



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÃO
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

sid.inpe.br/mtc-m21b/2014/05.26.19.46 -TDI

ESTIMATIVAS DE ÁREAS QUEIMADAS PARA O ESTADO DE RONDÔNIA E SUAS IMPLICAÇÕES NA MODELAGEM DO BALANÇO DE RADIAÇÃO

Francielle da Silva Cardozo

Tese de Doutorado do Curso de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto, orientada pelos Drs. Yosio Edemir Shimabukuro, e Elisabete Caria Moraes, aprovada em 09 de junho de 2014.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP5W34M/3GCG6CH>>

INPE
São José dos Campos
2014

PUBLICADO POR:

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE

Gabinete do Diretor (GB)

Serviço de Informação e Documentação (SID)

Caixa Postal 515 - CEP 12.245-970

São José dos Campos - SP - Brasil

Tel.:(012) 3208-6923/6921

Fax: (012) 3208-6919

E-mail: pubtc@sid.inpe.br

CONSELHO DE EDITORAÇÃO E PRESERVAÇÃO DA PRODUÇÃO INTELLECTUAL DO INPE (RE/DIR-204):**Presidente:**

Marciana Leite Ribeiro - Serviço de Informação e Documentação (SID)

Membros:

Dr. Gerald Jean Francis Banon - Coordenação Observação da Terra (OBT)

Dr. Amauri Silva Montes - Coordenação Engenharia e Tecnologia Espaciais (ETE)

Dr. André de Castro Milone - Coordenação Ciências Espaciais e Atmosféricas (CEA)

Dr. Joaquim José Barroso de Castro - Centro de Tecnologias Espaciais (CTE)

Dr. Manoel Alonso Gan - Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPT)

Dr^a Maria do Carmo de Andrade Nono - Conselho de Pós-Graduação

Dr. Plínio Carlos Alvalá - Centro de Ciência do Sistema Terrestre (CST)

BIBLIOTECA DIGITAL:

Dr. Gerald Jean Francis Banon - Coordenação de Observação da Terra (OBT)

REVISÃO E NORMALIZAÇÃO DOCUMENTÁRIA:

Maria Tereza Smith de Brito - Serviço de Informação e Documentação (SID)

Yolanda Ribeiro da Silva Souza - Serviço de Informação e Documentação (SID)

EDITORAÇÃO ELETRÔNICA:

Maria Tereza Smith de Brito - Serviço de Informação e Documentação (SID)

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



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÃO
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

sid.inpe.br/mtc-m21b/2014/05.26.19.46 -TDI

ESTIMATIVAS DE ÁREAS QUEIMADAS PARA O ESTADO DE RONDÔNIA E SUAS IMPLICAÇÕES NA MODELAGEM DO BALANÇO DE RADIAÇÃO

Francielle da Silva Cardozo

Tese de Doutorado do Curso de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto, orientada pelos Drs. Yosio Edemir Shimabukuro, e Elisabete Caria Moraes, aprovada em 09 de junho de 2014.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP5W34M/3GCG6CH>>

INPE
São José dos Campos
2014

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Cardozo, Francielle da Silva.

C179e Estimativas de áreas queimadas para o estado de Rondônia e suas implicações na modelagem do balanço de radiação / Francielle da Silva Cardozo. – São José dos Campos : INPE, 2014. xxii + 109 p. ; (sid.inpe.br/mtc-m21b/2014/05.26.19.46 -TDI)

Tese (Doutorado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2014.

Orientadora : Drs. Yosio Edemir Shimabukuro, e Elisabete Carria Moraes.

1. Queimadas. 2. Uso da terra. 3. Impactos. 4. Balanço de radiação. 5. Amazônia. I.Título.

CDU 528.88:630*43(811.1)



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

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

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

Dr. Egídio Arai



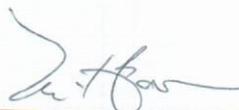
Presidente / INPE / São José dos Campos - SP

Dra. Elisabete Caria Moraes



Orientador(a) / INPE / SJCampos - SP

Dr. Manoel Ferreira Cardoso



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

Dr. André de Lima



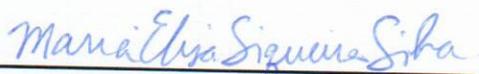
Membro da Banca / INPE / São José dos Campos - SP

Dr. Irving Foster Brown



Convidado(a) / UFAC / Rio Branco - AC

Dra. Maria Elisa Siqueira Silva



Convidado(a) / USP / São Paulo - SP

Este trabalho foi aprovado por:

maioria simples

unanimidade

Aluno (a): **Francielle da Silva Cardozo**

São José dos Campos, 09 de Junho de 2014

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus e a minha família. A meus pais, Francisco Matias Cardozo e Elizete Maria da Silva, e as minhas irmãs, Danielle Cardozo e Jacqueline Cardozo, pelo apoio e torcida.

Sou especialmente grata aos meus orientadores, Elisabete Caria Moraes e Yosio Edemir Shimabukuro, pela ajuda e ensinamentos prestados.

Aos membros da banca, Egídio Arai, André Lima, Maria Elisa Siqueira Silva, Irving Foster Brown e Manoel Ferreira Cardozo, pelos ensinamentos e sugestões.

Aos amigos do INPE, André Lima, Guilherme Augusto Verola Mataveli, Bruno Silva Oliveira e Gabriel de Oliveira, por toda a ajuda e sugestões prestadas no decorrer da pesquisa.

Agradeço especialmente ao Daniel Capella Zanotta e ao Thiago Silveira, pela ajuda no trabalho de campo.

À LBA, pelo fornecimento de dados micrometeorológicos da área de estudo.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), pelo auxílio financeiro, em forma de bolsa de estudo, processo número 2010/17437-4.

Finalmente, agradeço ao Gabriel Pereira, meu esposo, por toda a ajuda prestada, apoio, paciência e dedicação, indispensáveis na finalização deste trabalho.

E a todos que de alguma forma contribuíram para a realização desta tese, muito obrigada!

RESUMO

Na região Amazônica as queimadas são provocadas principalmente para a abertura e manutenção de áreas destinadas à agropecuária. Neste contexto, as queimadas associadas ao uso da terra constituem-se em um dos principais agentes modificadores da paisagem, pois alteram as características físico-químicas e biológicas da superfície terrestre, além de serem consideradas como uma das maiores emissoras de gases traço e aerossóis para a atmosfera. Assim, o objetivo principal deste trabalho consistiu na avaliação da alteração do balanço de radiação no Estado de Rondônia provenientes das queimadas. Para este propósito, as áreas queimadas foram mapeadas em imagens da reflectância espectral da superfície do sensor MODIS nos anos de 2000 a 2012, a partir do uso do Modelo Linear de Mistura Espectral (MLME), e a validação do mapeamento foi realizada a partir de imagens dos sensores TM e ETM+. Para analisar o impacto que a modificação no uso da terra causa no balanço de radiação da superfície, foi utilizado o modelo RegCM4, e como dados de entrada, foram utilizados o modelo de superfície BATS, as condições iniciais e de contorno lateral do ERA-Interim, o índice de área foliar proveniente do produto MOD15A2 e MYD15A2 do sensor MODIS, além de dados adquiridos em campo, como o NDVI, que gerou a fração de cobertura vegetal, e as reflectâncias ρ_{PAR} , ρ_{NIR} e ρ_{SWIR} . Após a entrada de todos os dados, o modelo foi rodado para os 12 anos com o uso e cobertura da terra do produto MCD12A1 com e sem queimadas. Os resultados da validação dos mapeamentos apresentaram uma correlação que variou de 0,46 a 0,93, representando uma média de aproximadamente 0,74 (significantes a $p < 0,05$, teste *T Student*), devido principalmente às distintas resoluções espaciais de ambos os sensores. De uma forma geral, as queimadas que ocorrem em Rondônia estão associadas com o uso e cobertura da terra, especialmente para a produção e expansão agropecuária, com destaque para os anos de 2005, 2010 e 2004, em que as maiores áreas queimadas localizam-se em áreas de extrativismo vegetal, em áreas mistas de pecuária grande porte e cultivos permanentes diversificados e áreas exclusivas de pecuária de grande porte. Neste contexto, foi verificado que as queimadas provocaram a diminuição do albedo da superfície, fator que provocou uma modificação no balanço de radiação de ondas curtas superior a 30 W/m^2 devido ao aumento da absorção da irradiância solar pelas cinzas escuras. Esta absorção ocasionou alterações nas trocas de calor e provocou a modificação no balanço de radiação de ondas longas, que apresentou uma variação média diária superior a 6 W/m^2 . Assim, o balanço de radiação da superfície também foi substancialmente modificado, apresentando em média uma alteração de 45 W/m^2 ao dia. Ainda, foi verificado que a temperatura da superfície apresentou um aumento que pode ultrapassar em média $1,5^\circ\text{C}$ por dia, podendo atingir um valor máximo que chega a 18°C de variação, enquanto que a temperatura do ar apresentou um aumento de $1,5^\circ\text{C}$ por dia, podendo atingir um valor superior a 5°C . Esta modificação também foi percebida para a temperatura do ar em altos níveis, que denotou um aumento de $0,5^\circ\text{C}$ até 2000 metros de altitude, podendo atingir valores que chegam a 5°C neste nível dependendo da queimada ocorrida, além da alteração nas taxas da evapotranspiração, que apresentou modificações na ordem de -3 mm ao dia. Assim, nota-se que os parâmetros físicos da superfície estão interligados, e que a alteração nas características da superfície afetam o balanço de energia e, conseqüentemente, podem afetar o clima local, regional e até global.

BURNED AREAS ESTIMATES FOR RONDÔNIA STATE AND ITS IMPLICATIONS IN THE RADIATION BALANCE MODELING

ABSTRACT

In Amazon region, biomass burning occurs mainly due to opening and maintenance of agriculture and pastures areas. In this context, biomass burning associated with land use is considered as one of the main environmental transformers due to the modification of physical-chemical and biological characteristics of surface, releasing a large amount of trace gases and aerosols into the atmosphere. The main objective of this study is the evaluation of the impacts in radiation balance in Rondônia State originated by biomass burning. For this purpose, the burned areas were mapped in MODIS spectral reflectance images from 2000 to 2011 years through the Linear Spectral Mixture Model (LSMM). Also, the validation mapping was originated from TM and ETM+ sensors. The RegCM4 model was utilized to analyze the impacts in the radiation balance derived from land use and land cover changes. As input data, was utilized the surface model denominated BATS, the initial and lateral boundary conditions of ERA-Interim, the leaf area index (LAI) from MOD15A2 and MYD15A2 products, and fieldwork data, such as NDVI, which generated the vegetation cover fraction, and ρ_{PAR} , ρ_{NIR} and ρ_{SWIR} reflectances. After entering all data, the model was run for 12 years with the land use and land cover of MCD12A1 product, with and without the mapped burned area. The validation results of mappings showed a correlation that varied from 0.46 to 0.93, representing an average of approximately 0.74 (significant at $p < 0.05$, Student t test), mainly due to the difference in spatial resolutions of both sensors. In general, biomass burning occurred in Rondônia were associated with land use and land cover, mainly for production and expansion of agriculture and pastures areas, especially for 2005, 2010 and 2004 years. The largest burned areas are located in areas of vegetation extraction, large livestock areas associated with permanent diversified crops and exclusive areas of large livestock. In this context, it was observed that fires caused the decrease in surface albedo, a factor that changes the shortwave radiation balance in 30 W/m^2 due to increased absorption of solar radiation by dark ashes. This absorption caused changes in heat exchange and occasioned a modification of long-wave radiation balance with a daily average variation exceeding 6 W/m^2 . Thus, the surface radiation balance was substantially modified, presenting an average change of 45 W/m^2 per day. Moreover, the surface temperature increased approximately 1.5°C per day, reaching a maximum value of 18°C , this effect altered the air temperature in 1.5°C per day, reaching a value higher than 5°C in some cases. This modification was also perceived in air temperature at high levels, presenting an increase of 0.5°C that could reach 5°C at 2000 meters depending of the burning impact. The evapotranspiration was also modified, presenting changes in order of -3 mm per day. Thus, it was noted that the physical parameters of surface are interconnected, and the changes in surface features affect energy balance and, consequently, may affect the local, regional and even global climate.

LISTA DE FIGURAS

Pág.

| | |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1 - Localização da área de estudo. Imagem do sensor MODIS, produto MOD09, composição 1B2G6R, dia 10 de setembro de 2010. | 23 |
| Figura 2 - Trajeto do campo realizado no Estado de Rondônia indicando as áreas visitadas. Imagem MOD09, composição 1B2G6R do dia 09/08/2010. | 28 |
| Figura 3 - Localizações geográficas obtidas com o GPS nas áreas queimadas, representadas pelas estrelas, nos dias 25, 26 e 27 de agosto de 2013. | 29 |
| Figura 4 - Localizações geográficas obtidas com o GPS nas áreas queimadas, representadas pelas estrelas, nos dias 28, 29 e 30 de agosto de 2013. | 30 |
| Figura 5 - Pontos coletados com o FieldSpec Pro para a obtenção do fator de reflectância espectral em áreas queimadas no Estado de Rondônia. | 31 |
| Figura 6 – Fotografias das áreas queimadas onde foram realizadas as observações com o FieldSpec no dia 25 de agosto. Áreas queimadas em regeneração (a, d), área queimada com solo (b), áreas queimadas recentes (c, f) e área queimada com vegetação seca (e)..... | 32 |
| Figura 7 - – Fotografias das áreas queimadas onde foram realizadas as observações com o FieldSpec no dia 26 de agosto. Área queimada recente (a), área queimada recente com cinzas (b), área queimada com vegetação seca (c) e áreas queimadas com gramíneas em regeneração (d)..... | 32 |
| Figura 8 - – Fotografias das áreas queimadas onde foram realizadas as observações com o FieldSpec no dia 27 de agosto. Área queimada recente (a), área queimada em regeneração (b, c), área queimada com vegetação seca (d) e impactos na fauna devido às queimadas (e, f)..... | 33 |
| Figura 9 - – Fotografias das áreas queimadas onde foram realizadas as observações com o FieldSpec no dia 28 de agosto. Área queimada com vegetação seca e em regeneração (a, b), área queimada ativa (c), área queimada ativa e com cinzas brancas (d, e) e área queimada ativa impactando o habitat natural da fauna (f)..... | 34 |

| | |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 10 -- Fotografias das áreas queimadas onde foram realizadas as observações com o FieldSpec no dia 29 de agosto. Área queimada recente (a, b) e área queimada com a presença de solo e vegetação seca (c, d). | 34 |
| Figura 11 - Fluxograma dos procedimentos metodológicos divididos em quatro módulos principais. | 41 |
| Figura 12 - Grade amostral com células de 5 km x 5 km utilizada na comparação dos mapeamentos realizados em imagens MODIS (em marrom) e TM/ETM+ (em laranja). Este resultado refere-se à órbita/ponto 232/67 do sensor TM do dia 25 de setembro de 2006..... | 46 |
| Figura 13 – Mapas do uso e cobertura da terra atualizados do produto MCD12A1 para os anos de 2000 a 2005. | 48 |
| Figura 14 – Mapas do uso e cobertura da terra atualizados do produto MCD12A1 para os anos de 2006 a 2011. | 49 |
| Figura 15 - Permanência da cicatriz de queimada em Rondônia. Queimada em área de pastagem e permanência por 20 dias no solo (a, b); queimada em área de floresta e permanência por um mês no solo (c, d); queimada em área de pastagem e permanência por quatro meses no solo (e, f); e queimada em área de floresta e permanência por três meses no solo (g, h)..... | 51 |
| Figura 16 - Gráficos da validação dos mapeamentos das áreas queimadas em Rondônia (em km ²) para as cenas 001/67 (2002 e 2003), 229/69 (2003 e 2004), 230/68 (2000 e 2008), 230/69 (2005 e 2010) e 231/66 (2007 e 2011)..... | 56 |
| Figura 17 - Gráficos da validação dos mapeamentos das áreas queimadas em Rondônia (em km ²) para as cenas 231/67 (2005 e 2008), 231/68 (2002 e 2004), 231/69 (2009 e 2011), 232/66 (2004 e 2006) e 232/68 (2000 e 2001)..... | 57 |
| Figura 18 - Gráficos da validação dos mapeamentos das áreas queimadas em Rondônia (em km ²) para as cenas 232/69 (2001 e 2009), 233/66 (2005 e 2008), 232/67 (2006), 233/67 (2009) e 233/68 (2007). | 58 |
| Figura 19 - Resultados da validação dos mapeamentos das áreas queimadas que apresentaram os menores coeficientes de correlação. | 59 |

| | |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 20 - Resultados da validação dos mapeamentos das áreas queimadas que apresentaram os maiores coeficientes de correlação..... | 61 |
| Figura 21 - Áreas queimadas em Rondônia nos anos de 2000 a 2011..... | 63 |
| Figura 22 – Gráfico da área total anual das queimadas em Rondônia nos anos de 2000 a 2011..... | 64 |
| Figura 24 - Gráficos da frequência do tamanho dos polígonos das áreas queimadas em Rondônia de 2000 a 2003..... | 68 |
| Figura 25 - Gráficos da frequência do tamanho dos polígonos das áreas queimadas em Rondônia de 2004 a 2007..... | 69 |
| Figura 26 - Gráficos da frequência do tamanho dos polígonos das áreas queimadas em Rondônia de 2008 a 2011..... | 70 |
| Figura 27 - Frequência total da ocorrência das queimadas em Rondônia de 2000 a 2011. | 71 |
| Figura 28 – Mapa da vegetação original do Estado de Rondônia. | 73 |
| Figura 29 – Mapa do uso da terra atual do Estado de Rondônia. | 74 |
| Figura 31 - Gráfico do fator de reflectância dos alvos biofísicos da superfície coletados em Rondônia. | 77 |
| Figura 32 - Mudanças ocorridas no balanço de radiação de ondas curtas devido às queimadas no Estado de Rondônia (2000 a 2011). | 79 |
| Figura 33 - Mudanças ocorridas no balanço de radiação de ondas longas devido às queimadas no Estado de Rondônia (2000 a 2011). | 81 |
| Figura 34 - Mudanças ocorridas no balanço de radiação da superfície devido às queimadas no Estado de Rondônia (2000 a 2011). | 83 |
| Figura 35 - Mudanças ocorridas na temperatura da superfície devido às queimadas no Estado de Rondônia (2000 a 2011). | 85 |
| Figura 37 - Mudanças ocorridas na temperatura do ar devido às queimadas no Estado de Rondônia (2000 a 2011). | 87 |

| | |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 38 - Gráfico da anomalia da temperatura em diversos níveis da atmosfera no Estado de Rondônia..... | 88 |
| Figura 39 - Mudanças ocorridas na evapotranspiração devido às queimadas no Estado de Rondônia (2000 a 2011)..... | 89 |
| Figura 40 - Gráfico da precipitação (em mm) simulada para Rondônia nos anos de 2000 a 2011 com queimadas (eixo x) e sem queimadas (eixo y)..... | 91 |

LISTA DE TABELAS

Pág.

| | |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabela 1 - Sorteio aleatório das cenas TM/ETM+ utilizadas para validar o mapeamento das áreas queimadas nas imagens MODIS..... | 37 |
| Tabela 2 - Atualização das classes de uso e cobertura da terra do IGBP para as classes do BATS..... | 40 |
| Tabela 3 - Parâmetros utilizados para as simulações controle no RegCM4 com os mapas de UCT sem as queimadas (coluna da esquerda) e com as áreas queimadas (coluna da direita)..... | 50 |
| Tabela 4 - Valores totais da frequência das queimadas em Rondônia de 2000 a 2011.. | 72 |
| Tabela 5 - RMSE e erro absoluto da radiação de ondas curtas incidente, temperatura do ar a 2m e temperatura da superfície observados em campo e simulados no modelo RegCM4 para os meses de agosto, setembro e outubro do ano de 2003..... | 92 |

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

| | |
|----------|-----------------------------------------------------------|
| ATSR | <i>Along Track Scanning Radiometer</i> |
| AVHRR | <i>Advanced Very High Resolution Radiometer</i> |
| BAI | <i>Burned Area Index</i> |
| BASA | Banco da Amazônia S.A. |
| BATS | <i>Biosphere-Atmosphere Transfer Scheme</i> |
| CCM3 | <i>Community Climate Model</i> |
| CLM | <i>Community Land Model</i> |
| ETM+ | <i>Enhanced Thematic Mapper Plus</i> |
| ECMWF | <i>European Centre for Medium-Range Weather Forecasts</i> |
| EEM | <i>Espectro Eletromagnético</i> |
| ENVI | <i>Environment for Visualizing Images</i> |
| ERS | <i>European Remote Sensing Satellite</i> |
| FCV | Fração de Cobertura Vegetal |
| GBA2000 | <i>Global Burnt Area</i> |
| GEMI | <i>Global Environmental Monitoring Index</i> |
| GlobScar | <i>Global Burned Forest Mapping</i> |
| GLCC | <i>Global Land Cover Characterization</i> |
| GOES | Geostationary Operational Environmental Satellite |
| GPS | <i>Global Positioning System</i> |
| HDF | <i>Hierarchical Data Format</i> |
| IBGE | Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística |
| IDL | <i>Interactive Data Language</i> |
| IGBP | <i>International Geosphere-Biosphere Programme</i> |
| INCRA | Instituto Nacional de Colonização e Reforma agrária |
| INPE | Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais |
| IVT | Infravermelho Termal |
| MLME | Modelo Linear de Mistura Espectral |
| MM4 | <i>Mesoscale Model</i> versão 4 |
| MOD | Produtos originados pelo sensor MODIS/Terra |

| | |
|------------|------------------------------------------------------------|
| MODIS | Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer |
| MRT | <i>MODIS Reprojection Tool</i> |
| MYD | Produtos originados pelo sensor MODIS/Aqua |
| NASA | <i>National Aeronautics and Space Administration</i> |
| NBR | <i>Normalized Burn Ratio</i> |
| NDVI | <i>Normalized Difference Vegetation Index</i> |
| NIR | Reflectância no Infravermelho Próximo |
| NUAR | Núcleos Urbanos de Apoio Rural |
| NOAA | <i>National Oceanic and Atmospheric Administration</i> |
| PAR | Radiação Fotosinteticamente Ativa |
| PLANAFLORO | Plano Agropecuário e Florestal de Rondônia |
| PRODES | Programa do Cálculo do Desflorestamento da Amazônia |
| RegCMn | <i>Regional Climate Model</i> , sendo n a versão do modelo |
| SPRING | Sistema de Processamento de Informações Georreferenciadas |
| SUDAM | Superintendência do Desenvolvimento da Amazônia |
| SWIR | Reflectância no infravermelho médio |
| TIR | Infravermelho Termal |
| TM | <i>Thematic Mapper</i> |
| TRMM | <i>Tropical Rainfall Measuring Mission</i> |
| TSM | Temperatura da Superfície do Mar |
| UCT | Uso e Cobertura da Terra |
| VIRS | <i>Visible and Infrared Scanner</i> |
| WFABBA | <i>Wildfire Automated Biomass Burning Algorithm</i> |

LISTA DE SÍMBOLOS

| | |
|------------------|-----------------------------------------------------------|
| FR | Fator de reflectância espectral |
| Km | Quilômetros |
| K* | Balanço de radiação de ondas curtas |
| K↓ | Radiação de ondas curtas que incide na superfície |
| K↑ | Radiação de ondas curtas refletida pela superfície |
| L* | Balanço de radiação de ondas longas |
| L↓ | Radiação de ondas longas que incide na superfície |
| L↑ | Radiação de ondas longas emitida pela superfície |
| mm | Milímetros |
| nm | Nanometros |
| Rn | Balanço de radiação |
| W/m ² | Watts por metro quadrado |
| ρ | Albedo da superfície |
| α | Absorção da irradiância solar pelos objetos da superfície |
| μm | Micrometros |
| °C | Graus Celsius |
| CO ₂ | Dióxido de carbono |
| O ₃ | Ozônio |
| CH ₄ | Metano |
| N ₂ O | Óxido nitroso |
| CFC's | Clorofluorcarbono |

SUMÁRIO

| | <u>Pág.</u> |
|------------------------------------------------------------------|-------------|
| 1. INTRODUÇÃO..... | 1 |
| 2. OBJETIVOS..... | 5 |
| 2.1. Objetivo Geral..... | 5 |
| 2.2. Objetivos Específicos:..... | 5 |
| 3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA..... | 7 |
| 3.1. Características das queimadas..... | 7 |
| 3.2. Balanço de radiação..... | 9 |
| 3.3. Processo de ocupação em Rondônia..... | 12 |
| 3.4. Uso da terra e seus impactos em Rondônia..... | 14 |
| 3.5. Produtos e sensores utilizados no estudo das queimadas..... | 16 |
| 3.6. Uso de modelos numéricos no estudo das queimadas..... | 19 |
| 4. ÁREA DE ESTUDO..... | 23 |
| 5. MATERIAIS E MÉTODOS..... | 27 |
| 5.1. Trabalho de Campo..... | 27 |
| 5.2. Materiais utilizados..... | 35 |
| 5.2.1. MODIS/Terra e Aqua..... | 35 |
| 5.2.2. TM/Landsat 5 e ETM+/Landsat 7..... | 36 |
| 5.2.3. Dados Auxiliares..... | 37 |
| 5.2.4. Dados de entrada do modelo climático RegCM4..... | 39 |
| 5.3. Fluxograma da Metodologia..... | 41 |
| 5.4. Metodologia..... | 42 |

| | |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 5.4.1. Processamento dos dados MOD09 | 42 |
| 5.4.2. Aplicação do MLME | 42 |
| 5.4.3. Mapeamento das Áreas Queimadas nas Imagens do TM e ETM+ | 43 |
| 5.4.4. Mapeamento das Áreas Queimadas nas Imagens do Sensor MODIS | 44 |
| 5.4.5. Análise dos polígonos das áreas queimadas com os dados auxiliares..... | 44 |
| 5.4.6. Validação das Áreas Queimadas | 45 |
| 5.4.7. Geração dos dados de entrada utilizados pelo RegCM4 | 46 |
| 5.4.8. Simulações com o RegCM4 | 48 |
| 6. RESULTADOS E DISCUSSÃO..... | 55 |
| 6.1. Validação dos Mapeamentos nas Imagens MODIS | 55 |
| 6.2. Análise Espacial e Temporal das Queimadas em Rondônia de 2000 a 2011..... | 63 |
| 6.3. Impactos no balanço de radiação da superfície provenientes das queimadas em Rondônia de 2000 a 2011 | 76 |
| 6.3.1. Impactos no balanço de radiação de ondas curtas | 78 |
| 6.3.2. Impactos no balanço de radiação de ondas longas | 80 |
| 6.3.3. Impactos no balanço de radiação da superfície | 82 |
| 6.3.4. Impactos na temperatura da superfície | 84 |
| 6.3.5. Impactos na temperatura do ar..... | 86 |
| 6.3.6. Impactos na evapotranspiração..... | 88 |
| 7. CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS..... | 95 |
| 8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 99 |

1. INTRODUÇÃO

O uso e cobertura da terra no Brasil são condicionados principalmente pelas atividades econômicas. O avanço da agricultura e da pecuária sobre áreas de vegetação nativa depende da necessidade da expansão de fronteiras agrícolas para suprir as demandas dos mercados nacional e mundial, sendo que a prática usual de manejo utilizada para esta finalidade é a queima da biomassa. Técnicas de datação avançadas indicaram que as primeiras queimadas ocorreram há milhões de anos atrás, devido, geralmente, a causas naturais como a combustão espontânea e a incidência de raios, porém, atualmente estima-se que 90% das queimadas sejam de origem antrópica (ANDREAE, 1991).

Na região Amazônica, assim como em outras partes do continente sul-americano, as queimadas são provocadas em geral por atividades relacionadas ao uso da terra, como na agropecuária, relacionada aos desmatamentos, renovações de pastos e controle de pestes (SAMPAIO et al., 2007; CARDOSO et al., 2008; MARENGO et al., 2010) sendo que o período de incidência anual observado ocorre durante a estação seca, entre os meses de junho a outubro (CRUTZEN; ANDREAE, 1990).

A utilização das queimadas nesse período ocorre devido à maior vulnerabilidade da vegetação ao fogo, principalmente pelo clima seco e pela baixa umidade da vegetação, sendo que a origem e a permanência de uma queimada são influenciadas por fatores como o tipo de biomassa e sua umidade, a temperatura e a umidade do ar e os ventos (CRUTZEN; ANDREAE, 1990; FREITAS et al., 2005; VAN DER WERF et al., 2006; FEARNSSIDE et al., 2009). No Brasil, a prática mais comum de preparação do solo é a derrubada da floresta três meses antes da sua queima com o intuito de provocar a eliminação da umidade e facilitar o processo das chamas (ARAÚJO et al., 1999), porém, as queimadas muitas vezes ultrapassam os limites originalmente selecionados para atuação e ocasionam o consumo de milhares de florestas por ano no Brasil (FREITAS et al., 2005).

Neste contexto, a queimada associada ao uso da terra constitui um dos principais agentes modificadores da paisagem, pois alteram as características físico-químicas e biológicas da superfície terrestre, como o albedo da superfície. As cinzas e os carvões depositados após a ocorrência do fogo reduzem o albedo da superfície e ocasionam maior absorção

da radiação solar, o que provoca o aumento da temperatura da superfície e alterações dos fluxos de calor latente e sensível, resultando na modificação direta do balanço de energia na superfície e, conseqüentemente, na evapotranspiração. Ainda, as queimadas são consideradas como uma das maiores fontes emissoras de gases traço e aerossóis para a atmosfera (ANDREAE; MERLET, 2001; ICHOKU; KAUFMAN, 2005).

Os gases do efeito estufa e os aerossóis liberados pelas queimadas alteram a radiação armazenada na atmosfera, pois nestas condições, mais radiação de ondas longas emitidas pela superfície fica retida na atmosfera. Estes fatores alteram a disponibilidade de energia para os processos atmosféricos ocasionando a variação do clima local, regional e global (PEREIRA et al., 2000; LIANG, 2000; MORAES et al., 2004; GIGLIO et al., 2006; PEREIRA et al., 2009; CARDOSO et al., 2009 BOWMAN et al., 2009).

Além dos impactos na atmosfera, as queimadas ocasionam outros impactos ambientais, como a erosão do solo, principalmente em áreas íngremes, a redução da retenção da água pelo solo, aumentando a ocorrência de inundações e de escassez de água, a destruição da flora e fauna (COCHRANE, 2009), além de impactos sociais, como o fechamento de aeroportos e rodovias e aumento na incidência de problemas respiratórios na população (SMITH et al., 2014).

Assim, o Estado de Rondônia vem sofrendo alterações significativas relacionadas com o uso da terra desde o início da década de 60, fatores que provocaram desmatamentos exponenciais no Estado, apresentando quase três milhões de hectares de florestas desmatadas nesta década. Os principais agentes das mudanças do uso da terra em Rondônia são os pequenos produtores, pecuaristas, mineradores e extratores de madeira a partir de atividades relacionadas com a derrubada e a queima da vegetação, sendo o Estado a apresentar a terceira maior taxa de desmatamento no Brasil, totalizando 54.772 km² no período de 1988 a 2013, (23% da área total do Estado), ficando atrás apenas de Mato Grosso e Pará, e durante os anos de 2000 a 2011, 132.000 km² de áreas foram queimadas no Estado de Rondônia.

Desta forma, a obtenção das alterações dos parâmetros físicos da superfície e atmosfera derivados das queimadas em grande escala, como é o caso da região Amazônica, pode ser feita com a utilização de modelos numéricos do clima, como é o caso do *Regional*

Climate Model (RegCM) (GIORGI, 1993). O RegCM é um modelo regional utilizado em estudos que estimam o impacto climático decorrentes das mudanças no uso e cobertura da terra, dentre outros parâmetros que podem ser avaliados (LIU et al., 1996; DRUYAN et al., 2002; CUADRA; DA ROCHA, 2006; DA ROCHA et al., 2009).

Comparado com as versões anteriores, o RegCM4 inclui novos esquemas que estudam a superfície, as nuvens, os aerossóis, a camada limite planetária e as interações entre a atmosfera/oceano, novas configurações na banda tropical e modificações nos esquemas pré-existentes de transferência radiativa e camada limite, além de mudanças nos códigos promovendo uma maior flexibilidade e facilidade para os usuários no uso do modelo (GIORGI et al., 2012).

Para modelar estas alterações o RegCM necessita de diversos dados de entrada, como a área queimada e parâmetros físicos como a reflectância no visível (ρ_{PAR}), a reflectância no infravermelho próximo (ρ_{NIR}) e médio (ρ_{SWIR}), a fração de cobertura vegetal e o índice de área foliar. Na região Amazônica o monitoramento e o mapeamento das áreas queimadas geralmente são dificultados pela grande extensão territorial e pela alta taxa de cobertura de nuvens, assim o sensoriamento remoto surge como alternativa viável para a obtenção dos parâmetros biofísicos de forma rápida e com baixo custo, quando comparado com métodos convencionais como dados coletados em campo. Desta forma, o sensoriamento remoto pode ser utilizado para uma grande variedade de estudos que envolvem a queima de biomassa, como a detecção de focos ativos, a estimativa de área queimada, o estudo dos padrões de incêndios, a estimativa da severidade do fogo, a análise de regeneração da vegetação e a previsão de riscos (FREITAS et al., 2005; MIGUEL et al., 2010).

