegetação (MARCHIORI, 2004). No Holoceno Superior (com início há quatro milhões de anos antes do presente) a floresta com araucária começa a prevalecer nas regiões do planalto (há três milhões de anos antes do presente), e a mata atlântica já havia se estabelecido nas escarpas do planalto, assim como as matas nebulares, indicando uma mudança de clima seco para um clima mais úmido e sazonal (BEHLING et al., 2009). O aquecimento e a umidificação no final do Holoceno produziram um efeito de *savanização* na paisagem, com o aparecimento de formas de vida comuns em regiões de savana, porém não sendo uma verdadeira savana (MARCHIORI, 2004).

Apesar da mudança climática ocorrida entre os períodos do Pleistoceno e Holoceno, os campos no sul do Brasil prevalecem, principalmente no Rio Grande do Sul, que possuem a maior parte de campo preservada, já que no Paraná a agricultura avançou consideravelmente sobre estas regiões e em Santa Catarina os campos estão restritos à porção sudeste do Estado (BOLDRINI, 2009). Além disso, conforme Marchiori (2004), as diferenças florístico-estruturais dos campos sulinos refletem muito mais as variantes edáficas e ações antrópicas do que os efeitos climáticos, alternando-se, neste caso, frequentemente em mosaicos (de campo e floresta).

2.9.1. VEGETAÇÃO DO RIO GRANDE DO SUL

O Rio Grande do Sul, ao contrário dos Estados de Santa Catarina e Paraná (pertencentes à região Sul do Brasil), possui basicamente dois terços do seu território composto por campos e um terço composto por vegetação florestal (MARCHIORI, 2004), conforme demonstrado na Figura 2.9.

Os campos do RS são caracterizados fisionomicamente por gramíneas, que constituem o grupo dominante (BOLDRINI, 2009). A diversidade campestre no RS é na ordem de 2.200 espécies (BOLDRINI, 2009), além da coexistência de espécies C₃ (de crescimento no inverno) e C₄ (de crescimento na estação quente, primavera-verão) (BOLDRINI, 2009; OVERBECK et al., 2007; NABINGER et al., 2000).

A vegetação campestre no Rio Grande do Sul está inserida em dois biomas (Figura 2.10): no bioma Mata Atlântica, que cobre a parte norte do Estado (cobrindo 37% da superfície do Estado); e no bioma Pampa, que cobre a metade sul e oeste (cobrindo 63% da superfície do Estado) e é o único bioma no Brasil com ocorrência em apenas um Estado (no RS, com continuidade no Uruguai e Argentina) (IBGE, 2004).

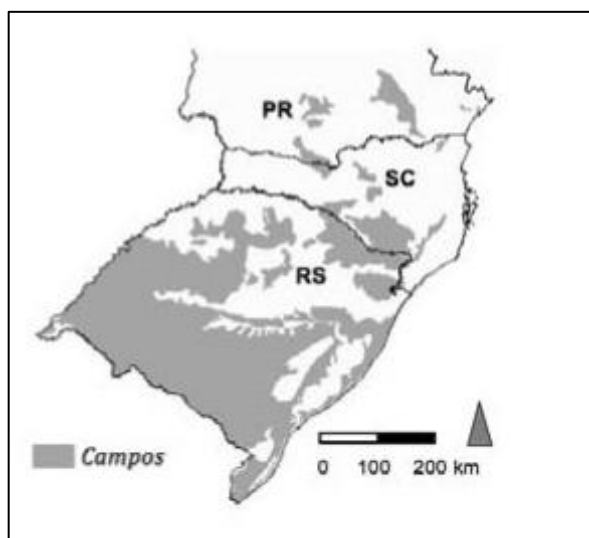


Figura 2.9. Ocorrência de vegetação campestre nos Estados que compõem a região sul do Brasil (Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul).

Fonte: Modificado de Overbeck et al., 2009.

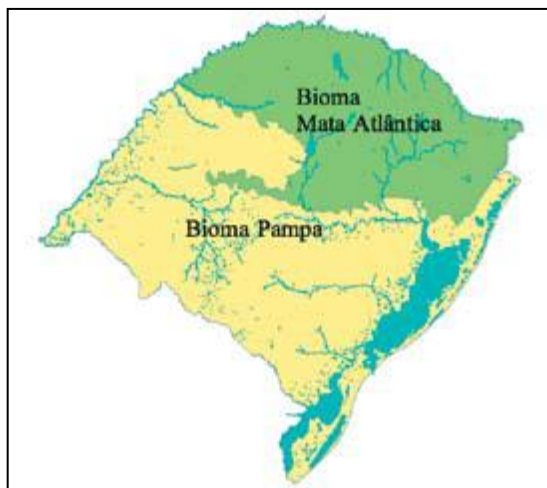


Figura 2.10. Biomas existentes no Rio Grande do Sul (RS), conforme a classificação do IBGE (2004).

Fonte: Cordeiro e Hasenack (2009).

O bioma Mata Atlântica é caracterizado pelo predomínio da vegetação florestal e ocorre na região do Planalto na metade norte do Estado (IBGE, 2004). Na região nordeste do Estado é possível encontrar grandes mosaicos de campo. Esses campos, como ocorrem em regiões de altitude, fazem parte dos Campos de Cima da Serra (FORTES, 1959, apud BOLDRINI, 2009) e são denominados de Campos de Altitude pelo Ministério do Meio Ambiente (MMA) (BOLDRINI, 2009) e formam uma paisagem de mosaico de campo e floresta com Araucária (OVERBECK et al., 2007). Segundo Boldrini (2009), a vegetação desse bioma é representada por grandes extensões de campo, entremeados com mata de araucária e turfeiras. Em relação às espécies campestres, destacam-se as pertencentes às famílias Asteraceae (totalizando 24% de espécies), com expressiva diversidade florística e populacional; seguidas pelas gramíneas (com 20%); as famílias Leguminosae, com vários táxons herbáceos com xilopódios desenvolvidos adaptados ao fogo e Cyperaceae, essa última geralmente associada a ambientes úmidos, (com 7%); Apiaceae (com 3%), família fisionomicamente importante e que ocorre em baixadas úmidas e em campos secos e alterados pelo uso do fogo; entre outras, que totalizam 39% (BOLDRINI, 2009). O clima frio da região, a alta precipitação pluviométrica e a altitude elevada, favoreceram o desenvolvimento de espécies endêmicas, ou seja, espécies exclusivas dessa região (op. cit.).

No bioma Pampa, predomina a vegetação campestre sobre a florestal, porém esse é considerado um bioma complexo, com várias formações vegetacionais, sendo o campo

dominado por gramíneas o mais representativo (BOLDRINI, 2009). Os campos do bioma Pampa possuem diferentes denominações em relação à sua localização, aliada ao tipo de solo e clima. Boldrini (2009) caracteriza os campos desse bioma em sete tipos:

i) os campos de barba-de-bode, que ocorrem no noroeste do Estado, e são um tipo de vegetação relictual de um período geológico mais seco, com espécies predominantemente tropicais, com um grande número de gramíneas estivais, com metabolismo fotossintético C₄ e poucos representantes de ciclo hibernar com metabolismo fotossintético C₃;

ii) os campos de solos rasos, típicos da fronteira oeste do Estado;

iii) os campos de solos profundos, localizados no sudoeste do Estado, com um grande número de gramíneas (com 29% em relação às outras famílias), onde as compostas são menos representativas (considerando todo o Estado) e onde ocorre uma alta participação de gramíneas hibernais (mais representativa do que as demais regiões do Estado);

iv) os campos dos areais, no centro-oeste do Estado, com plantas com rizomas e xilopódios desenvolvidos para suportar o estresse hídrico;

v) vegetação savanóide, no planalto sul-rio-grandense (região também conhecida como Serra do Sudeste), onde as temperaturas são baixas no inverno, com solos rasos e pedregosos (principalmente granito), a vegetação original era ocupada por arbustos e árvores de baixo porte que foram sendo cortadas e queimadas, ampliando as áreas de campo, que apresentam um equilíbrio entre espécies de gramíneas e compostas, onde as leguminosas são mais bem representadas e onde a vegetação rupestre associada aos campos possui cactáceas e campos ricos em endemismos;

vi) campos do centro do Estado, situados entre o planalto sul-brasileiro e o planalto sul-rio-grandense, com representantes de vegetação tropical e subtropical e famílias botânicas campestres semelhantes às da Serra do Sudeste;

vii) e os campos litorâneos, onde as famílias solanáceas e leguminosas estão bem representadas e espécies de gramíneas cobrem os solos medianamente drenados e as ciperáceas, os solos mal drenados.

A Figura 2.11 mostra as regiões fitoecológicas do RS, que são as regiões onde ocorre o predomínio de algum tipo de vegetação, devido principalmente à sua relação com o tipo de solo, clima e altitude.

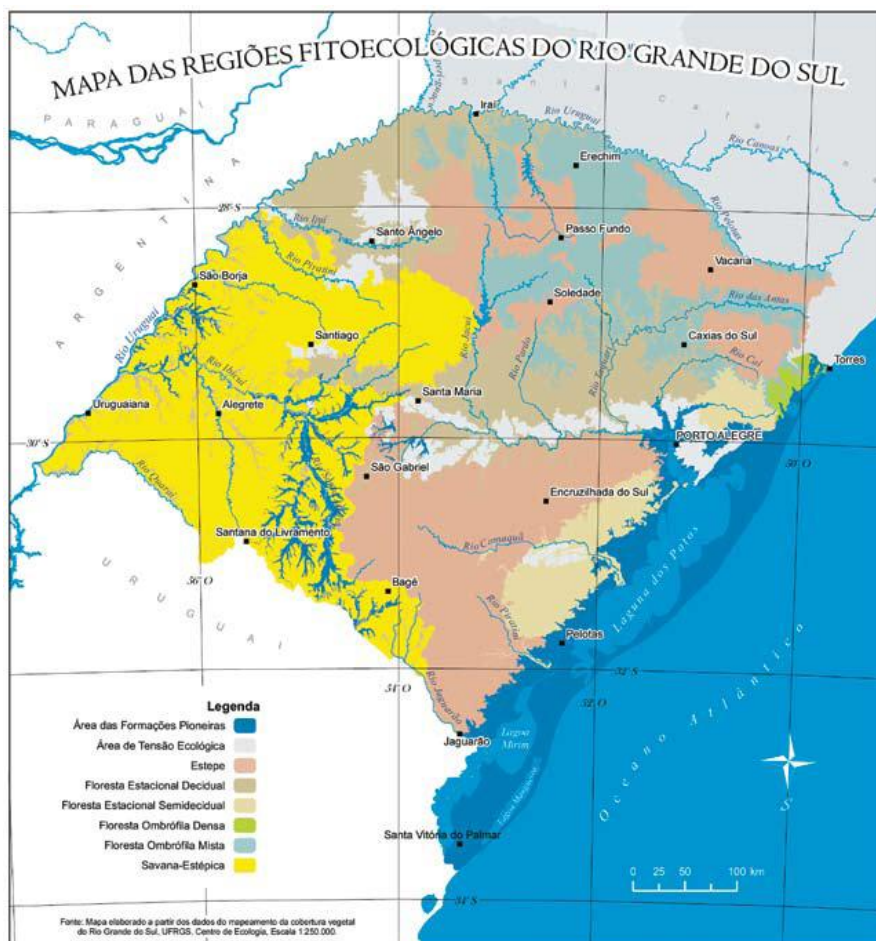


Figura 2.11. Regiões fitoecológicas do Rio Grande do Sul atualizadas no último mapeamento da vegetação (MMA, 2007).

Fonte: Cordeiro e Hasenack (2009).

Em 2007 foi publicado o mapeamento da vegetação dos biomas brasileiros (MMA, 2007). A iniciativa fez parte de um subprojeto do Projeto sobre a biodiversidade (PROBIO) do MMA, sendo uma ou mais instituições responsáveis pelo mapeamento da vegetação de um bioma. Em relação aos biomas que abrangem o Rio Grande do Sul, o bioma Pampa foi mapeado sob a responsabilidade do Laboratório de Geoprocessamento do Centro de Ecologia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), com a parceria da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA) Pecuária Sul e EMBRAPA Clima Temperado; e o bioma Mata Atlântica teve três instituições envolvidas, ficando sob a responsabilidade do Instituto de Estudos Socioambientais do Sul da Bahia (IESB), do Instituto de Geociências da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ) e do Departamento de Geografia da Universidade Federal Fluminense (UFF) (MMA, 2007). Devido à diferença das metodologias utilizadas para cada bioma para realizar o mapeamento

(apesar de alguns requisitos terem sido estabelecidos para serem cumpridos por todas as metodologias em todos os biomas), e com o intuito de aproveitar as imagens adquiridas para mapear o bioma Pampa, a equipe técnica do bioma Pampa estendeu o mapeamento para todo o RS (HASENACK et al, 2007; CORDEIRO; HASENACK, 2009), para obter um resultado homogêneo no RS. Deste resultado foi recortado o bioma Pampa, que foi disponibilizado no sítio do MMA (2007).