Assim, a partir do final da década de 90, iniciou-se uma nova perspectiva para o monitoramento e detecção de queimadas devido ao lançamento do sensor *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer* (MODIS) dos satélites Terra e Aqua (JUSTICE et al., 2002; ROY et al., 2002; ZHAN et al., 2002). O sensor MODIS possui uma série de características melhoradas, dentre elas, boa resolução espectral e radiométrica, melhor resolução espacial nas bandas espectrais da região do visível e do infravermelho próximo e médio, quando comparados aos sensores dos satélites geoestacionários, e alta resolução temporal (JUSTICE et al., 2002).

Diante do exposto, verifica-se que o mapeamento das áreas queimadas é fundamental para a obtenção de estimativas mais precisas das alterações ambientais da superfície resultantes desta prática, além de permitir o monitoramento das mudanças no uso e cobertura da terra, fornecendo os dados de entrada necessários para a representação das características biofísicas em modelos atmosféricos.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo Geral

O objetivo principal desta pesquisa consiste em avaliar a alteração do balanço de radiação no Estado de Rondônia originado da modificação das características físico-químicas e biológicas provenientes das queimadas.

2.2. Objetivos Específicos:

(a) Mapear as cicatrizes de queimadas para os anos de 2000 a 2011 no Estado de Rondônia a partir dos dados diários de reflectância de superfície (MOD09GA e MOD09GQ) do sensor MODIS/Terra;

(b) Analisar temporalmente e espacialmente a evolução das áreas que foram afetadas pelas queimadas;

(c) Validar o mapeamento das áreas queimadas a partir de dados do sensor *Thematic Mapper* (TM) do satélite Landsat 5 e do sensor *Enhanced Thematic Mapper Plus* (ETM+) do Landsat 7;

(d) Estimar a reflectância ρ_{PAR} , ρ_{NIR} e ρ_{SWIR} e a fração de cobertura vegetal coletados em campo, necessários para a entrada no modelo RegCM4;

(e) Modelar as alterações ocorridas no balanço de radiação ocasionada pelas modificações das características físico-químicas e biológicas da superfície provenientes da queima da biomassa da região Amazônica.

3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo serão citadas referências acerca dos tópicos estudados, como as principais características das queimadas, o balanço de radiação, os processos que ocasionaram o uso e ocupação de Rondônia, assim como os impactos provocados pelo uso da terra, os principais sensores utilizados no estudo das queimadas e o uso de modelos numéricos como o RegCM4 no estudo dos impactos de ordem climática provocados pelas modificações biofísicas da superfície.

3.1. Características das queimadas

As queimadas podem ser consideradas como uma forma particular de combustão, que é um processo de oxidação. A oxidação pode ocorrer lentamente a baixas temperaturas, permitindo a liberação de energia, como na respiração, ou pode ocorrer rapidamente a altas temperaturas, como, por exemplo, durante as queimadas. O fogo é simplesmente a liberação de energia gerada pelo processo de chama de uma combustão, sendo que o início da combustão necessita de um processo de ignição, material combustível e oxigênio em proporções adequadas. As fontes mais comuns de ignição em queima de biomassa são as chamas, as superfícies aquecidas, as fagulhas, as centelhas e os raios (fonte natural de ignição). Nas florestas os materiais combustíveis são formados principalmente pelo carbono da biomassa vegetal (celulose, folhas, madeira, húmus, etc), e a combustão é mantida quando a transferência de calor é suficiente para prolongar a oxidação dos materiais combustíveis vizinhos (COCHRANE, 2009).

Assim, a queima das substâncias orgânicas passa por três fases principais de combustão. A primeira fase é a de pré-aquecimento (*preheating*), processo endotérmico em que as temperaturas dos materiais combustíveis aumentam induzindo a evaporação da água. Assim, o conteúdo de água de um material determinará a sua flamabilidade, sendo que a ignição não ocorrerá se o fogo ou outra fonte não transmitir energia suficiente para desidratar o material (WARD, 2001).

A segunda é a fase de combustão dos gases (*gaseous*) e origina-se quando o material combustível atinge o ponto de ignição de calor, que é a temperatura necessária para originar a combustão. A liberação de calor nessa fase é suficiente para manter a queima contínua dos materiais próximos (SAITO, 2001).

A terceira fase de combustão é a fase de fumaça (*smoldering*), que ocorre mesmo se não houver oxigênio suficiente para permitir a combustão na fase das chamas. Nessa fase os materiais tornam-se carvão e cinza e ocorre a extinção do fogo. A fumaça se espalha lentamente pela superfície dos materiais, permitindo que a transferência de calor para os solos e vegetações vizinhas ocorra por um longo tempo, fato que libera diversos tipos e quantidades de partículas voláteis. Logo, a fase da fumaça representa um processo de combustão menos eficiente, porém, libera uma maior quantidade de fumaça e de partículas respiráveis (WARD, 2001).

As queimadas possuem algumas características que determinarão como um dado ecossistema pode ser impactado e como ele responde ao evento. Dentre elas, pode-se citar: 1) altura das chamas, este parâmetro é importante porque ajusta a distância entre a chama e os materiais combustíveis próximos da direção de espalhamento do fogo; 2) intensidade da linha de fogo, útil para estimar a altura em que cada folhagem será atingida pela passagem das chamas; 3) taxa de espalhamento do fogo, de forma que o espalhamento ocorrerá mais rapidamente sobre materiais combustíveis secos, aclives e na direção do vento; e 4) tempo de residência, que é a quantidade de tempo necessária para uma queimada se espalhar a uma distância igual a profundidade da chama, em que longos tempos de residência resultarão em maiores profundidades de aquecimento do solo, matando as raízes da vegetação (COCHRANE, 2009).

Outros atributos relacionados ao regime do fogo relacionam-se à extensão da queimada, como o tamanho médio do fogo em um ecossistema, de forma que os impactos irão variar de acordo com o tamanho da queimada; a sazonalidade, que descreve a época do ano em que uma queimada é mais comum, sendo que o impacto, mesmo com queimadas de intensidades equivalentes, pode ser diferente dependendo do período em que ela ocorre; a frequência, definida pelo intervalo entre as queimadas e utilizado para definir o regime do fogo; intensidade, definida pela energia liberada por unidade de área; e a severidade, que é o impacto ecológico no ecossistema provocado pelas queimadas, sendo uma medida da mortalidade das plantas ou a quantidade de consumo dos materiais combustíveis (COCHRANE, 2009).

Assim, a existência do fogo depende de uma conjunção local de energia térmica, combustível e oxigênio, enquanto que o comportamento do fogo expressa uma escala

maior do tempo, do terreno e das características dos materiais combustíveis. Portanto, os efeitos de uma queimada dependerão da sua intensidade, duração e extensão, assim como, da época do ano em que ela ocorre, sendo que uma queimada pode ser benéfica ou destrutiva para a vegetação, pois um determinado tipo de ecossistema pode retornar mais vigoroso após uma queimada, enquanto que outros ecossistemas são totalmente destruídos por sua atuação (COCHRANE, 2009).

3.2. Balanço de radiação

A radiação proveniente do sol é chamada de radiação solar e sua energia está centrada nos comprimentos de onda entre 0,3 e 4 μm , e 99% da radiação solar abrangem às bandas do espectro eletromagnético referentes ao ultravioleta, visível e infravermelho próximo e médio. A irradiância solar ao penetrar na atmosfera Terrestre sofre uma série de processos, uma parte será refletida pelas nuvens e espalhada difusamente pela atmosfera; outra parte será absorvida pelos gases radiativamente ativos, nuvens e partículas constituintes da atmosfera; assim, apenas uma parte dela chega à superfície (HARTMANN, 1994).

A queima de biomassa intensifica a emissão de carbono elementar para a atmosfera e de gases e aerossóis contendo compostos orgânicos que afetam a intensidade da radiação solar que atinge a superfície terrestre, bem como as propriedades radiativas da atmosfera. Estas partículas afetam direta e indiretamente o clima. Diretamente pelo fato dos compostos orgânicos aumentarem o espalhamento (efeito de resfriamento) e pelos carbonos elementares absorverem a radiação solar (efeito de aquecimento), e indiretamente por atuar como núcleo de condensação das nuvens (LOHMANN; FEICHTER, 2005; SANDRADEWI et al., 2008; MOOSMULLER et al., 2009). Segundo Rocha et al. (2009) o crescimento higroscópico dos aerossóis pode alterar o ciclo hidrológico de uma região aumentando ou reduzindo a quantidade de chuva.

Os diversos alvos da superfície e da atmosfera também podem atuar como emissores da radiação eletromagnética de acordo com suas temperaturas, e estas emissões ocorrem na faixa do infravermelho termal. Apenas uma parte da radiação infravermelha termal (IVT) emitida pela superfície chega ao espaço, a outra parte é absorvida principalmente pelos

gases do efeito estufa presentes na atmosfera, ocasionando o aumento da temperatura neste local (HARTMANN, 1994).

A IVT emitida pela atmosfera em direção à superfície representa a contribuição da atmosfera e engloba informações de nebulosidade e concentração de gases estufa, sendo uma componente muito importante no cálculo do balanço de radiação na superfície. No entanto, é a componente do balanço de radiação mais difícil de ser medida, obtida quase sempre de forma indireta ou por diferença, a partir da equação do balanço de radiação, em que os demais termos são estimados por modelagem numérica (FRANCHITO et al., 2002).

Neste contexto, o balanço de radiação (Rn) engloba a soma do balanço de radiação solar (ou balanço de radiação de ondas curtas - K^*) e do balanço de radiação IVT (ou balanço de radiação de ondas longas - L^*) na superfície, conforme **Equação 1**.

$$Rn = K^* + L^* \quad (1)$$

O balanço de radiação de ondas curtas é definido pela diferença entre a irradiância solar na superfície terrestre ($K \downarrow$) e sua reflexão ($K \uparrow$), conforme **Equação 2**.

$$K^* = K \downarrow - K \uparrow \quad (2)$$

O balanço de radiação de ondas longas é definido pela diferença entre a radiação de ondas longas que incide na superfície terrestre ($L \downarrow$) e a radiação de ondas longas que é emitida pela superfície ($L \uparrow$), conforme **Equação 3**.

$$L^* = L \downarrow - L \uparrow \quad (3)$$

Assim, o balanço de radiação na superfície pode ser obtido a partir da Equação 4:

$$Rn = (1 - \rho)K \downarrow + L^* \quad (4)$$

em que ρ representa o albedo da superfície. A partir da Lei de Kirchoff, a equação 4 pode ser reescrita em relação ao fluxo absorvido (desprezando-se a transmitância da superfície) da seguinte forma:

$$Rn = \alpha \cdot K \downarrow + L * \quad (5)$$

em que α representa o coeficiente de absorção da irradiância solar pelos objetos da superfície. Neste contexto, como uma grande quantidade de radiação solar incidente é absorvida pela superfície e transformada em calor latente, na floresta amazônica a resposta da circulação atmosférica regional às mudanças de albedo da superfície são intensas. Em geral seu albedo é igual a 0,119 na estação úmida e a 0,123 na estação seca, e quando áreas de floresta são substituídas por pastagem, o albedo destas áreas aumenta para 0,169 na estação úmida e para 0,165 na estação seca (YANAGI, 2006). Assim, a floresta Amazônica é considerada como uma importante fonte de calor para a circulação geral da atmosfera (BASTABLE et al., 1993).

Neste contexto, o RegCM4 utiliza o esquema de radiação do *Community Climate Model* (CCM3) Kiehl et al. (1996), implementado por Giorgi et al. (1999) na primeira versão do RegCM. Este esquema inclui os cálculos para a radiação de ondas curtas e de ondas longas, além de incluir os efeitos dos aerossóis e dos gases radiativamente ativos na atmosfera. Considera como principais gases do efeito estufa o vapor d'água, CO₂, O₃, CH₄, N₂O e CFC's, sendo que os processos radiativos são tratados pela formulação *delta-Eddington*, proposta por Briegleb (1992). A descrição do espalhamento e da absorção da radiação solar pelos aerossóis é baseado em suas propriedades ópticas (coeficiente de absorção e albedo).

Em relação ao cálculo dos processos radiativos das nuvens, as propriedades ópticas no espectro solar são baseadas no caminho óptico da água líquida da nuvem, a partir da quantidade de água líquida da nuvem calculada pelo modelo, da cobertura fracional da nuvem e do raio das gotículas da nuvem. No infravermelho terrestre, a emissividade da nuvem é calculada como uma função do caminho óptico da água líquida/gelo na nuvem e nas seções transversais de absorção dependendo do raio efetivo para as fases líquida e de gelo (GIORGI et al., 2012).

O calor sensível, o vapor d'água e os fluxos de momento na superfície são calculados usando coeficiente baseado na teoria de similaridade na camada da superfície. Este coeficiente depende do comprimento de rugosidade e da estabilidade atmosférica na

camada próxima à superfície, e as taxas de evapotranspiração da superfície dependerão da disponibilidade de água no solo (DICKINSON et al., 1986).

3.3. Processo de ocupação em Rondônia

O processo de ocupação na região Amazônica teve início na década de 60, a partir da criação de órgãos como a Superintendência do Desenvolvimento da Amazônia (SUDAM) e do Banco da Amazônia S.A. (BASA), em 1966, instituições responsáveis pelo repasse dos recursos financeiros para a ocupação e desenvolvimento da região. Inicialmente ocorreu a criação de eixos viários como a rodovia Belém-Brasília (BR-010), na década de 60, e as rodovias Cuiabá-Santarém (BR-163), Cuiabá-Porto Velho (BR-364) e a rodovia TransAmazônica (BR-230), na década de 70. Assim, a política de ocupação da Amazônia foi determinada, aliada à abertura das estradas, pela criação de um programa de distribuição de terras para grandes grupos empresariais com o intuito de implantação da pecuária em conjunto com um plano de colonização que atraiu muitos imigrantes de outras partes do Brasil para a região, e por projetos que envolviam atividades relacionadas à mineração, extração de madeira e indústrias (BECKER, 2005).

Assim como a região Amazônica, a ocupação do Estado de Rondônia também teve início na década de 60 com a elaboração de inúmeros mecanismos de incentivos fiscais promovidos pela SUDAM e BASA a partir do ano de 1966. A maior parte das terras de Rondônia foi disponibilizada estrategicamente com o intuito de ligar a região Norte com o Centro-Sul do país, porém, o fluxo migratório inicial foi intenso e desorganizado, sendo que a ocupação das terras era realizada por particulares e companhias colonizadoras privadas (COSTA, 2013). O excesso de migrantes ocasionou tensões sociais, fator que levou o Governo Federal a intervir e criar processos dirigidos para a ocupação das terras (BECKER et al., 1995).

Assim, o Governo Federal com apoio do Instituto Nacional de Colonização e Reforma agrária (INCRA), primeiramente lançou projetos de colonização para agricultores migrantes do Centro-Sul e, posteriormente, lançou medidas para atrair pecuaristas e empreendedores, com terras a preços baixos e incentivos fiscais. Esses fatos intensificaram o fenômeno migratório provocando uma explosão demográfica no Estado entre os anos de 1983 e 1987 (SILVA et al., 2005).

Desta forma, essa política de colonização atraiu a população de outras regiões, proporcionando o maior crescimento populacional do país na década de 80, com um aumento de 324%, constituindo-se na mais importante frente de expansão do povoamento do país nessa época. Dentre as políticas de ação que ocasionaram o interesse migratório ressalta-se o crescimento da indústria madeireira, que aliadas às melhorias nas estradas propiciou maior acesso dos agricultores e camponeses às áreas até então inacessíveis; o desmatamento, que começou a se expandir para o interior do Estado, até então concentrado na área central; e as queimadas; causadas pela população no manejo de pastagens e áreas agrícolas (BATISTA, 2001).

Porém, os programas de colonização de Rondônia ocasionaram processos de desmatamentos exponenciais, além de contribuírem para a dizimação de vários indígenas (PERDIGÃO; BASSEGIO, 1992; SKOLE, et al., 1993). Além disso, esses programas não cumpriram totalmente com seus objetivos, pois com a alta pressão do fluxo migratório, muitos assentamentos foram dispostos em áreas inadequadas para a agricultura e em locais de difícil acesso para o colono e para a implantação de infraestrutura (DIAS, 1980).

Assim, na década de 80 foi construída a rodovia 364 com o empréstimo do Banco Mundial, com o intuito de promover o desenvolvimento regional. A construção dessa rodovia fez parte do Programa Integrado de Desenvolvimento do Noroeste do Brasil (POLONOROESTE), que possuía como objetivos a construção de novos assentamentos com o intuito de realizar uma ocupação menos predatória do Estado, incluindo recursos que visavam a conservação ambiental e a proteção de comunidades indígenas devido à essa ocupação (PEDLOWSKI, et al., 1996).

Em 1984, o INCRA em conjunto com o Programa de Desenvolvimento Integrado de Rondônia criou projetos de assentamento chamados de Núcleos Urbanos de Apoio Rural (NUAR), disponibilizando lotes de 50 hectares, de forma que 25 hectares de sua área deveriam ser mantidos e conservados com vegetação nativa (BECKER et al., 1995). A retirada da madeira era intensa e acompanhava as áreas colonizadas ao longo da BR-364, e as madeireiras não respeitavam os contratos, o que ocasionou a maior retirada de madeira do que o estabelecido (PERDIGÃO; BASSEGIO, 1992). Tais condições

provocaram o desmatamento de cerca de 1,7 milhões de hectares em 1984 e 2,7 milhões de hectares em 1985 (MALINGREAU; TUCKER, 1988).

Desta forma, foi iniciado outro plano de ação na metade da década de 80, chamado Plano Agropecuário e Florestal de Rondônia (PLANAFLORO) implementado pelo Governo Federal e financiado pelo Banco Mundial. Este plano teve como intuito manter os serviços de saúde para as comunidades indígenas, conservar a biodiversidade, proteger os limites das áreas protegidas e das reservas indígenas, desenvolver a integração do manejo da floresta e agricultura e investir em infraestrutura, sócio-economia e serviços necessários para a implantação de um zoneamento agroecológico em áreas já ocupadas ou desmatadas e, assim como todos os outros projetos citados, esse plano de ação denotou uma série de problemas e falhou em sua execução (PEDLOWSKI, et al., 1996).

3.4. Uso da terra e seus impactos em Rondônia

De forma geral, os principais agentes das mudanças do uso da terra em Rondônia são os pequenos produtores que, para ocupar a região, provocaram o desmatamento das terras no passado, que ocorreu de forma muito acelerada, além dos pecuaristas, mineradores e extratores de madeira (FAMINOW, 1998). Assim, as atividades que prevalecem na mudança do uso da terra em Rondônia decorrem de técnicas de derrubada e queima da vegetação, utilizada pelos produtores nos primeiros anos, principalmente para a implantação da agricultura, seguida por períodos de abandono; exploração de madeira em remanescentes de floresta em diferentes estágios e pelo manejo de pastos com diferentes técnicas (FERRAZ et al., 2005).

Neste contexto, o uso da terra pelo pequeno produtor ocorre a partir do cultivo de culturas que possuem interesse econômico e apresentam uma fase de pousio, caracterizando o crescimento da vegetação secundária, que promove o acúmulo de nutrientes liberados após uma nova queima de biomassa, fator que permite uma nova fase produtiva de cultivo. Outra prática que faz parte da dinâmica de uso e cobertura da terra na Amazônia é o abandono das terras por períodos longos que fazem com que a queima da vegetação regenerada forneça mais nutrientes ao solo, aumentando sua fertilidade, porém, em fases de pousios curtos, a fertilidade do solo vai diminuindo, tornando necessário insumos e mão-de-obra para a manutenção e a produção da cultura (DENICH, 1991).

Em Rondônia, o abandono de áreas desmatadas e o desflorestamento de áreas regeneradas são práticas comuns (ALVES; SKOLE, 1996). As pastagens dificilmente são abandonadas, não havendo tempo suficiente para a regeneração da vegetação, e nas áreas com alta concentração de desmatamento também ocorre a pressão para a derrubada da vegetação secundária (ALVES et al., 2003).

Ainda, no Estado de Rondônia, assim como nos Estados do Pará e Mato Grosso, a implantação de novas culturas e a expansão das culturas tradicionais, juntamente com a pecuária, tornaram as lavouras mais significativas, integrando-as à economia nacional e transformando-as em atividades com alta geração de renda (TERRACLASS, 2011). Porém, a pecuária ainda é a principal atividade que causa o desmatamento no Estado, pois mesmo as áreas que foram desmatadas inicialmente para a utilização de culturas anuais de subsistência por produtores familiares acabam convertidas em pastagens para a pecuária bovina de leite e de corte, ocupando 25% das áreas antropizadas até o ano de 2008 na Amazônia (FAMINOW, 1998).

Porém, a pecuária por sua vez também causa vários impactos negativos no ambiente, principalmente devido ao extensivo uso do solo e à extração de nutrientes que não conseguem ser repostos a tempo, expondo o solo à erosão e compactação e causando a exaustão da terra, fatores que podem causar danos irreversíveis, além da perda da biodiversidade, dos recursos florestais e do sequestro de carbono (FAMINOW, 1998).

Neste contexto, sabe-se que a dinâmica da paisagem em Rondônia é composta pela conversão sistemática de floresta em pasto, e a extensão e magnitude dos impactos causados pela fragmentação da floresta são influenciados pelo tamanho, conectividade, forma, contexto e heterogeneidade dos fragmentos remanescentes na área, sendo que a conversão dos ambientes naturais em manchas remanescentes possui como resultado o aumento do tamanho das bordas dos fragmentos, resultado da interação entre dois ecossistemas separados por uma transição abrupta (FERRAZ et al., 2006). Assim, os remanescentes de floresta nativa são impactados pela arquitetura dos assentamentos em Rondônia, resultando em corredores de floresta longos e lineares, ultrapassando os limites das propriedades e criando o conhecido desmatamento característico do Estado em forma de "espinha de peixe" (CAVIGLIA-HARRIS; HARRIS, 2011).

3.5. Produtos e sensores utilizados no estudo das queimadas

A identificação e o monitoramento das áreas queimadas por Sensoriamento Remoto geralmente são realizadas em duas linhas de pesquisa. A primeira refere-se à detecção dos focos de calor, ou seja, o registro instantâneo da temperatura dos objetos em combustão, a partir da análise das bandas espectrais entre 3 e 11 micrometros (μm) (JUSTICE et al., 2002; GIGLIO et al., 2003).

A outra linha de pesquisa refere-se à identificação das áreas queimadas a partir das cicatrizes, em que o mapeamento é realizado na área com vegetação destruída ou afetada de acordo com a mudança das características espectrais em imagens obtidas antes e depois da ocorrência do fogo. Neste caso são utilizadas as bandas espectrais das regiões do visível, do infravermelho próximo e do infravermelho médio do espectro eletromagnético (EEM) (ROY et al., 2002). Como a queima de biomassa modifica a paisagem, os dados disponíveis em diversas escalas são essenciais para o estudo referente à identificação e mapeamento das queimadas.

Com o passar dos anos diversos sensores que operam na faixa óptica do EEM vêm sendo utilizados em distintas escalas para a identificação das áreas queimadas, como o sensor *Thematic Mapper* (TM) e o *Enhanced Thematic Mapper Plus* (ETM+) do satélite Landsat 5 e 7, respectivamente; o sensor *Operational Land Imager* (OLI) do satélite Landsat 8 e o sensor *Advanced Very High Resolution Radiometer* (AVHRR) a bordo do satélite *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA); assim como diversos produtos como o *Global Burnt Area* (GBA2000) do sensor *VEGETATION* a bordo do satélite SPOT 5; o *Burned Area* (MCD45) do sensor MODIS a bordo dos satélites Terra e Aqua e o *Global Burned Forest Mapping* (GlobScar) do sensor *Along Track Scanning Radiometer* (ATSR) do satélite *European Remote Sensing Satellite* (ERS-1 e 2).

Em relação à detecção de focos ativos, pode-se citar o produto *Wildfire Automated Biomass Burning Algorithm* (WFABBA) do satélite *Geostationary Operational Environmental Satellite* (GOES), o produto *Thermal Anomalies and Fire* (MOD14) do sensor MODIS, os dados mensais de focos de calor do sensor *Visible and Infrared Scanner* (VIRS) do satélite *Tropical Rainfall Measuring Mission* (TRMM) e os dados dos

focos de calor do portal do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) provenientes do sensor AVHRR do satélite NOAA.

Na região visível do EEM (0,4 a 0,7 μm), a reflectância da vegetação geralmente é baixa, sendo que diferentes estudos demonstram resultados distintos de acordo com o tipo de vegetação, de ecossistema e de severidade do fogo, pois uma queimada pode produzir cinzas brancas pela completa combustão da biomassa e cinzas negras, como o carvão, pela combustão durante a deficiência de oxigênio, portanto, é necessária a análise detalhada do local afetado para deduzir se a reflectância nessa banda aumenta ou diminui após uma queimada (ARINO et al., 2001). Porém, como muitos alvos possuem propriedades espectrais semelhantes às queimadas, como corpos d'água, sombras de nuvens e determinados tipos de solo, a utilização desta faixa espectral não é recomendada.

No NIR, que abrange a faixa espectral de 0,7 a 1,3 μm , a reflectância da vegetação é mais alta, e em geral fornece as informações espectrais mais indicadas para a identificação e o mapeamento das queimadas, devido à perda de material fotossinteticamente ativo da vegetação verde e pelo depósito de cinzas e carvão sobre o solo, causando uma forte diminuição da reflectância nessa região (EVA; LAMBIN, 1998; ARINO et al., 2001), denotando um elevado contraste entre a vegetação queimada e a não queimada. Dentre os sensores úteis para o mapeamento das queimadas que operam nesta faixa, pode-se salientar a banda 2 do AVHRR, a banda 4 do TM, a banda 5 do sensor OLI, a banda 3 do VEGETATION e as bandas 2 e 5 do sensor MODIS.

A região do SWIR, que abrange a faixa de 1,3 a 3 μm do EEM, é sensível à umidade do dossel e do solo, ocorrendo o aumento da reflectância após uma queimada devido à perda de água pela vegetação (ARINO et al., 2001; FRANÇA; FERREIRA, 2005), salientando-se as bandas 5 e 7 do TM, as bandas 6, 7 e 9 do sensor OLI, a banda 4 do VEGETATION, a banda 6 e 7 do MODIS e a banda 3A do AVHRR para o estudo nessa faixa espectral.

No comprimento de onda entre 7 e 15 μm , referente ao infravermelho termal (TIR), as cinzas e o carvão depositados no solo impedem o processo de resfriamento, ocorrendo o aumento na temperatura da superfície devido à forte absorção da irradiância solar e a falta de evapotranspiração nas áreas com cinzas e carvão na superfície, características

identificadas na banda 6 do TM, nas bandas 10 e 11 do sensor OLI e nas bandas 4 e 5 do AVHRR (ARINO et al., 2001; FRANÇA; FERREIRA, 2005).

Entre as características mais comuns dos produtos utilizados para o estudo dos focos, pode-se destacar a resolução espacial baixa, geralmente com 1 quilômetro (km) e a alta resolução temporal (1 dia). Porém, os sensores de baixa resolução espacial possuem algumas limitações quanto à identificação das queimadas, devido a fatores como a presença de nuvens, queimadas ativas que ocorrem em horários diferentes da passagem do satélite e frentes de fogo menores que 50 metros ou abaixo do dossel (BARBOSA et al., 1999).

Assim, a detecção dos focos é realizada no momento da ocorrência da queimada e durante a passagem do satélite, não permitindo uma estimativa confiável do mapeamento da área queimada total, fundamentais em muitas aplicações como, por exemplo, na estimativa de emissão de gases traços e aerossóis para a atmosfera. Para isso, seria necessária a calibração dos dados de focos ativos com estimativas obtidas por sensores com melhor resolução espacial (EVA; LAMBIN, 1998).

Ao contrário dos focos ativos, as cicatrizes das queimadas podem permanecer por vários dias ou meses na superfície, permitindo a sua identificação pelas características espectrais por muito mais tempo, no entanto, as cicatrizes podem desaparecer devido à remoção das cinzas pelo vento ou chuva ou pela rápida rebrota da vegetação, principalmente em área de pastos e no Cerrado.

Em relação à identificação e mapeamento das cicatrizes de queimadas, sensores que possuam melhor resolução espacial (média ou alta) são mais favoráveis para capturar o padrão espacial da cicatriz, pois em sensores com baixa resolução espacial a separabilidade espectral da superfície queimada e não queimada é dificultada devido à mistura de informações dentro do *pixel*, onde a distribuição espacial de queimadas pequenas e esparsas não são detectadas, dificultando estimativas eficientes das superfícies queimadas totais.

Ainda, a resolução espectral é muito importante devido à presença de bandas espectrais em regiões do EEM propícias à utilização de índices espectrais, como o *Normalized*

Difference Vegetation Index (NDVI), o *Global Environmental Monitoring Index* (GEMI), o *Normalized Burn Ratio* (NBR) e o *Burned Area Index* (BAI). Porém, muitos sensores utilizados para a identificação e mapeamento das áreas queimadas possuem como limitação a baixa resolução temporal, impedindo que toda a estação de queimada seja identificada e mapeada com eficiência.

3.6. Uso de modelos numéricos no estudo das queimadas

Os modelos numéricos vêm sendo utilizados em uma grande variedade de estudos nas últimas décadas, e dentre eles, podemos citar o RegCM, um modelo regional utilizado em estudos que envolvem a análise e variações de precipitação, temperaturas e do clima em geral, principalmente quando relacionados com as mudanças no uso e cobertura da terra (LIU et al., 1996; DRUYAN et al., 2002; CUADRA; DA ROCHA, 2006; DA ROCHA, 2009).

Este modelo já foi amplamente validado em diversos estudos, como em Park et al. (2013), que investigaram o impacto das condições de contorno ERA-Interim e NCEP/DOE 2 nas simulações das características da precipitação, utilizando 18 anos de simulações (1989 - 2006) do *Coordinated Regional Climate Downscaling Experiment* (CORDEX) da região leste da Ásia. Os resultados mostraram que o RegCM4 simulou adequadamente a distribuição espacial da precipitação e suas variações temporais, apresentando uma superestimativa na região central do domínio do modelo, com exceção da Índia e Coreia do Sul, e uma superestimativa sobre a região oceânica equatorial. O modelo apresentou melhor desempenho no inverno de acordo com as condições de contorno devido à baixa resolução (50 km), sendo que as simulações da precipitação são impactadas de acordo com a condição de contorno e os impactos variam com a localização geográfica e a estação.

Tesfaye et al. (2013) avaliaram o desempenho das propriedades ópticas dos aerossóis (POA) no modelo RegCM4, acoplado a um esquema antropogênico de poeira no deserto na África do Sul. A validação foi realizada a partir da comparação com dados dos perfis de coeficientes de extinção dos aerossóis, profundidade óptica dos aerossóis e albedo com observações dos sensores AERONET, LIDAR, e MISR. Os resultados mostraram que a simulação da POA na estação Skukuza (24° S, 31° E) apresentaram valores de acordo

com o desvio padrão comparado com os sensores AERONET e $\pm 25\%$ com observações do MISR. Em relação ao LIDAR, o modelo apresentou um bom desempenho na captura dos perfis de extinção de aerossóis, indicando uma boa habilidade na reprodução das principais características no que concerne aos aerossóis na área de interesse.

Fuentes-Franco et al. (2014) avaliaram a habilidade do modelo RegCM4 na obtenção dos padrões médios e da variabilidade interanual da temperatura e precipitação no México, a partir de comparações com 27 anos de observações originadas por reanálises. Os resultados indicaram que o RegCM4 reproduz adequadamente os padrões espaciais médios da precipitação e temperatura sazonal, associadas com a variabilidade interanual. O principal erro encontrado consistiu na superestimativa da precipitação em regiões montanhosas, e que o desempenho do modelo denotou qualidade suficiente não apenas para o estudo da precipitação e temperatura, mas também pode ser utilizado para a estimativa de outras variáveis climatológicas.

Ji e Kang (2014) investigaram a ocorrência de eventos climáticos extremos na China no final do século 21 (2080–2099) utilizando o RegCM4. A validação do desempenho do modelo foi realizada a partir de comparações entre dados observados e simulados no período de 1985–2005. Os resultados mostraram que o modelo pode reproduzir satisfatoriamente a distribuição espacial dos eventos climáticos extremos, simulando as temperaturas extremas mais acuradamente do que a precipitação.

Pereira (2012) verificou o impacto nas simulações numéricas do RegCM4 oriundas da atualização de mapas do uso e cobertura da terra e suas respectivas características físico-químicas e biológicas, além da validação dos dados do *Tropical Rainfall Measuring Mission* (TRMM). Como na maioria dos modelos regionais e de previsão do tempo e clima, os mapas de uso e cobertura da terra encontram-se defasados, este fator influencia nos resultados das simulações. Os resultados mostraram que a comparação dos dados de precipitação mensal estimada pelo TRMM com as 183 estações meteorológicas espalhadas pelo Brasil apresentaram uma concordância de aproximadamente 97%. Ainda, com a atualização do uso e cobertura da terra para o ano de 2007 utilizado pelo modelo de superfície BATS, os resultados obtiveram uma melhora de 10% da simulação da precipitação, além de uma boa concordância em relação à temperatura máxima e mínima, com valores próximos ao esperado.

Desta forma, percebe-se que o modelo RegCM4 é eficaz na produção de estimativas referentes aos parâmetros climatológicos e de qualidade do ar, e pode ser considerado como um método potencial para a obtenção dos impactos ocasionados pelas mudanças no uso e cobertura da terra e pelas queimadas.

4. ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo abrange o Estado de Rondônia, localizado nas coordenadas geográficas 09°45' e 8°00' de latitude sul; 66°50' e 59°50' de longitude oeste, conforme **Figura 1**. O Estado possui área total de 237.576 quilômetros quadrados (km²), fazendo divisa com o Estado do Amazonas ao norte, Acre a oeste, Mato Grosso a leste e ao sul e com a Bolívia ao oeste e ao sul.

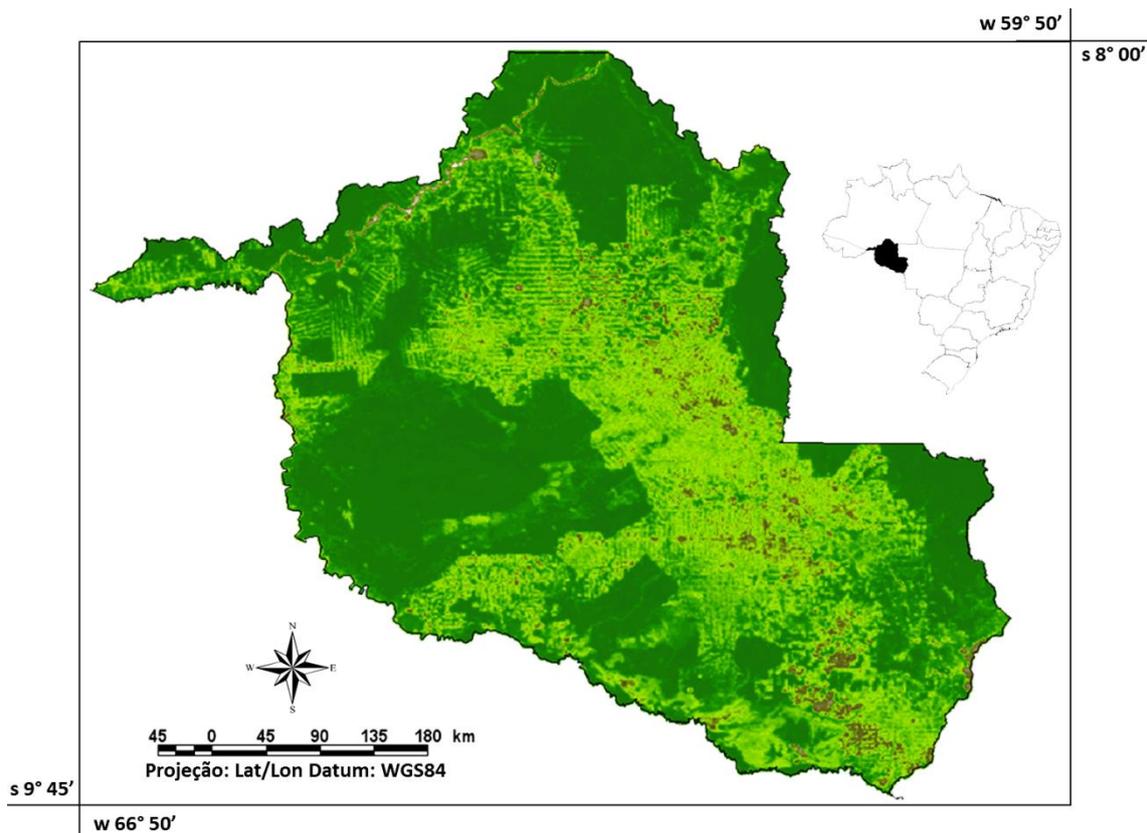


Figura 1 - Localização da área de estudo. Imagem do sensor MODIS, produto MOD09, composição 1B2G6R, dia 10 de setembro de 2010.

O Estado de Rondônia está localizado, em maior parte, em terrenos do Escudo Pré-Cambriano, composto por rochas metamórficas gnáissicas e graníticas intrusivas, além de rochas sedimentares marinhas/continentais. Nas regiões norte e sudoeste do Estado e ao longo dos vales dos rios Madeira, Machado e Guaporé localizam-se as Formações Superficiais Terciárias, constituídas por sedimentos inconsolidados e os Depósitos aluvionais Quaternários, constituídos por argilas (RONDÔNIA, 2002).

O relevo é constituído por quatro unidades geomorfológicas: Planície Amazônica, que se estende dos limites com o Estado do Amazonas e se prolonga nas direções Sul-Sudeste até encontrar as primeiras ramificações das chapadas dos Parecis, apresentando altitudes de 90 a 200 metros; Encosta Setentrional do Planalto Brasileiro, constituída de uma superfície de aplainamento rebaixada pelas sucessivas fases erosivas, subdivididas em patamares com altitudes que variam de 100 metros a 600 metros; Chapada dos Parecis – Pacaás Novos, pertencendo ao sistema mato-grossense do Maciço Central Brasileiro, com altitudes que variam entre 600 e 1000 metros, sendo que algumas áreas apresentam altitudes acima de 1000 metros, como o pico do Jaru com 1.126 metros, ponto mais alto do Estado; e Vale do Guaporé-Mamoré, composto por uma vasta planície tabular formada por terrenos sedimentares recentes, com altitudes que variam entre 100 e 200 metros, constituída por terrenos alagados drenados pelos rios Guaporé, Mamoré e pelos baixos cursos de seus afluentes, sendo as áreas mais baixas são periodicamente inundadas por esses rios formando lagos temporários e meandros de escoamento complexo (SEDAM, 2002).

A hidrografia é caracterizada principalmente pelo rio Madeira e seus afluentes, formando oito sub-bacias, entre elas a Bacia do Guaporé, Bacia do Mamoré, Bacia do Abunã, Bacia do Mutum-Paraná, Bacia do Jaci-Paraná, Bacia do Jamari, Bacia do Machado e Bacia do Aripuanã (SEDAM, 2002).

Segundo a classificação de Köppen, o Estado de Rondônia possui Clima Tropical Quente e Úmido. A precipitação média anual varia entre 1.400 e 2.600 mm ao ano, apresentando chuvas intensas nos meses de outubro a abril e um período seco bem definido durante a estação de inverno, quando ocorrem moderados déficits hídricos, com índices pluviométricos inferiores a 50 mm ao mês, principalmente nos meses de junho a agosto. As temperaturas médias mínimas anuais giram em torno de 18° C no mês mais frio e as médias máximas anuais entre 30 e 35° C, apresentando temperaturas médias anuais entre 24 e 26° C (SEDAM, 2012).

Os principais solos presentes no Estado, que compõem cerca de 58% de toda a área são os Latossolos, principalmente o Latossolo Vermelho Amarelo, Latossolo Vermelho e Latossolo Amarelo. Além destes constituem a região os Argissolos, Neossolos, Cambissolos e Gleissolos. A maior parte dos solos era coberto pela floresta, os quais

apresentavam produtividade alta apesar da baixa fertilidade devido à reciclagem de nutrientes e à preservação da matéria orgânica. Porém, a matéria orgânica vem diminuindo devido ao desmatamento das florestas e ao manejo inadequado dos solos, fatores que provocam a diminuição da fertilidade, aumento da acidez, deterioração da estrutura física e prejuízos nas atividades biológicas. Ainda, os efeitos da degradação são potencializados com a substituição das florestas pelas pastagens, pois a elevada umidade relativa do ar em conjunto com a radiação solar, altas temperaturas e intensa precipitação pluvial expõem o ambiente edáfico, de baixa resiliência, ao intemperismo, que podem provocar a erosão e assoreamento dos rios, empobrecimento da química do solo e poluição ao ambiente (SCHLINDWEIN et al., 2012).

Em geral, a vegetação original de Rondônia, segundo dados de IBGE (2004), apresenta seis Regiões Fitoecológicas: Floresta Ombrófila Densa (Floresta Tropical Pluvial), Floresta Ombrófila Aberta (Fasciações da Floresta Ombrófila Densa), Floresta Estacional Semidecidual (Floresta Tropical Subcaducifólia), Áreas das Formações Pioneiras (Sistema Edáfico de Primeira Ocupação), Savana (Cerrado) e Áreas de Tensão Ecológica (Contatos entre Tipos de Vegetação).

A Região da Floresta Ombrófila Densa ocorre sob clima ombrófilo sem período seco durante o ano, com temperaturas médias em torno de 22° e 25°, apresentando árvores grandes nos terraços aluviais e nos tabuleiros terciários e árvores médias nas encostas marítimas. Este tipo de vegetação apresenta dois grupos de formações na área de estudo, a Aluvial e Terras Baixas, além de apresentar vegetação secundária e atividades agrárias (IBGE, 2004).

A Região da Floresta Ombrófila Aberta possui fisionomia florestal composta por árvores mais espaçadas, com estrato arbustivo pouco denso e caracterizada por fanerófitas rosuladas e lianas lenhosas. O clima apresenta períodos secos, em torno de dois a quatro meses e as temperaturas médias oscilam entre 24° e 25°. Neste tipo de vegetação ocorrem quatro facies florestais: a floresta de palmeiras, com a presença de babaçu e inajá; a floresta de bambu; a floresta de cipó e a floresta de sororoca. Na área de estudo este tipo de vegetação aparece em três grupos de formações, representadas pela Aluvial, Terras Baixas e Submontana, além da vegetação secundária e atividades agrárias (IBGE, 2004).

A Região da Floresta Estacional Semidecidual apresenta um clima com uma estação chuvosa e outra seca, sendo que a área tropical apresenta temperaturas médias de 21°, curto período seco e acentuada baixa térmica e a área subtropical apresenta temperaturas médias em torno de 15°. Esta região apresenta a formação Submontana e vegetação secundária com atividades agrárias (IBGE, 2004).

A Região da Savana inclui várias formações campestres, apresentando vegetação gramíneo lenhosa baixa, com alternância de pequenas árvores isoladas, capões florestados e galerias florestais ao longo dos rios, com grande variabilidade estrutural. As árvores variam de pequeno a médio porte e ocorrem tanto em clima estacional tropical, que apresenta período seco que varia entre três e sete meses, como em clima ombrófilo sem período seco. Esta região apresenta três formações, a Arborizada (campo cerrado), a Florestada (cerradão) e a Parque (campo sujo), além de apresentar vegetação secundária e atividades agrárias (IBGE, 2004).

A Região das Formações Pioneiras estão presentes próximas a cursos d'água, pântanos e lagoas, apresentando vegetação campestre herbáceo lenhosa. São áreas pedologicamente instáveis, com sedimentos inconsolidados ou pouco consolidados, sob diferentes processos de acumulação, sendo que na área de estudo é encontrada a formação da vegetação com influência fluvial e/ou lacustre (IBGE, 2004).

As áreas de Tensão Ecológica ocorrem quando são encontradas duas ou mais regiões fitoecológicas. Na área de estudo são encontrados os contatos entre Floresta Ombrófila Densa e Floresta Estacional Semidecidual, Savana e Floresta Ombrófila Densa e Savana e Floresta Estacional Semidecidual (IBGE, 2004).

5. MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo serão apresentados todos os materiais e dados utilizados neste trabalho, assim como os procedimentos metodológicos realizados para a obtenção dos resultados.

5.1. Trabalho de Campo

O trabalho de campo em Rondônia foi realizado com o intuito de coletar a localização geográfica com o *Global Positioning System* (GPS) em áreas queimadas para posterior validação do mapeamento realizado nas imagens do sensor OLI do Satélite Landsat 8 para o mesmo período de tempo do trabalho de campo. A validação em campo foi realizada para assegurar a confiabilidade do mapeamento realizado em imagens dos sensores TM e ETM+ dos Satélites Landsat 5 e Landsat 7, utilizados como referência na validação dos mapeamentos das áreas queimadas nas imagens do sensor MODIS.

No campo foram coletados o fator de reflectância espectral em áreas queimadas com o intuito de gerar a fração de cobertura vegetal e as reflectâncias ρ_{PAR} , ρ_{NIR} e ρ_{SWIR} , utilizadas como parâmetros de entrada no modelo RegCM4 que simulou o impacto da modificação no uso da terra no balanço de radiação da superfície. O trabalho de campo em Rondônia foi realizado no período de 24 a 31 de agosto de 2013, onde foram visitados diversos Municípios: Porto Velho, Ariquemes, Alvorada do Oeste, São Miguel do Guaporé, Seringueiras, Ji-Paraná e Machadinho do Oeste. O trajeto realizado no campo está indicado na **Figura 2**.

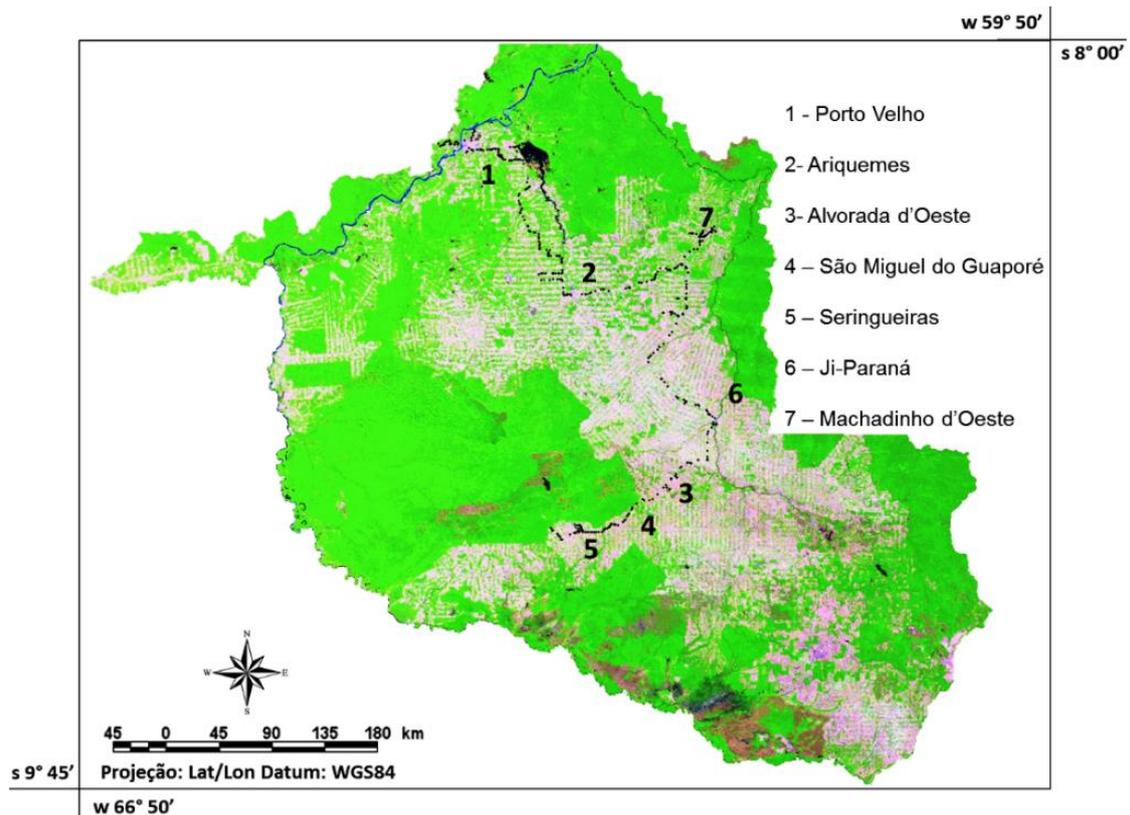


Figura 2 - Trajeto do campo realizado no Estado de Rondônia indicando as áreas visitadas. Imagem MOD09, composição 1B2G6R do dia 09/08/2010.

Os locais de coleta da localização com GPS em áreas queimadas no trabalho de campo podem ser visualizadas com maior destaque nas **Figuras 3 e 4**. Foram coletados 56 pontos em áreas que apresentavam queimadas, sendo que apenas quatro pontos não coincidiram com o mapeamento, o que representa 93% de acurácia. Os pontos não coincidentes decorrem de áreas que apresentavam queimadas muito antigas, que podiam ser vistas em campo, mas não mais nas imagens do Landsat. Desta forma considerou-se o mapeamento das imagens referência confiável para validar o mapeamento das imagens MODIS.

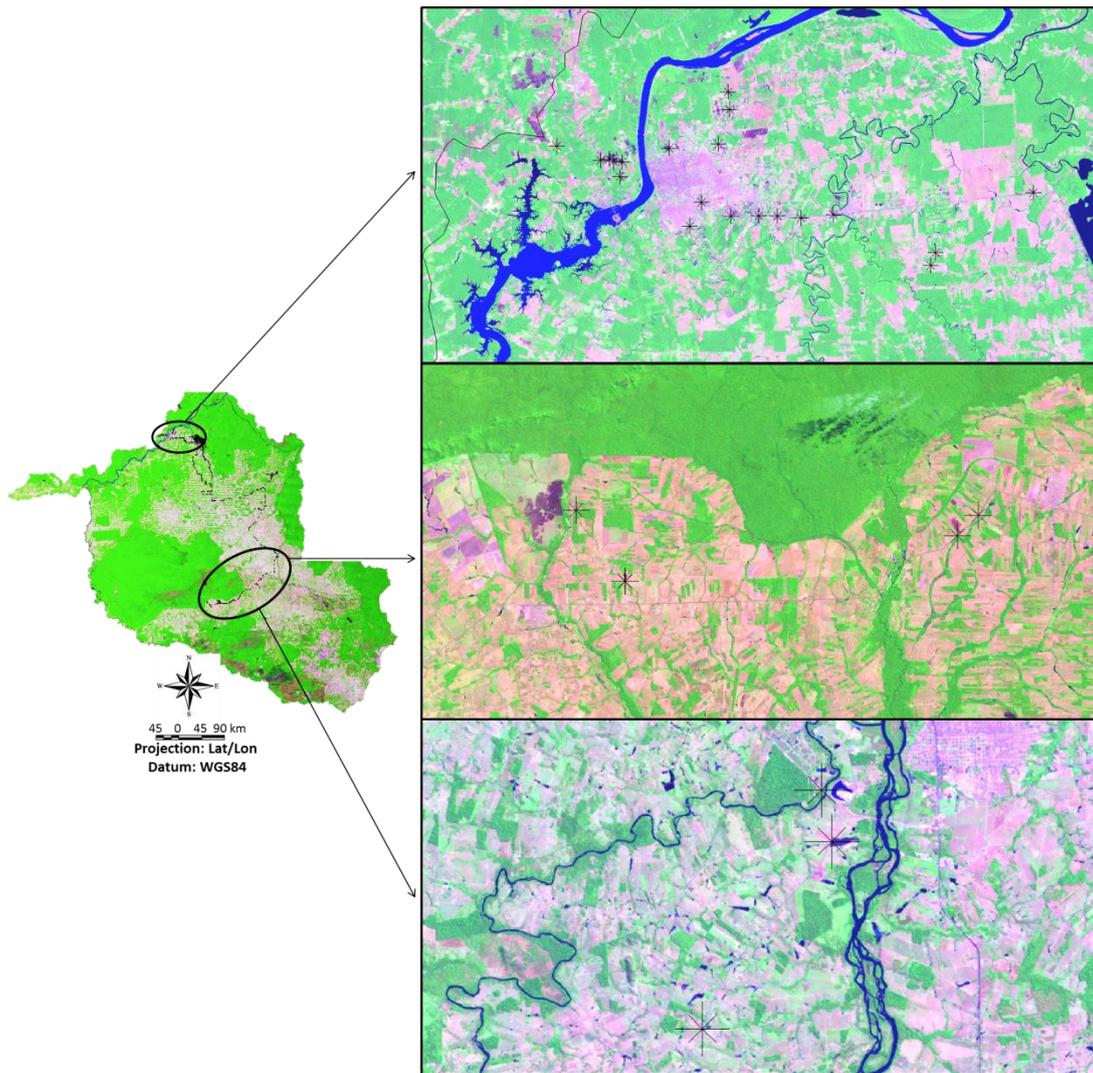


Figura 3 - Localizações geográficas obtidas com o GPS nas áreas queimadas, representadas pelas estrelas, nos dias 25, 26 e 27 de agosto de 2013.

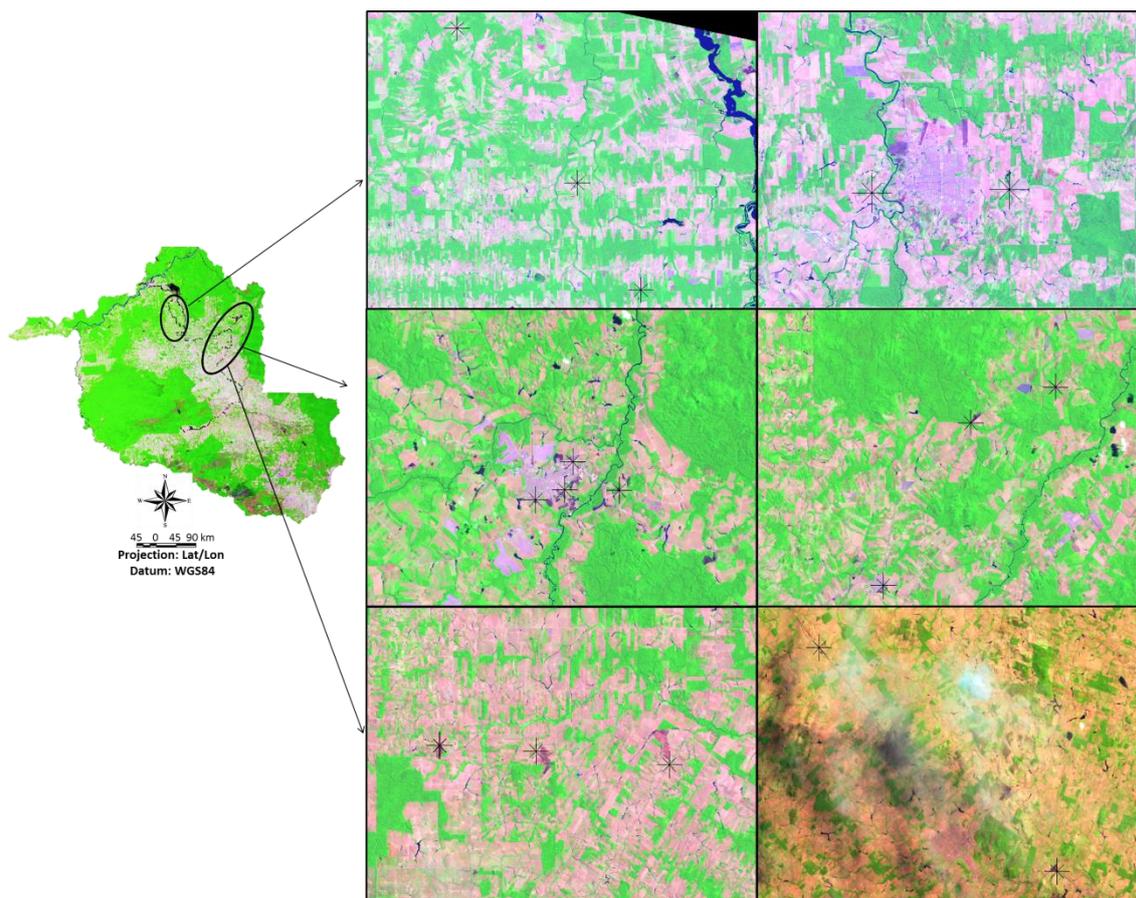


Figura 4 - Localizações geográficas obtidas com o GPS nas áreas queimadas, representadas pelas estrelas, nos dias 28, 29 e 30 de agosto de 2013.

Ainda, neste trabalho de campo foi utilizado o espectrorradiômetro FieldSpec Pro e uma placa Spectralon-11, desenvolvida em material sintético (polytetrafluoretileno) com reflectância espectral próxima a 100% (Jackson et al., 1992), que permitiu a obtenção do fator de reflectância espectral para diversos alvos terrestres de 350 a 2400 nanômetros (nm). O fator de reflectância é estimado a partir da razão entre a radiância espectral da amostra pela radiância espectral de uma superfície lambertiana ideal, nas mesmas condições de iluminação e observação. Foram adquiridas três coletas para cada alvo, e posteriormente foi gerada a média do fator de reflectância espectral para corpos d'água, pastagens em diversos estágios, vegetação herbácea-arbustiva, vegetação arbórea, áreas agrícolas, solo exposto e queimadas em vários estágios (recente, em estágio inicial de regeneração e estágio avançado de regeneração em diversos tipos de vegetação), e os pontos coletados com o FieldSpec nas áreas queimadas podem ser visualizados na **Figura 5**.

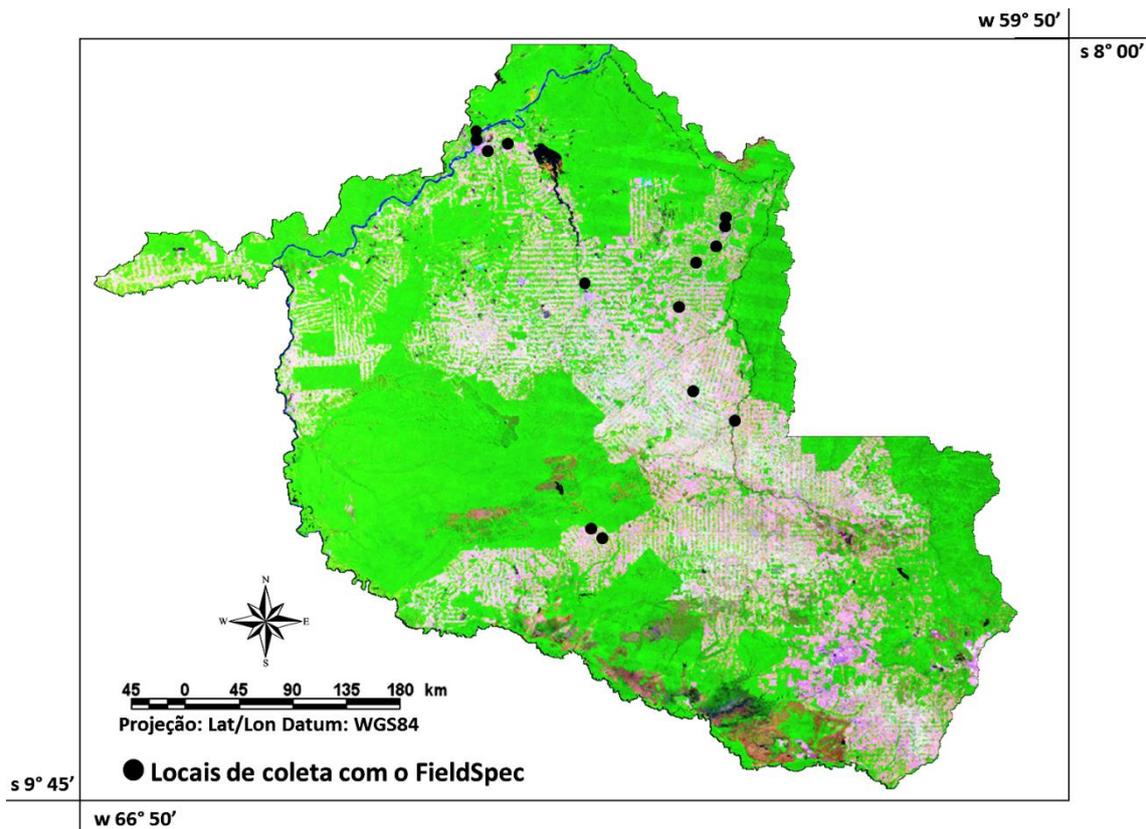


Figura 5 - Pontos coletados com o FieldSpec Pro para a obtenção do fator de reflectância espectral em áreas queimadas no Estado de Rondônia.

No dia 25 de agosto foram realizadas quatro coletas em Porto Velho. A primeira ocorreu às 11:40h da manhã em uma área que apresentava queimada recente e com regeneração próxima à BR-364. A segunda coleta ocorreu às 11:50h da manhã em outra área próxima à BR-364, e as queimadas apresentavam diversas características (queimada com solo, queimada com vegetação seca, cinzas, queimada com rebrota e queimada no dossel da folha). A terceira coleta ainda ocorreu na região de Porto Velho às 15:00h em área de queimada recente e a quarta coleta ocorreu às 15:15h em uma área que apresentava cinzas e queimadas com vegetação e troncos secos. As características visuais da paisagem e das condições da vegetação e solo são mostradas nas fotografias da **Figura 6**.

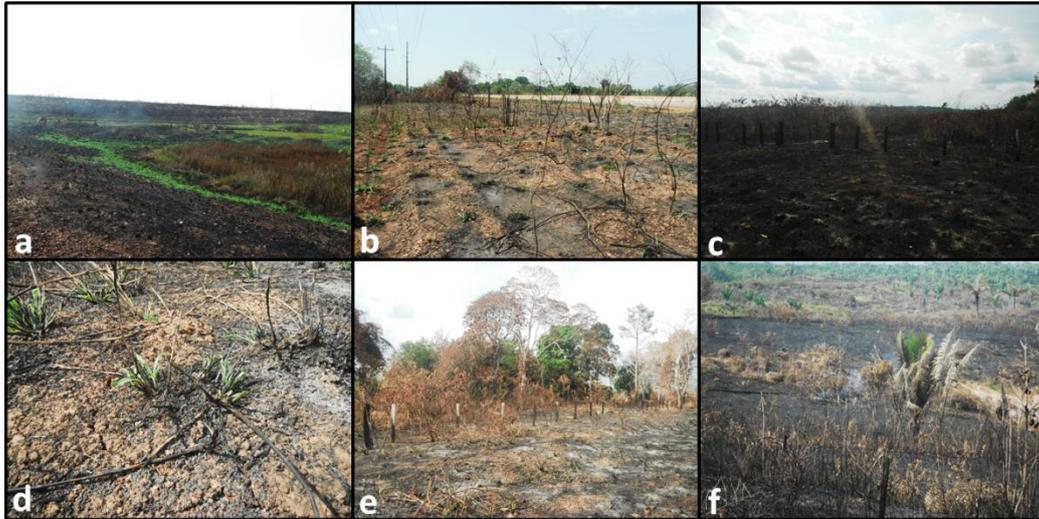


Figura 6 – Fotografias das áreas queimadas onde foram realizadas as observações com o FieldSpec no dia 25 de agosto. Áreas queimadas em regeneração (a, d), área queimada com solo (b), áreas queimadas recentes (c, f) e área queimada com vegetação seca (e).

No dia 26 de agosto foram realizadas duas coletas entre os Municípios de Porto Velho e Ariquemes. A primeira ocorreu às 08:35h da manhã em áreas queimadas recentes e com cinzas e galhos secos e a segunda coleta ocorreu as 14:00h em áreas queimadas com a presença de vegetação seca e gramíneas em regeneração, e algumas fotos podem ser visualizadas na **Figura 7**.

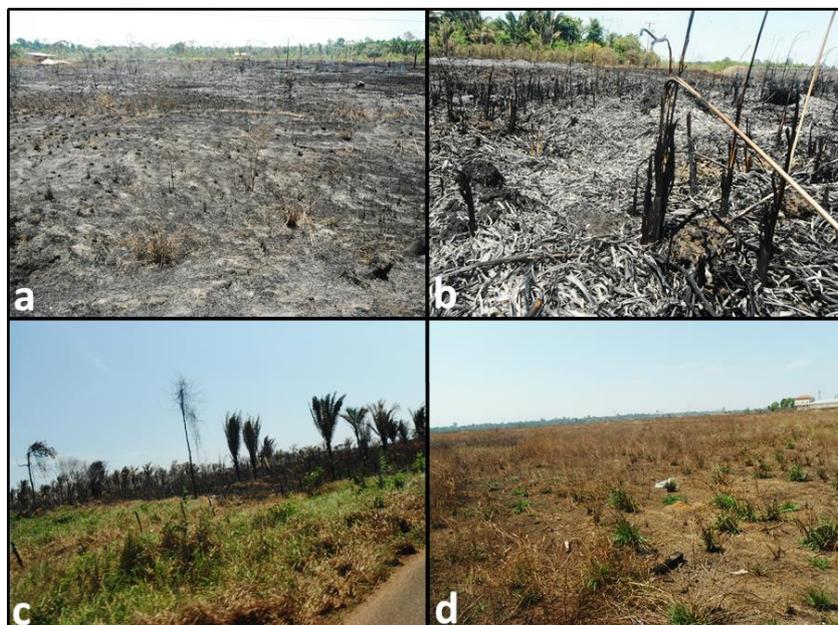


Figura 7 – – Fotografias das áreas queimadas onde foram realizadas as observações com o FieldSpec no dia 26 de agosto. Área queimada recente (a), área queimada recente com cinzas (b), área queimada com vegetação seca (c) e áreas queimadas com gramíneas em regeneração (d).

No dia 27 de agosto foram realizadas três coletas. A primeira ocorreu às 11:20h da manhã em áreas queimadas antigas e em regeneração, a segunda coleta ocorreu às 11:40h em área queimada recente e a terceira coleta ocorreu às 16:00h em áreas queimadas recentes, com vegetação seca e com vegetação em regeneração (**Figura 8**).