Neste sentido, a partir do último mapeamento oficial da vegetação (MMA, 2007), Cordeiro & Hasenack (2009) estimaram que aproximadamente 70% da vegetação do Estado foi suprimida e/ou alterada. Mesmo assim, a vegetação campestre continuou sendo a formação vegetal predominante no Estado, o que pode estar relacionado com a utilização do campo nativo para a pecuária (CORDEIRO; HASENACK, 2009). Do total de vegetação remanescente (aproximadamente 30%), em torno de 60% referem-se à vegetação campestre (HASENACK et al, 2007; CORDEIRO; HASENACK, 2009). A Figura 2.12 mostra o resultado da metodologia do último mapeamento de vegetação realizado (MMA, 2007), porém para todo o RS (HASENACK et al, 2007; CORDEIRO; HASENACK, 2009).

Os campos remanescentes do RS são, na maior parte das áreas campestres, utilizados como pasto, principalmente para a criação de gado. Assim, a vegetação campestre remanescente do RS convive com a mais antiga atividade econômica do RS desde a chegada dos europeus, o pastejo (NABINGER et al., 2000). A prática deste tipo de economia tem ajudado a manter a paisagem campestre na região sul, porém, a vegetação tem sido manejada para um melhor rendimento do pasto, sendo o fogo uma das formas de manejo utilizadas (OVERBECK et al., 2007; NABINGER et al., 2000).

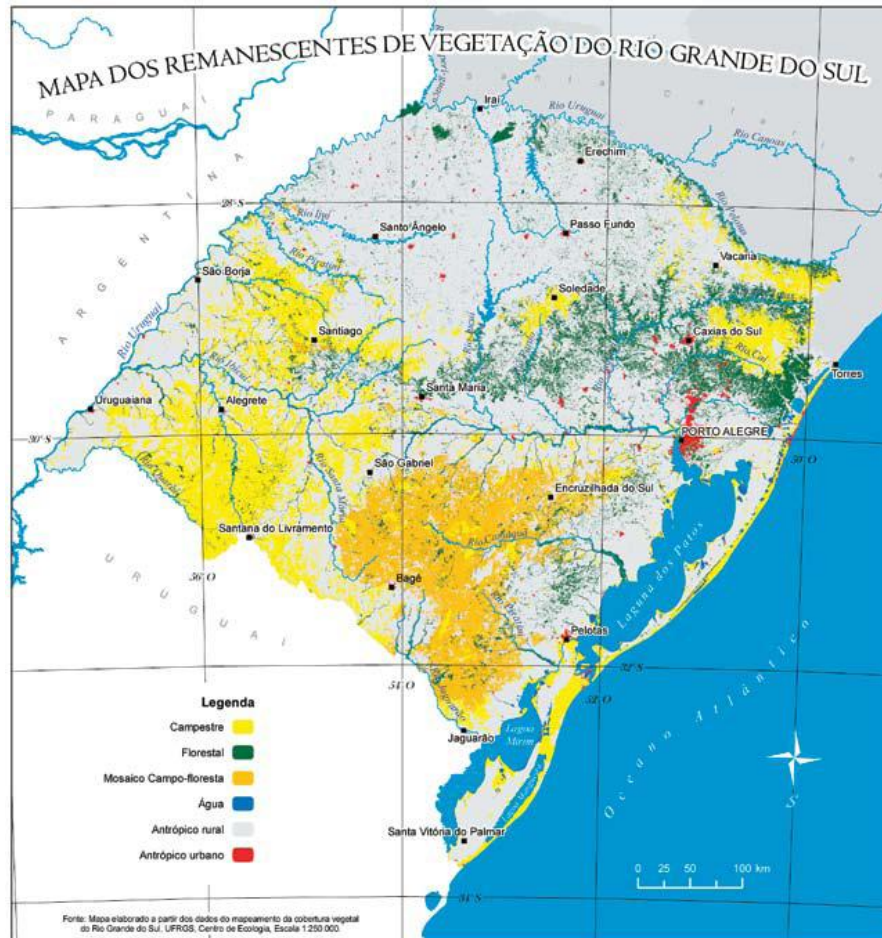


Figura 2.12. Mapa dos remanescentes de vegetação do Rio Grande do Sul.

Fonte: Cordeiro e Hasenack (2009).

2.9.1.1. MANEJO DO CAMPO NO RS – PASTEJO E FOGO

Alguns autores sugerem que a prevalência dos campos na região sul do Brasil tenha relação com duas práticas frequentes, o pastejo e o fogo (PILLAR; QUADROS, 1997; PILLAR, 2003; OVERBECK et al., 2007; BEHLING et al., 2009). O uso de queimadas é realizado para o manejo no campo tem uma forte relação com uma atividade muito comum na região sul do Brasil, e predominante em regiões campestres no RS, a pecuária (NABINGER et al., 2000).

A pecuária é uma das principais atividades econômicas na região sul do Brasil, e ocorre predominantemente em vegetação campestre (NABINGER, 2000). O gado foi introduzido na região sul a partir do século XVII, no leste do rio Uruguai, a partir das

reduções jesuítas castelhanas oriundas do Paraguai (NABINGER, 2000). Os jesuítas fundaram reduções no RS após fugirem dos ataques dos bandeirantes paulistas no Paraguai, em 1626, dedicando-se à agricultura e estâncias de criação de gado trazidas de Corrientes (província Argentina) (PESAVENTO, 2002). Devido ao ataque pelos bandeirantes em busca de mão de obra (escrava) aborígene, as reduções foram abandonadas e o gado deixado pelos jesuítas formou uma grande reserva de gado bravio no pampa gaúcho. Este evento ficou conhecido como “Vacaria del Mar” e a prea do gado xucro foi o fundamento econômico básico de apropriação da terra gaúcha, gerando também um abate indiscriminado do mesmo (PESAVENTO, 2002). Após a fundação dos sete povos das Missões, pelos jesuítas que retornavam ao RS, na região noroeste do RS (Planalto das Missões), parte do rebanho foi levado para a região nordeste do RS, formando assim, uma nova reserva de gado na serra, conhecida como Vacaria dos Pinhais ou Campos de Vacaria (PESAVENTO, 2002).

Antes da introdução do gado pelos jesuítas, os animais pastadores pertenciam à fauna nativa e eram de pequeno porte, como veados, emas, capivaras, antas, e pequenos roedores (BEHLING, et al., 2009). Também, antes desta época, animais pastadores (megafauna) dominavam a região e se tornaram extintos devido às freqüentes caçadas pelos antigos habitantes da região (caçadores pré-históricos) e também às mudanças climáticas ocorridas entre o final do Pleistoceno e início do Holoceno, além da prática do fogo também ser comum em caçadas (KERN, 1997a; KERN, 1997b). A extinção dos animais pastadores ocorreu entre 6.000 e 8.000 anos antes do presente (KERN, 1997b). Segundo Behling et al. (2009), houve um intervalo de oito mil anos desde a extinção da megafauna (grandes pastadores) e a introdução do gado no RS, o que pode ter influenciado no aumento das queimadas nos campos durante este período.

Neste sentido, a prática do fogo no Rio Grande do Sul tem indícios arqueológicos e palinológicos, além disso, em algumas regiões campestres, a freqüência de queimadas como manejo no campo perdura há mais de 100 anos (HERINGER; JACQUES, 2002a, 2002b). A prática de queimadas, apesar de inicialmente proibida por legislação (Lei Federal 4.771/1965 e Lei Estadual 9.519/92), pode ser utilizada somente em casos onde há laudo técnico e permissão dos órgãos competentes (Lei Estadual 11.498), fora isso, as queimadas são proibidas e o uso dessa prática, dependendo da maneira como é utilizada, pode causar danos ao ambiente, como a deterioração do solo e a redução do potencial produtivo da vegetação nativa (MACHADO, 1999; JACQUES, 2003).

O fogo é utilizado como ferramenta de manejo no campo, para abertura de novas áreas agrícolas, no controle de pragas e eliminação de pasto antigo (áreas permanentemente queimadas acumulam menos material morto do que áreas não queimadas, (HERINGER; JACQUES, 2002a; PILLAR, 2003). Apesar de não se conhecerem bem os efeitos do fogo na flora e solo (HERINGER; JACQUES, 2002a; OVERBECK et al., 2007), conforme Boldrini (2009), a prática do fogo provavelmente tem selecionado espécies vegetais e animais, que apresentam mecanismos de defesa a este distúrbio, como xilopódios e outros órgãos de reserva (FIDELIS et al., 2006, FIDELIS et al., 2009). Alguns estudos revelam que a vegetação campestre é resiliente ao fogo, além de indicar as mudanças na composição florísticas ocorridas após a queimada (QUADROS; PILLAR, 2001; OVERBECK, et al., 2005; FIDELIS et al, 2007, FIDELIS et al., 2010b; FIDELIS et al., 2012).

Segundo Jacques (2003), existem dois tipos de queima no RS, uma se refere à queima do material seco que ainda está preso à parte aérea da planta (processo semelhante ao que é realizado quando se utiliza uma roçadeira) e o outro tipo é a queima de material morto que foi desprendido da planta e depositado sobre a superfície do solo, com a eliminação total ou parcial deste material seco. O uso do fogo na pecuária está relacionado com a oferta de forragem para o gado. As comunidades de campo pastejado normalmente exibem um duplo estrato herbáceo, caracterizado, conforme Overbeck et al. (2007), por um estrato baixo com espécies prostradas, que são as espécies intensamente pastejadas; e um estrato mais alto que o anterior, que é composto de gramíneas cespitosas que possuem baixo valor forrageiro e outras espécies não atrativas para o gado, formadas por subarbustos e espécies espinhosas, sendo que este último estrato tem uma distribuição em manchas.

O RS se caracteriza por estações quentes e frias durante o ano (com as quatro estações definidas). A produtividade da pecuária, então, varia entre a estação fria e quente do ano, determinada pelo balanço de espécies C₃ e C₄ (NABINGER et al., 2000). Embora a estação quente (verão) seja suficientemente úmida, a lotação das pastagens é feita pela capacidade de suporte do inverno (PILLAR; QUADROS, 1997; NABINGER et al., 2000; OVERBECK et al., 2007). A biomassa produzida no verão corresponde às gramíneas C₄, que são altamente produtivas e não são totalmente consumidas pelo gado (OVERBECK et al., 2007), fazendo com que, pelo acúmulo de biomassa, o manejo com fogo seja realizado no final do inverno, entre agosto e final de setembro, normalmente a cada dois anos, para propiciar o rebrote da vegetação (biomassa fresca), que é utilizada na alimentação do gado na primavera e verão (BOLDRINI, 2009; OVERBECK et al., 2007; HERINGER; JACQUES,

2002a; FIDELIS et al., 2012), o que pode diminuir a oferta de espécies hibernais C₃ (NABINGER, 2000).

Segundo Overbeck et al. (2007), para que um regime de pastejo seja sustentável, é necessário ter um balanço entre a produção forrageira, diversidade de espécies e preservação do solo. A vegetação sob pastejo tende a concentrar a biomassa mais próxima ao solo (PILLAR, 2003; OVERBECK et al., 2007). O acúmulo de biomassa no campo aumenta os níveis de inflamabilidade do mesmo, e está relacionada às condições de solo, luminosidade e ao regime do pastejo, as áreas excluídas de pastejo tendem a acumular mais biomassa do que áreas pastejadas (PILLAR, 2003; BEHLING et al., 2009).

Na região da Mata Atlântica, a prática da pecuária, utiliza o manejo de queimadas no final de cada inverno ou a cada dois anos para propiciar o rebrote da vegetação que é utilizada na alimentação do gado na primavera e no verão (BOLDRINI, 2009). Essa região é mais propícia para o desenvolvimento de espécies hibernais (de estação fria), porém, ocorre a dominância de espécies estivais, provavelmente pelo uso do fogo na mesma época do início de desenvolvimento das espécies hibernais, que impede o desenvolvimento das últimas (hibernais) (op. cit.).

No bioma Pampa, devido às características do solo, o pastejo tem intensificado um problema encontrado na região Oeste do Estado, a arenização. Segundo Machado (1999), o fogo aliado ao pastejo, também pode ser responsável por este processo de degradação do solo no oeste do Rio Grande do Sul. Além disso, conforme Jacques (2003), a prática do fogo nos campos diminui a cobertura vegetal o que ocasiona uma menor retenção de água no solo; com os solos descobertos, as regiões campestres ficam fragilizadas frente às estiagens. Na região da campanha gaúcha (Oeste/Sudoeste), a ocorrência de estiagens é frequente e tem se tornado cada vez mais severa em alguns municípios.

Apesar das controvérsias sobre o uso de queimadas e sua proibição pela legislação vigente, segundo Machado (1999), quando se fala em fogo como manejo dos campos, o mesmo é realizado como uma prática criteriosa e em muitas propriedades rurais se pratica o fogo ao invés de uso de dessecantes, aração e superpastejo, que também estão sujeitos a desenvolver danos à vegetação e ao solo.

2.9.1.2. ESTUDOS EM ÁREAS QUEIMADAS NO RS

Alguns estudos têm sido realizados para avaliar ecologicamente o comportamento de vegetação campestre submetida à queima em áreas pastejadas, principalmente, pelo gado no RS, e a influência que a prática do fogo no RS tem na composição florística da vegetação campestre. Estes estudos podem ser verificados em trabalhos publicados por Quadros e Pillar (2001); Heringer e Jacques (2002a, 2002b); Fidelis et al. (2010b, 2012); Overbeck et al., (2005); Müller (2005); Overbeck et al. (2007).