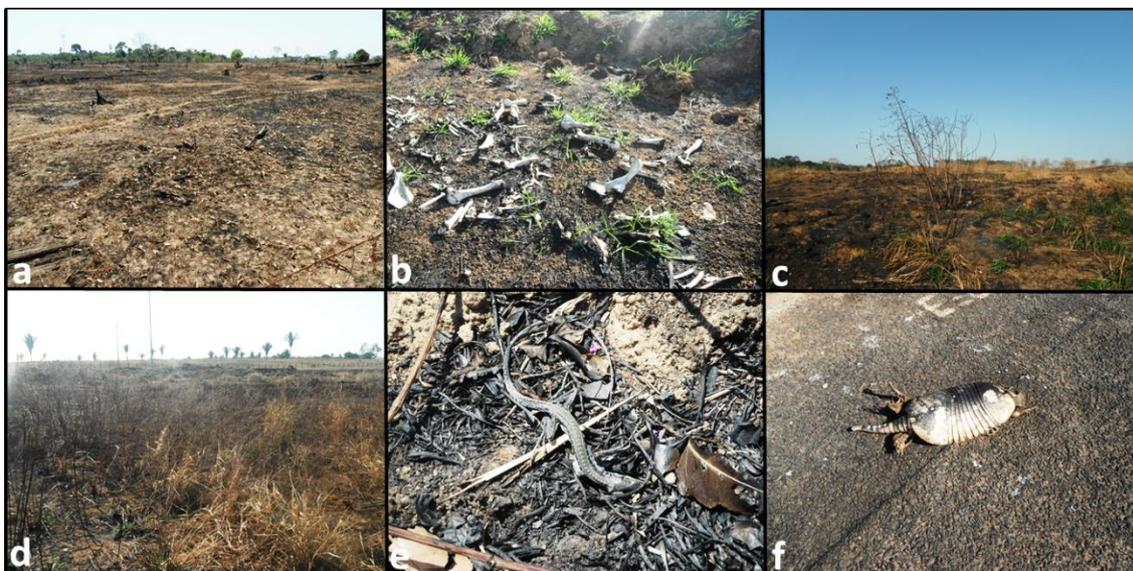


Figura 8 - – Fotografias das áreas queimadas onde foram realizadas as observações com o FieldSpec no dia 27 de agosto. Área queimada recente (a), área queimada em regeneração (b, c), área queimada com vegetação seca (d) e impactos na fauna devido às queimadas (e, f).

No dia 28 de agosto foram realizadas cinco coletas entre os Municípios de Ji-Paraná e Machadinho d’Oeste. A primeira ocorreu às 09:50h da manhã em áreas queimadas com cinzas, galhos secos e vegetação em regeneração, a segunda coleta ocorreu às 12:40h em área queimada recente, a terceira coleta ocorreu às 14:45h em área queimada recente e com palhas secas e cinzas, a quarta coleta ocorreu às 15:10h em áreas queimadas com cinzas e regeneração e a quinta coleta ocorreu em Machadinho d’Oeste às 16:30h em uma área de queimada ativa (**Figura 9**).

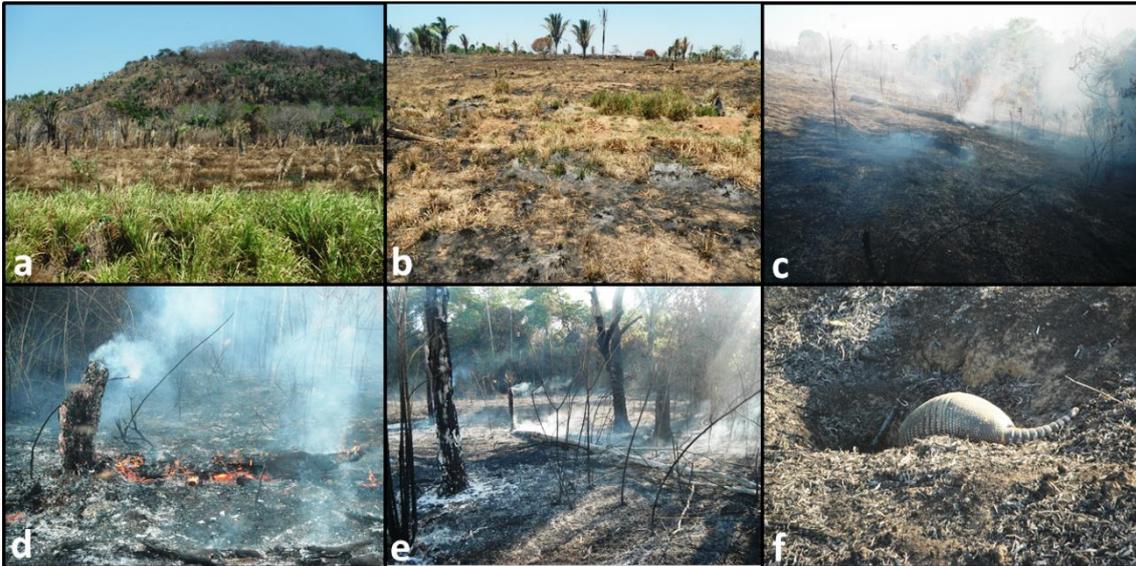


Figura 9 - – Fotografias das áreas queimadas onde foram realizadas as observações com o FieldSpec no dia 28 de agosto. Área queimada com vegetação seca e em regeneração (a, b), área queimada ativa (c), área queimada ativa e com cinzas brancas (d, e) e área queimada ativa impactando o habitat natural da fauna (f).

No dia 29 de agosto foram realizadas duas coletas na direção de Machadinho d'Oeste para Porto Velho. A primeira ocorreu às 08:35h da manhã em áreas queimadas com cinzas, galhos secos e vegetação em regeneração e a segunda coleta ocorreu às 14:00h em áreas queimadas e com presença de gramíneas em regeneração, solo e vegetação seca (Figura 10).

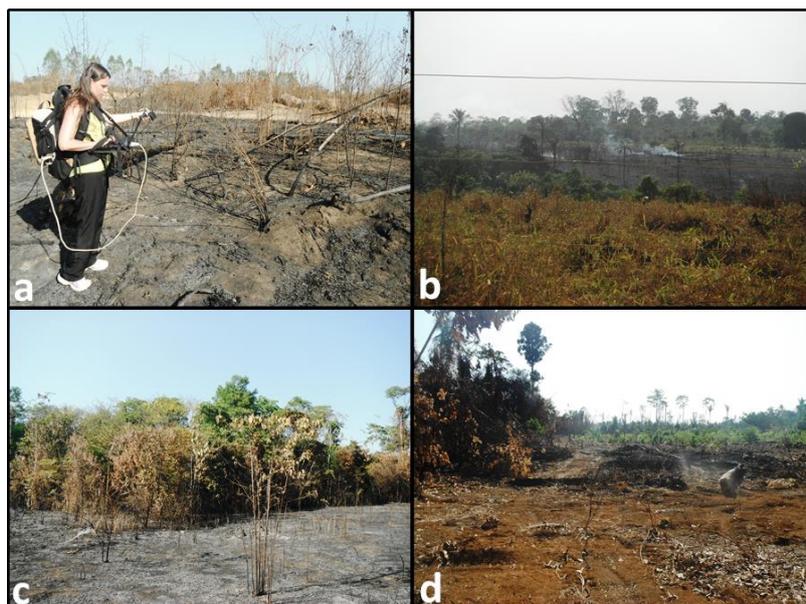


Figura 10 - – Fotografias das áreas queimadas onde foram realizadas as observações com o FieldSpec no dia 29 de agosto. Área queimada recente (a, b) e área queimada com a presença de solo e vegetação seca (c, d).

Os dados coletados nas áreas queimadas durante o trabalho de campo foram utilizados para calcular os valores do fator de reflectância espectral. Esses valores foram utilizados para calcular as reflectâncias ρ_{PAR} , ρ_{NIR} e ρ_{SWIR} e para a geração do NDVI, que originou a fração de cobertura vegetal, utilizados como alguns dos dados de entrada necessários no modelo RegCM4.

5.2. Materiais utilizados

Neste capítulo serão abordados todos os materiais e dados auxiliares utilizados para este trabalho.

5.2.1. MODIS/Terra e Aqua

A identificação e o mapeamento das áreas queimadas para este trabalho foram realizados com base nas imagens do sensor MODIS, a bordo dos satélites Terra e Aqua, que possui órbita polar, altitude de 700 km e área de imageamento de 2.330 km. O horário de passagem varia de acordo com o satélite. O satélite Terra cruza o Equador em órbita descendente às 10h30 e órbita ascendente às 22h30, e seus produtos recebem a sigla MOD, enquanto que o satélite Aqua em órbita ascendente cruza o Equador às 13h30 e em órbita descendente às 01h30, e seus produtos recebem a sigla MYD, possibilitando a obtenção de quatro passagens diárias sobre uma mesma área.

Os produtos MODIS utilizados referem-se ao MOD09GA, que representa a reflectância espectral da superfície, possui 7 bandas e resolução espacial de 500 metros, e MODO09GQ, que possui 2 bandas e resolução espacial de 250 metros, ambos com resolução temporal de 1 dia. As imagens utilizadas englobaram os tiles V09, V10, H11 e H12, que abrange o Estado de Rondônia na região Amazônica, e o período utilizado consistiu nos meses de junho a novembro dos anos de 2000 a 2011, período seco e de atuação das queimadas na área de estudo. As imagens que possuíam muitas nuvens e que apresentavam uma má qualidade radiométrica foram descartadas, sendo que ao final foram utilizadas 835 imagens.

A opção por realizar os mapeamentos a partir de produtos diários decorreu da necessidade da obtenção de inventários com a maior precisão possível de toda a estação de queimada, já que alguns produtos de área queimada existentes, como o MCD45, não fornecem

estimativas confiáveis. Segundo Cardozo et al. (2011), o produto MCD45 apresenta uma taxa de omissão de 96% das queimadas na região Amazônica, principalmente por fatores ligados à interferência da profundidade óptica das nuvens e das plumas, à falta de dados pelos sensores no momento de ocorrência de uma queimada e especialmente pela resolução espacial incompatível, já que a maioria das queimadas que ocorrem na América do Sul possuem tamanhos menores do que a resolução espacial de 500 metros do produto MCD45 (Roy et al., 2006; Roy et al., 2008).

Foram utilizados ainda os produtos MYD15A2 e MOD15A2, que fornecem os índices de área foliar e a radiação fotossinteticamente ativa, obtidos a partir de um mosaico temporal de 8 dias e com 1 km de resolução espacial.

5.2.2. TM/Landsat 5 e ETM+/Landsat 7

Para validar o mapeamento das áreas queimadas realizado com as imagens MODIS, foram utilizadas imagens dos sensores TM e ETM+ a bordo dos satélites Landsat 5 e Landsat 7, respectivamente, que apresentam resolução espacial de 30 metros e resolução temporal de 16 dias. O sensor TM possui sete bandas espectrais nas regiões do visível, infravermelho próximo, infravermelho médio (30 metros) e infravermelho termal (120 metros) do EEM; o sensor ETM+ possui as mesmas características do TM, com o destaque de uma banda pancromática de 15 metros e a banda do infravermelho termal com 60 metros. A escolha das cenas utilizadas na validação foi realizada primeiramente a partir de um sorteio aleatório. Posteriormente, todas as cenas que apresentavam queimadas sem a presença de nuvens foram adquiridas, totalizando 71 imagens. A **Tabela 1** mostra todas as cenas utilizadas para a validação a partir do sorteio.

Tabela 1 - Sorteio aleatório das cenas TM/ETM+ utilizadas para validação do mapeamento das áreas queimadas nas imagens MODIS.

| Órbita/Ponto | Anos sorteados aleatoriamente | Datas disponíveis |
|---------------------|--------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------|
| 001/67 | 2002, 2003 | 19/08/02, 06/10/02, 14/08/03, 15/09/03 |
| 229/69 | 2003, 2004 | 11/08/03, 27/08/03, 12/09/03, 14/10/03, 28/07/04, 13/08/04, 29/08/04, 14/09/04 |
| 230/68 | 2000, 2008 | 10/09/00, 12/10/00, 25/08/00, 26/09/00, 15/08/08, 31/08/08, 16/09/08, 02/10/08 |
| 230/69 | 2005, 2010 | 22/07/05, 07/08/05, 23/08/05, 24/09/05, 21/08/10, 06/09/10 |
| 231/66 | 2007, 2011 | 20/08/07, 05/09/07, 15/08/11, 16/09/11 |
| 231/67 | 2005, 2008 | 14/08/05, 15/09/05, 01/10/05, 09/10/08, 23/09/08 |
| 231/68 | 2002, 2004 | 15/09/02, 01/10/02, 11/08/04, 12/09/04, 28/09/04 |
| 231/69 | 2009, 2011 | 09/08/09, 26/09/09, 12/10/09, 15/08/11, 16/09/11 |
| 232/66 | 2004, 2006 | 02/08/04, 18/08/04, 24/08/06, 25/09/06 |
| 232/67 | 2006 | 24/08/06, 12/11/06 |
| 232/68 | 2000, 2001 | 08/09/00, 23/08/00, 24/09/00, 10/08/01, 29/10/01 |
| 232/69 | 2001, 2009 | 10/08/01, 29/10/01, 01/09/09, 17/09/09 |
| 233/66 | 2005, 2008 | 12/08/05, 28/08/05, 20/08/08 |
| 233/67 | 2009 | 08/09/09, 23/08/09, 10/10/09 |
| 233/68 | 2007 | 01/07/07, 18/08/07, 03/09/07, 19/09/07, 05/10/07 |

5.2.3. Dados Auxiliares

Para analisar as ocorrências das queimadas em áreas de desmatamento recente foram utilizados os dados do Programa do Cálculo do Desflorestamento da Amazônia (PRODES), elaborado pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) com o intuito de medir as taxas anuais de corte raso da floresta Amazônica superior a 6,25 hectares, entendendo-se corte raso como a remoção completa da cobertura florestal em um curto intervalo de tempo (INPE, 2008). Os mapeamentos sistemáticos das áreas desmatadas na região Amazônica foram iniciados em 1988, sendo que nessa época a estimativa das áreas era realizada de forma analógica, a partir da interpretação visual das imagens impressas em papel fotográfico, processo que passou a ser realizado de forma digital a partir do ano 2003 (<http://www.obt.inpe.br/prodes/>).

Os mapeamentos são realizados com a utilização de imagens do sensor TM, sendo o processo realizado pela aplicação do Modelo Linear de Mistura Espectral (MLME), seguido de segmentação e aplicação da classificação não supervisionada com o ISOSEG, de forma que os novos desmatamentos detectados para os anos subsequentes são denominados de incrementos. Com o uso das imagens originais em composição colorida é realizada a edição visual das imagens classificadas por um fotointérprete experiente, resultando em mapas digitais por órbita-ponto e mosaicos por Estado. Estes mapas são disponibilizados na Internet, além de planilhas com informações detalhadas.

Para analisar e verificar os impactos na vegetação original a partir do uso da terra atualizado foi utilizado o mapa de vegetação do IBGE (2004) e o mapa de uso da terra do IBGE (2012). O mapa de vegetação do IBGE, na escala 1:5.000.000, representa uma provável reconstituição dos tipos de vegetação que revestiam o território brasileiro na época do descobrimento, originado em 1993. A atualização em 2004 foi realizada com base em interpretações em imagens do sensor TM, pesquisas bibliográficas e de campo. Estes dados foram obtidos em formato *shapefile* no site http://www.ibge.gov.br/home/geociencias/default_prod.shtm#REC_NAT.

O mapa de uso da terra do IBGE, em escala 1:1.000.000, foi elaborado a partir da interpretação de imagens do sensor TM para o ano de 2011. A elaboração foi originada a partir de um Sistema de Classificação de Uso da Terra (SCUT), que possibilita a representação da realidade a partir do uso de imagens de satélite como fonte de primeira informação, aliadas com trabalhos de campo, entrevistas, dados estatísticos e literatura disponível. Este mapa foi obtido em formato *shapefile* de ftp://geofp.ibge.gov.br/mapas_tematicos/uso_da_terra/unidades_federacao/shape/RO/.

A ocorrência da precipitação na área de estudo também foi analisada com base nos dados do sensor *Tropical Rainfall Measuring Mission* (TRMM). Os dados do TRMM são estimados a partir de um algoritmo que combina múltiplos sensores originando dados globais de precipitação. Para este trabalho os valores de precipitação foram extraídos do produto 3B42, que possui resolução temporal de 3 horas, cobertura geográfica de 50°S a 50°N e resolução espacial de 0.25°x0.25° (disponíveis em <http://mirador.gsfc.nasa.gov/>).

5.2.4. Dados de entrada do modelo climático RegCM4

O RegCM4 é um modelo climático regional de área limitada, fator que permite o aumento da resolução espacial e, portanto, uma melhor representação dos fenômenos atmosféricos. Ele é baseado no modelo numérico *Mesoscale Model* versão 4 (MM4), desenvolvido por Dickinson et al. (1989) e Giorgi (1989). Com o passar do tempo as versões subsequentes do modelo foram sendo aprimoradas, como, por exemplo, as parametrizações físicas, a representação dos processos da superfície, a parametrização da convecção, entre outros itens. Antes do modelo ser processado algumas informações são necessárias, como as condições iniciais e as de contorno lateral provenientes de modelos globais, as informações de temperatura da superfície do mar (TSM), o uso e cobertura da terra, a altimetria, o índice de área foliar, o tipo funcional da vegetação, a textura e a cor dos solos, dentre outras.

O RegCM4 permite o acoplamento de dois esquemas de superfície, o *Biosphere-Atmosphere Transfer Scheme* (BATS), desenvolvido por Dickinson et al. (1986) e o *Community Land Model* (CLM), desenvolvido por Oleson (2004), além de outros parâmetros como esquemas de convecção de cúmulos, umidade, condições iniciais e de contorno lateral, fluxos oceânicos e gradiente de pressão.

O esquema de superfície implementado no RegCM4 utilizado neste trabalho foi o BATS, que possui 20 classes de uso e cobertura da terra, apresenta as interações entre a superfície e a atmosfera e simula a influência da vegetação e umidade do solo nas trocas de momentum, energia e vapor d'água. Neste modelo é considerado a textura e a cor dos solos, sendo que a camada de neve, solo e raízes é ponderada, em que as parametrizações incluem a previsão do conteúdo de água no solo a partir da precipitação, do derretimento da neve, da condensação de umidade no dossel, da evapotranspiração, do escoamento superficial e da infiltração na camada de raízes (REGCM TEAM, 2010). Uma das limitações do BATS decorre da utilização de parâmetros físicos estáticos para a vegetação, assim, as variações do vigor vegetativo e do ciclo fenológico das espécies vegetais não são contabilizadas.

As classes de uso e cobertura da terra utilizadas pelo BATS são originárias dos dados do *Global Land Cover Characterization* (GLCC), gerado a partir da utilização de dados

orbitais do sensor AVHRR/NOAA com resolução espacial de 1 km para o ano de 1992. Os mapas para os anos de 2000 a 2011 foram atualizados a partir do produto de uso e cobertura da terra do sensor MODIS (MCD12Q1, 500 metros, anual) para o Estado de Rondônia, sendo que o esquema de classificação utilizado foi baseado no *International Geosphere-Biosphere Programme* (IGBP), que separa a superfície em 17 classes, conforme a **Tabela 2**. Nesta atualização, a classe 8, referente ao deserto, foi substituída pela classe queimada.

Tabela 2. Atualização das classes de uso e cobertura da terra do IGBP para as classes do BATS.

| Classe | Classificação do IGBP | Classificação utilizada pelo BATS |
|---------------|----------------------------------------|------------------------------------------|
| 1 | Hidrografia | Água interior / Oceano (14 e 15) |
| 2 | Floresta de coníferas | Floresta de coníferas (3) |
| 3 | Floresta Ombrófila Densa | Floresta Ombrófila Densa (6) |
| 4 | Floresta de coníferas decidual | Floresta de coníferas decidual (4) |
| 5 | Floresta Estacional Decidual | Floresta Estacional Decidual (5) |
| 6 | Mosaico de Floresta e pastagem | Mosaico de Floresta e pastagem (18) |
| 7 | Vegetação arbustiva fechada | Vegetação arbustiva decidual (17) |
| 8 | Vegetação arbustiva aberta | Semideserto (11) |
| 9 | Savana lenhosa | Mosaico de Floresta e pastagem (18) |
| 10 | Savana | Mosaico de pastagem e floresta (19) |
| 11 | Gramíneas | Gramíneas (2) |
| 12 | Áreas alagadas permanentemente | Região Pantanosa / Alagada (13) |
| 13 | Predominância Agrícola | Predominância Agrícola (1) |
| 14 | Áreas Urbanas | Deserto (8) |
| 15 | Mosaico de Áreas Agrícolas / Vegetação | Predominância Agrícola (1) |
| 16 | Gelo / Glaciar | Gelo / Glaciar (12) |
| 17 | Solo exposto ou vegetação rala | Deserto (8) |

O produto que fornece as informações das condições iniciais e de contorno lateral utilizado neste trabalho constitui as reanálises do *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts* (ECMWF) denominado ERA-Interim. Esses dados estão disponíveis desde 1989, possuem resolução espacial de 1,5° (aproximadamente 170x170km) na faixa tropical, 37 níveis de pressão e fornecem informações de diversas variáveis meteorológicas a cada 6 horas (DEE et al., 2011).

5.3. Fluxograma da Metodologia

A Figura 11 mostra o fluxograma da metodologia, dividido em quatro módulos principais. No módulo I foi realizado o sorteio aleatório das cenas dos sensores TM/ETM+ para o mapeamento das áreas queimadas, originados da segmentação e edição manual, utilizadas como referência para validar os mapeamentos das imagens MODIS, originadas da aplicação do MLME, segmentação das imagens fração sombra e edição manual (módulo II). No módulo III foram adquiridos diversos produtos que foram utilizados para analisar a ocorrência das queimadas com o uso da terra, vegetação original, áreas de desmatamento recente e precipitação.

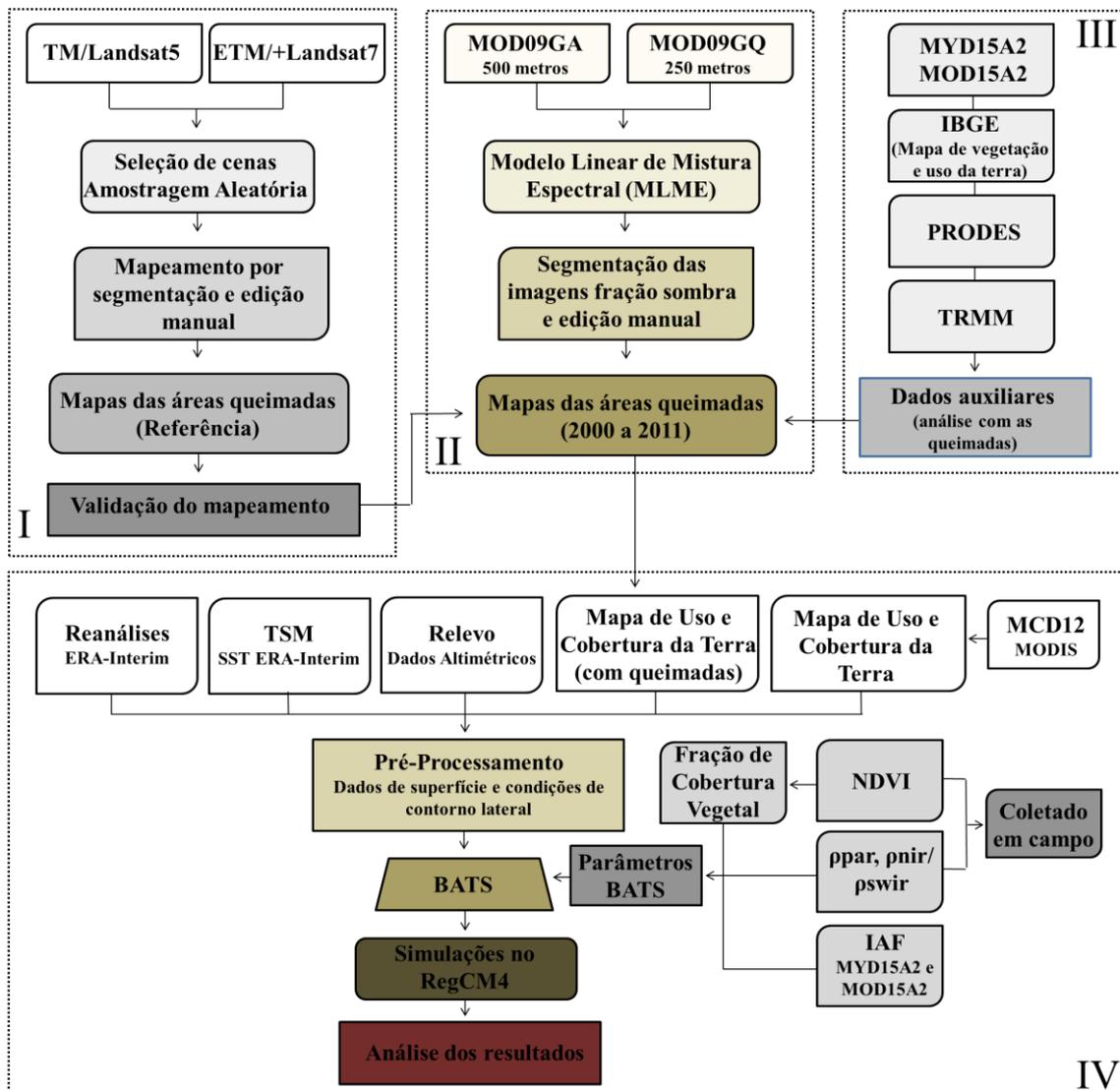


Figura 11 - Fluxograma dos procedimentos metodológicos divididos em quatro módulos principais.

Por fim, no módulo IV foi realizada a modelagem no RegCM4 para a análise dos impactos das queimadas em parâmetros físicos da superfície. Primeiramente foi utilizado o mapa de uso e cobertura da terra atualizado do produto MCD12 do sensor MODIS, gerando dois tipos de mapas (uso da terra original e uso da terra atualizado com as queimadas) para analisar as diferenças na modelagem com os dois tipos de usos. Outros dados de entrada no modelo foram adquiridos em campo, como o NDVI, que gerou a fração de cobertura vegetal, as reflectâncias ρ_{PAR} , ρ_{NIR} e ρ_{SWIR} , assim como os dados do índice de área foliar provenientes do produto MOD15A2 e MYD15A2 do sensor MODIS. Assim, foram definidos os dados das condições iniciais e de contorno lateral (ERA-Interim) assim como o modelo de superfície (BATS), e após a entrada de todos os dados, o modelo foi rodado para todos os anos com os dois tipos de usos (com e sem queimada).

5.4. Metodologia

5.4.1. Processamento dos dados MOD09

Os produtos MOD09GA e MOD09GQ estão em formato *Hierarchical Data Format* (HDF), portanto, após o download de todos os dados, foi realizada a conversão dos mesmos para o formato Geotiff a partir da ferramenta *MODIS Reprojection Tool* (MRT), onde foram realizados os mosaicos dos 4 tiles que englobam o Estado de Rondônia e, posteriormente, foi gerado o recorte da área de estudo, originando imagens com 7 bandas e 250 metros de resolução espacial. Todos os dados foram adquiridos de <http://e4ftl01.cr.usgs.gov/>.

5.4.2. Aplicação do MLME

Existe uma grande variedade de alvos na resposta espectral que compõe cada *pixel*, no qual o valor digital possuirá informações sobre a proporção da mistura entre cada componente pura, e a resposta espectral desses alvos será influenciada pela resolução espacial de cada sensor (SHIMABUKURO; SMITH, 1991; TEIXEIRA, 2004).

Portanto, uma das técnicas utilizadas para identificar áreas queimadas ocorre a partir do uso do MLME, que consiste na utilização de uma relação linear para representar a mistura espectral dos alvos em cada *pixel*. Assim, a resposta espectral dos *pixels* em qualquer comprimento de onda pode ser considerada como uma combinação linear de cada componente da mistura (SHIMABUKURO; SMITH, 1991).

Deste modo, ao analisar uma área queimada, os *pixels* puros (*endmembers*) a serem utilizados como dados de entrada serão selecionados diretamente na imagem a partir de *pixels* que possuam resposta espectral mais próxima da curva teórica esperada para alvos puros. Os *endmembers* geralmente utilizados para cada conjunto de dados referem-se às imagens fração vegetação, solo e sombra, conforme **Equação 6**.

$$\rho_i = a * \text{veg}_i + b * \text{solo}_i + c * \text{sombra}_i + e_i \quad (6)$$

em que ρ_i é a resposta da reflectância do *pixel* na banda i ; a , b e c são as proporções de vegetação, solo e sombra, respectivamente; veg_i , solo_i e sombra_i são as respostas espectrais das componentes vegetação, solo e sombra (ou água), respectivamente; e e_i é o erro na banda i .

Sendo assim, o MLME foi aplicado nas imagens MODIS com o intuito de gerar a fração sombra, que realça os alvos de baixa refletância representados pelas áreas queimadas, reduzindo, desta forma, o volume de dados analisados. A extração dos *endmembers* foi realizada no programa *Environment for Visualizing Images* (ENVI) e, posteriormente, o MLME foi utilizado a partir de um *script* criado no *Interactive Data Language* (IDL), em que o processamento foi aplicado para todas as 835 imagens MODIS ao mesmo tempo e utilizando os mesmos *endmembers* coletados.

5.4.3. Mapeamento das Áreas Queimadas nas Imagens do TM e ETM+

Primeiramente, o mapeamento das áreas queimadas foi realizado em imagens dos sensores TM e ETM+, que foram utilizados neste trabalho como dados de referência para validar o mapeamento realizado nas imagens do sensor MODIS. Depois de adquirir todas as imagens, as mesmas foram inseridas no Sistema de Processamento de Informações Georreferenciadas (SPRING), em que todas as imagens foram geometricamente corrigidas a partir do modelo polinomial de primeiro grau e interpolador vizinho mais próximo. As imagens foram georreferenciadas a partir da base Geocover disponibilizada pela *National Aeronautics and Space Administration* (NASA), originados de imagens Landsat que foram submetidos a procedimentos de ortorretificação para minimizar o deslocamento nas imagens devido ao relevo.

Os mapeamentos foram realizados a partir da segmentação das imagens com o intuito de gerar polígonos espectralmente homogêneos. O próximo passo consistiu na seleção de limiares de similaridade (limiar mínimo em que duas regiões são consideradas similares e agrupadas em um único polígono) e área (área mínima em número de *pixels* para que uma região seja individualizada). Os valores de limiares escolhidos foram 12 para similaridade e 8 para área, baseados na complexidade da forma, na dimensão e nos valores dos desvios das médias dos níveis de cinza apresentados pelas cicatrizes de queimadas. Após a segmentação, os polígonos de áreas queimadas foram agrupados e associados em uma categoria temática, e posteriormente uma edição manual foi realizada com o intuito de minimizar possíveis erros de inclusão e omissão decorrentes da classificação, permitindo um mapeamento com maior acurácia.

5.4.4. Mapeamento das Áreas Queimadas nas Imagens do Sensor MODIS

Após a aplicação do MLME no ENVI, todas as imagens fração sombra resultantes foram inseridas no SPRING e segmentadas. Os limiares utilizados foram 12 para a similaridade e 20 para a área. Os procedimentos foram os mesmos realizados nas imagens dos sensores TM e ETM+, em que a partir dos polígonos originados na segmentação, foi realizada a edição topológica, onde foram atribuídos os polígonos das áreas queimadas às suas respectivas classes. A etapa final envolveu a edição manual do mapeamento com a finalidade de corrigir eventuais erros decorrentes da classificação.

5.4.5. Análise dos polígonos das áreas queimadas com os dados auxiliares

As áreas queimadas de 2000 a 2011 em Rondônia foram analisadas em conjunto com a vegetação original do Estado, o uso da terra atual e com as áreas de desmatamento recente. Portanto, os mapas de vegetação e uso da terra do IBGE em formato *shapefile* foram inseridos no SPRING e suas respectivas classes associadas à uma categoria temática, que apresentavam diversos planos de informação contendo o nome de cada classe dos mapas originais. Os dados do PRODES, em formato *shapefile*, continham dados temáticos classificados na representação vetorial, e assim como os mapas do IBGE, também foram inseridos no SPRING e sua classe associada a uma categoria temática. Foi realizada a compatibilização a partir da reamostragem de todos os dados para a mesma resolução das imagens MODIS e, posteriormente, foi realizada a tabulação cruzada para a análise dos

resultados.

5.4.6. Validação das Áreas Queimadas

Como exposto anteriormente, a validação do mapeamento das áreas queimadas nas imagens MODIS foi realizada a partir do mapeamento das áreas queimadas em imagens referência, compostas pelos sensores TM/ETM+, que apresentam melhor resolução espacial. Assim, a comparação foi realizada para as mesmas datas em ambos os produtos.