Dentre os estudos em área queimada, dados sobre a intensidade do fogo são praticamente inexistentes no RS. Um dos poucos experimentos realizados em campo com dados disponíveis com a vegetação campestre do sul do Brasil para medir o consumo de biomassa pelo fogo foi realizado por Fidelis et al. (2010a). Este experimento, apesar de utilizar pequenas parcelas, gerou dados sobre a intensidade do fogo, a taxa de espalhamento do consumo da biomassa, a temperatura acima do solo da queima da vegetação campestre (medida a partir de *thermocouples*) e a eficiência da combustão. Os dados gerados sobre a intensidade do fogo (medidos em kW/m) foram comparados com as mesmas medidas realizadas em outras regiões campestres no Brasil (cerrado) e em outras regiões campestres em outros países. Para os dados de campo, os valores de intensidade da frente de fogo ficaram em torno de 36-319 kW/m, sendo a média de $93,52 \pm 19,6$ kW /m, em áreas frequentemente queimadas e $179,04 \pm 27,5$ kW /m em áreas excluídas de queimadas. Os dados gerados sobre a intensidade da frente de fogo foram bem inferiores quando comparados com outras regiões campestres (campos, pradarias, savanas, cerrado, entre outras), no cerrado brasileiro, por exemplo, a energia irradiada pela frente de fogo varia entre 2.842 e 16.394 kW/m, conforme as referências citadas em Fidelis et al. (2010a).

CAPÍTULO 3

ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo está localizada no município de André da Rocha, situado na região nordeste do Rio Grande do Sul, nas coordenadas 28°38' de latitude sul e 51°34' de longitude oeste (Figura 3.1). Segundo dados do IBGE (2010), a área da unidade territorial de André da Rocha é de 324,327 km², com uma população de 1.216 habitantes e densidade demográfica de 3,75 habitantes por km², sendo que aproximadamente 67% da população vivem em áreas rurais e 33% na área urbana.

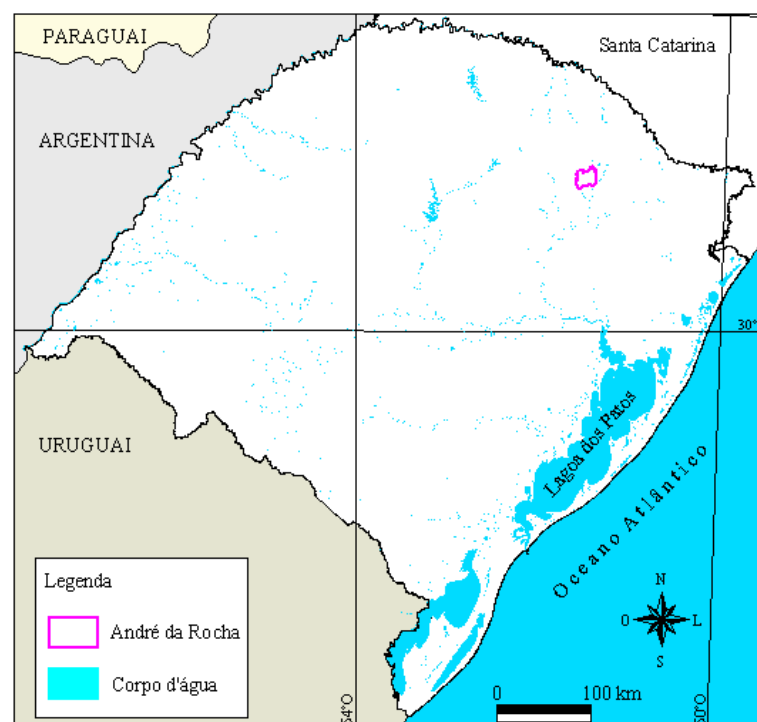


Figura 3.1. Localização do Município de André da Rocha no Rio Grande do Sul, Brasil.

O município pertence à região fisiográfica dos Campos de Cima da Serra, e faz parte do Conselho Regional de Desenvolvimento do RS (COREDE) dos Campos de Cima da Serra (FEE, 2012). Segundo a classificação de Köppen, o clima da região é temperado úmido (Cfb), com verões amenos. A precipitação média é em torno de 1800-1900 mm e temperatura

média anual de 16°C , segundo dados do Atlas socioeconômico do RS, disponibilizado pela Secretaria de Planejamento, Gestão e Participação Cidadã (SEPLAG, 2011). O município está localizado a uma altitude de 800m (SEPLAG, 2011) e é caracterizado pela ocorrência de solos do tipo Latossolo, com a classe LBRa4, que corresponde ao Latossolo Bruno Intermediário para Latossolo Roxo Álico (IBGE, 2002). A vegetação predominante é a campestre e está situada em uma zona de transição entre o campo e a mata e faz parte dos campos do Brasil Central ou campos sulinos, inseridos no bioma Mata Atlântica (BOLDRINI, 2009).

Segundo o censo agropecuário do IBGE (2006), o município possui 231 estabelecimentos agropecuários (propriedades individuais), que somam 25.568ha. As principais atividades pecuárias da região são de bovinos e suínos, além da criação de ovinos, eqüinos, caprinos, muares e bubalinos. Além da pecuária, o município possui produção agrícola como aveia, feijão, milho, soja, sorgo granífero, trigo, cereais, leguminosas e oleaginosas (IBGE, 2007a).

As lavouras existentes no município podem ser permanentes ou temporárias. As lavouras permanentes constituem-se de produção de caqui, erva mate, figo, laranja, noz, pêra, pêssego, tangerina e uva; já as temporárias são de aveia, batata doce, cana de açúcar, cebola, ervilha, feijão, fumo, mandioca, milho, soja, sorgo e trigo (IBGE, 2007a).

As propriedades que utilizam o pastejo sobre o campo no município possuem diferentes alternativas de manejo do campo (vegetação campestre). Entre elas, podem ser destacadas cinco alternativas, verificadas no trabalho de Heringer e Jacques (2002a), como áreas de vegetação campestre sem queima e sem roçada, áreas sem queima de vegetação e com roçada, áreas com melhoramento do campo nativo há 24 anos, áreas com melhoramento do campo nativo há sete anos e áreas que utilizam a prática de queimadas na vegetação campestre nativa há mais de 100 anos.

Segundo Heringer e Jacques (2002a), os tratamentos sem queima utilizam o pastejo de forma rotativa, baseados na oferta de forragem para o gado, com lotação média de um bovino a cada hectare. A área dos tratamentos do campo com queimadas, ao contrário, permanecem com lotação contínua durante todo o ano e a média é de 0,5 bovino por cada hectare. O uso das queimadas no tratamento do campo é utilizado no município a cada dois anos, entre o final do inverno e início da primavera (HERINGER; JACQUES, 2002a); sendo este o período padrão de queimadas característicos do manejo em áreas pastejadas nos campos de cima da serra (BOLDRINI, 2009).

Além disso, existem diferenças entre a composição botânica em cada tipo de tratamento e o acúmulo de material morto. A composição florística é expressa em peso médio dos componentes acumulados, sendo expressa na medida de quilograma de matéria seca por hectare (MS kg/ha) (HERINGER; JACQUES, 2002b).

Em relação à contribuição média estacional de gramíneas nativas nos diferentes tratamentos, no município, os dados obtidos por Heringer e Jacques (2002a) demonstram que a área com queima bienal há mais de cem anos possui um maior número de gramíneas hibernais (de MS/ha) do que os outros quatro tratamentos. Em todos os outros grupos identificados no trabalho, como gramíneas estivais, leguminosas nativas, ciperáceas e espécies nativas de outras famílias, a quantidade média estacional foi inferior em relação aos outros tratamentos. Da mesma maneira, a área com queima possui menos acumulação de material morto do que nas áreas com outros tipos de manejo (tratamentos).

Os dados sobre acumulação de forragem e material morto encontrados por Heringer e Jacques (2002a) em relação às cinco alternativas de manejo citadas anteriormente, demonstram que, na área com queima sistemática bienal e contínua ocorre uma drástica redução da oferta de forragem para o gado. A área com queima no município acumula um total anual de 3.665 kg/ha de Matéria Seca da Forragem Verde (MSFV), bem inferior ao total de 7.000 a 9.000 kg/ha de MSFV de acúmulo registrado nos outros tratamentos. O acúmulo de material morto tem uma média estacional inferior a 500 kg/ha de MS na área com queimada. A média de acúmulo de material morto em todos os tratamentos é de aproximadamente 1.705 kg/ha de MS na primavera, 1.479 kg/ha de MS no inverno, 1.090 kg/ha de MS no verão e 691 kg/ha de MS no outono.

Conforme Heringer e Jacques (2002a), o acúmulo de material morto depende do crescimento e da utilização da vegetação (pastagem). Enquanto os tratamentos sem queima e com melhoramento apresentam um decréscimo de acúmulo de biomassa no outono, o tratamento com queima apresenta um aumento. Segundo os autores, esse é um comportamento exclusivo da vegetação da área queimada, onde, ao final do verão, somente mantém-se à base de plantas vivas, permanecendo assim até a aplicação do fogo, quando inicia o rebrote da vegetação, determinando uma maior rejeição ao pastejo e o retorno de material morto no solo durante o outono.

CAPÍTULO 4

MATERIAL E MÉTODOS

4.1. PERÍODO DE ESTUDO

A escolha da imagem ocorreu a partir do sítio do programa de queimadas do INPE, pela visualização dos focos de calor na área de estudo. Entre o período de 2006 e 2009, somente um grânulo, do sensor MODIS/AQUA, detectou queimada na área de estudo. Os focos de calor obtidos no município de André da Rocha foram identificados no dia 04 de setembro de 2007 e a detecção ocorreu às 17 horas e 23 minutos no horário UTC.

4.2. AQUISIÇÃO E PROCESSAMENTO DE DADOS DE SATÉLITE PARA O CÁLCULO DA PRF

Para a obtenção do valor da *PRF* em cada pixel identificado como foco de calor, foi adquirida a imagem diária do sensor MODIS, do produto de nível dois MYD14 (*MODIS Thermal Anomalies / Fire 5-MIN L2-SWATH 1KM V005*), referente a anomalias termais/focos de calor. A imagem foi adquirida gratuitamente no sítio eletrônico da NASA (2011i). O grânulo é fornecido em *Hierarchical Data Format* (HDF), e corresponde à seguinte denominação: MYD14.A2007247.1720.005.2009021042800.

Para a projeção do produto MYD14, foi utilizado o *Modis Reprojection Tools Swath* (MRT- *Swath*), desenvolvido especialmente para a visualização, obtenção e projeção de dados *Swath*. O MRT *Swath* é disponibilizado gratuitamente no sítio da NASA (2011j). Para a projeção do grânulo *swath* (MYD14), é necessário a utilização de um produto de geolocalização, neste caso o produto utilizado é o produto MYD03, disponibilizado pelo *Level 1 Atmosphere Archive and Distribution System* (LAADS), da NASA, e obtido no

mesmo sítio eletrônico do MYD14. O produto de geolocalização corresponde ao produto MYD03.A2007247.1720.005.2009295055716 e foi utilizado para a obtenção das coordenadas. O MRT/*Swath* permite a projeção dos dados *swath* para diferentes coordenadas e elipsóides de referência. O grânulo obtido do produto MYD14 foi projetado e utilizado em coordenadas geográficas e projeção cônica conforme de Lambert, e datum WGS84.

Para a visualização do grânulo obtido do produto MYD14, foi utilizado o programa ENVI 4.2. No ENVI foi possível obter o valor da *PRF* para a área estudada, a partir da exportação dos dados para formato ASCII, gerando uma tabela de dados com 19 colunas, contendo as seguintes informações: confiabilidade da detecção, número válido de pixels vizinhos, tamanho da janela de background, número de pixels adjacentes de água, número de pixels adjacentes de nuvem, potência radiativa do fogo, temperaturas médias de brilho do background; desvio padrão médio, diferença absoluta e valores para as bandas 21/22 e 31; temperatura de brilho do pixel de fogo para as bandas 21/22 e 31; reflectância do pixel de fogo no canal 2; longitude e latitude do pixel de fogo; linha e coluna do pixel no grânulo.

A partir das coordenadas centrais obtidas da tabela de dados do grânulo do produto MODIS, os dados de focos de calor foram transformados em arquivo *shape file*, o que permitiu a inserção dos dados em um Sistema de Informações Geográficas (SIG), com um grande conjunto de informações sobre o pixel, entre elas, a *PRF*, a temperatura de brilho, a confiabilidade de detecção, entre outras citadas anteriormente.

4.3. AQUISIÇÃO E PROCESSAMENTO DE IMAGENS PARA A IDENTIFICAÇÃO E QUANTIFICAÇÃO DA ÁREA QUEIMADA

Para identificar e mapear a área queimada no terreno foi utilizada uma imagem do satélite Landsat. A imagem foi adquirida gratuitamente junto ao catálogo de imagens Landsat do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE, 2011c). A cena utilizada corresponde à imagem adquirida pelo satélite Landsat5 *Thematic Mapper* (TM), sendo a órbita-ponto da imagem para o município de André da Rocha a 221-80. A data da passagem ocorreu no dia 15 de setembro de 2007, às 13 horas e 11 minutos no horário central GMT. A

imagem possui o nível um de correção com a seguinte identificação L5TM22108020070915, com projeção UTM e sistema de referência geodésica (datum) WGS84.

As imagens do satélite Landsat 5 TM, possuem sete bandas espectrais, com tempo de revisita (resolução temporal) a cada 16 dias. Cada cena gerada pelo satélite tem uma área de 185 x 185 km. As bandas 1, 2, 3, 4, 5 e 7 possuem resolução geométrica de 30m no terreno, e a banda 6, de 120m.

Como o nível de correção padrão da cena da imagem Landsat é baixo (nível 1), foi adquirida no mesmo sítio uma imagem dos sensores TM e TM+ que possui um bom nível de georreferenciamento. Essa imagem é uma Landsat do ano de 2005 e serve de base para georreferenciar a imagem Landsat5 TM da área de estudo.

O georreferenciamento da imagem do satélite Landsat 5TM foi feito no programa ARCGIS. Para essa finalidade, foi utilizada como base para o georreferenciamento e coleta dos pontos de controle a imagem LANDSAT de 2005. O georreferenciamento foi realizado para a delimitação da cicatriz de queimada na área de estudo e para realizar a sobreposição da área central do ponto de foco de calor da imagem MYD14 com a área campestre queimada. A diferença de data de aquisição entre a imagem do sensor TM e do grânulo MYD14 do sensor MODIS é de 11 dias, mesmo assim, a permanência das cicatrizes na área de estudo, possibilita a identificação da área queimada. A cicatriz da área queimada foi delimitada a partir da composição colorida falsa-cor RGB543 da imagem Landsat. A delimitação da cicatriz de campo queimado foi feita por interpretação visual e o mapeamento foi feito manualmente no programa ARCGIS.

4.4. AQUISIÇÃO DE DADOS DE CAMPO

Os dados de campo do tipo e densidade de vegetação no município de André da Rocha foram obtidos a partir de revisões bibliográficas. Para a obtenção da densidade da cobertura vegetal existente na área de estudo, foi utilizado como referência o trabalho realizado por Heringer e Jacques (2002a). Os dados correspondem à quantidade de biomassa e material morto, acima do solo, obtidos em áreas permanentemente queimadas no município de André da Rocha. O total estimado a partir da soma de biomassa viva acima do solo e

biomassa morta (material morto) presente na superfície do solo foi de $0,09 \text{ kg/m}^2$, conforme o Quadro 4.1.

O conhecimento sobre a taxa de espalhamento de uma queimada em vegetação campestre no sul do Brasil e a eficiência da combustão foi obtido no experimento realizado por Fidelis et al. (2010a). O experimento foi realizado em uma parcela de vegetação campestre na região de Porto Alegre, em áreas que continham histórico de fogo. Embora o experimento tenha sido realizado em uma área diferente da área de estudo e realizado na estação de verão, é o único dado de campo disponível com queima de vegetação campestre no RS. No estudo realizado por Fidelis et al. (2010a), foram obtidos dados sobre a taxa de espalhamento do fogo, com valor de $0,015 \text{ m/s}$, e a eficiência de combustão, com valor de $93,8 \%$, conforme é apresentado no Quadro 4.1.

Eficiência da combustão (%)	Taxa de espalhamento (m/s)	Densidade de biomassa acima do solo (kg/m^2)
$93,8 \pm 0,84$	$0,015 \pm 0,002$	0,09

Quadro 4.1. Valores das variáveis de dados de campo obtidas de Fidelis et al. (2010a) e Heringer e Jacques (2002a).

4.5. CÁLCULO DA BIOMASSA QUEIMADA E *PRF* PARA A OBTENÇÃO DO COEFICIENTE DE CONSUMO DE BIOMASSA

4.5.1. BIOMASSA QUEIMADA

Para o cálculo da biomassa queimada, as coordenadas dos focos de calor do pixel de fogo do grânulo MYD14 foram utilizadas para a geração de um *buffer* de raio de 500m, o que corresponde à medida do pixel do MYD14 (com diâmetro de 1km).

O *buffer* foi inserido no SIG em formato *shape file* e foi plotado com a cicatriz de queimada mapeada a partir da imagem Landsat. Desta maneira, foi obtida somente a área da cicatriz de queimada inserida no *buffer*, para cada pixel. O valor da área total de cicatriz de queimada foi utilizado para a obtenção do valor de biomassa queimada.

A biomassa queimada foi estimada a partir da equação 2.12 (SEILER; CRUTZEN, 1980). Os valores das variáveis da Equação 2.12 foram obtidos pelos dados de campo dos experimentos realizados por Fidelis et al. (2010a) e Heringer e Jacques (2002a), e pela área de cicatriz mapeada e inserida no buffer. Nesse sentido, a área queimada foi obtida pela área de cicatriz de campo queimado em cada *buffer*; a densidade de biomassa acima do solo no município de André da Rocha foi obtida no trabalho publicado por Heringer e Jacques (2002a) e o valor da eficiência da combustão foi obtida do trabalho de Fidelis et al. (2010a), conforme a Equação 4.1.

$$BC = 0,09 \times 0,94 \times A \quad (4.1)$$

onde *BC* corresponde à biomassa consumida pelo fogo (dada em kg); *A* corresponde à área de cicatriz queimada no interior do *buffer* (em m²).

4.5.2. CÁLCULO DA PRF

Os dados relativos à energia do fogo (*PRF*) foram da tabela de dados do grânulo do produto MYD14. Para cada pixel de fogo detectado, foi derivada a potência da energia radiativa correspondente ao pixel (ou a taxa de emissão da potência radiativa do fogo - *PRF*) dada em megawatts ou megajoules por segundo.

Como os dados da *PRF* foram obtidos no mesmo horário, e devido à queimada ser realizada de maneira controlada (manejo), a obtenção da *PRF* foi possível somente em uma passagem do sensor MODIS. A *PRF* total foi obtida pelo somatório das observações (pixels).

4.6. CÁLCULO DO COEFICIENTE DE CONSUMO DE BIOMASSA.

Para o cálculo do coeficiente de consumo de biomassa, foi utilizada a Equação 2.23 (WOOSTER et al., 2005). Como os dados de consumo de biomassa e de *PRF* foram

obtidos de maneira independente, para aplicar a fórmula que relaciona estes dois dados, foram derivados a *PRF* média da área de estudo e a taxa de consumo média de biomassa.

A *PRF* média foi obtida pelo somatório das três medidas e o valor foi dividido pelo número de observações. A taxa média de consumo de biomassa foi obtida utilizando o consumo de biomassa total (para as três áreas de campo queimado no interior de cada *buffer*). Para derivar a biomassa total (em kg) em taxa de consumo (em kg/s), foi utilizada a seguinte estratégia: supôs-se que a frente do fogo tenha tido espalhamento igual em todas as direções do plano da queimada, ou seja, espalhamento circular, dessa maneira, foi obtido o raio da área total de biomassa consumida (pelo cálculo da área da circunferência) e a partir do valor do raio, esse foi relacionado com a taxa de espalhamento (em m/s) (dada por FIDELIS et al., 2010a). O resultado foi o tempo total de queima de biomassa para a área total de campo dos *buffers*. Com o valor de queima total de biomassa (em kg) e o tempo que a mesma leva para queimar (em segundos), foi obtida a taxa média de consumo de biomassa por segundo (em kg/s). Com o conhecimento da taxa média de consumo da biomassa e da *PRF* média, foi calculado o coeficiente médio de consumo de biomassa/carbono (dado em kg/MJ), conforme a Equação 4.2, obtida de Wooster et al. (2005):

$$C_e \text{ médio} = BC_{\text{média}} / PRF_{\text{média}} \quad (4.2)$$

onde, $C_e \text{ médio}$ corresponde ao coeficiente de consumo de biomassa (em kg/MJ); $BC_{\text{média}}$, a taxa média biomassa consumida (em kg/s) e $PRF_{\text{média}}$, a taxa média de potência radiativa do fogo (em MJ/s).

O desenvolvimento da metodologia é apresentado, em forma esquemática a seguir (Figura 4.1):

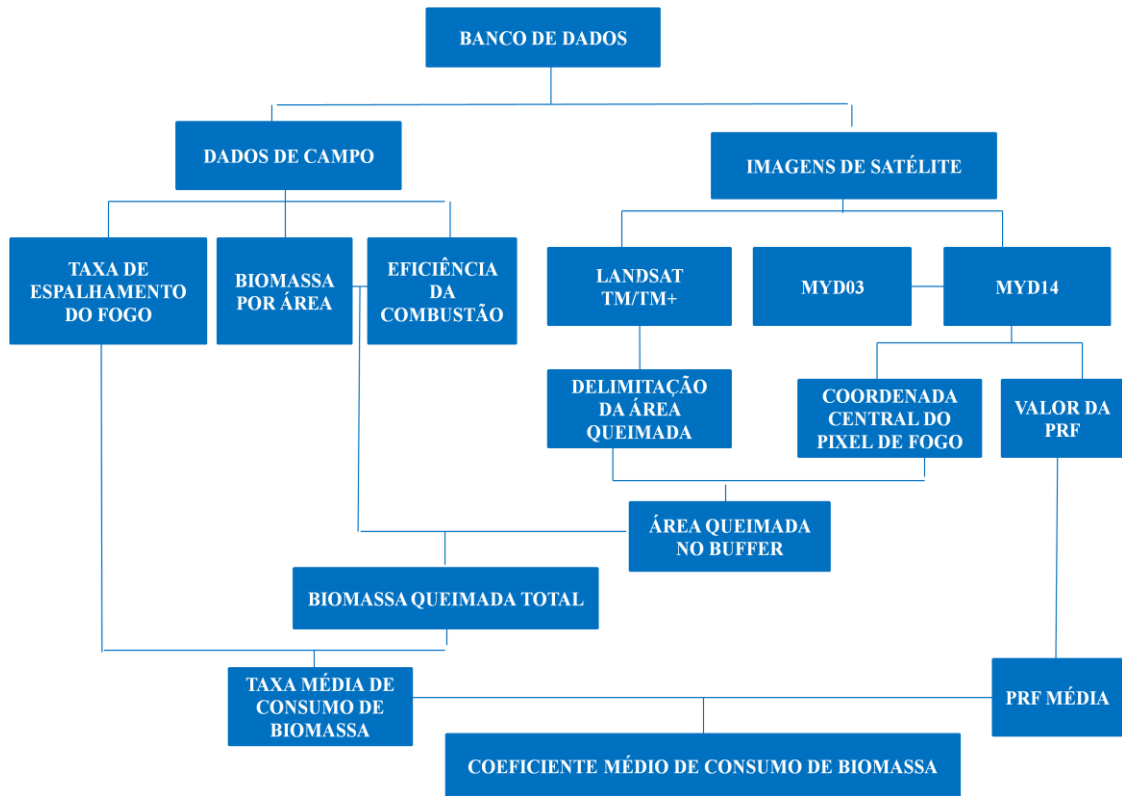


Figura 4.1. Representação esquemática do desenvolvimento da metodologia.

CAPÍTULO 5

RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1. IDENTIFICAÇÃO DOS FOCOS DE CALOR

A aquisição do grânulo do MODIS (MYD14) gerou informação sobre a localização dos focos de calor no grânulo MYD14. Parte do grânulo abrange o RS, o que permite a identificação de focos de calor em outras regiões do Estado (Figura 5.1). Na região nordeste, foi possível visualizar e extrair informações de uma grande quantidade de pixels de fogo nos campos de cima da serra, como mostra a Figura 5.1. Apesar da presença dos focos de calor e a obtenção de dados de *PRF*, a falta de dados de biomassa nos demais municípios que englobam os campos de cima da serra impossibilitaram a utilização dos valores de *PRF* para a derivação do coeficiente de consumo de biomassa. Mesmo assim, é possível identificar uma grande densidade de focos de calor nos campos, demonstrando a prática do uso do fogo como alternativa de manejo no inverno, conforme relatado por Boldrini (2009) e Heringer e Jacques (2002a).

Para a área de estudo (município de André da Rocha), foram detectados três pixels, o que gerou três medidas de *PRF*, conforme a Figura 5.2. A resolução espacial do sensor MODIS de aproximadamente 1km à nadir, registra um único sinal em uma área de 1x1km, e, conseqüentemente, um valor de *PRF*. Neste sentido, não é possível determinar se o registro equivale a um ou vários focos de queima no interior do pixel, considerando ainda as características de uma queimada com suas diferentes fases. A informação que pode ser extraída, neste caso, é sobre a intensidade da queimada e a presença de mais de um pixel indica o tamanho, ou a área abrangente da queimada.