Devido à diferença na resolução espacial dos dois produtos, que origina um deslocamento geográfico entre os mapas, as avaliações foram realizadas não considerando a forma, o posicionamento e a intersecção das áreas queimadas, mas sim a estimativa da área. Assim, foi criada uma grade de 5 km x 5 km (exemplificado na **Figura 12**) para comparar a área queimada estimada por ambos os produtos. Os mapeamentos nas imagens TM/ETM+ e MODIS foram convertidos para ASCII, contendo informações sobre a latitude e a longitude do polígono central e a sua respectiva área, e o passo seguinte consistiu na aplicação de um algoritmo que percorreu a grade e somou todas as áreas incluídas dentro desta célula, de acordo com a **Equação 7**.

$$Grid_{(lon,lat,MODIS,TM)} = \sum_{a=-\alpha}^{\alpha} \sum_{b=-\beta}^{\beta} (\chi(a,b) * T(lon+a, lat+b) \cap \chi(a,b) * M(lon+a, lat+b)) \quad (7)$$

Em que $\chi(a,b)$ representa uma máscara de convolução de tamanho M x N (linhas e colunas); T representa a área queimada estimada pelo TM/ETM+; M representa a área queimada estimada pelo MODIS; GRID é a grade resultante definida para todos os pontos em que a máscara de tamanho M x N sobrepõe inteiramente a imagem ($lon \in [\alpha, M - \alpha]$, $lat \in [\beta, N - \beta]$).

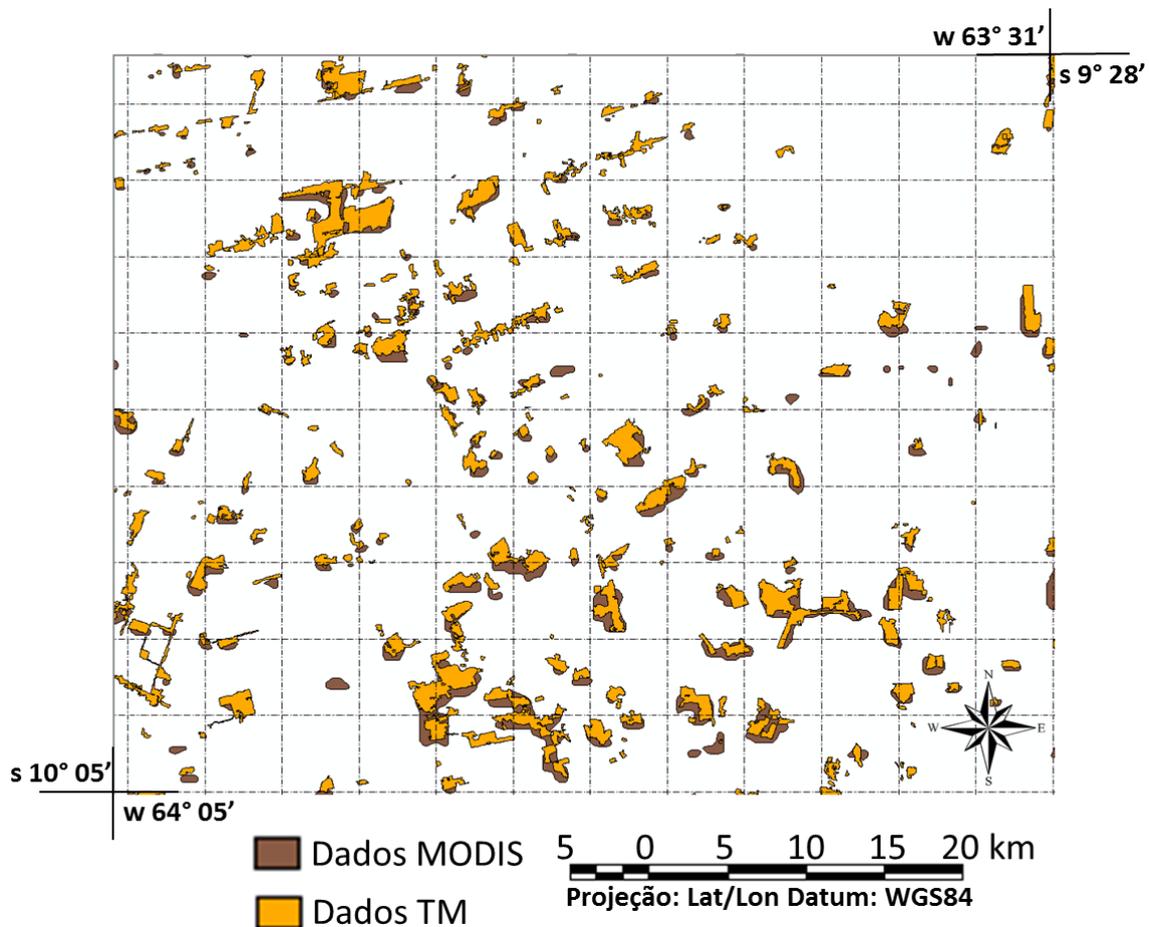


Figura 12 - Grade amostral com células de 5 km x 5 km utilizada na comparação dos mapeamentos realizados em imagens MODIS (em marrom) e TM/ETM+ (em laranja). Este resultado refere-se à órbita/ponto 232/67 do sensor TM do dia 25 de setembro de 2006.

Posteriormente foi realizada uma regressão linear, devido a não existência de uma relação de dependência entre as variáveis. As áreas queimadas mapeadas em imagens TM/ETM+ foram escolhidas como variáveis explicativas e as áreas queimadas mapeadas em imagens MODIS foram escolhidas como variáveis dependentes. Os resultados das regressões foram significativos ao nível $p < 0,05$ do teste *T Student*.

5.4.7. Geração dos dados de entrada utilizados pelo RegCM4

Uma vez que o modelo RegCM4 utiliza as informações do albedo da superfície, as reflectâncias ρ_{PAR} , ρ_{NIR} e ρ_{SWIR} coletadas em campo em áreas queimadas foram integradas em seus respectivos comprimentos de ondas, conforme equação 8 e 9:

$$\rho_{PAR} = \int_{400\text{ nm}}^{700\text{ nm}} FR_{\lambda} d\lambda \quad (8)$$

$$\rho_{nir+swir} = \int_{701\text{ nm}}^{2400\text{ nm}} FR_{\lambda} d\lambda \quad (9)$$

em que FR_{λ} representa o fator de reflectância espectral. Ressalta-se que na estimativa dos valores de $\rho_{nir+swir}$, eliminaram-se os comprimentos de onda referentes às bandas de absorção do vapor d'água (1350 a 1450 nm e 1800 a 1960 nm).

Outro parâmetro utilizado pelo modelo consiste da fração de cobertura vegetal (FCV), estimada a partir da relação entre o NDVI para superfícies vegetadas e para o solo exposto (CARLSON; RIPLEY, 1997). O NDVI pode ser estimado pela seguinte equação:

$$NDVI = \frac{\rho_{nir} - \rho_{red}}{\rho_{nir} + \rho_{red}} \quad (10)$$

em que ρ_{nir} é a reflectância no infravermelho próximo e ρ_{red} é a reflectância na banda do vermelho. Assim, a partir dos dados coletados em campo, foram estimadas as reflectâncias *in-band* ($\rho_{in-band}$) para as bandas referentes à faixa do espectro eletromagnético do vermelho (620-670 nm) e do infravermelho próximo (841-876 nm) para o sensor MODIS, considerando na estimativa a curva de sensibilidade espectral para cada banda. Neste contexto, a FCV pode ser calculada a partir de (CARLSON; RIPLEY, 1997):

$$FCV = \frac{NDVI - NDVI_s}{NDVI_v - NDVI_s} \quad (11)$$

em que o NDVI é estimado a partir dos dados de FR coletados em campo ($NDVI_s$ representa o valor do NDVI para o solo e $NDVI_v$ representa o valor do NDVI para a vegetação, 0,05 e 0,90 respectivamente), e convertidos para a $\rho_{in-band}$. O índice de área foliar foi obtido dos produtos MYD15A2 e MOD15A2 no ENVI a partir de um sorteio aleatório em áreas queimadas. Nestas áreas traçou-se um perfil temporal dos valores máximos e mínimos extraídos para cada ponto sorteado, gerando ao final a média dos valores.

5.4.8. Simulações com o RegCM4

O modelo RegCM4 foi executado com o uso e cobertura da terra (UCT) atualizado do produto MCD12A1 para cada ano (2000-2011) e com o produto MCD12A1 contendo as informações das queimadas. Desta forma, para cada ano, foram realizadas duas simulações: I) com o dado de UCT proveniente do produto MCD12A1 sem queimadas (denominada neste trabalho de **controle**); II) com o dado de UCT do MCD12A1 contendo as áreas queimadas do respectivo ano (denominada neste trabalho de **queimada**). Os mapas de UCT para os anos de 2000 a 2011 atualizados do produto MCD12A1 do sensor MODIS podem ser visualizados nas **Figuras 13 e 14**.

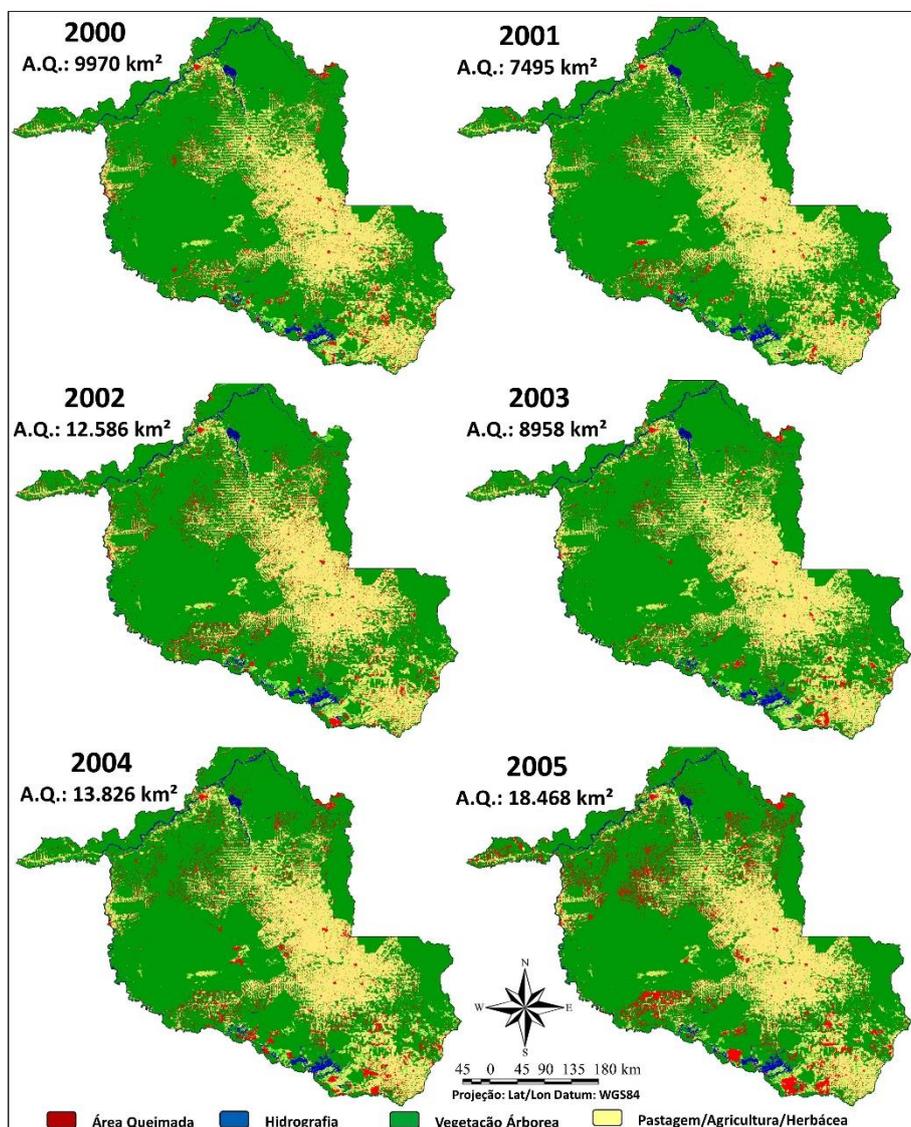


Figura 13 – Mapas do uso e cobertura da terra atualizados do produto MCD12A1 para os anos de 2000 a 2005.

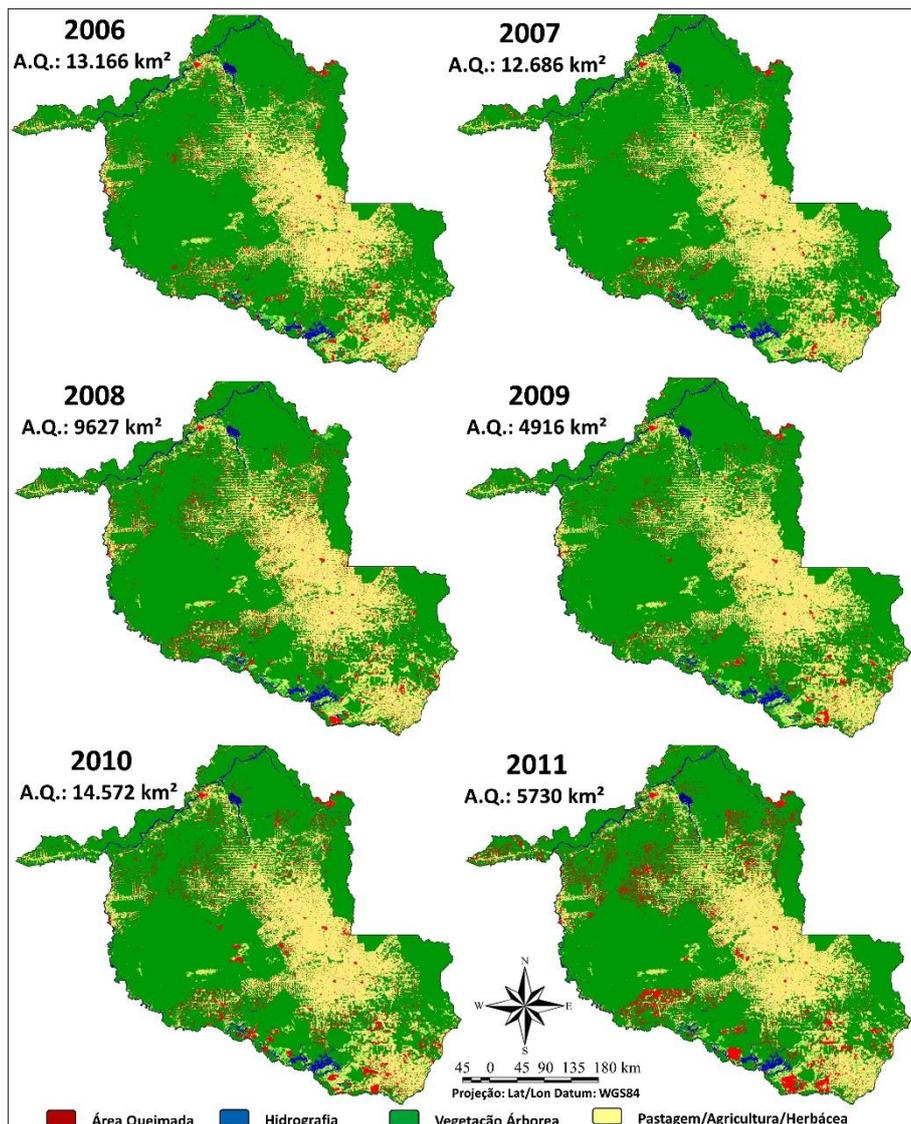


Figura 14 – Mapas do uso e cobertura da terra atualizados do produto MCD12A1 para os anos de 2006 a 2011.

A **Tabela 3** mostra os parâmetros utilizados para as simulações no RegCM4 com os mapas de UCT sem as queimadas (coluna da esquerda) e com os parâmetros modificados para as simulações com as áreas queimadas (coluna da direita). Os parâmetros Fração de Cobertura Vegetal e Reflectâncias ρ_{PAR} , ρ_{NIR} e ρ_{SWIR} , utilizados para a simulação com as queimadas, foram coletados em campo e referem-se às médias dos valores para as simulações do mês de agosto (queimada recente - α), setembro (queimada em estágio inicial de regeneração - β) e outubro (queimada em estágio avançado de regeneração - γ). Esses dados, em conjunto com os valores mínimos (θ) e máximos (ϑ) do índice de área foliar obtido dos produtos MYD15A2 e MOD15A2, foram modificados em uma tabela no modelo RegCM4.

Tabela 3. Parâmetros utilizados para as simulações controle no RegCM4 com os mapas de UCT sem as queimadas (coluna da esquerda) e com as áreas queimadas (coluna da direita).

| Parâmetros | Simulação controle | Simulação queimada |
|---------------------------------------------------------------------------|--------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Mapas de UCT | Atualizados do produto MCD12A1 | Atualizados do produto MCD12A1 com a substituição da classe 8 (deserto) pela classe queimada |
| Fração de cobertura vegetal | 0,8 | 0,02 ^a ; 0,40 ^b ; 0,42 ^γ |
| Reflectância ρ_{PAR} | 0,1 | 0,04 ^a ; 0,05 ^b ; 0,06 ^γ |
| Reflectância $\rho_{NIR/}$ ρ_{SWIR} | 0,3 | 0,07 ^a ; 0,17 ^b ; 0,23 ^γ |
| Índice de área foliar | 0,5; 2,0 | 0,1 ^{o a} e 1,0 ^{g a} ; 0,3 ^{o a} e 1,5 ^{g a} ; 0,7 ^{o a} e 2,0 ^{g a} ; |

Para a escolha do período a ser simulado, foi analisada a permanência da cicatriz de queimada no solo a partir de um sorteio aleatório em 12 pontos que continham queimadas nas imagens para cada ano, totalizando 144 áreas analisadas. Assim, a partir dessa análise, percebeu-se que a permanência da cicatriz de queimada no solo em Rondônia variou de 20 dias até quatro meses, com uma média de três meses de permanência. A **Figura 15** mostra alguns exemplos da duração das cicatrizes. Na **Figura 15a** e **15b** a queimada ocorreu em área de pastagem e permaneceu por 20 dias no solo; na **Figura 15c** e **15d** a queimada ocorreu em área de floresta e permaneceu por um mês; na **Figura 15e** e **15f** a queimada ocorreu também em área de floresta e permaneceu por três meses no solo; e na **Figura 15g** e **15h** a queimada ocorreu em área de pastagem e permaneceu por quatro meses. Assim, a permanência da cicatriz no solo varia e pode estar relacionada à diversos fatores como o tipo de vegetação, aspectos climáticos e intensidade da queimada.

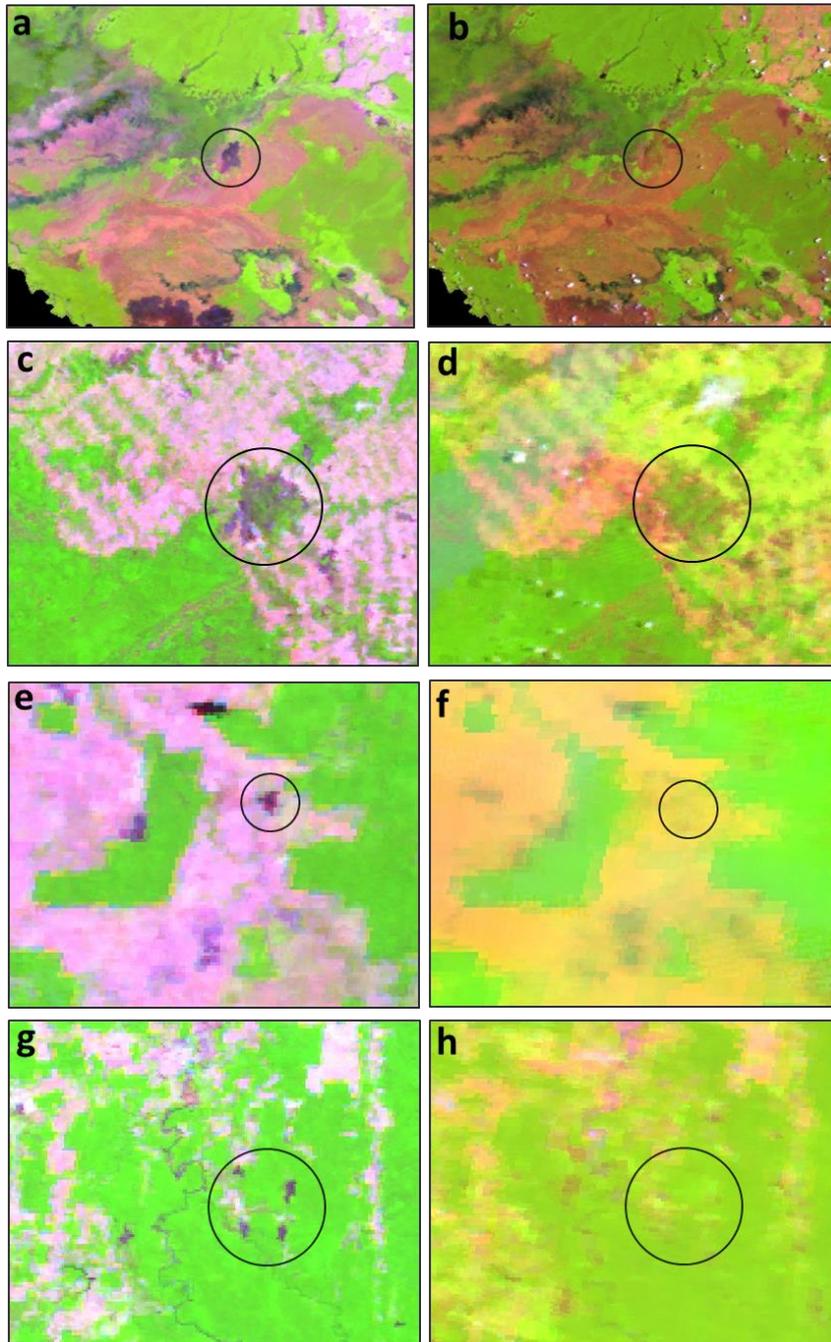


Figura 15 - Permanência da cicatriz de queimada em Rondônia. Queimada em área de pastagem e permanência por 20 dias no solo (a, b); queimada em área de floresta e permanência por um mês no solo (c, d); queimada em área de pastagem e permanência por quatro meses no solo (e, f); e queimada em área de floresta e permanência por três meses no solo (g, h).

Desta forma, considerando o tempo médio de permanência da cicatriz de queimada, foi escolhido um período de três meses por ano de simulações com o RegCM4, representados pelos meses de agosto, setembro e outubro, que apresentam as maiores ocorrências de queimadas durante o ano na área de estudo. Em média, para cada dia de simulação o custo

operacional foi de 24 horas, e ao total foram necessários seis meses para finalizar as simulações controle e queimada. Os parâmetros iniciais e as configurações do modelo foram as seguintes: I) início da simulação no dia 01 de julho, final da simulação no dia 01 de novembro para o período de 2000 a 2011; II) 224 pontos na coordenada x (longitude), 224 pontos na coordenada y (latitude) e 18 níveis atmosféricos em z (altitude). A resolução espacial considerada foi de 5 km e o ponto central da grade foi definido em 11°S e 63°W.

Ainda, para as configurações adicionais do modelo, empregaram-se as configurações mais adotadas na literatura: I) esquema de condição de contorno lateral a partir técnica de relaxamento exponencial; II) esquema de condições iniciais proposto por Holtslag et al., (1990); III) esquema de fechamento na parametrização cúmulos desenvolvido por Fritsch e Chappell (1980); IV) esquema de convecção cúmulos desenvolvido por Emmanuel (1991); V) dados de entrada provenientes do ERA-Interim; e VI) esquema de gradiente de pressão a partir da dedução hidrostática com perturbação da temperatura.

Ainda, para as configurações adicionais do modelo, empregaram-se as configurações mais adotadas na literatura: I) esquema de condições iniciais proposto por Holtslag et al. (1990), descrito na Equação 12; II) esquema de convecção cúmulos desenvolvido por Grell et al. (1994), descrito na Equação 13; III) Momentum horizontal proposto por Grell et al. (1994), descrito nas Equações 14 e 15; e IV) Dados de entrada que são assimilados no modelo provenientes do ERA-Interim.

$$F_c = -kw_t z \left(1 - \frac{z}{\frac{R_{icr}[u(h)^2 + v(h)^2]}{(g/\theta_s)[\theta_v(h) - \theta_s]}} \right)^2 \left(\frac{\delta C}{\delta z} - \left(C \frac{\phi_c^0}{w_t \frac{R_{icr}[u(h)^2 + v(h)^2]}{(g/\theta_s)[\theta_v(h) - \theta_s]}} \right) \right) \quad (12)$$

Na equação 12, k representa a constante de Karman, w_t representa a velocidade turbulenta convectiva, h é a altura da camada limite planetária, C é uma constante (8,5), ϕ_c^0 representa a temperatura da superfície ou o fluxo de vapor de água, u(h) e v(h) são as componentes do vento, θ_v é a temperatura potencial virtual na altura da camada limite planetária, g é a gravidade, R_{icr} é derivado do valor crítico de Richardson, θ_s representa a temperatura próxima à superfície.

$$P^{CU} = I_1 \left(\frac{ABE'' - ABE'}{NA\Delta t} \right) (1 - \beta) \quad (13)$$

Na equação 13, I_1 representa a corrente ascendente normaliza, ABE' é a energia flutuante disponível para convecção, ABE'' é o total de energia flutuante disponível para convecção em adição à energia flutuante originada por processos não-convectivos durante determinado intervalo de tempo (Δt) e NA é a taxa de alteração de ABE em relação à massa de fluxo ascendente.

$$\frac{\delta p^* u}{\delta t} = -m^2 \left(\frac{\delta p^* uu / m}{\delta x} + \frac{\delta p^* vu / m}{\delta y} \right) - \frac{\delta p^* u \sigma}{\delta \sigma} - mp^* \left[\frac{RT_v}{(p^* + p_t / \sigma)} \frac{\delta p^*}{\delta x} + \frac{\delta \phi}{\delta x} \right] + fp^* v + F_H u + F_V u \quad (14)$$

$$\frac{\delta p^* v}{\delta t} = -m^2 \left(\frac{\delta p^* uv / m}{\delta x} + \frac{\delta p^* vv / m}{\delta y} \right) - mp^* \left[\frac{RT_v}{(p^* + p_t / \sigma)} \frac{\delta p^*}{\delta y} + \frac{\delta \phi}{\delta xy} \right] + fp^* u + F_H v + F_V v \quad (15)$$

Nas equações 14 e 15, u e v representam as componentes zonal e meridional do vento, respectivamente, T_v é a temperatura virtual, ϕ representa a altura geopotencial, f representa o efeito coriolis, R é a constante do gás para o ar seco, m é o fator de escala para a projeção adotada (Mercator), σ (coordenada sigma) = $d\sigma/dt$, F_H e F_V representam os efeitos da difusão horizontal e vertical e $p^* = p_s$ (pressão na superfície) – p_t (pressão em determinado nível).

Ao final, foram gerados diversos resultados provenientes das simulações executadas pelo RegCM4, para os experimentos determinados de controle e queimada. O impacto climático pela ocorrência das queimadas foi avaliado a partir da análise da diferença entre os dois experimentos simulados: queimada e controle. A análise foi realizada para os parâmetros do balanço de radiação de ondas curtas, balanço de radiação de ondas longas, temperatura da superfície e do ar e evapotranspiração, e a partir desses dados foi gerado o resultado do impacto no balanço de radiação na superfície.

6. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo serão abordados os resultados gerados neste trabalho, englobando a análise temporal e espacial das áreas queimadas, a validação dos mapeamentos e os impactos ocasionados nos parâmetros físicos da superfície e atmosfera proveniente da modificação no uso e cobertura da terra a partir da queima da biomassa.

6.1. Validação dos Mapeamentos nas Imagens MODIS

As **Figuras 16, 17 e 18** mostram os gráficos da validação dos mapeamentos das áreas queimadas para o Estado de Rondônia no período estudado. O eixo x mostra os valores obtidos dos mapeamentos do sensor MODIS e o eixo y mostra os valores obtidos dos mapeamentos dos sensores TM/ETM+. É possível notar que os coeficientes de determinação variam de acordo com os distintos padrões das áreas que foram queimadas e no decorrer dos anos de 2000 a 2011.

Os menores valores de R^2 variam de 0,46 a 0,58, e os maiores valores de R^2 variam de 0,86 a 0,93, representando uma média de aproximadamente 0,74. As regressões lineares foram para todos os anos estatisticamente significativas a $p < 0,05$, teste T *Student*). Fica evidente que nas áreas que apresentam cicatrizes de tamanhos pequenos a correlação linear entre os dados do TM/ETM+ e do MODIS diminuem, e apresentam R^2 variando de 68% a 76% (significante a $p < 0,05$, teste T *Student*). Nestas áreas os resultados dos mapeamentos nas imagens MODIS subestimaram os resultados no TM/ETM+ em aproximadamente 35%.

Para as cicatrizes de queimadas com tamanhos superiores 2 km² a correlação entre as áreas estimadas por ambos os sensores aumenta expressivamente, variando de 85% a 96% (significante a $p < 0,05$, teste T *Student*). Neste caso, os valores do MODIS apresentam uma superestimativa de aproximadamente 6% (em média) comparado com os dados do TM/ETM+. De acordo com Silva et al. (2005) algumas superestimativas podem ocorrer em sensores como o MODIS devido à localização de pequenas queimadas dentro de uma área queimada maior, fazendo com que toda essa área seja identificada como uma única queimada.

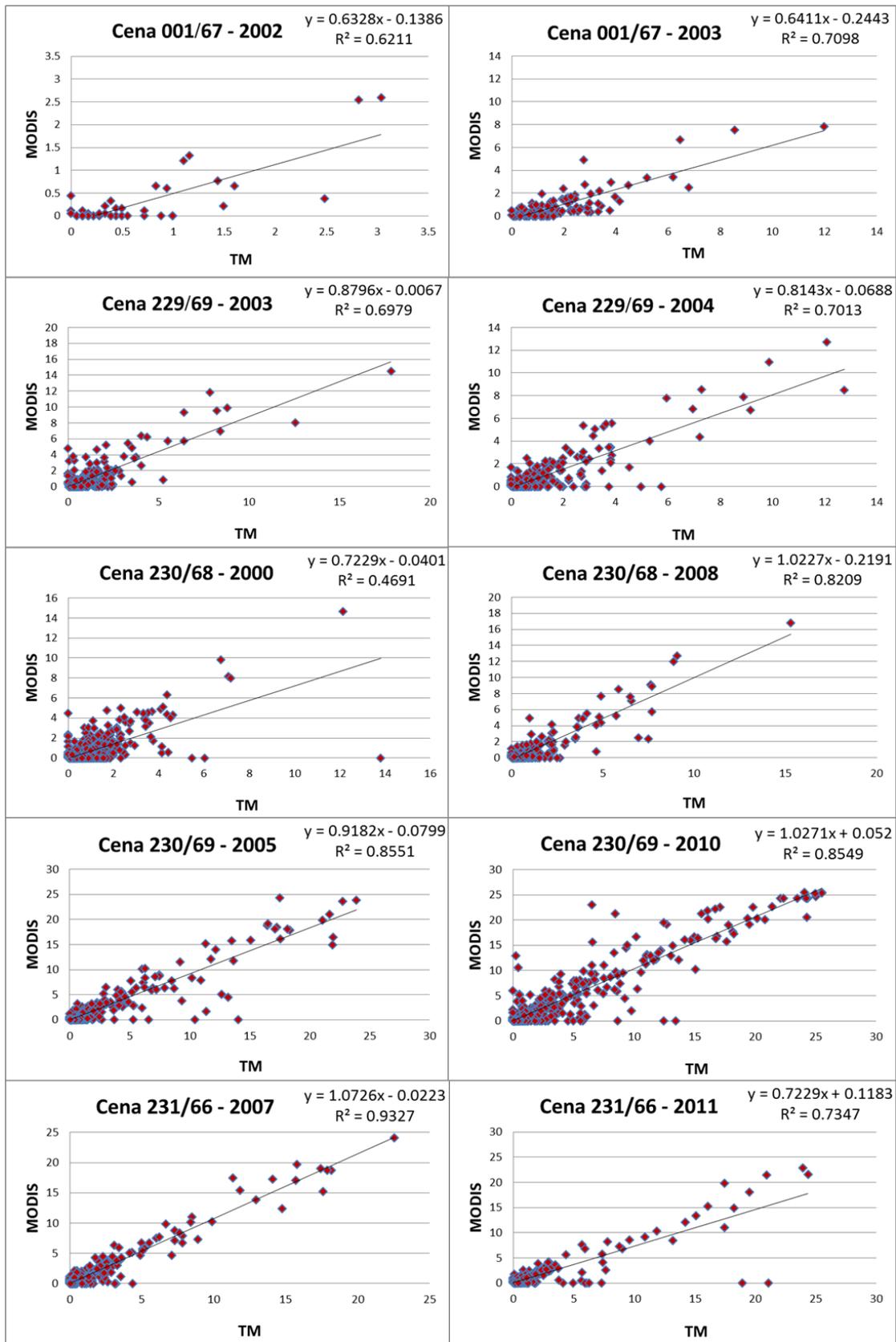


Figura 16 - Gráficos da validação dos mapeamentos das áreas queimadas em Rondônia (em km²) para as cenas 001/67 (2002 e 2003), 229/69 (2003 e 2004), 230/68 (2000 e 2008), 230/69 (2005 e 2010) e 231/66 (2007 e 2011).