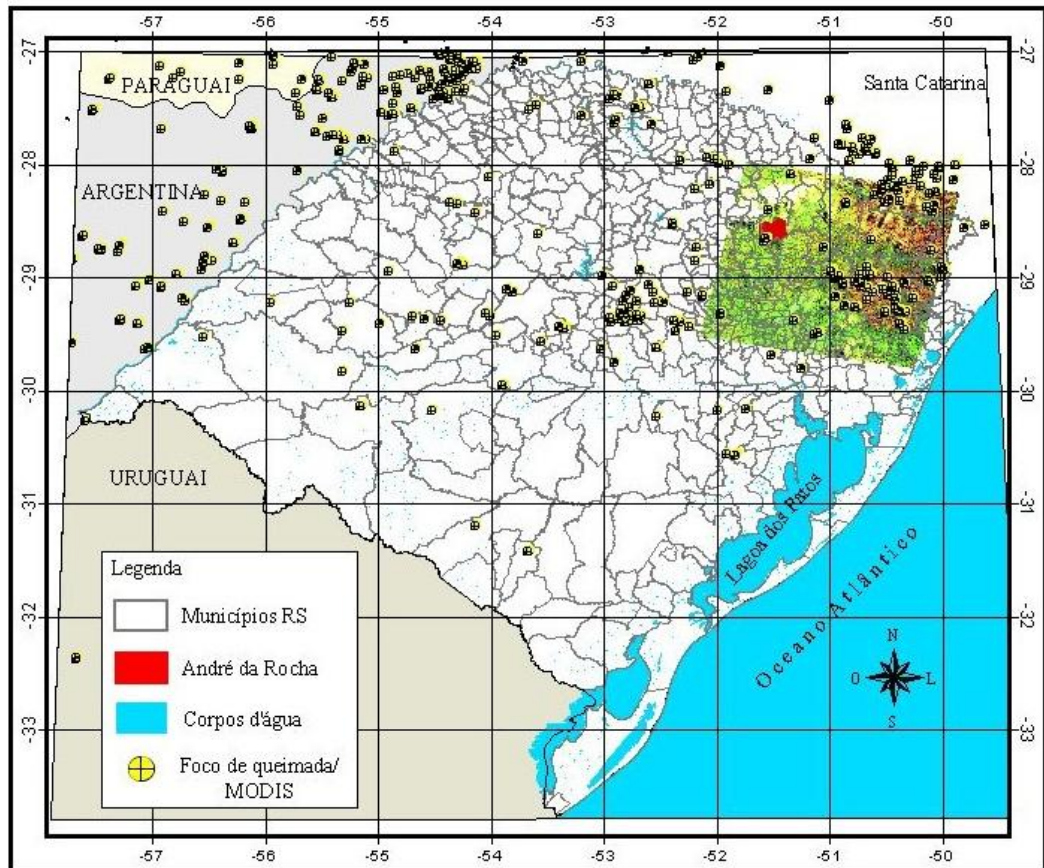


Figura 5.1. Localização de parte dos focos de calor obtidos pelo sensor MODIS (MYD14), em 04/09/2007, no RS e regiões adjacentes, e cena obtida do satélite Landsat, órbita-ponto 221-80, composição colorida falsa-cor RGB543, representados em coordenadas geográficas.

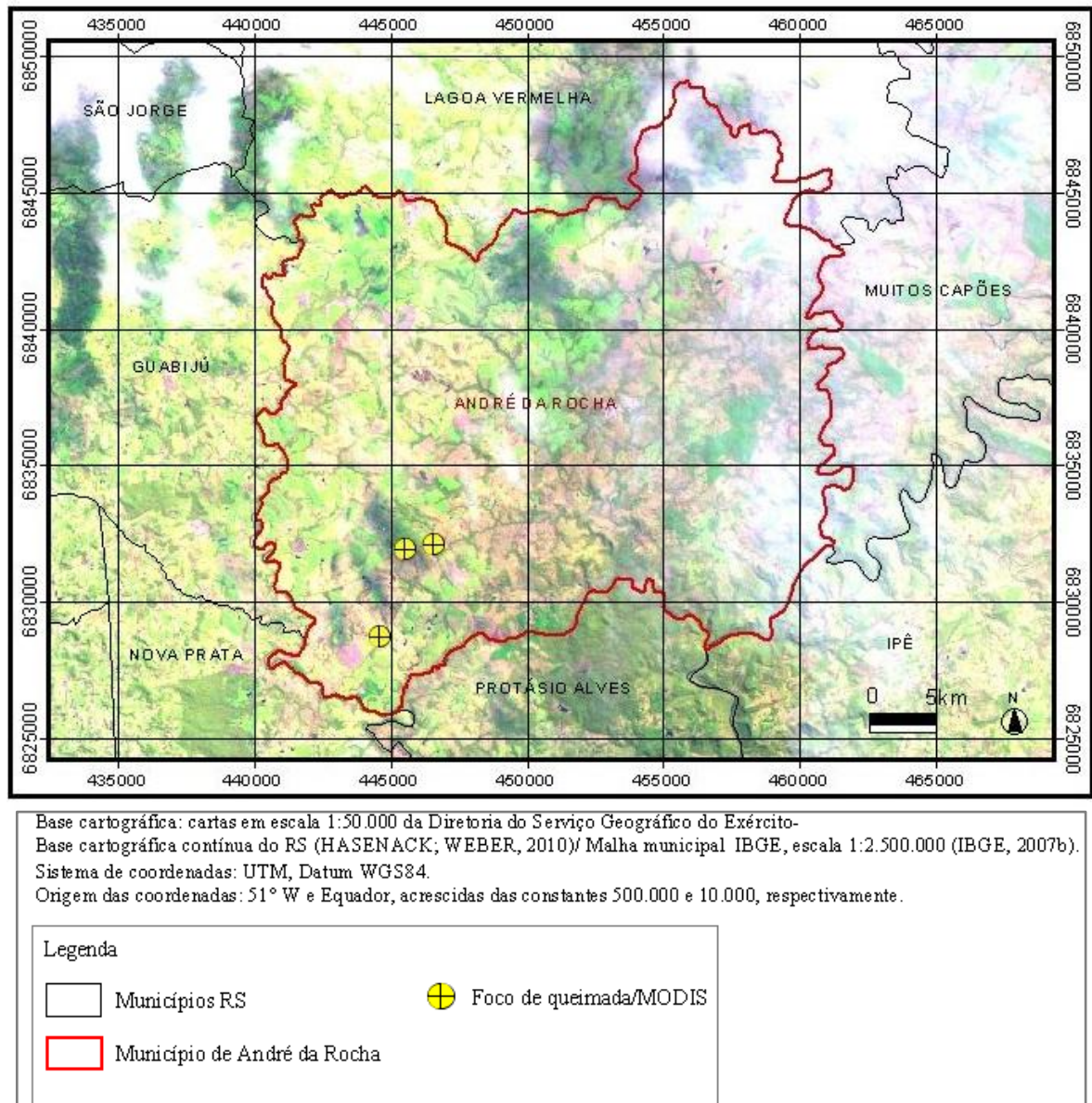


Figura 5.2. Focos de calor no município de André da Rocha, representados em coordenadas planas (UTM, fuso 22) e cena Landsat com composição colorida falsa cor RGB543 realçada.

5.2. DELIMITAÇÃO DA ÁREA QUEIMADA

A imagem do satélite Landsat possibilitou identificar no terreno a área correspondente à queimada, conforme mostra a Figura 5.3, validando, desta maneira, os dados de queimada obtidos pelo MODIS. Entretanto, devido à diferença de datas de aquisição entre a imagem do satélite Landsat e do grânulo correspondente à área de estudo do MODIS, a

incerteza no dado da cicatriz corresponde ao fato de que a mesma possui uma área maior de biomassa queimada do que a biomassa em processo de combustão no momento da passagem do sensor MODIS.

A cicatriz de área queimada não ocorre de forma homogênea, mas é possível identificar a extensão da área de campo com presença de cicatriz. Nesse sentido, como não houve o conhecimento do horário do início da queimada, o que poderia fornecer uma estimativa da biomassa queimada no momento da passagem do sensor MODIS, devido ao conhecimento das variáveis, eficiência da combustão, densidade de biomassa e material morto acima do solo, e taxa de espalhamento, algumas suposições tiveram que ser assumidas para a obtenção do resultado final, como considerar o espalhamento do fogo em formato circular e igual para todas as direções, desconsiderando, neste caso, variáveis como, a direção do vento e ponto de ignição.

A Figura 5.3 mostra a área mapeada como campo queimado no entorno e no interior do *buffer*. A partir do mapeamento da área queimada foi possível obter a região de campo com presença de cicatrizes inseridas no *buffer* de 500m de raio.

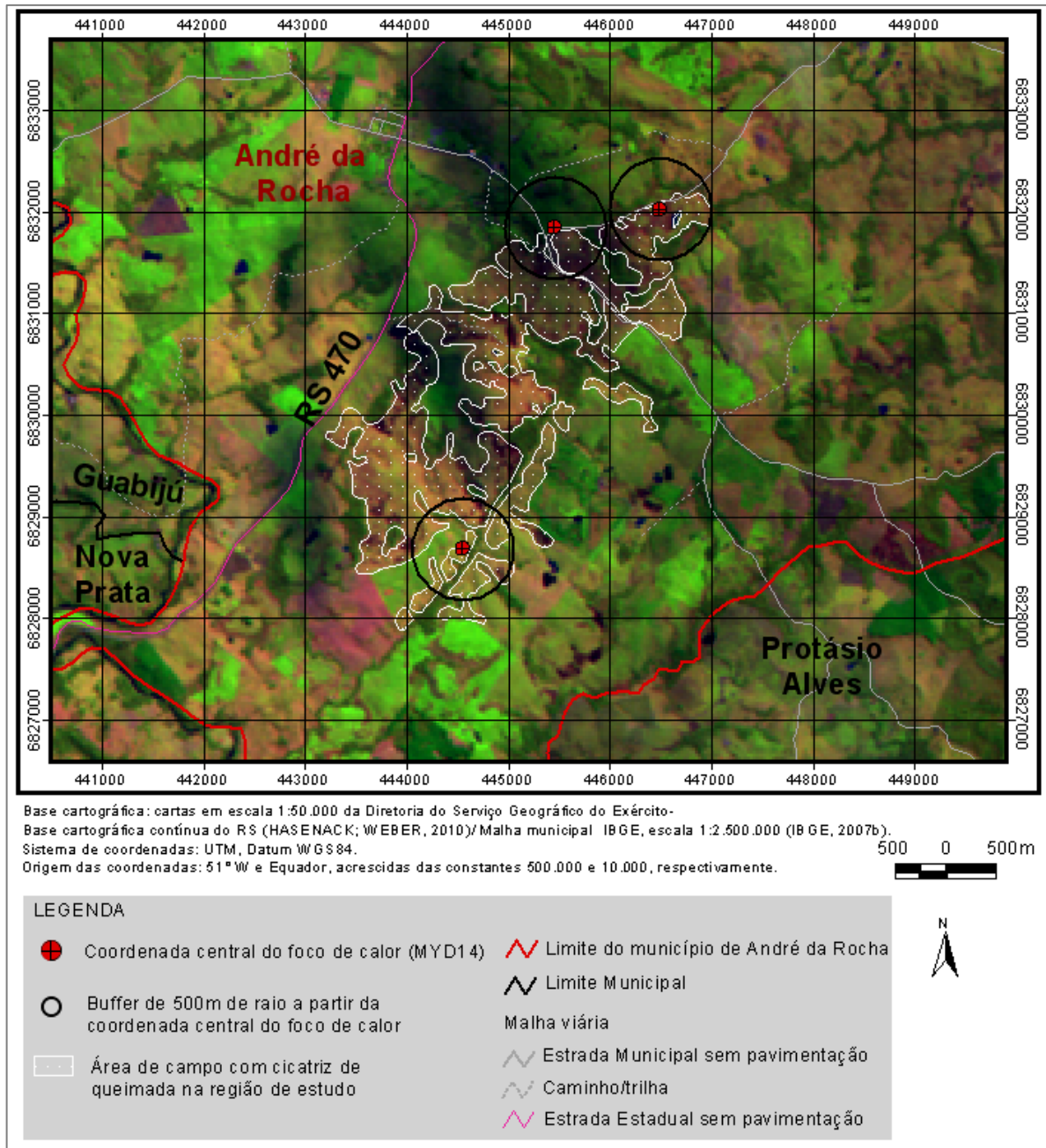


Figura 5.3. Localização da área campestre com vestígios de cicatriz de queimada no município de André da Rocha (RS) e a região correspondente à área do pixel de 1km, representada pelo *buffer*, em cena Landsat com composição colorida falsa cor RGB543.

5.3.BIOMASSA QUEIMADA E PRF

A máscara gerada pelo *buffer* permitiu derivar a área de vegetação campestre com cicatriz de queimada e possibilitou o cálculo do consumo de biomassa nas três áreas

mostradas na Figura 5.4 (identificadas como área 1, 2 e 3). O valor total de área campestre queimada no interior dos três *buffers* foi utilizado para a estimativa de biomassa queimada na Equação 4.1. Da mesma maneira, foi obtido o valor da potência radiativa do fogo (*PRF*), de cada pixel e foi calculada a energia total dos três pixels (Tabela 5.1).

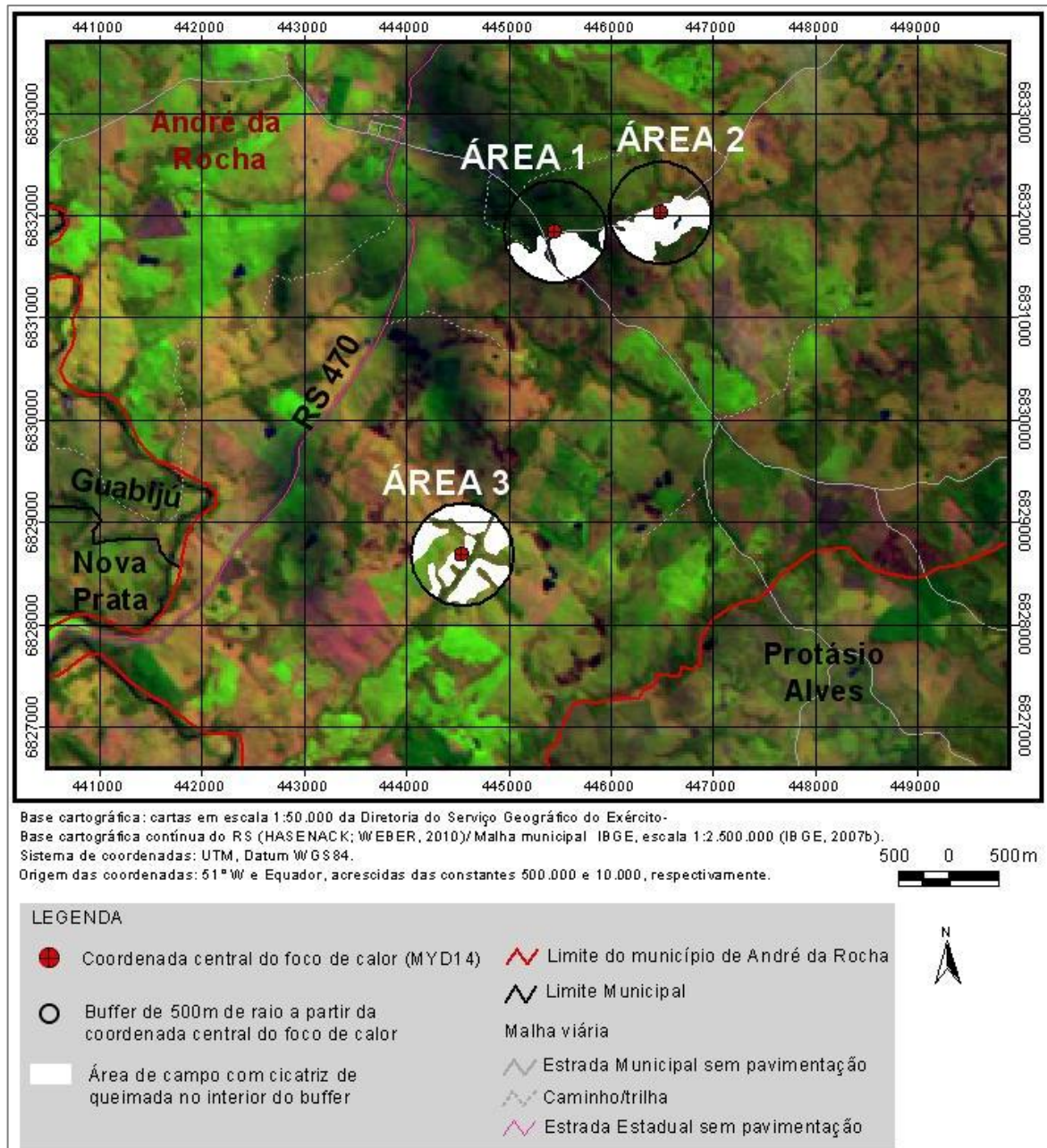


Figura 5.4. Área campestre mapeada no interior do buffer com vestígios de queimada, no município de André da Rocha, RS, em cena Landsat, com composição colorida falsa cor RGB543.

Tabela 5.1. Valores para cada área e somatório total correspondente às áreas de campo, potência radiativa do fogo (*PRF*) e biomassa queimada (*BQ*).

	Área de campo (ha)	Área de campo (km ²)	PRF (MW)	BQ (kg)
ÁREA 1	26,72	0,27	7,21	22.842
ÁREA 2	31,04	0,31	13,80	26.226
ÁREA 3	41,27	0,41	6,76	34.686
TOTAL	99,03	0,99	27,77	83.754

Os dados da Tabela 5.1 mostram que o sensor MODIS/AQUA registrou baixos valores de *PRF* para a área de estudo, o que foi visualizado nas demais áreas campestres da região nordeste do RS com registro de queimadas no grânulo obtido. Os dados de campo sobre a intensidade do fogo na região sul do Brasil sugerem que a mesma é inferior à intensidade do fogo obtida em outras regiões com ocorrência de vegetação campestre, como constatado no trabalho realizado por Fidelis et al. (2010a), sendo que no Brasil, a intensidade do fogo a partir de experimentos *in situ* para a região de campos no sul é bem inferior à da região de Cerrado. Porém, quando se consideram os dados obtidos por sensores orbitais, devem ser levados em consideração outros componentes que afetam a qualidade do sinal que chega ao sensor, além do campo de visada, resolução espacial, condições atmosféricas, entre outros.

Outro fator importante é a temperatura registrada pelo sensor, a partir da temperatura de brilho do pixel, que é utilizada para o cálculo da *PRF* no algoritmo do sensor MODIS. Os dados obtidos pelo sensor forneceram uma temperatura de 316K e 310K, para o maior (área 2) e os menores (áreas 1 e 3) valores de *PRF*, respectivamente, e uma temperatura de background de 303K, para os canais 21 e 22 do sensor MODIS. Esses valores equivalem a 43°C e 37°C para os focos de queimadas e 30°C para as áreas do entorno. Alguns trabalhos utilizando a *PRF* obtida pelo MODIS, como os trabalhos de Pereira et al. (2007a) e Pereira et al. (2007b) verificaram temperaturas em torno de 50° Celsius e 40° Celsius, respectivamente, nas áreas em combustão em regiões do cerrado e temperaturas em torno de 30° Celsius nos pixels vizinhos (*background*). Os valores encontrados de *PRF* por Pereira et al. (2007a), para a região de campo no Cerrado, foram próximos aos valores encontrados neste trabalho, porém, no trabalho realizado por Pereira et al. (2007a), a queimada perdurou por dias, o que forneceu várias medidas de *PRF*, nesse sentido, conforme o autor, devido às características de

imageamento e da heterogeneidade do pixel, o valor de temperatura pode ter seus valores diminuídos pela integração do sinal (PEREIRA et al. 2007a).

Com o valor total de biomassa consumida pelo fogo e a área total de campo apresentados na Tabela 5.1, foi obtida a estimativa da biomassa queimada por área (Quadro 5.1). Da mesma maneira, a partir da obtenção da biomassa total consumida pelo fogo e com o conhecimento da taxa de espalhamento do fogo para a região campestre, foi calculado o raio do *buffer*, a partir da área campestre total (0,99 km²), e com esse resultado o tempo de consumo de biomassa, o que possibilitou o cálculo da taxa média de consumo de biomassa. Também foi obtida a *PRF* média pelo somatório das medidas dividido pelo número de observações. Os resultados obtidos são apresentados no Quadro 5.1.

Biomassa queimada por área (kg/ha)	Tempo de consumo total (s)	Raio (km)	Taxa média de consumo de biomassa (kg/s)	<i>PRF</i> média (MJ/s)
845,744	37.333	0,56	2,24	9,26

Quadro 5.1. Valores utilizados para a obtenção da taxa média de consumo de biomassa (biomassa queimada total, tempo de consumo e raio) e valores da taxa média de consumo e *PRF* média, utilizados na equação para a obtenção do resultado final.

5.4. COEFICIENTE DE CONSUMO DE BIOMASSA

Os valores da taxa média de queima de biomassa e da *PRF* média foram substituídos na equação 4.2 para a obtenção do coeficiente médio de queima de biomassa. O valor do coeficiente obtido foi de 0,24 kg/MJ. Ou seja, para cada MJ liberado da queima de biomassa campestre, são consumidos em média 0,24 kg de biomassa.

O dado do valor do consumo de carbono, ou do consumo de biomassa, se aproximou do valor encontrado por Wooster et al. (2005), que é de 0,368 kg/MJ. Embora a metodologia utilizada neste trabalho tenha sido diferente da metodologia desenvolvida por Wooster et al. (2005), e utilizada por Freeborn et al. (2008) e Pereira (2008), as duas

metodologias permitiram estimar o coeficiente de consumo de biomassa. Na metodologia desenvolvida por Wooster et al. (2003) foi corroborada a relação de dependência entre o consumo de biomassa e a *PRF* liberada e, a partir dessa relação de dependência, foram obtidos os coeficientes em Wooster et al., (2005), Freeborn et al. (2008) e Pereira (2008). No presente estudo, esta relação foi considerada para determinar o coeficiente de consumo de biomassa, porém foi utilizada uma nova metodologia.

A metodologia utilizada pelos autores recém-citados foi a do método proposto por Wooster et al. (2003), que utiliza a radiância espectral em 4 μ m. Nessa metodologia foi realizado um experimento a partir de medidas *in situ* de queima de biomassa de amostras de vegetação coletadas em campo e com o uso de espectrorradiômetro para a derivação da *PRF* e do consumo de biomassa correspondente à mesma. No presente trabalho, foi proposta uma metodologia utilizando a *PRF*, obtida a partir do produto de anomalias termais do sensor MODIS, e dados de biomassa queimada, estimados a partir de dados obtidos da literatura (densidade de biomassa, taxa de espalhamento do fogo, eficiência da combustão) e pelo mapeamento da cicatriz de campo queimado.

Outro aspecto relevante se deve ao fato de que os dados obtidos a partir da literatura foram estimados em diferentes estações do ano. Os dados sobre a taxa de espalhamento do fogo e da eficiência de combustão foram obtidos do experimento realizado por Fidelis et al. (2010a), em uma região campestre com exclusão de fogo há seis anos. O experimento foi realizado no verão (em dezembro), época em que o acúmulo de biomassa é maior e, com isso, o *fuel load* (combustível) é maior — o *fuel load* era aproximadamente cinco vezes maior do que o *fuel load* estimado para o município de André da Rocha na época de inverno, quando o material combustível (biomassa) é menor.

CAPÍTULO 6

CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste trabalho, optou-se pelo desenvolvimento de uma metodologia que pudesse unir dados oriundos da literatura de experimentos realizados com queimadas em região campestre no RS e dados de satélites para delimitar a área queimada e obter a *Potência Radiativa do Fogo* e assim estimar o coeficiente de consumo de biomassa. A metodologia proposta para a obtenção do coeficiente de consumo de biomassa não existe na literatura da área e foi construída a partir do pressuposto da relação linear existente entre a *PRF* e a biomassa queimada verificada na revisão da literatura. Desta forma, foi obtido o valor de um coeficiente médio de consumo de biomassa para a área de estudo.

A revisão da literatura feita neste estudo revelou a existência de poucos dados de experimentos com queimadas para a região campestre do RS. Além disso, como a maior parte das queimadas é utilizada como alternativa de manejo do campo, com duração controlada de tempo, muitas vezes, a detecção por imagens de satélite dos focos ativos é difícil de ser obtida. Devido a estas limitações, não foi possível utilizar uma sequência de dados de *PRF* e biomassa queimada para a área de estudo ao longo do tempo. Ao invés, foram utilizados três focos de queimada de uma única imagem com os quais se determinou a *PRF* média para a área de estudo. Para a derivação da taxa de consumo de biomassa, como não foi possível obter o horário de início e fim da queimada na área de estudo, calculou-se a taxa de consumo para toda a cicatriz de campo queimado — valor médio, correspondente ao pixel de fogo detectado pelo MODIS.

A diferença sazonal de aquisição dos dados de campo sobre a queima de biomassa para o RS e da *PRF*, obtida pelo MODIS, pode influenciar na estimativa do valor de coeficiente de consumo. Isso porque, para o Rio Grande do Sul, existe uma sazonalidade bem marcada durante o ano (com as quatro estações bem definidas), o que influencia na densidade de biomassa, que tende a ser maior na estação quente de verão. Outra questão refere-se a limitações do produto do sensor MODIS, como a dificuldade de obtenção de pequenos focos de queimadas e a ausência de correção atmosférica no produto.

Outras dificuldades no uso do sensor MODIS foram verificadas no desenvolvimento do trabalho. As imagens diárias do sensor MODIS se mostram muito úteis pela boa resolução temporal — diária, porém nem sempre é possível a aquisição de uma boa imagem para a área que se deseja estudar. Isso ocorre por inúmeros problemas encontrados, como ruídos, presença de nuvens, não imageamento da área, duplicação de dados, deformações devido ao ângulo de visada, entre outros. Esses problemas foram verificados na obtenção de imagens do sensor MODIS nas datas anteriores e posteriores à queimada na área de estudo.

Para o presente estudo, diversas imagens foram testadas antes de adotar a metodologia final, desde a aquisição das imagens brutas, até a aquisição de imagens diárias de outros produtos do sensor MODIS. A tentativa de adquirir outras imagens teve como intuito conseguir obter dados mais precisos sobre a quantidade de biomassa antes e após a queimada, porém, para a área de estudo, não foi possível. Desta maneira optou-se pelo uso da imagem do satélite Landsat, a partir da obtenção da cicatriz deixada pela queima da vegetação e pela boa resolução espacial.

O resultado obtido neste trabalho é um dado preliminar para novos estudos, e a ausência de precisão do mesmo deve-se à falta de dados e de experimentos em campo. Por outro lado, dados de campo de queima de biomassa em outras regiões campestres, poderiam contribuir para uma estimativa mais abrangente, envolvendo toda a região campestre do sul do Brasil, e fornecer informações importantes sobre a quantidade de biomassa queimada e as emissões causadas pela mesma, quando utilizados dados de satélite, além de possibilitar o uso de análises estatísticas. Além disso, o conhecimento da *PRF* pode auxiliar em trabalhos de grande escala para compreender a dinâmica, o comportamento e a severidade das queimadas.