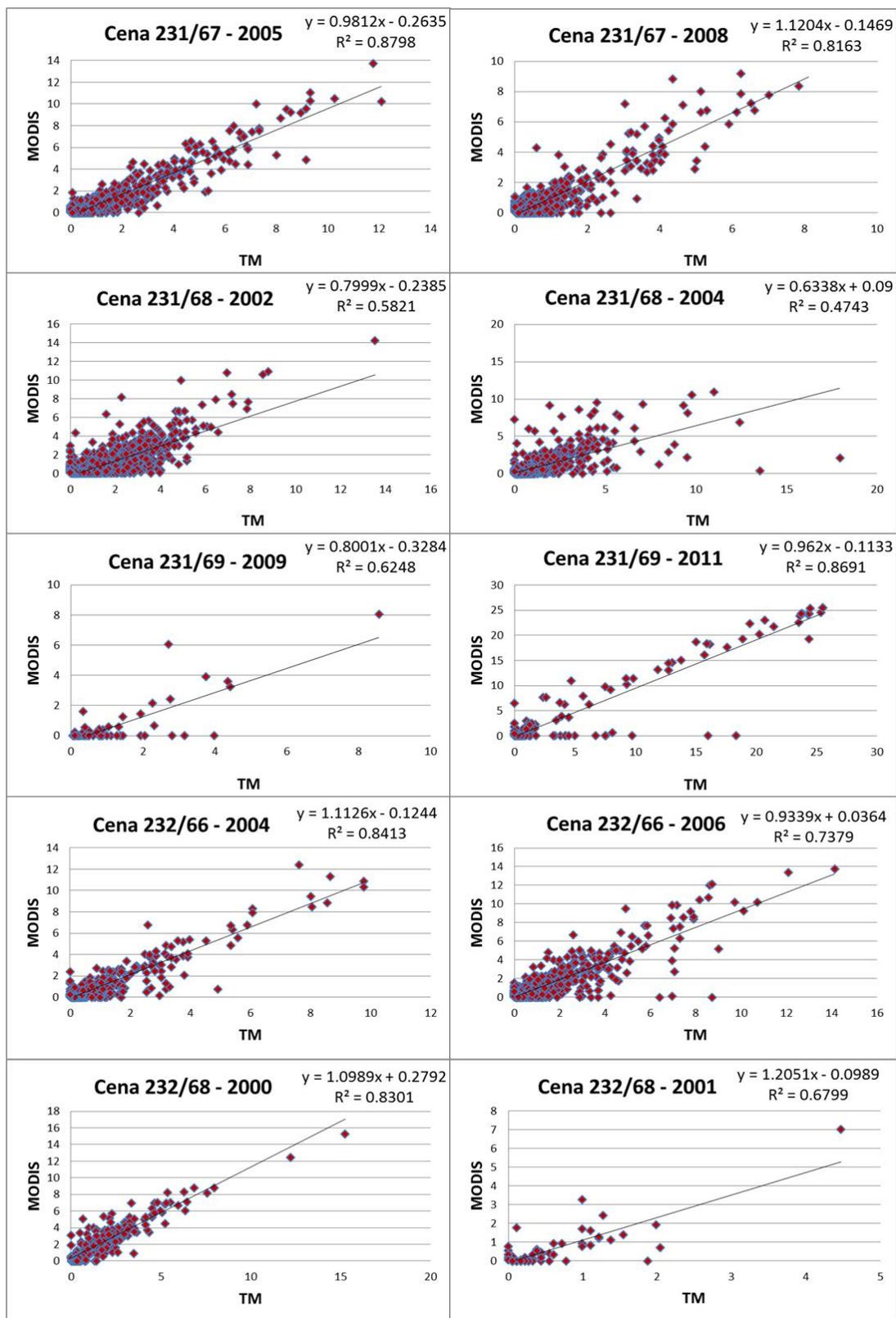


Figura 17 - Gráficos da validação dos mapeamentos das áreas queimadas em Rondônia (em km²) para as cenas 231/67 (2005 e 2008), 231/68 (2002 e 2004), 231/69 (2009 e 2011), 232/66 (2004 e 2006) e 232/68 (2000 e 2001).

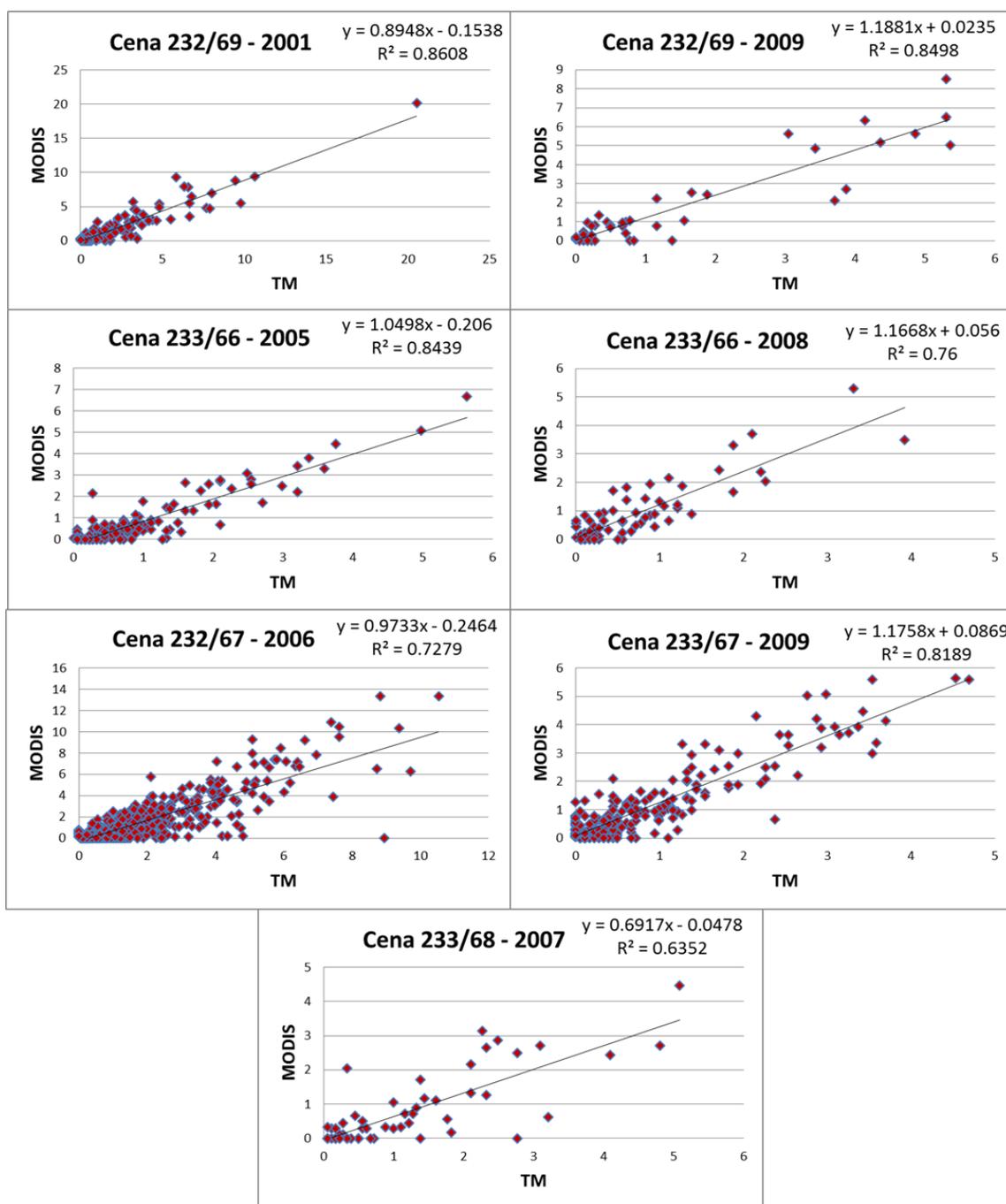
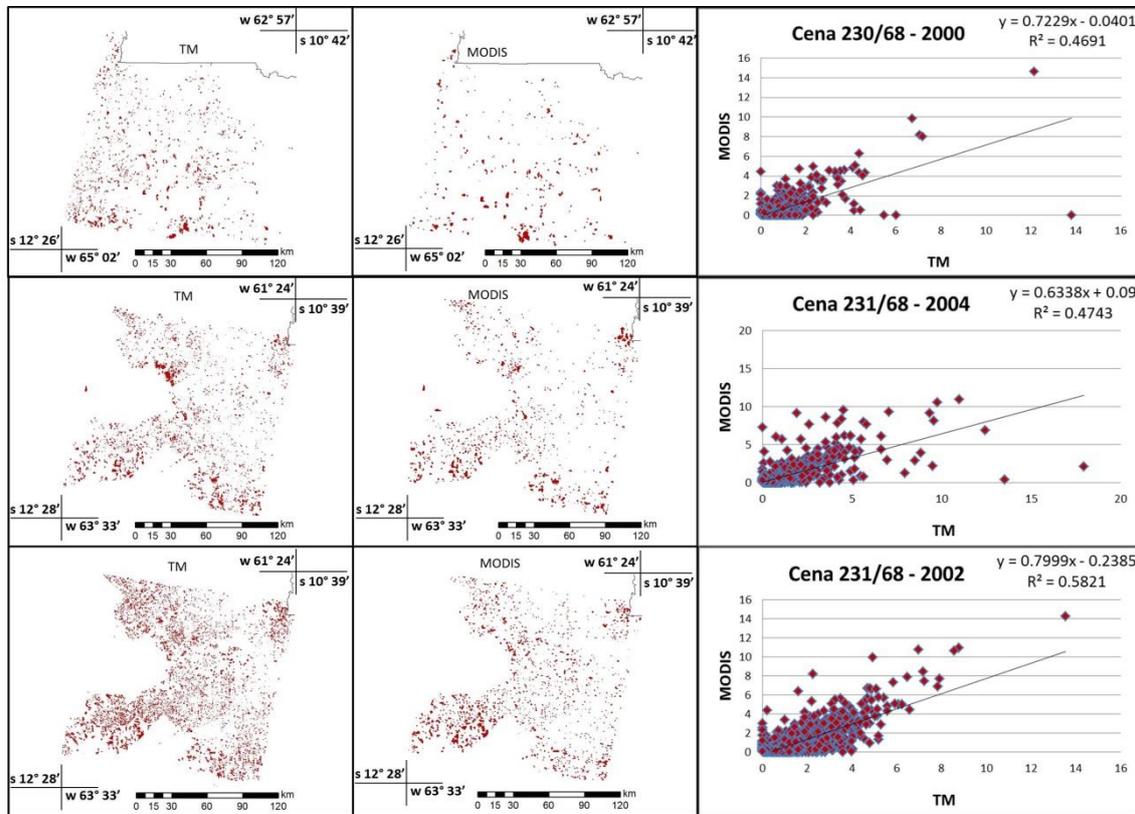


Figura 18 - Gráficos da validação dos mapeamentos das áreas queimadas em Rondônia (em km²) para as cenas 232/69 (2001 e 2009), 233/66 (2005 e 2008), 232/67 (2006), 233/67 (2009) e 233/68 (2007).

As análises das queimadas para o Estado de Rondônia que apresentaram baixa correlação ($R^2 < 70\%$) entre os resultados obtidos de ambos os sensores é apresentado na **Figura 19**, assim como os gráficos diagramas de espalhamento para as estimativas de ambos os produtos. Além dos diagramas é apresentado as imagens com os mapeamentos das áreas

queimadas no TM (esquerda) e MODIS (direita) para o ano específico da órbita/ponto sorteada.



■ Áreas queimadas mapeadas no sensor TM (coluna da esquerda) e no sensor MODIS (coluna do meio).

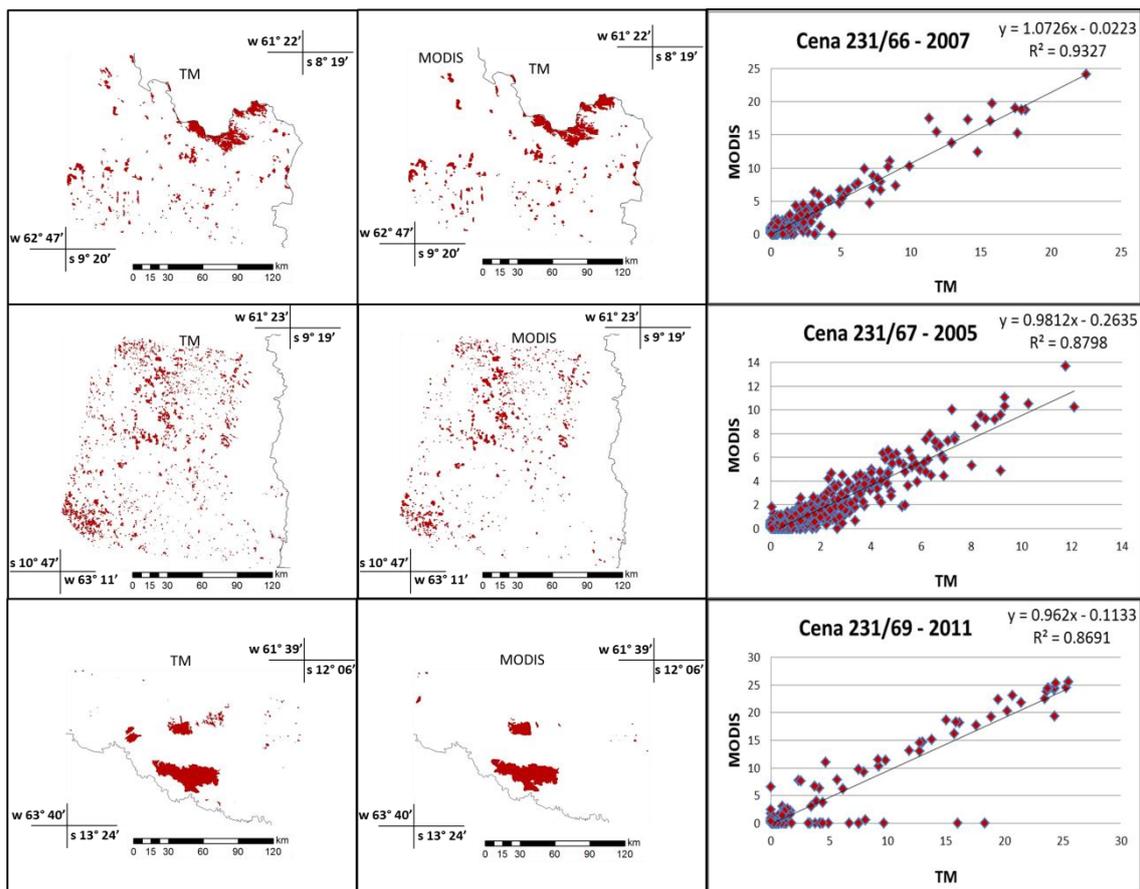
Figura 19 - Resultados da validação dos mapeamentos das áreas queimadas que apresentaram os menores coeficientes de correlação.

Na **Figura 19** nota-se a presença da ocorrência de muitas queimadas nas áreas amostradas, compostas principalmente pela presença de pequenas cicatrizes (em maioria) e de grandes cicatrizes. As pequenas cicatrizes são totalmente distinguíveis nas imagens TM/ETM+ devido à resolução espacial de 30 metros, no entanto, devido ao tamanho dessas cicatrizes, as mesmas não são visualizadas nas imagens MODIS que possuem 250 metros de resolução espacial.

Assim, o principal fator de omissão nas imagens MODIS ocorrem devido à diferença na resolução espacial de ambos os sensores. Na cena 230/68 do ano 2000, quatro datas foram adquiridas, 25 de Agosto de 2000, 10 de setembro de 2000, 26 de setembro de 2000 e 12 de outubro de 2000. A análise desta cena mostrou que as pequenas cicatrizes de queimadas estiveram concentradas na região sudoeste da imagem, apresentando valores

médios de 1 km², com poucas áreas queimadas maiores que 4 km². Na cena 231/68 do ano de 2004, duas datas foram adquiridas, 11 de Agosto de 2004 e 12 de setembro de 2004. Nesta cena podemos perceber um número maior de queimadas comparado com a cena anterior, apresentando 2,5 km² de área em média, concentradas especialmente na região leste da cena e na ponta direita da região sul, apresentando poucas queimadas com tamanhos entre 5 e 10 km². Finalmente, na cena 231/68 do ano de 2002, duas datas foram adquiridas, 15 de setembro de 2002 e 01 de outubro de 2002. É notável a presença das queimadas por toda a cena, exceto nas áreas em branco que representam unidades de conservação de proteção integral. Os valores médios das áreas queimadas nesta cena variaram em torno de 2 km² e as queimadas de grandes proporções apresentaram valores entre 6 e 9 km².

As cenas que apresentaram as maiores correlações ($R^2 > 80\%$) entre ambos os mapeamentos é apresentada na **Figura 20**, assim como os diagramas de espalhamento das áreas queimadas estimadas pelas imagens TM/ETM+ e MODIS e os mapeamentos realizados nas imagens TM (esquerda) e MODIS (direita) para o ano específico da órbita/ponto sorteada.



Áreas queimadas mapeadas no sensor TM (coluna da esquerda) e no sensor MODIS (coluna do meio).

Figura 20 - Resultados da validação dos mapeamentos das áreas queimadas que apresentaram os maiores coeficientes de correlação.

Comparando os resultados da **Figura 20**, percebe-se as diferenças na ocorrência das queimadas nestas áreas, em que é notável a presença de cicatrizes maiores, assim, essas queimadas puderam ser identificadas com maior precisão nas imagens MODIS, aumentando a correlação entre ambos os sensores.

Na cena 231/66 do ano de 2007, duas datas foram adquiridas, 20 de Agosto de 2007 e 05 de setembro de 2007. Analisando esta cena, podemos notar a presença de poucas queimadas com tamanhos pequenos, com 2,5 km² de tamanho em média, apresentando em maioria cicatrizes de queimadas com tamanhos maiores, com valores acima de 10 km², concentradas especialmente na região norte da cena. Na cena 231/67 do ano de 2005, três datas foram adquiridas, 14 de Agosto de 2005, 15 de setembro de 2005 e 01 de outubro de 2005. Nesta cena a presença de grandes cicatrizes é menor, comparada com a cena anterior, apresentando áreas com 2 km² em média, além da presença de cicatrizes com tamanhos entre 7 e 12 km², localizadas na região norte e oeste da região sul da cena.

Na cena 231/69 do ano de 2011, duas datas foram adquiridas, 15 de Agosto de 2011 e 16 de setembro de 2011. Nesta cena é notável a presença de poucas cicatrizes de tamanhos pequenos, apresentando em maioria áreas queimadas de tamanhos maiores, com 5 km² em média e valores entre 10 e 25 km². Entretanto, notou-se que em algumas regiões grandes cicatrizes de queimadas não foram detectadas pelo MODIS, e este fato pode ser explicado pelo ângulo de visada de algumas cenas do sensor MODIS, impedindo a identificação das queimadas.

Foi realizada uma análise estatística relativa ao tamanho dos polígonos das áreas queimadas que ocorreram na área de estudo pelo processo de clusterização. Baseado no mapeamento das imagens de referências, foram selecionadas aleatoriamente 10 datas para analisar o número mínimo de polígonos detectados pelos dois produtos. As cenas foram agrupadas em classes que variaram de 1 a 10.000 hectares e foi realizada uma análise de regressão linear para verificar a diferença no mapeamento global para cada cena.

Os resultados indicaram que, no total, 40% das queimadas presentes nas imagens TM e ETM+ apresentaram tamanho de até 6 hectares, que é o tamanho mínimo de detecção do MODIS, representando de 3-5% da área anual total queimada. Baseado nesses resultados, pode-se dizer que 33% das queimadas que ocorreram em Rondônia não são detectadas pelo MODIS (em alguns casos polígonos pequenos podem ser agrupados por queimadas vizinhas), representando 7% da área total queimada de 2000 a 2011. Porém, ao analisar a área total queimada para todas as cenas de validação e para ambos os produtos, a regressão linear apresentou correlação de 95%, com uma subestimativa de 13% (a partir da tabulação cruzada) indicando que, em geral, os mapeamentos em ambos os produtos são consistentes entre si.

Nota-se que a resolução espacial dos sensores influencia nos resultados finais dos mapas das áreas queimadas, e no caso da área de estudo, esta influência ocorre em aproximadamente 7% da área total (considerando a metodologia de convolução). Essa diferença pode ser explicada pelas queimadas em bordas e erros de registro, como já mencionado. Entretanto, mesmo apresentando estas limitações de geometria, os resultados mostraram uma boa correlação entre os mapeamentos de ambos os produtos, tornando os mapeamentos das imagens MODIS confiáveis, significantes a $p < 0,05$ do teste T *Student*.

6.2. Análise Espacial e Temporal das Queimadas em Rondônia de 2000 a 2011

Na **Figura 21** podemos verificar as áreas queimadas que ocorreram em Rondônia para o período compreendido nos anos de 2000 a 2011. De acordo com a **Figura 21**, as queimadas apresentam uma variabilidade espacial significativa e abrangem grandes áreas, especialmente na porção central norte, principalmente nos Municípios de Nova Mamoré, Porto Velho e Machadinho d'Oeste; no meio leste do Estado, abrangendo principalmente os Municípios de Costa Marques e Seringueiras e no sul do Estado, localizadas em diversos Municípios, destacando-se grandes áreas queimadas em São Francisco do Guaporé, Alta Floresta, Alto Alegre e Pimenteiras.

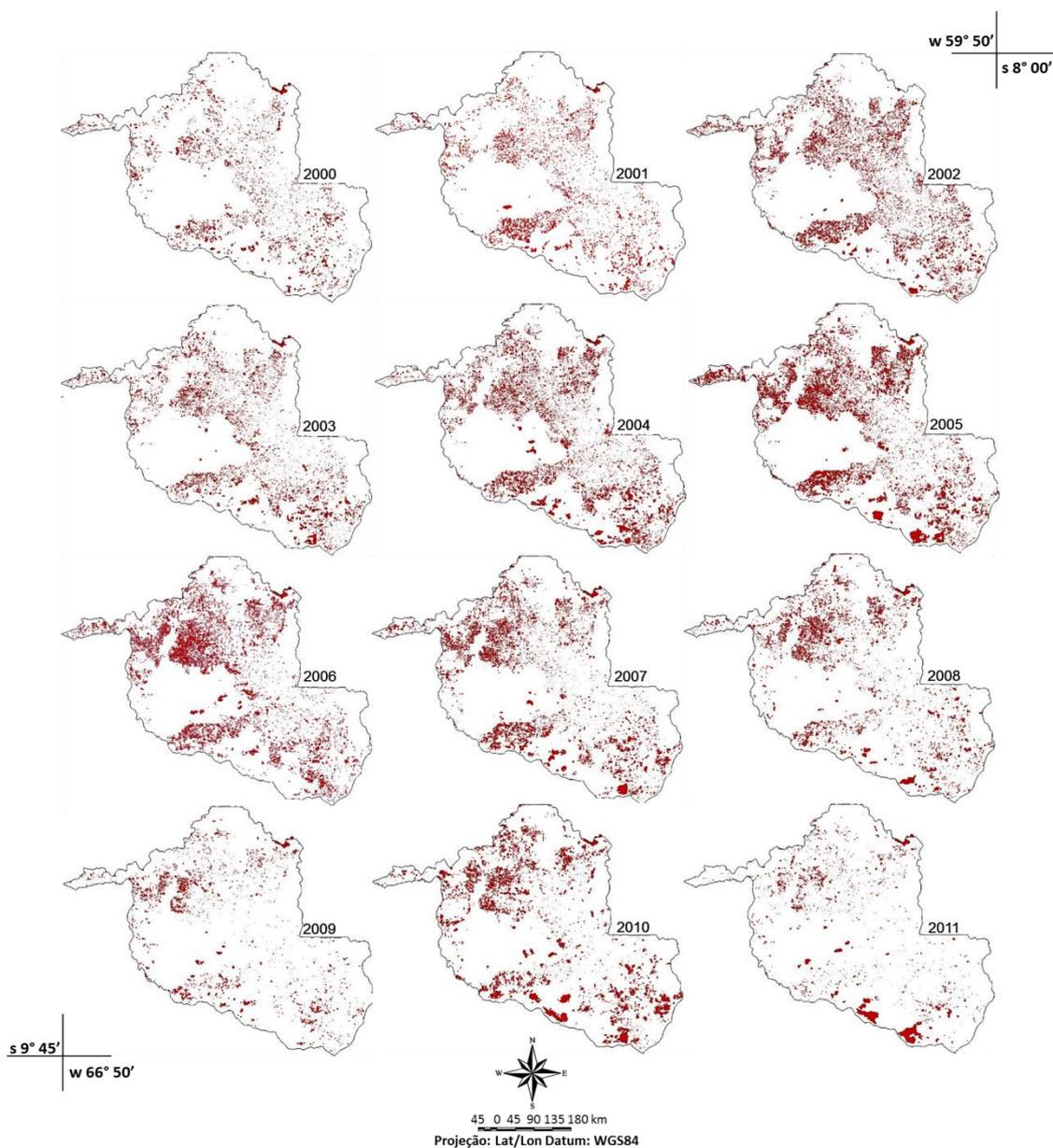


Figura 21 - Áreas queimadas em Rondônia nos anos de 2000 a 2011.

De uma forma geral pode-se notar que do ano 2000 ao ano de 2005 a ocorrência das queimadas aumentou no Estado de Rondônia, apresentando algumas oscilações, sendo que o pico de ocorrência ocorreu no ano de 2005. Após 2005 houve uma diminuição gradativa significativa até o ano de 2009, apresentando o segundo pico de ocorrência em 2010 e uma substancial diminuição no ano seguinte, conforme pode ser visualizado no gráfico da **Figura 22**.

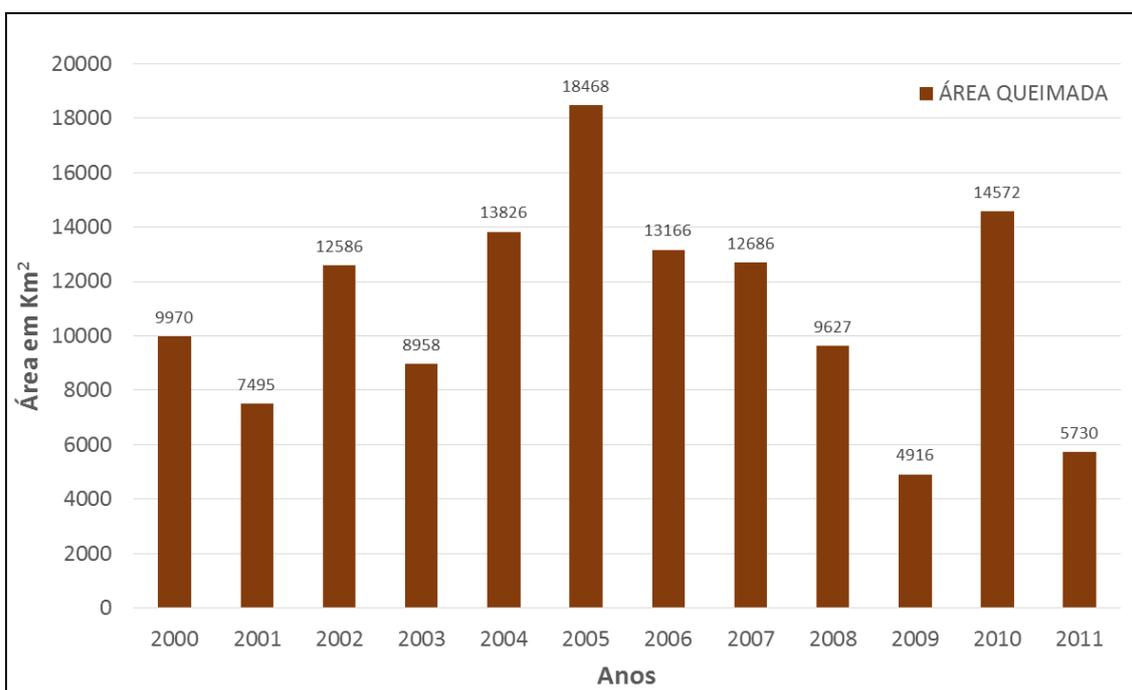


Figura 22 – Gráfico da área total anual das queimadas em Rondônia nos anos de 2000 a 2011.

De acordo com os dados apresentados na **Figura 22**, os anos que apresentaram as maiores ocorrências de queimadas foram 2005 (18.468 km²), compreendendo 7,7% de todo o Estado, 2010 (14.572 km², 6,13%) e 2004 (13.826 km², 5,8%), e os anos que apresentaram as menores ocorrências foram 2009 (4.916 km², 2%), 2011 (5.730 km², 2,4%) e 2001 (7.495 km², 3,1%).

Diversos fatores são responsáveis pela ocorrência das queimadas em Rondônia, entre eles cita-se a abertura e manutenção de áreas destinadas à agropecuária. Porém, existem diversos mecanismos que, aliados ao uso da terra, acentuam os impactos das queimadas na região. Foi constatado que nos últimos 30 anos a intensidade e frequência das secas na

região Amazônica aumentaram, apresentando dois eventos extremos nos anos de 2005 e 2010 (LIMA, 2013).

A seca de 2005 esteve associada ao aquecimento das águas do Atlântico Tropical Norte (MARENGO et al., 2008; ZENG et al., 2008), afetando 1,9 milhões de quilômetros na Amazônia, e a seca de 2010, que foi considerada a mais severa dos últimos cem anos, afetou uma área com cerca de 3 milhões de quilômetros (LEWIS et al., 2011), também relacionada com a oscilação inter-decadal de aquecimento da temperatura da superfície do mar do Atlântico Tropical Norte. Essas secas afetaram diversos Estados da região Amazônica, incluindo Rondônia, fato que provavelmente contribuiu para as maiores ocorrências das queimadas nesses anos. A **Figura 23** mostra os gráficos anuais e mensais de precipitação ocorridos em Rondônia para os anos de 2000 a 2011, extraídos do TRMM.

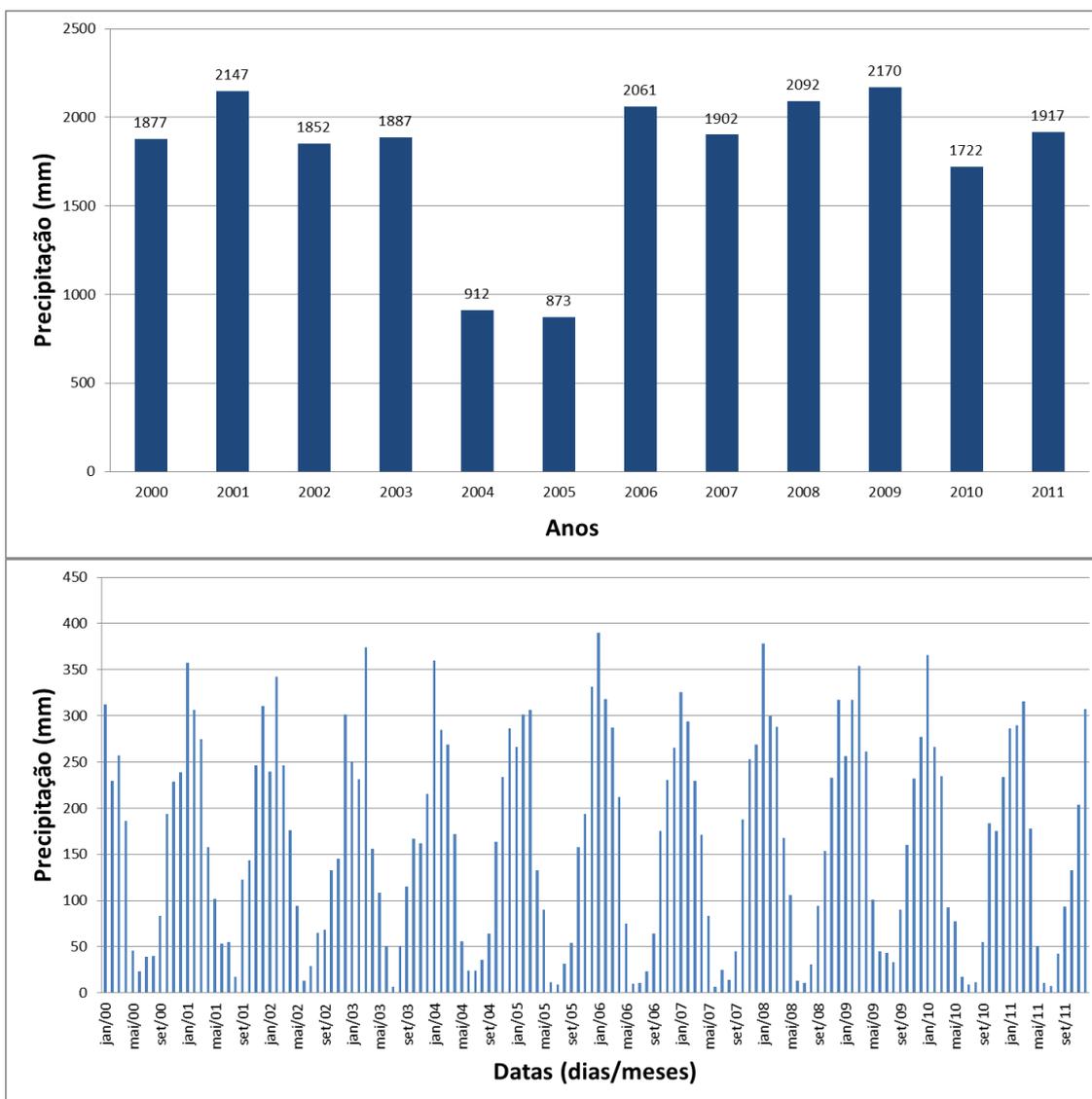


Figura 23 - Precipitação anual (a) e mensal (b) em mm ocorrida em Rondônia nos anos de 2000 a 2011.