CAPÍTULO 7

REFERÊNCIAS

ANAYA, J.; CHUVIECO, E.; PALACIOS-ORUETA, A. Propuesta preliminar para la estimación de emisiones por biomassa quemada em Colômbia. In: HERNÁNDEZ, L.; PARREÑO, J. M. (Ed.) **Tecnologias de La información geográfica para El desarrollo territorial. Las Palmas de Gran Canaria**: Servicio de Publicaciones y Difusión Científica de La ULPGC, 2008, p.474-487.

ANDREAE, M. O. Biomass burning: Its history, use and distribution and its impact on environmental quality and global climate. In LEVINE, J. S.(Ed.) **Global biomass burning: Atmospheric, Climatic and Biospheric Implications**. Cambridge: MIY Press, 1991, p. 3-21.

ANDREAE, M. O.; MERLET, P. Emission of trace gases and aerosols from biomass burning. **Global Biogeochemical Cycles**, v. 15, n. 4, p. 955-966, 2001.

BEHLING, H. Late Quaternary vegetation, climate and fire history of the Araucaria Forest and campos region from Serra Campos Gerais, Paraná state (south Brazil). **Review of palaeobotany and palynology**, v. 97, p. 109-121, 1997.

BEHLING, H.; PILLAR, V. D. Late Quaternary vegetation, biodiversity and fire dynamics on the southern brazilian highland and their implication for conservation and management of modern Araucaria forest and grassland ecosystems. **Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences**, v. 362, p. 243-251, 2007.

BEHLING, H.; JESKE-PIERUSCHKA, V.; SCHÜLER, L.; PILLAR, V. D. Dinâmica dos campos no sul do Brasil durante o Quaternário Tardio. In: PILLAR, V. D.; MÜLLER, S. C.; CASTILHOS, Z. M. de S.; JACQUES, A. V. A. (Ed.). **Campos sulinos: conservação e uso sustentável da biodiversidade**. Brasília: MMA, 2009. p. 13-25.

BOLDRINI, I. I. Campos no Rio Grande do Sul: caracterização fisionômica e problemática ocupacional. **Boletim do Instituto de Biociências da UFRGS**. v. 56, p. 1-39, 1997.

BOLDRINI, I. I. A flora dos campos do Rio Grande do Sul. In: PILLAR, V. D.; MÜLLER, S. C.; CASTILHOS, Z. M. de S.; JACQUES, A. V. A. (Ed.). **Campos sulinos: conservação e uso sustentável da biodiversidade**. Brasília: MMA, 2009. p. 63-77.

CARUSO, F.; OGURI, V. **Física moderna: origens clássicas e fundamentos quânticos**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2006. 605 p.

CHENEY, P.; SULLIVAN, A. **Grassfires: fuels, wheather and fire behavior**. Australia: CSIRO Publishing, 2 ed., 2008. 160 p.

COMMONWEALTH SCIENTIFIC AND INDUSTRIAL RESEARCH ORGANISATION (CSIRO). **Parts of a fire**. 2011. Disponível em: <<http://www.csiro.au/Outcomes/Safeguarding-Australia/PartsOfFire.aspx>>. Acesso em: dez. de 2011.

CORDEIRO, J. L. P.; HASENACK, H. Cobertura vegetal atual do Rio Grande do Sul. In: PILLAR, V. D.; MÜLLER, S. C.; CASTILHOS, Z. M. de S.; JACQUES, A. V. A. (Ed.). **Campos sulinos: conservação e uso sustentável da biodiversidade**. Brasília: MMA, 2009. p. 285-299.

DOZIER, J. A method for satellite identification of surface temperature fields of subpixel resolution. **Remote Sensing of Environment**, n. 11, p. 221– 229, 1981.

EISBERG, R.; RESNICK, R. **Física quântica: átomos, moléculas, sólidos, núcleos e partículas**. Rio de Janeiro: Elsevier, 1979. 928 p.

FUNDAÇÃO DE ECONOMIA E ESTATÍSTICA (FEE). **COREDES**. 2012. Disponível em: <http://www.fee.tche.br/sitefee/pt/content/resumo/pg_coredes_detalhe.php?corede=Campos+de+Cima+da+Serra>. Acesso em: jan. de 2012.

FIDELIS, A.; MÜLLER, S. C.; PILLAR, V. D.; PFADENHAUER, J. Influência do fogo na biomassa aérea e subterrânea dos campos sulinos. In: XXI Reunião do grupo técnico em forrageiras do Cone Sul — grupo campos: Desafios e oportunidades do bioma Campos frente à expansão e intensificação agrícola. **Anais...Pelotas: EMBRAPA-Clima Temperado**, 2006. Disponível em: <http://www.cpact.embrapa.br/publicacoes/download/documentos/documento_166/pastagens_nativas.htm>. Acesso em: ago. de 2012.

FIDELIS, A.; MÜLLER, S. C.; PILLAR, V. D.; PFADENHAUER, J. Efeito do fogo na ecologia de populações de herbáceas e arbustos dos campos sulinos. **Revista Brasileira de Biociências**, Porto Alegre, v. 5, supl. 1, p. 303-305, 2007.

FIDELIS, A.; APPEZZATO da G, B.; PFADENHAUER, J. A importância da biomassa e das estruturas subterrâneas nos campos sulinos. In: PILLAR, V. DE P.; MÜLLER, S. C.; CASTILHOS, Z. M. de S.; JACQUES, A. V. A. (Ed.). **Campos sulinos: conservação e uso sustentável da biodiversidade**. Brasília: MMA, 2009. p. 88-100.

FIDELIS, A.; DELGADO-CARTAY, D.; BLANCO, C. C.; MÜLLER, S. C.; PILLAR, V. D.; PFADENHAUER, J. Fire intensity and severity in brazilian campos grasslands. **Interciencia**, v. 35, n. 10, p. 739-745, 2010a.

FIDELIS, A.; MÜLLER, S. C.; PILLAR, V. D.; PFADENHAUER, J. Population biology and regeneration of forbs and shrubs after fire in Brazilian *Campos* grasslands. **Plant Ecology**. v. 211, p. 107-117, 2010b.

FIDELIS, A.; BLANCO, C. C.; MÜLLER, S. C.; PILLAR, V. D.; PFADENHAUER, J. Short-term changes caused by fire and mowing in brazilian campos grasslands with different long-term fire histories. **Journal of Vegetation Science**, v. 23, p. 552-562, 2012.

FRANÇA, H. **Metodologia de identificação e quantificação de áreas queimadas no cerrado com imagens AVHRR/NOAA**. 2000. 133 f. Tese (Doutorado em Ciências – ênfase Ecologia) – Instituto de Biociências, Curso de Pós-Graduação em Ciências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000.

FREEBORN, P. H.; WOOSTER, M. J.; HAO, W. M.; RYAN, C. A.; NORDGREN, B. L.; BAKER, S. P.; ICHOKU, C. Relationships between energy release, fuel mass loss, and trace gas and aerosol emissions during laboratory biomass fires. **Journal of Geophysical Research**. v. 113, n. D01301, p. 1- 17, 2008.

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

GIGLIO, L. **MODIS Collection 5 Active Fire Product User's Guide: Version 2.4**. 2010. Disponível em: <http://maps.geog.umd.edu/firms/products/MODIS_Fire_Users_Guide_2.4.pdf>. Acesso em: 06 out. 2010.

GIGLIO, L; JUSTICE, C. O. **MODIS Active Fire Algorithm and Products: Collection 5 Change Sumamary**. 2006. Disponível em: < http://landweb.nascom.nasa.gov/QA_WWW/forPage/C005_Change_Fire.pdf> Acesso em outubro de 2011.

GUIMARÃES, R. J. DE P. S. e.; KRUG, T.; SETZER, A. W., Análise dos diferentes estágios da queimada através do sensor MODIS AIRBORNE SIMULATOR. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 13., 2007. Florianópolis, **Anais...São José dos Campos:INPE**, 2007. p. 4465-4472.

HASENACK, H.; CORDEIRO, J. L. P.; COSTA, B. S. C. Cobertura vegetal atual do Rio grande do Sul. In: II Simpósio de Forrageiras e Produção Animal: sustentabilidade produtiva do bioma Pampa, 2007. **Anais...Porto Alegre: Departamento de Plantas Forrageiras e Agrometeorologia – UFRGS**, 2007. p. 15-21.

HASENACK, H.; WEBER, E. (org.). **Base cartográfica vetorial contínua do Rio Grande do Sul – escala 1:50.000**. Porto Alegre, UFRGS-IB-Centro de Ecologia. Série Geoprocessamento, n. 3. 2010. 1 DVD-ROM.

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**. 2010. Disponível em: < <http://www.gmes-atmosphere.eu/documents/deliverables/d-fire/>>. Acesso em ago. de 2012.

HERINGER, I.; JACQUES, A. V. A. Acumulação de forragem e material morto em pastagem nativa sob distintas alternativas de manejo em relação às queimadas. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v.31, n.2, p. 599-604, 2002a. Disponível em: < <http://dx.doi.org/10.1590/S1516-35982002000300009>>. Acesso em: out. 2010.

HERINGER, I.; JACQUES, A. V. A. Composição florística de uma pastagem natural submetida a queima e manejos alternativos. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 32, n. 2, p. 315-321, 2002b.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Manual técnico da vegetação brasileira**. Rio de Janeiro:IBGE, séries manuais técnicos em geociências, n. 1. 1992. 92 p.

_____. **Mapa exploratório de solos do Estado do Rio Grande do Sul**. 2002. Disponível em: <ftp://geofp.ibge.gov.br/mapas_tematicos/pedologia/unidades_federacao/rs_pedologia.pdf>. Acesso em: dez. de 2011.

_____. **Mapa de Biomas do Brasil**. 2004. Disponível em: <http://www.ibge.gov.br/home/geociencias/default_prod.shtm#MAPAS> Acesso em: out. de 2011.

_____. **Censo Agropecuário**. 2006. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br/cidadesat/topwindow.htm?1>>. Acesso em: ago. de 2011.

_____. **Produção agrícola Municipal**. 2007a. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br/cidadesat/topwindow.htm?1>>. Acesso em: ago. de 2011.

_____. **Malha municipal digital - escala 1:2.500.000**. 2007b. Disponível em: <ftp://geofp.ibge.gov.br/malhas_digitais/municipio_2007/>. Acesso em: nov. de 2011.

_____. **Censo**. 2010. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br/cidadesat/topwindow.htm?1>>. Acesso em: ago. de 2011.

ICHOKU, C.; KAUFMAN, Y. J. A method to derive smoke emission rates from MODIS fire radiative energy measurements. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 43, n. 11, 2005.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS (INPE). **Monitoramento do Transporte de Poluição Antropogênica e de Queimada na América do Sul**. 2011a. Disponível em: <http://meioambiente.cptec.inpe.br/modelo_cattbrams.php?lang=pt#model_description>. Acesso em: out. de 2010.

_____. **Monitoramento de Queimadas em Tempo Quase-Real**. 2011b. Disponível em: <<http://sigma.cptec.inpe.br/queimadas/perguntas.html>>. Acesso em: jun. de 2011.

_____. **Catálogo de imagens**. 2011c. Disponível em: <<http://www.dgi.inpe.br/CDSR/>>. Acesso em set. de 2010.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). 2001. **Climate Change 2001: Synthesis Report - Summary for policymakers**. Disponível em: <<http://www.ipcc.ch/pdf/climate-changes-2001/synthesis-spm/synthesis-spm-en.pdf>>. Acesso em: 21 out. 2010.

JACQUES, A. V. A. A queima das pastagens naturais: efeitos sobre o solo e a vegetação. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 33, n. 1, p. 177-181, 2003.

JENSEN, J. R. **Sensoriamento remoto do ambiente: uma perspectiva em recursos terrestres**. Tradução José Carlos Epiphânio (Coord.)...[et al.]. São José dos Campos, SP: Parêntese, 2009. 598 p.

JUSTICE, C.; GIGLIO, L.; BOSCHETTI, L.; ROY, D.; CSISZAR, I.; MORISETTE, J.; KAUFMAN, Y. MODIS fire products algorithm technical background document. Version 2.3. 2006. Disponível em: http://modis-fire.umd.edu/AF_usermanual.html> Acesso em outubro de 2010.

JUSTICE, C.; GIGLIO, L.; BOSCHETTI, L.; ROY, D.; CSISZAR, I.; MORISETTE, J.; KAUFMAN, Y. **Algorithm technical background document**. Modis fire products version 2.3. 2006. Disponível em: <http://modis.gsfc.nasa.gov/data/atbd/atbd_mod14.pdf>. Acesso em out. de 2010.

JUSTICE, C. O.; GIGLIO, L.; KORONTZI, S.; OWENS, J.; MORISETTE, J. T.; ROY, D.; DESCLOITRES, J.; ALLEAUME, S.; PETITCOLIN, F.; KAUFMAN, Y. The MODIS fire products. **Remote Sensing of Environment**, v. 83, , p. 244-262. 2002

KAISER, J. W.; HEIL, A.; SCHULTZ, M. G.; VAN DER WERF, G. R.; WOOSTER, M. J.; XU, W. **Final report implementation and quality of D-Fire assimilation system**. MACC deliverable D_D-FIRE_7. 2011. Disponível em: <<http://www.gmes-atmosphere.eu/documents/deliverables/d-fire/>> Acesso em ago. de 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, p. 527-554, 2012.