Nesta figura percebe-se que, em geral, os anos que apresentaram as maiores áreas queimadas coincidiram com os anos que apresentaram as menores taxas de precipitação anuais, como 2005 (873 mm), 2004 (912 mm) e 2010 (1722 mm). Nota-se que o ano de 2010 apresentou o dobro de precipitação comparado com 2004, mas, ainda assim, foi o terceiro ano com a menor taxa de precipitação ocorrida no Estado, e a seca ocorrida neste ano afetou diversos estados da Amazônia, entre eles Rondônia, devido principalmente à baixa taxa de precipitação que ocorreu nos meses de abril e maio (antecedendo a estação seca).

Ao analisar a precipitação mensal, nota-se que no período seco (meses de junho a outubro)

a precipitação foi 23% menor nos anos que apresentaram as maiores áreas queimadas comparadas com os anos que apresentaram as menores taxas, e na estação chuvosa que precede a estação seca, as taxas de precipitação também foram menores, representando 8%, sugerindo-se que o uso da terra associado com a ocorrência de eventos climáticos intensifica a origem, o número e o impacto das queimadas na região.

As **Figuras 24, 25 e 26** mostram os gráficos da frequência do tamanho dos polígonos das áreas queimadas em Rondônia para os 12 anos analisados. A linha cinza indica a frequência acumulada do tamanho dos polígonos de queimadas. Assim, a análise estatística dos polígonos indica que em média as cicatrizes de queimadas mapeadas que mais ocorrem na área de estudo abrangem uma área de 20 a 80 hectares, apresentando 64% das ocorrências, enquanto que as queimadas que possuem tamanho maior que 1.280 hectares são as que menos ocorrem.

Percebe-se que a presença de grandes cicatrizes de queimadas em Rondônia, principalmente na região sul do Estado, ocorre, em sua maioria, em áreas de vegetação com influência fluvial e/ou lacustre e em áreas de cerrado compostas pela savana parque e pela savana arborizada, que compõem áreas campestres em terras indígenas, áreas de conservação de uso sustentável e de proteção integral e áreas campestres com pecuária, segundo o uso da terra atual (IBGE, 2012), porém, essas grandes cicatrizes ocorrem em menores proporções, em aproximadamente 7% do total de abrangência.

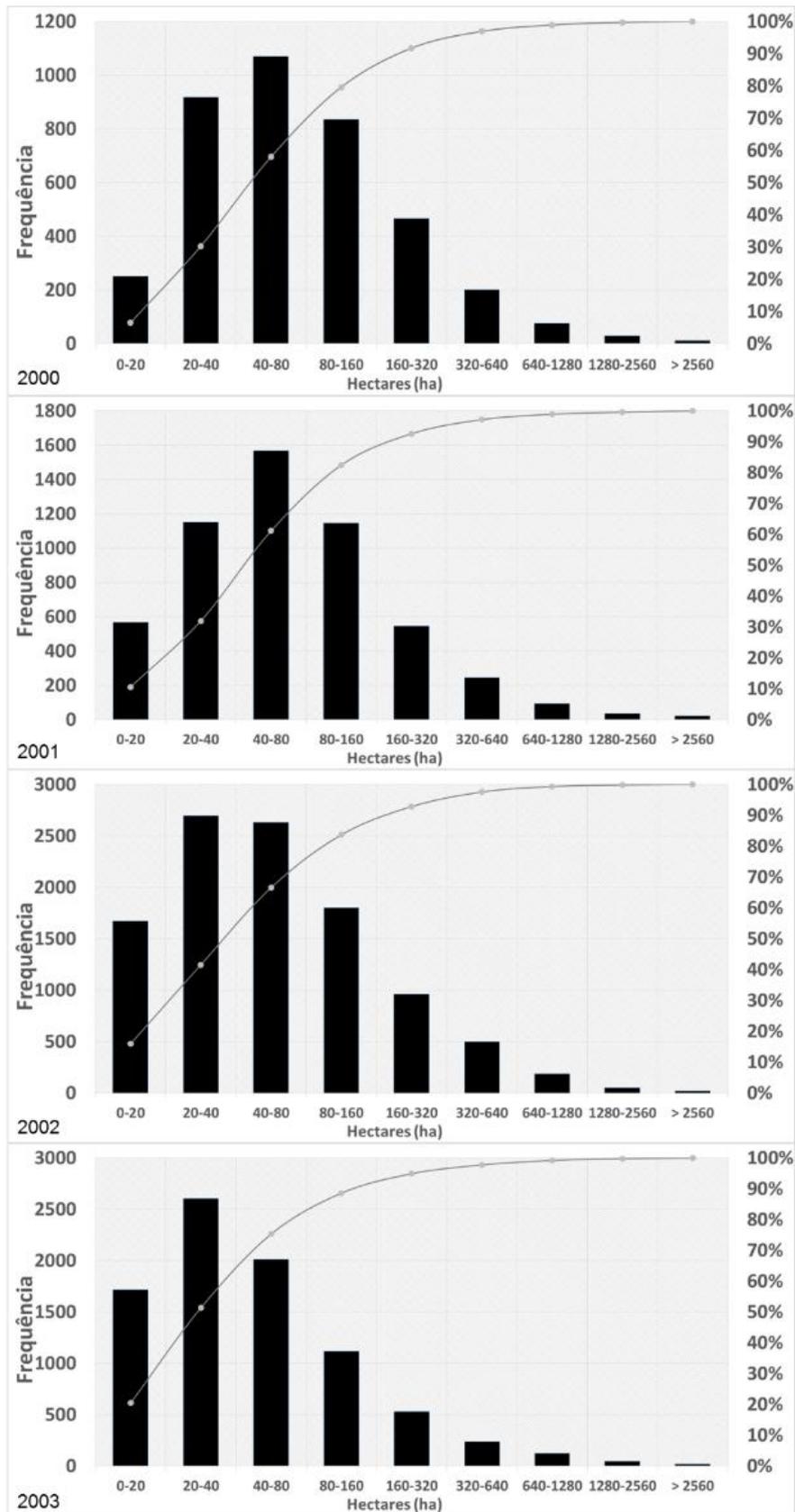


Figura 24 - Gráficos da frequência do tamanho dos polígonos das áreas queimadas em Rondônia de 2000 a 2003.

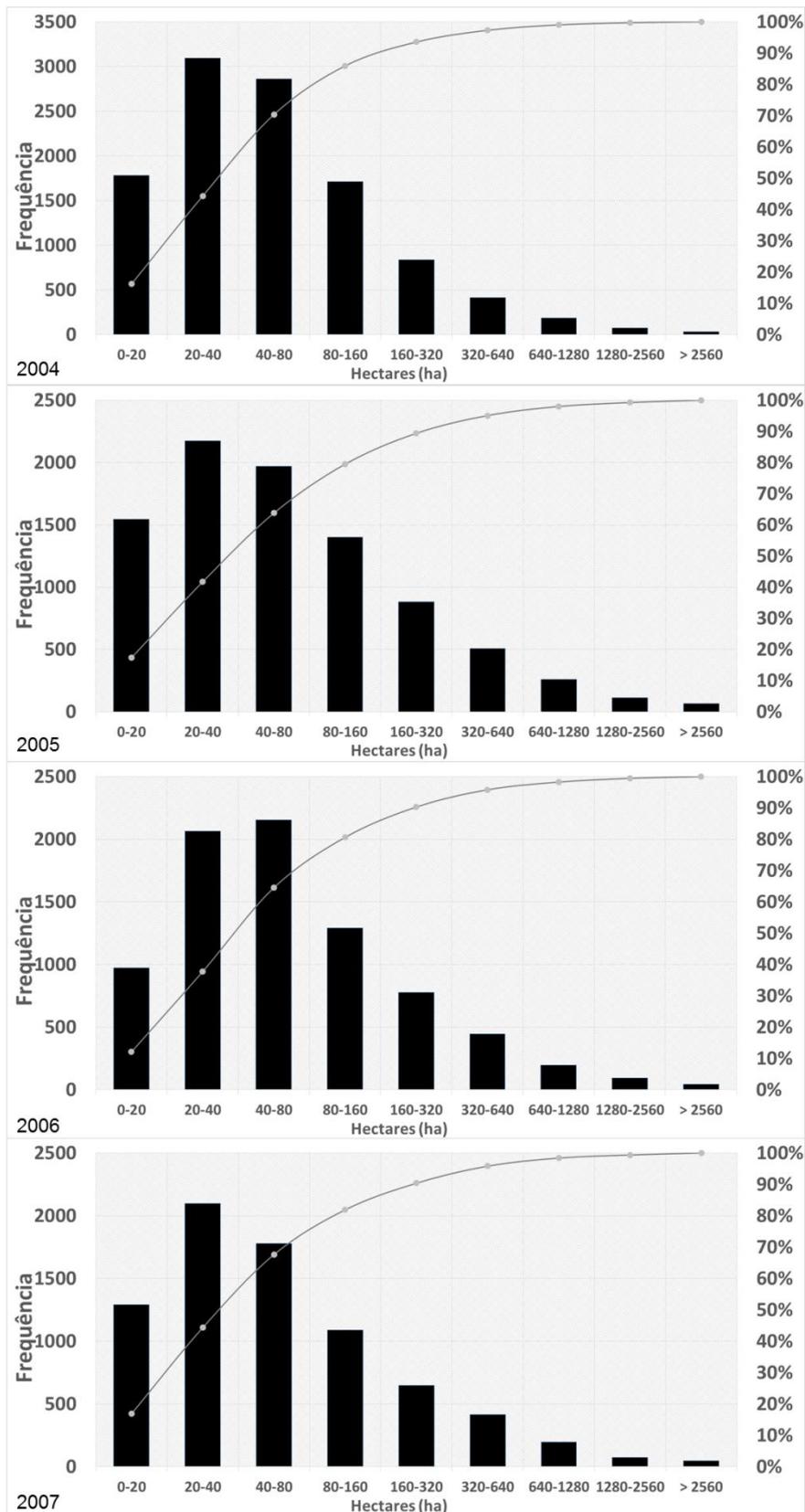


Figura 25 - Gráficos da frequência do tamanho dos polígonos das áreas queimadas em Rondônia de 2004 a 2007.

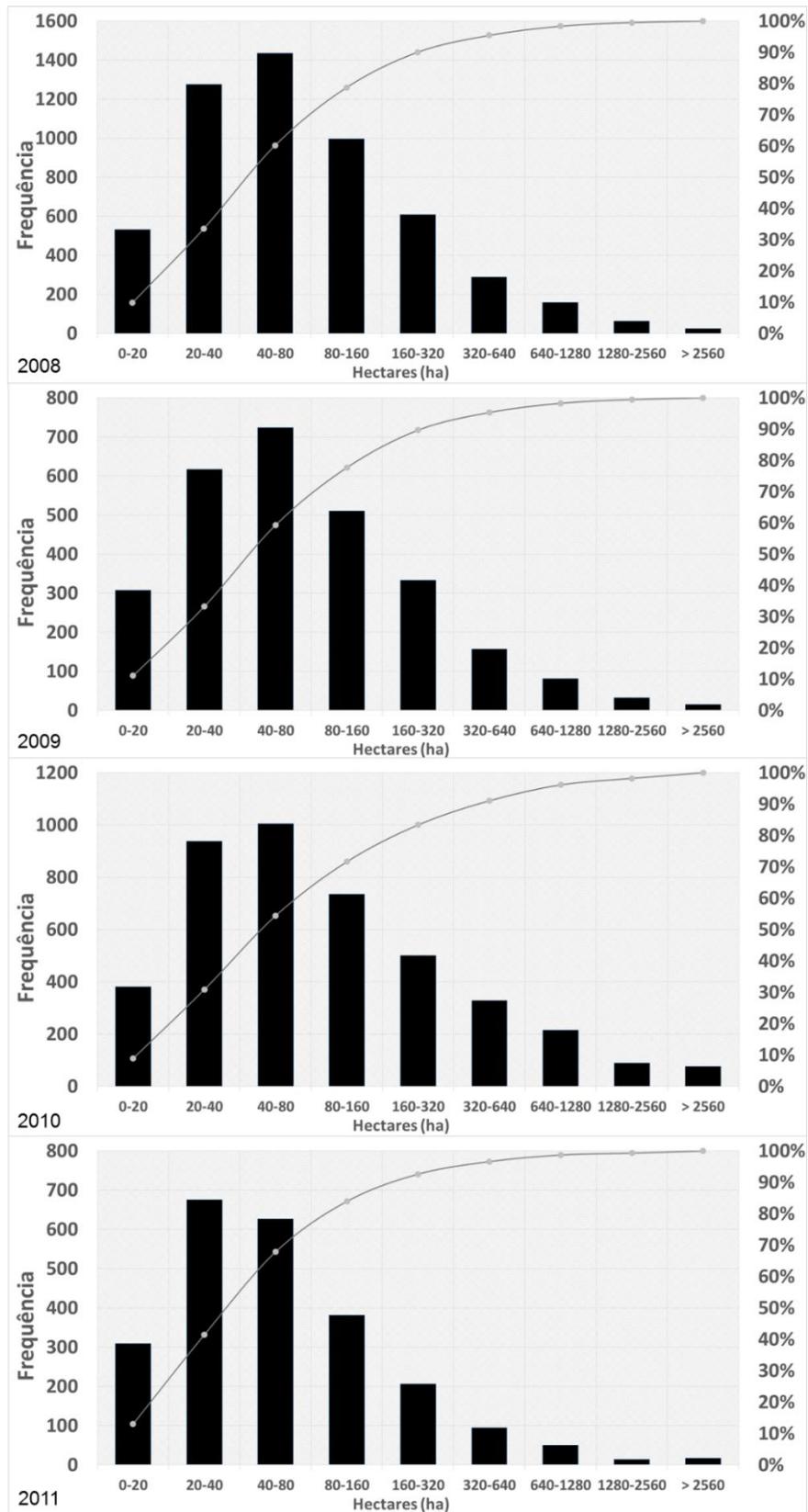


Figura 26 - Gráficos da frequência do tamanho dos polígonos das áreas queimadas em Rondônia de 2008 a 2011.

A utilização da queima da biomassa na área de estudo apresenta em maioria pequenas áreas queimadas e ocorrem principalmente em regiões da floresta ombrófila aberta (submontana, terras baixas e com vegetação secundária e atividades agrárias) e em áreas de savana arborizada, que abrangem atualmente áreas de unidade de conservação de uso sustentável, que podem estar associadas às áreas de pecuária de animais de grande porte e cultivos permanentes diversificados, de extrativismo vegetal em área florestal e áreas exclusivas de pecuária de animais de grande porte, que podem estar associadas à cultivos permanentes diversificados. A **Figura 27** mostra a frequência total da ocorrência das queimadas na área de estudo nos 12 anos analisados.

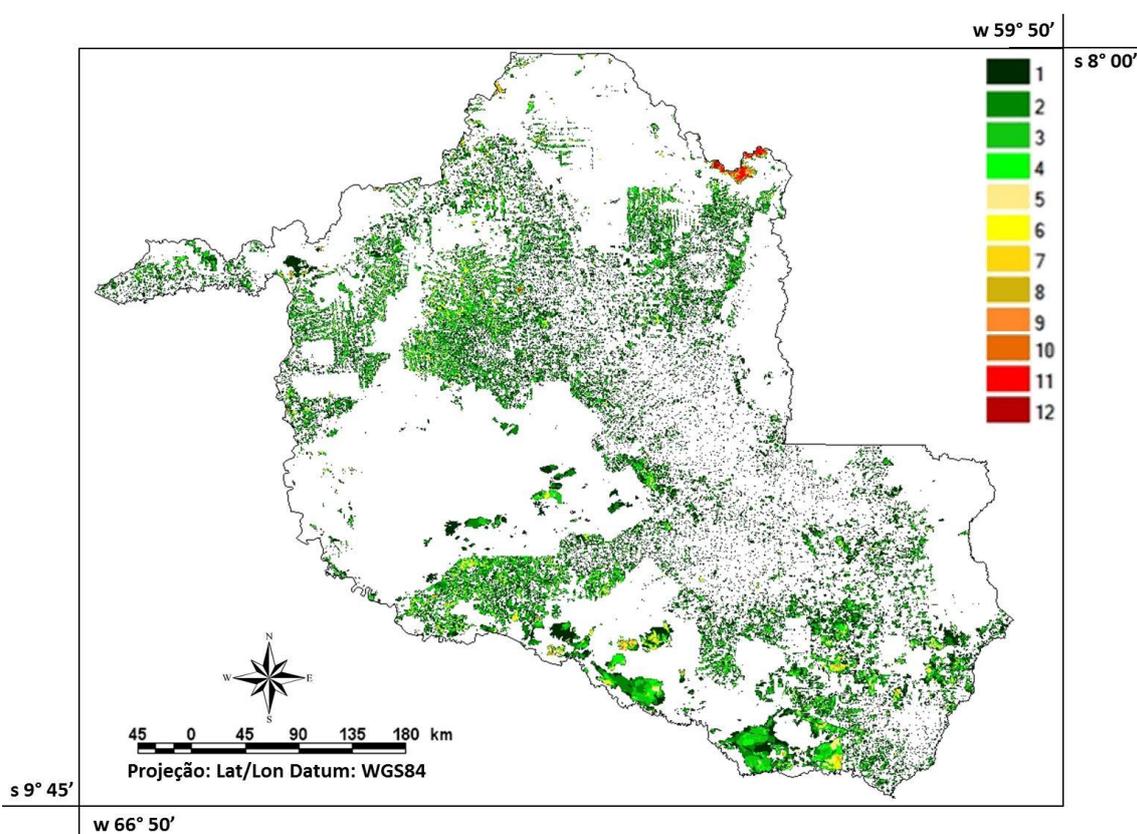


Figura 27 - Frequência total da ocorrência das queimadas em Rondônia de 2000 a 2011.

A frequência espacial das queimadas compreende doze classes, relacionadas com a incidência de cicatrizes durante o período analisado. Desta forma, a classe 1 refere-se a uma ocorrência de queimada durante os anos analisados, enquanto que a classe 12 refere-se à presença de queimadas no mesmo local durante os doze anos considerados, e os valores totais para cada classe nos 12 anos analisados pode ser visualizada na **Tabela 4**.

Tabela 4 - Valores totais da frequência das queimadas em Rondônia de 2000 a 2011.

| Frequência | Área (em km ²) |
|------------|----------------------------|
| 1 | 28.585 |
| 2 | 15.122 |
| 3 | 8.511 |
| 4 | 4.530 |
| 5 | 2.048 |
| 6 | 890 |
| 7 | 397 |
| 8 | 177 |
| 9 | 114 |
| 10 | 103 |
| 11 | 172 |
| 12 | 32 |

Na análise das medidas de classe, nota-se que a frequência 12 foi a que menos ocorreu, compreendendo 32 km² de área total queimada, seguida pela classe 10, com 103 km² e pela classe 9, com 114 km², ou seja, poucas áreas apresentaram queimadas no mesmo local durante todos os anos, destacando-se uma área de floresta caracterizada pela Savana Parque na porção norte do Estado, divisa com o Estado do Amazonas, que apresenta queimadas frequentes, mesmo estando localizada em área campestre em unidade de conservação de proteção integral. A frequência que apresentou maior ocorrência na área de estudo foi a classe 1, com 28.585 km² nos 12 anos, seguida pela classe 2, com 15.122 km² e pela classe 3, com 8.511 km², destacando que todos os anos novos locais são queimados em Rondônia.

As classes de vegetação em minoria no Estado estão representadas pelas três áreas de Contato, que totalizam 1.379 km², seguidas por áreas da Floresta Ombrófila Densa das Terras Baixas (1.462 km²) e Aluvial (1.969 km²). A vegetação predominante na área de estudo é composta pela vegetação secundária e atividades agrárias da Região da Floresta Ombrófila Aberta, com área de 73.306 km², localizada na grande mancha desmatada na área central do Estado. Nesta região predominam áreas de pecuária de animais de grande porte, cultivos permanentes diversificados e extrativismo vegetal, de acordo com o mapa de uso da terra de 2011 do IBGE. A segunda e terceira classe de vegetação mais presente é a Floresta Ombrófila Aberta Submontana, com área de 64.841 km² e a Floresta Ombrófila Aberta das Terras Baixas, com área de 31.972 km², localizadas ao redor da grande área central desmatada, com exceção da região sul do Estado. O mapa de vegetação pode ser visualizado na **Figura 28**.

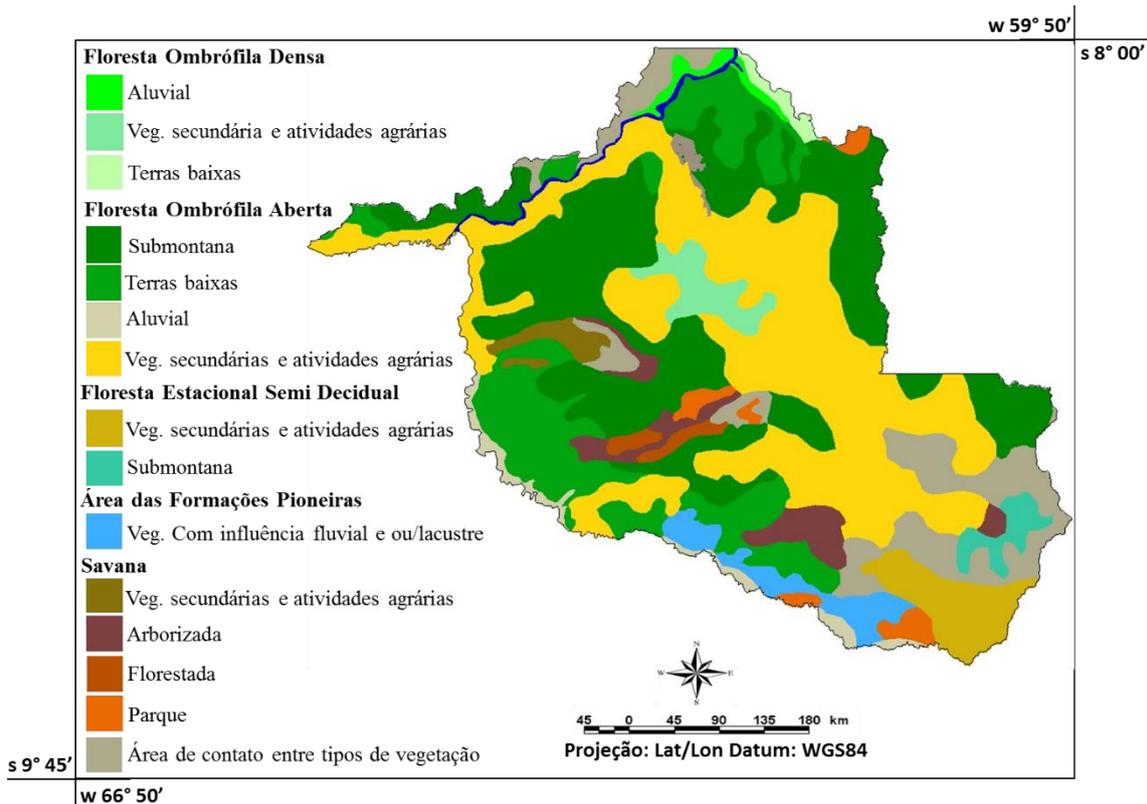


Figura 28 – Mapa da vegetação original do Estado de Rondônia.

Porém, ao analisar o mapa de uso da terra atual, a formação Submontana apresenta uma redução de 52,5% de sua área original, substituídas por áreas de conservação de uso sustentável (13.497 km²), por áreas de pecuária de animais de grande porte, que podem estar associadas com cultivos permanentes diversificados (7.998 km²) e por áreas de extrativismo vegetal (12.572 km²). O mesmo ocorreu com a formação Terras Baixas, que apresentou uma redução de 52,6%, devido à substituição por áreas de conservação de uso sustentável (13.268 km²) e por áreas de extrativismo vegetal (3.568 km²). O mapa de uso da terra atual está demonstrado na **Figura 29**.

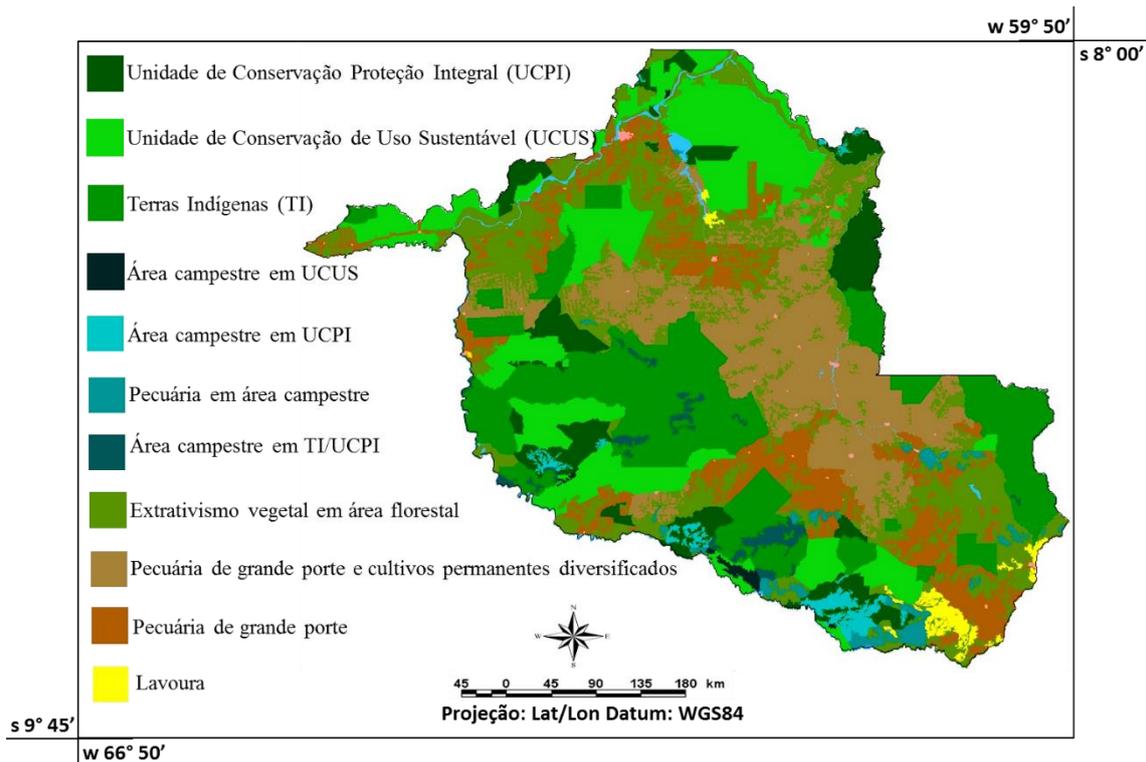


Figura 29 – Mapa do uso da terra atual do Estado de Rondônia.

Percebeu-se neste estudo que nem sempre as queimadas estão relacionadas com áreas de desmatamento recente, conforme verificado pela análise em conjunto com os dados do PRODES, como pode ser visualizado na **Figura 30**.

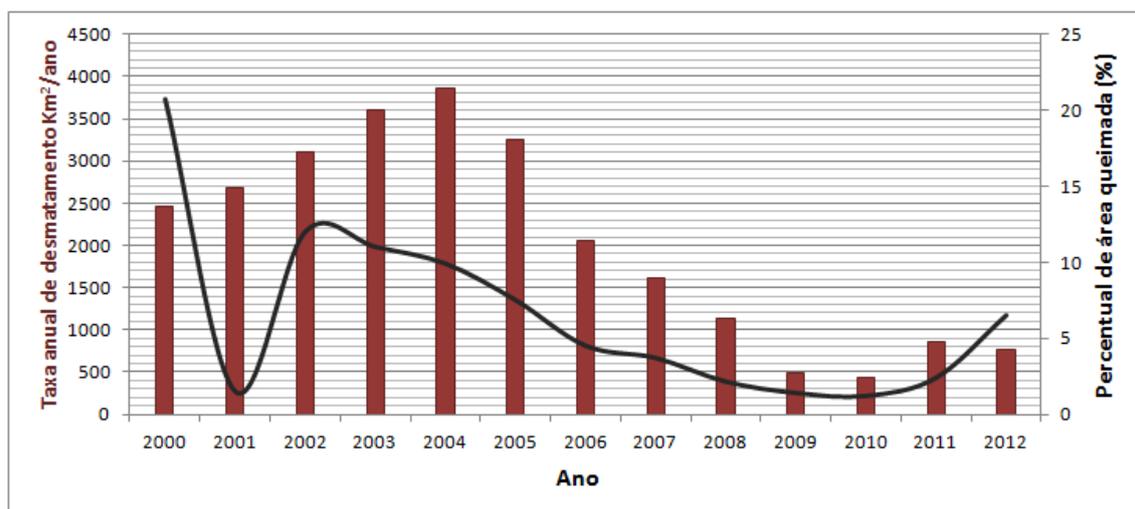


Figura 30 - Ocorrência de queimadas em áreas de desmatamento recente em Rondônia de 2000 a 2011.

Segundo o PRODES, Rondônia apresenta a terceira maior taxa de desmatamento no Brasil, totalizando 54.772 km² de áreas no período de 1988 a 2013, o que representa 23%

da área total do Estado, atrás apenas de Mato Grosso e Pará. Ressalta-se que durante o período compreendido entre 2000 e 2011 o desmatamento em Rondônia totalizou 25.514 km², representando 10,7% da área de estudo. De uma forma geral, dentro do período estudado as áreas desmatadas apresentaram aumento gradativo até o ano de 2004, evidenciando uma redução gradual nos anos seguintes. Ainda, com base nos dados do PRODES verifica-se que a área de atuação de ambos não são as mesmas, já que apenas 6,5% das queimadas em média ocorreram em áreas de desmatamento recente.

Ao cruzar os polígonos de desmatamento do PRODES com os polígonos de desmatamento das queimadas do ano seguinte, percebeu-se que a área de atuação aumenta para 9,3%, (15,9% se considerarmos ambos os anos) indicando que muitas vezes essas queimadas não ocorrem logo após a derrubada da floresta, porém, infere-se que mais de 90% das queimadas não ocorrem em áreas de desmatamento recente. Este fato já foi destacado em diversos estudos, como, por exemplo, em Aragão e Shimabukuro (2010) e Lima (2013), em que os autores em seus estudos sobre a Amazônia não encontraram correlação das queimadas com os desmatamentos recentes.

Em relação à ocorrência das queimadas com o uso da terra atual, percebeu-se que a queima de biomassa ocorreu em maioria em áreas de extrativismo vegetal, abrangendo 14.994 km², seguida por áreas de pecuária de animais de grande porte e cultivos permanentes diversificados (14.525 km²) e por áreas exclusivas de pecuária de animais de grande porte (12.409 km²). Outra análise foi realizada em relação ao tamanho das cicatrizes, que foram separadas em áreas menores que 1 km² (representando cicatrizes pequenas e fragmentadas) e áreas maiores que 10 km². Em geral observou-se que as cicatrizes maiores estão localizadas em áreas destinadas à pecuária de animais de grande porte, cultivos permanentes diversificados e áreas de conservação de uso sustentável, e representam 90% de ocorrência, indicando que as grandes cicatrizes ocorrem em áreas que já possuem algum tipo de uso e provavelmente sua utilização deve-se à manutenção dessas áreas, sendo incomum a ocorrência em áreas de floresta, já que as mesmas geralmente são cortadas antes da queima.

As queimadas que apresentaram tamanhos pequenos ocorreram em 60% dos casos também em áreas de pecuária animal de grande porte, cultivos permanentes diversificados e áreas de conservação de uso sustentável, e 33% dos casos ocorreram em áreas de

extração vegetal e próximas das bordas das florestas. Assim, fica evidenciado que as queimadas em pequenas proporções são utilizadas tanto para a manutenção de áreas que já possuem algum tipo de uso quanto para a abertura de novas áreas destinadas à agropecuária.

Após analisar a ocorrência das queimadas na área de estudo, no próximo capítulo será analisado o impacto ocasionado nos parâmetros físicos da superfície e atmosfera provocados pela modificação das características biofísicas da superfície.

6.3. Impactos no balanço de radiação da superfície provenientes das queimadas em Rondônia de 2000 a 2011

Neste capítulo serão abordados os impactos ocasionados em parâmetros físicos da superfície e atmosfera provenientes da modificação do uso e cobertura da terra pelas queimadas.

A **Figura 31** mostra o gráfico da reflectância espectral dos alvos biofísicos da superfície obtidos a partir do fator de reflectância. Os dados foram coletados em Rondônia no trabalho de campo, composto por corpos hídricos, pastagem seca, vegetação arbórea e herbácea, solo exposto e queimadas em três estágios (queimada recente, em estágio inicial de regeneração e em estágio avançado de regeneração).