KAUFMAN, Y. J.; REMER, L. A.; OTTMAR, R. D.; WARD, D. E.; RONG-R, L.; KLEIDMAN, R.; FRASER, R. S.; FLYNN, L.; McDOUGAL, D.; & SHELTON, G. Relationship between remotely sensed fire intensity and rate of emission of smoke: SCAR-C experiment. In: LEVINE, J. S. (Ed.). **Biomass burning and global change**. Maryland: MIT Press, 1996, p. 685-696.

KAUFMAN, Y. J.; JUSTICE, C.; FLYNN, L.; KENDALL, J.; PRINS, E.; GIGLIO, L.; WARD, D.E.; MENZEL, P.; SETZER, A. Potential global fire monitoring from EOS-MODIS. **Journal of Geophysical Research**, v. 103, n. D24, p. 32,2 - 32,238, 1998a.

KAUFMAN, Y. J.; KLEIDMAN, R. G.; KING, M. D. SCAR-B fires in the tropics: Properties and remote sensing from EOS-MODIS. **Journal of Geophysical Research**, v. 103, n. D24, p. 31,955 - 31,968, december, 27, 1998b.

KAUFMAN, Y. J.; HOBBS, P. V.; KIRCHHOFF, V. W. J. H.; ARTAXO, P.; REMER, L. A.; HOLBEN, B. N.; KING, M.D.; WARD, D. E.; PRINS, E. M.; LONGO, K. M.; MATTOS, L. F.; NOBRE, C. A.; SPINHIRNE, J. D.; JI, Q.; THOMPSON, A. M.; GLEASON, J. F.; CHRISTOPHER, S. A.; TSAY S.-C. Smoke, Clouds and Radiation-Brazil (SCAR-B) experiment. **Journal of Geophysical Research**, v. 103, n. D24, p. 31,783 - 31,808, december, 27, 1998c.

KAUFMAN, Y. J.; ICHOKU, C.; GIGLIO, L.; KORONTZI, S.; CHU, D. A.; HAO, W. M.; LI, R.-R.; JUSTICE, C. O. Fire and smoke observed from the Earth Observing System MODIS instrument: products, validation and operational use. **International Journal of Remote Sensing**, v. 24, n. 8, p. 1765-1781, 2003.

KERN, A. A. Origens da ocupação pré-histórica do Rio Grande do Sul na transição Pleistoceno-Holoceno. In: KERN, A. A.; JACOBUS, A. L.; COPÉ, S. M.; SCHMITZ, P. I.; NAUE, G.; BECKER, B. (Org.). **Arqueologia pré-histórica do Rio Grande do Sul**. Porto Alegre: Mercado Aberto, 1997a. p. 13-62.

KERN, A. A. Paleopaisagens e povoamento pré-histórico do Rio Grande do Sul. In: KERN, A. A.; JACOBUS, A. L.; COPÉ, S. M.; SCHMITZ, P. I.; NAUE, G.; BECKER, B. (Org.). **Arqueologia pré-histórica do Rio Grande do Sul**. Porto Alegre: Mercado Aberto, 1997b. p. 89-102.

LILLESAND, T. M.; KIEFER, R. W. **Remote sensing and image interpretation**. New York: John Wiley & Sons, 1979. 612 p.

LINDMAN, C. A. M. **A vegetação no Rio Grande do Sul**. São Paulo/Belo Horizonte: EDUSP/Itatiaia. 1906.

LIU, W. T. H. **Aplicações de sensoriamento remoto**. Campo Grande: UNIDERP, 2007. cap. 11, p. 535-557.

LONGO, K. M.; FREITAS, S. R.; ANDREAE, M. O.; YOKELSON, R.; ARTAXO, P. Biomass burning in Amazonia: Emissions, long-range transport of smoke and its regional and remote impacts. In: KELLER, M.; BUSTAMANTE, M.; DIAS, P. S. (Ed.). **Amazônia and global change**. Washington DC: American Geophysical Union, 2009, p. 207-232.

MACHADO, L. A. Z. **Manejo de pastagem nativa**. Guaíba: Agropecuária, 1999. 158 p.

MARCHIORI, J. N. C. **Fitogeografia do Rio Grande do Sul: Campos Sulinos**. Porto Alegre: EST edições, 2004. 110 p.

MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÃO (MCTI). **Primeiro inventário brasileiro de emissões antrópicas de gases de efeito estufa. 2002**. Disponível em: <<http://www.mct.gov.br/index.php/content/view/17341.html#lista>>. Acesso em: out. de 2011.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE (MMA). **Mapas de cobertura vegetal dos biomas brasileiros**. 2007. Disponível em: <<http://mapas.mma.gov.br/mapas/aplic/probio/datadownload.htm>> Acesso em: out. de 2010.

MOTA, F. S. da. **Meteorologia agrícola**. São Paulo: Nobel, 1981. 376 p.

MÜLLER, S. C. **Padrões de espécies e tipos funcionais de plantas lenhosas em borda de floresta e campo sob influência do fogo**. 2005. 135 f. Tese (Doutorado em Ciências – ênfase em Ecologia) – Instituto de Biociências, Curso de Pós-Graduação em Ecologia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005.

NABINGER, C.; MORAES, A. de; MARASCHIN, G. E: Campos in southern Brazil. In: LEMAIRE, G.; HODGSON, J.;MORAES, A. de; NABINGER, C.; CARVALHO, P. C. de F.(Ed.). **Grassland Ecophysiology and Grazing Ecology**. CAB International, 2000. p. 355-376.

NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION (NASA). **MODIS level 1b product user's guide**. 2006. Disponível em: <http://mcst.gsfc.nasa.gov/sites/mcst.gsfc/files/file_attachments/M1054.pdf>. Acesso em: nov. de 2011.

_____. **About MODIS: components**. 2011a. Disponível em: <<http://modis.gsfc.nasa.gov/about/components.php>>. Acesso em: jun. de 2011.

_____. **Terra**. 2011b. Disponível em: <<http://terra.nasa.gov/about/>>. Acesso em: jun. de 2011.

_____. **Terra science**. 2011c. Disponível em: <<http://terra.nasa.gov/index.php?section=22>>. Acesso em: jun. de 2011.

_____. **About Aqua**. 2011d. Disponível em: <<http://Aqua.nasa.gov/about/instruments.php>>. Acesso em: jun. de 2011.

_____. **Aqua project science**. 2011e. Disponível em: <<http://Aqua.nasa.gov/index.php>>. Acesso em: jun. de 2011.

_____. **About MODIS: specifications**. 2011f. Disponível em: <<http://modis.gsfc.nasa.gov/about/specifications.php>>. Acesso em: jun. de 2011.

_____. **About MODIS**. 2011g. Disponível em: <<http://modis.gsfc.nasa.gov/about/>>. Acesso em: jun. de 2011.

_____. **MODIS land: thermal anomalies/fires**. 2011h. Disponível em: <<http://modis-land.gsfc.nasa.gov/fire.html>>. Acesso em: jan. de 2011.

_____. **Wist Echo**. 2011i. Disponível em: <<http://reverb.echo.nasa.gov/reverb/redirect/wist>>. Acesso em: mar. de 2011.

_____. **Land processes distributed active archive center: MODIS reprojection tools swath**. 2011j. Disponível em: <https://lpdaac.usgs.gov/tools/modis_reprojection_tool_swath>. Acesso em mar. de 2011.

NOVO, E. M DE M. **Sensoriamento remoto: princípios e aplicações**. São Paulo: Blucher, 2008. 363 p.

OVERBECK, G. E.; MÜLLER, S. C.; FIDELIS, A.; PFADENHAUER, J.; PILLAR, V. D.; BLANCO, C. C.; BOLDRINI, I. I.; BOTH, R.; FORNECK, E. D. Brazil's neglected biome: the southern Brazilian campos. **Perspectives in Plant Ecology, Evolutions and Systematics**, v. 9, p. 101-116, 2007.

OVERBECK, G. E.; MÜLLER, S. C.; PILLAR, V. DE P.; PFADENHAUER, J. Fine-scale post-fire dynamics in southern Brazilian subtropical grassland. **Journal of Vegetation Science**, v. 16, p. 655-664, 2005.

PEREIRA, G.; FREITAS, S. R. de; MORAES, E. C.; FERREIRA, N. J. Derivação da taxa de emissão de fumaça através das medidas de energia radiativa do fogo do sensor MODIS/TERRA: um estudo na Serra da Canastra. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 13., 2007. Florianópolis, **Anais...São José dos Campos:INPE**, 2007a. p. 4519-4526.

PEREIRA, G.; MORAES, E. C.; ARAI, E.; OLIVEIRA, L. G. L. de; FERREIRA, N. J. Estimativas de alterações do albedo de superfície e da emissão de gases do efeito estufa em áreas queimadas inferidas através de imagens Landsat. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 13., 2007. Florianópolis, **Anais...São José dos Campos:INPE**, 2007b. p. 4527-4534.

PEREIRA, G. **O uso de satélites ambientais para a estimativa dos fluxos de gases traços e de aerossóis liberados na queima de biomassa e sua assimilação em modelos numéricos de qualidade do ar**. 2008. 108 f. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) – Curso de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2008.

PEREIRA, G.; CARDOZO, F. da S.; SILVA, F. B.; SHIMABUKURO, Y. E.; MORAES, E. C.; FREITAS, S. R. de; FERREIRA, N. J. O uso da energia radiativa do fogo para estimar as emissões de queimadas para a América do Sul. **Revista Brasileira de Geofísica**. v. 28, n. 2, p. 155-164, 2010.

PESAVENTO, S. J. **História do Rio Grande do Sul**. Porto Alegre: Mercado Aberto, 2002. 142 p.

PILLAR, V. D.; QUADROS, F. L. F. de. Grassland-forest boundaries in southern Brazil. **Coenoses**, Gorizia, v. 12, n. 2-3, p.119-126, 1997.

PILLAR, V. D. Dinâmica da expansão florestal em mosaicos de floresta e campos no sul do Brasil. In: CLAUDINO-SALES, V. (Org.) **Ecossistemas brasileiros: manejo e conservação**. Fortaleza: Expressão Gráfica e Editora, 2003. p. 209-216.

QUADROS, F. L. F. de; PILLAR, V. D. Dinâmica vegetacional em pastagem natural submetida a tratamentos de queima e pastejo. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 31, n. 5, p. 863-868, 2001.

RAMBO, B. **A fisionomia do Rio Grande do Sul**. Porto Alegre: Selbach, 1956.

ROBERTS, G.; WOOSTER, M. J.; PERRY, G. L. W.; DRAKE, N. Retrieval of biomass combustion rates and totals from fire radiative power observations: Application to southern Africa using geostationary SEVIRI imagery. **Journal of Geophysical Research**, v. 110, n. D21111, 2005.

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

SECRETARIA DE PLANEJAMENTO, GESTÃO E PARTICIPAÇÃO CIDADÃ (SEPLAG). **Atlas socioeconômico do Rio Grande do Sul**. 2011. Disponível em: <<http://www.scp.rs.gov.br/atlas/default.asp>>. Acesso em: dez. de 2011.

SETZER, A.; MORELLI, F.; RIVERA-LOMBARDI, R. Estimativa quinzenal de áreas queimadas. In RUDORFF, B. F. T.; SHIMABUKURO, Y. E.; CEBALLOS, J. C. (Ed.) **O sensor MODIS e suas aplicações ambientais no Brasil**. São José dos Campos: Bookimage, 2007. p.403 - 417.

SISMANOGLU, R. A.; SETZER, A. W. Risco de fogo da vegetação da América do Sul: comparação de três versões na estiagem de 2004. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 12., 2005. Goiânia, **Anais...**São José dos Campos:INPE, 2005. p. 3349-3355.

TEIXEIRA, M. B.; NETO, A. B. C.; PASTORE, U.; FILHO, A. L. R. R. As regiões fitoecológicas, sua natureza e seus recursos econômicos estudo fitogeográfico. In: IBGE (org.). **Levantamento dos recursos naturais volume 33: folha SH. 22 Porto Alegre e parte das folhas SH.21 Uruguaiana e SI. 22 Lagoa Mirim**. Rio de Janeiro:IBGE, 1986. cap. 4, p.541-632.

TIPLER, P. **Física Moderna**. Rio de Janeiro: Editora Moderna, 1981. 422 p.

TROLLOPE, W. S. W.; TROLLOPE, L. A.; HARTNETT, D. C. Fire behaviour a key factor in the fire ecology of African grasslands and savannas. In: Forest Fire Research and Wildland Fire Safety. **Proceedings...**Rotterdam: Millpress, 2002, p. 1-15.

WHELAN, R. J. **The ecology of fire**. UK:Cambridge University Press, 1995. 346 p.

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, 2002, p. 23,1 - 23,4, 2002.

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**, n. 86, p.83-107, 2003.

WOOSTER, M. J.; ROBERTS, G.; PERRY, W. 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**, v. 110, n. D24311, 2005.