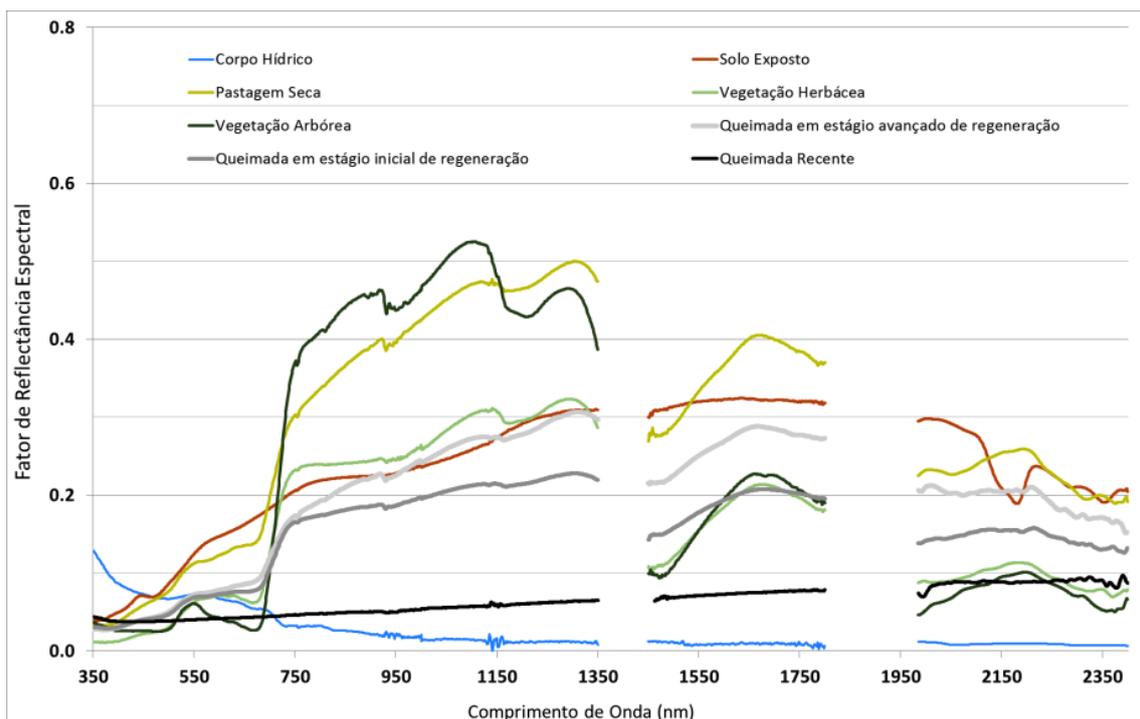


Figura 31 - Gráfico do fator de reflectância dos alvos biofísicos da superfície coletados em Rondônia.

Neste gráfico percebe-se que a assinatura espectral da vegetação é bem característica, com um pequeno pico de reflectância na banda do verde na região do visível do espectro eletromagnético devido à realização da fotossíntese e valores elevados de reflectância na região do infravermelho próximo devido à estrutura foliar da vegetação. Os valores centrados em 1400 e 1900 nm referem-se às bandas de absorção do vapor d'água pela atmosfera e foram retirados da análise por apresentarem apenas ruídos devido à ausência de irradiância na superfície.

Assim, percebe-se que na ocorrência de uma queimada recente a reflectância ao longo de todo o EEM apresenta uma substancial diminuição devido à perda de material fotossinteticamente ativo da vegetação verde e pelo depósito de cinzas e carvão sobre o solo, denotando um elevado contraste entre a vegetação queimada e a não queimada. Em relação às queimadas em regeneração, percebe-se que a reflectância retorna a apresentar a assinatura espectral similar da vegetação devido à recomposição da estrutura vegetal, porém, com aumento da reflectância em comprimentos de onda superiores a 1450 nm, principalmente devido à influência do solo no comportamento espectral coletado.

Outra análise pode ser realizada com o albedo, definido pela reflectância integrada em todas as faixas do espectro eletromagnético, portanto, após uma queimada, ocorre uma grande diminuição na reflectância espectral da superfície, conseqüentemente uma forte diminuição do albedo. Com base nos dados da **Figura 31**, constata-se que o albedo da vegetação arbórea apresenta um valor de 22%, entretanto, ao queimar a vegetação os valores de albedo diminuem para 6%, denotando que nessas áreas a radiação solar é quase totalmente absorvida (94%), porém, a medida que a área queimada inicia o processo de regeneração, os valores de albedo aumentam para 16% e 20%, indicando uma maior contribuição de pequenas áreas vegetadas e de solo exposto sem cinzas.

Estas informações obtidas em campo e estimadas a partir de produtos orbitais foram introduzidas nos valores de entrada do modelo regional RegCM4 e, assim, simulou-se as principais alterações ocorridas nas variáveis meteorológicas. O resultado das diferenças nas simulações (controle-queimada) é apresentado a seguir.

6.3.1. Impactos no balanço de radiação de ondas curtas

Após a ocorrência de uma queimada ocorre uma grande diminuição na reflectância espectral da superfície, causando a diminuição do albedo, e este fator provoca o aumento da absorção da irradiância solar pelas cinzas escuras. Desta forma, a diminuição do albedo provoca modificações no balanço de radiação de ondas curtas, como pode ser visto na **Figura 32**.

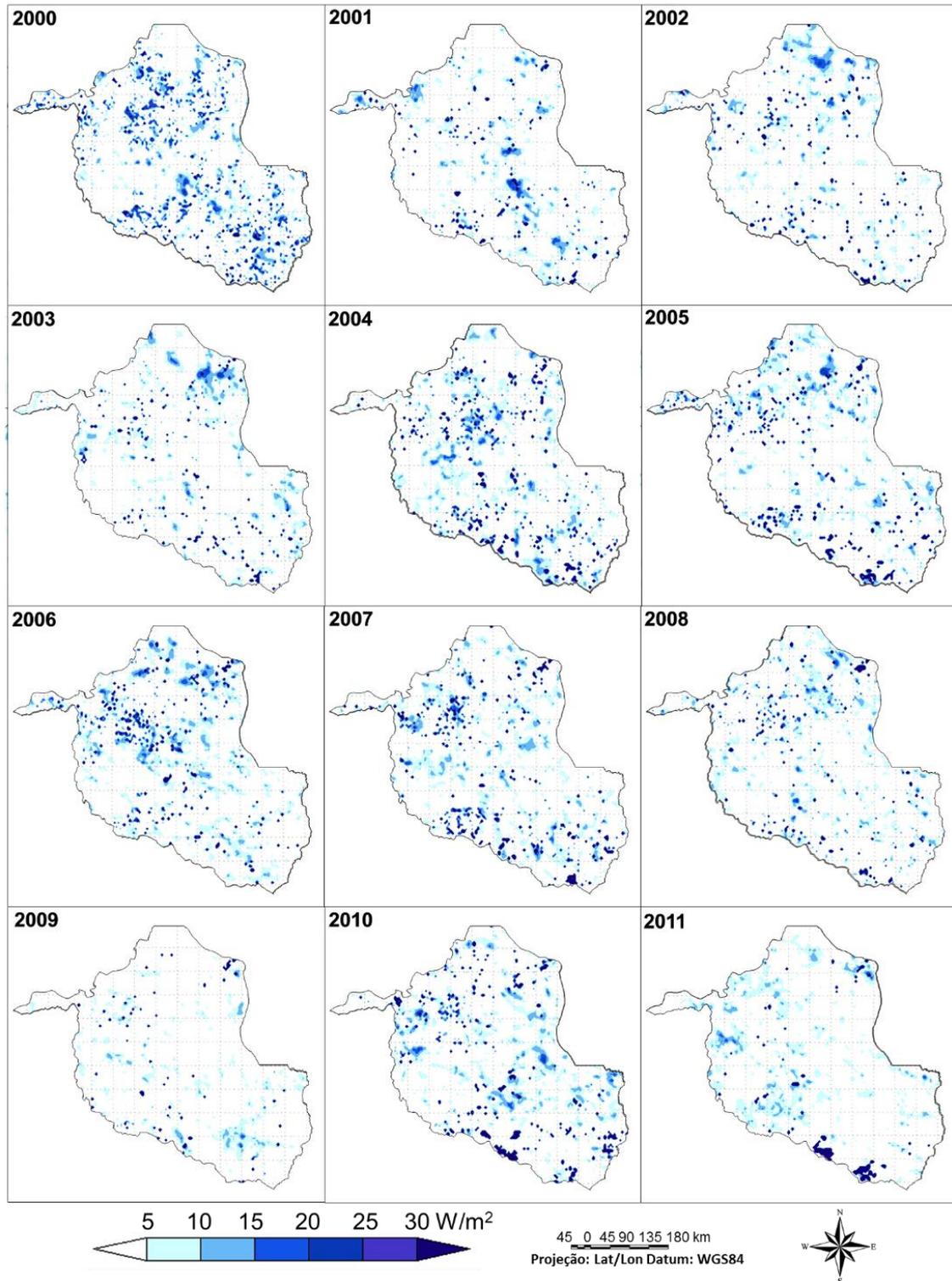


Figura 32 - Mudanças ocorridas no balanço de radiação de ondas curtas devido às queimadas no Estado de Rondônia (2000 a 2011).

Na área de estudo as queimadas provocam em geral um aumento na absorção da irradiância incidente que pode ser superior a 30 watts por metro quadrado (W/m^2) em média, podendo chegar a valores máximos de $90 W/m^2$ em áreas onde as queimadas foram

mais extensas e intensas, principalmente em locais com queimadas mais recentes, como nas áreas que apresentam grande quantidade de queimadas na região norte e no centro do Estado e nas áreas que apresentam grandes cicatrizes localizadas na região sul. As maiores variações podem ser visualizadas nos tons azuis mais escuros nos mapas anuais, coincidindo com as cicatrizes de queimadas mapeadas, destacando-se os anos de 2000, 2004, 2005, 2006, 2007 e 2010 como os anos que apresentaram as maiores variações.

Apesar do ano 2005 apresentar as maiores ocorrências de queimadas em todo o período estudado, percebe-se que o impacto no balanço de radiação de ondas curtas não foi tão expressiva comparada com o ano 2000, por exemplo. Uma vez que o modelo leva em consideração todos os fatores meteorológicos em sua simulação, o fato de um ano apresentar uma quantidade maior de nuvens pode influenciar no total de irradiância solar absorvida pela superfície. Desta forma, a diferença entre a simulação de controle e queimada pode apresentar diferenças sutis.

6.3.2. Impactos no balanço de radiação de ondas longas

A maior absorção da radiação solar incidente ocasiona alterações nas trocas de calor e faz com que a temperatura aumente na superfície, ocasionando a modificação no balanço de radiação de ondas longas, como pode ser visualizado na **Figura 33**.

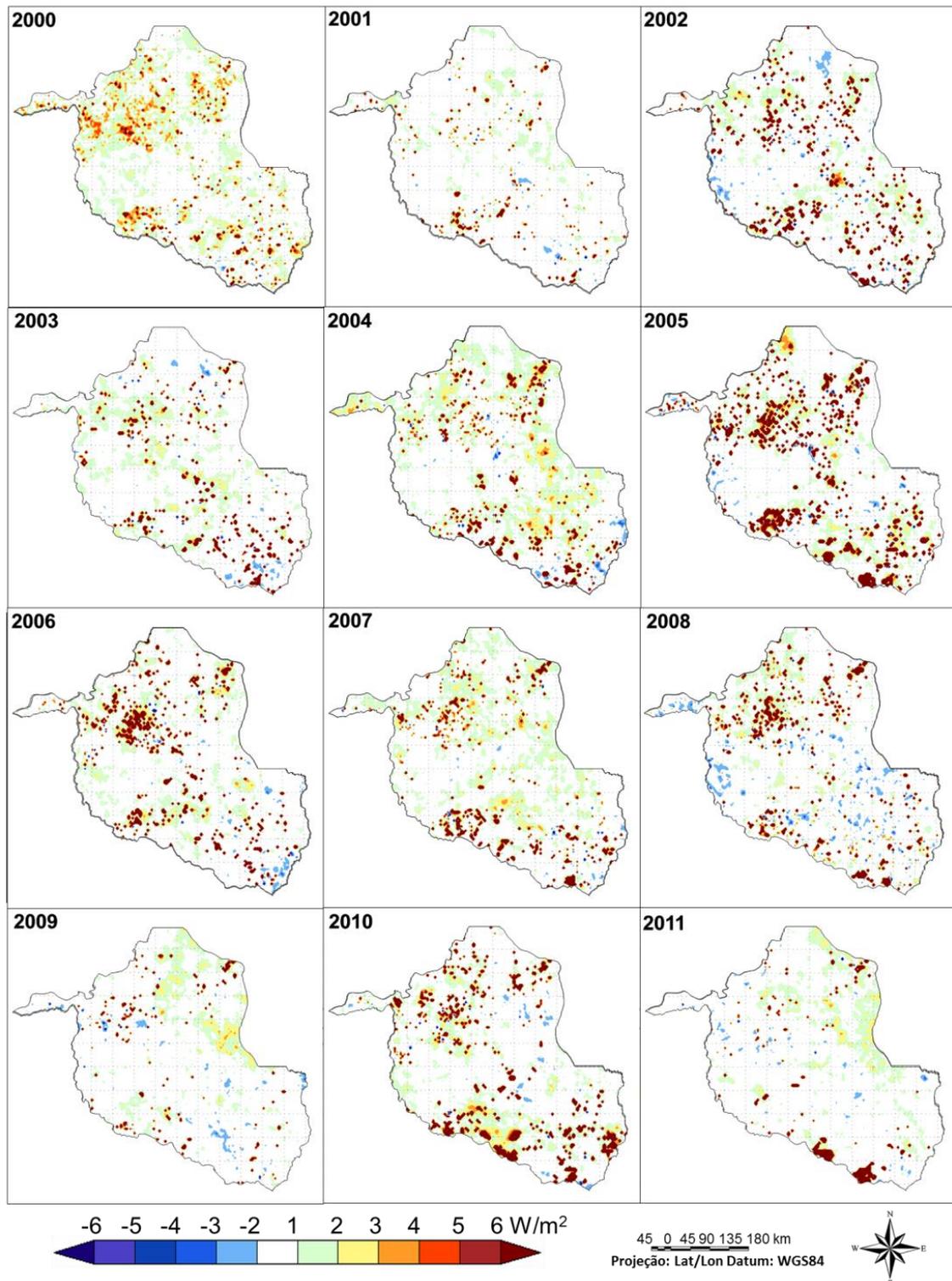


Figura 33 - Mudanças ocorridas no balanço de radiação de ondas longas devido às queimadas no Estado de Rondônia (2000 a 2011).

Podemos perceber nesta figura que a modificação no balanço de radiação de ondas longas apresentou uma variação média diária que pode ser superior a 6 W/m^2 , e os valores máximos desta variação podem ultrapassar 40 W/m^2 nas áreas que apresentam queimadas

mais intensas e recentes. Assim, para as áreas queimadas, a contra-radiação da atmosfera continua sendo menor do que a radiação de ondas longas emitida pela superfície. Cabe destacar que o saldo de ondas longas para uma região queimada é maior do que para uma vegetação sadia.

Neste caso percebe-se que as maiores variações visivelmente ocorreram nos anos de 2005, 2010, 2002 e 2006 e 2008, e os locais que apresentaram as maiores variações, que estão relacionados com a intensidade da queimada nesses locais, são a porção centro norte, que abrange os Municípios de Nova Mamoré, Porto Velho, Alto Paraíso, Buritis, Ariquemes, Monte Negro e Campo Novo de Rondônia; na região leste da porção central do Estado, abrangendo os Municípios de Costa Marques, Seringueiras e São Francisco do Guaporé; e no sul do Estado, abrangendo diversos Municípios, com destaque para São Francisco do Guaporé, Alta Floresta, Pimenta Bueno, Chupinguaia, Parecis, Vilhena, Cerejeiras e Pimenteiras.

Cabe ressaltar que embora a absorção da radiação solar nas áreas queimadas foi maior em 2000 do que em 2005, esta absorção não se traduziu em aquecimento da superfície, visto que o saldo de radiação de ondas longas em 2005 foi superior a 2000. Isto se deve ao fato desta energia absorvida provavelmente ter sido utilizada para a evapotranspiração (aumento do fluxo de calor latente), pois o inverno do ano de 2000 foi muito mais úmido do que o ano de 2005, cuja região sofreu fortemente com a seca intensa. Este fato é corroborado pelos resultados mostrados na **Figura 32**.

6.3.3. Impactos no balanço de radiação da superfície

Após a avaliação de todas as modificações ocorridas nos parâmetros físicos analisados, a **Figura 34** apresenta as alterações ocorridas no balanço de radiação da superfície provenientes das queimadas. Percebe-se, de uma forma geral, que o balanço de radiação da superfície foi substancialmente modificado, apresentando em média uma alteração de 45 W/m^2 ao dia. Nota-se que as modificações ocorreram por todo o Estado e em todos os anos, representadas pelas áreas em vermelho escuro, com exceção dos anos de 2009 e 2011 que apresentaram poucas ocorrências de queimadas, porém, grandes cicatrizes podem ser visualizadas no sul do Estado. Desta forma, em áreas em que as queimadas foram mais intensas e recentes os valores máximos podem ultrapassar 90 W/m^2 ao dia.

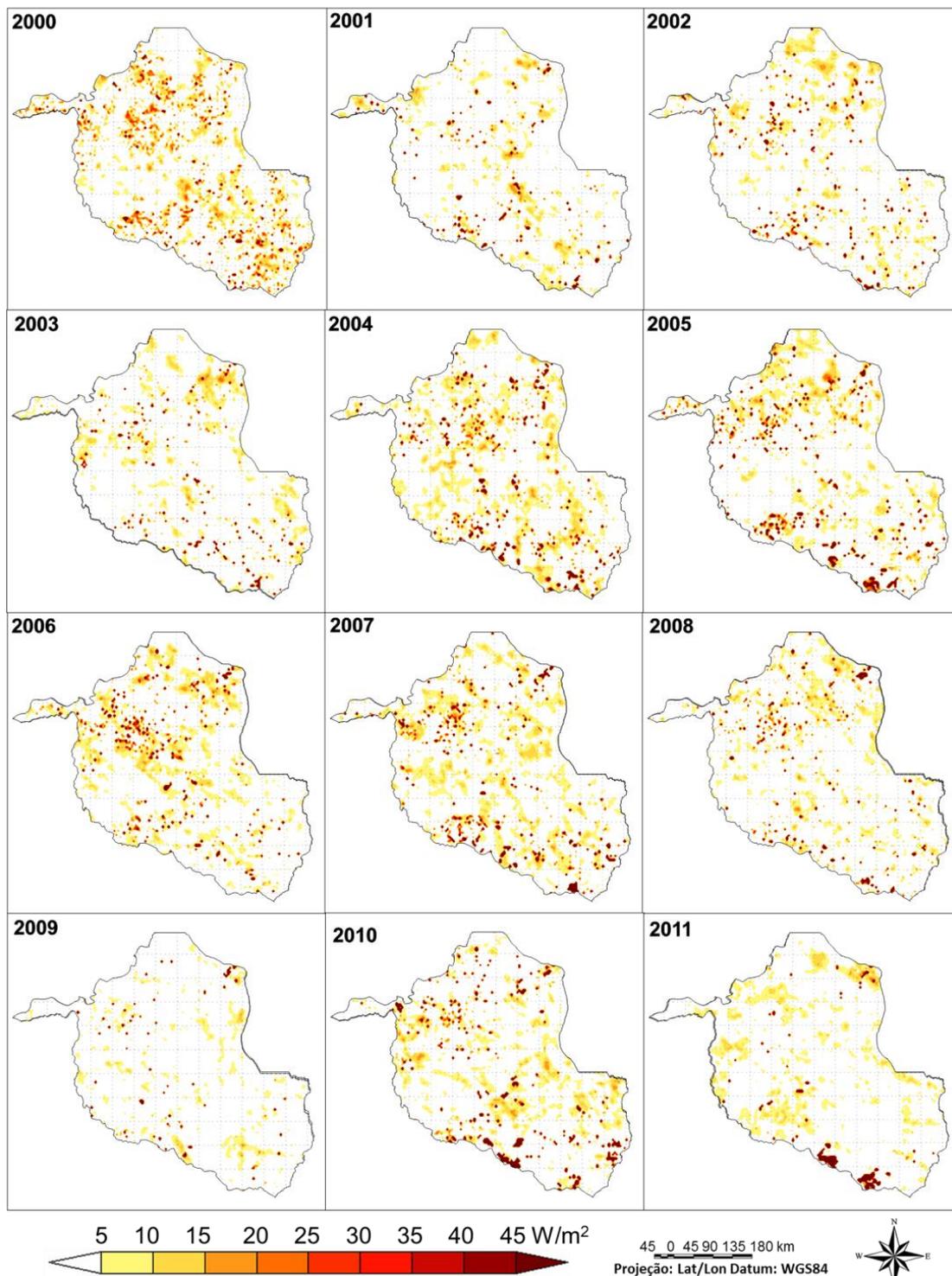


Figura 34 - Mudanças ocorridas no balanço de radiação da superfície devido às queimadas no Estado de Rondônia (2000 a 2011).

O balanço de radiação representa a energia disponível para a ocorrência dos processos físicos e biológicos da superfície terrestre, como o aquecimento da temperatura da superfície e do ar e a evaporação da água, e sua estimativa é essencial nos estudos

climáticos, pois o saldo de radiação é um componente essencial do balanço de energia, e suas modificações provocam impactos na circulação atmosférica e no clima. Assim, percebeu-se que os parâmetros acima mencionados também sofreram modificações, conforme pode ser verificado a seguir.

6.3.4. Impactos na temperatura da superfície

Percebe-se que todos os parâmetros físicos da superfície estão interligados, e as modificações provocadas pelas queimadas em apenas um deles podem influenciar todos os outros parâmetros. Desta forma, a diminuição do albedo da superfície por consequência altera o balanço de radiação de ondas curtas devido ao aumento da absorção da radiação incidente, que modifica o balanço de radiação de ondas longas devido ao aumento da temperatura.

Desta forma, a mudança no uso da terra é um fator essencial na modificação da circulação atmosférica local, uma vez que está diretamente relacionado com a alteração do balanço de radiação e, conseqüentemente, com o balanço de energia. Assim, a redução no albedo da superfície implica em uma maior absorção da irradiância solar pela superfície, e por decorrência um maior aquecimento. Neste contexto, a **Figura 35** mostra a variação na temperatura da superfície devido às queimadas na área de estudo nos 12 anos analisados.

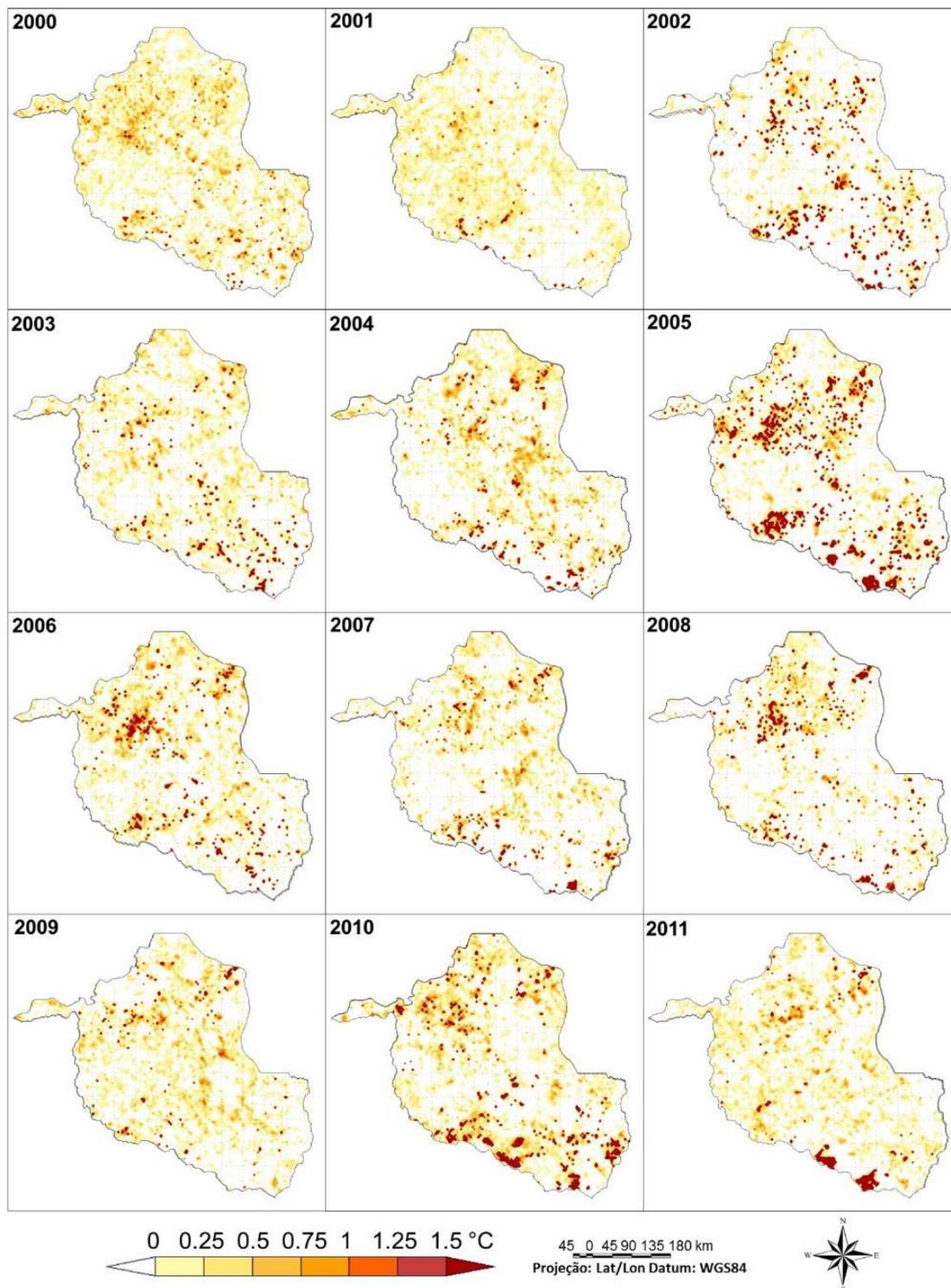


Figura 35 - Mudanças ocorridas na temperatura da superfície devido às queimadas no Estado de Rondônia (2000 a 2011).

Percebe-se nesta figura que as temperaturas na superfície apresentam um aumento que pode ultrapassar em média 1,5 graus Celsius (°C) por dia, representados pela cor vermelho escuro dos mapas, com destaque para os anos 2005, 2010, 2002, 2006 e 2008.

Ao analisar o perfil das temperaturas máximas da superfície ocorridas durante o dia na área de estudo, percebe-se que as mesmas podem atingir um valor máximo de 18°C dependendo da área que foi queimada (em relação à simulação controle, na qual as áreas são consideradas sem queimada). As áreas que apresentam as maiores modificações na temperatura da superfície estão localizadas de uma forma geral em uma extensa área da região central norte e na região leste no centro do Estado, destacando a ocorrência de cicatrizes maiores no sul do Estado, sempre relacionadas e coincidindo com as queimadas de maior intensidade.

6.3.5. Impactos na temperatura do ar

O aumento da temperatura da superfície também influencia no aumento da temperatura do ar, conforme pode ser visualizado na **Figura 36**. Nesta figura podemos notar que a temperatura do ar a 2 metros também apresenta modificações, apresentando valores médios que podem ultrapassar 1,5°C por dia nas áreas que apresentam cicatrizes de queimadas. Os locais que apresentam as maiores variações nos anos analisados geralmente são os mesmos, localizados em uma grande extensão territorial da região norte, na área central leste do Estado e na região Sul, que apresenta as cicatrizes de maiores proporções.

Na análise anual percebe-se que quase todos os anos apresentaram uma notável modificação na temperatura do ar distribuída por todo o Estado, representada pelas áreas em vermelho escuro. Algumas exceções podem ser percebidas nos anos de 2001, 2003, 2009, 2011, que coincidem com os anos que apresentaram as menores ocorrências de áreas queimadas. Nesses anos, em geral, as modificações ocorreram de forma mais branda, e a variação das temperaturas máximas atingem um valor superior a 5°C.

Ao analisar as temperaturas da superfície (**Figura 36**) e as temperaturas do ar (**Figura 37**), percebe-se que, em geral, ambas foram fortemente afetadas somente nas regiões em que as queimadas foram extensas, com exceção observada para o ano de 2000. Cabe ressaltar que embora a temperatura da superfície para o ano 2000 tenha sido mais amena do que, por exemplo, o ano de 2005, houve um incremento razoável na temperatura do ar. Isto ocorreu pelo aquecimento devido à liberação de calor latente para a atmosfera, fator que contribuiu para o aquecimento do ar.

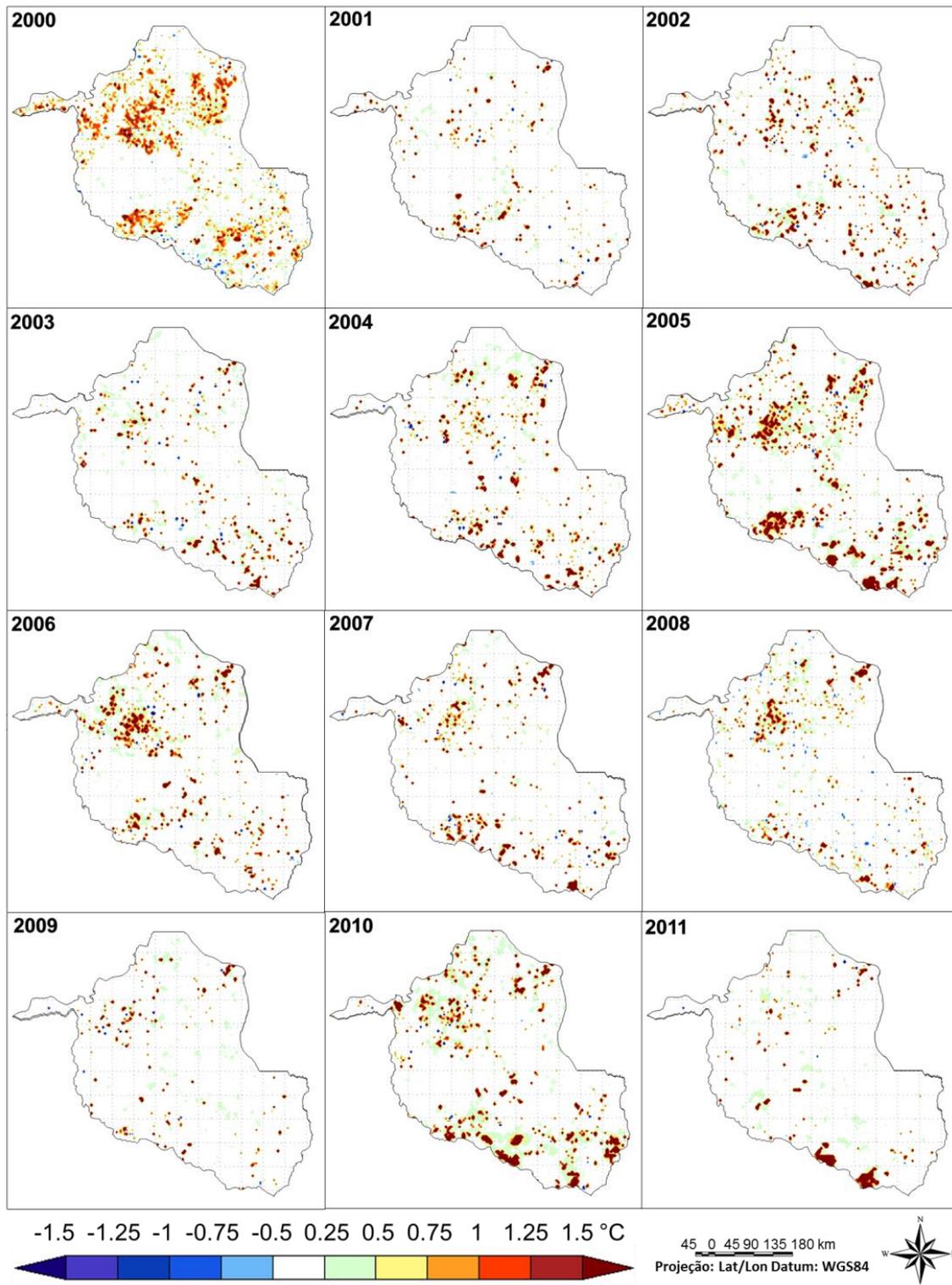


Figura 37 - Mudanças ocorridas na temperatura do ar devido às queimadas no Estado de Rondônia (2000 a 2011).

A **Figura 38** mostra o gráfico da anomalia da temperatura distribuída em diversos níveis da atmosfera. Neste caso foram selecionados cinco pontos em áreas queimadas para cada ano e a média da temperatura total diária foi gerada. A linha vermelha tracejada representa

a média diária da temperatura e a linha preta representa a variação máxima da anomalia da temperatura do ar nas camadas atmosféricas que ocorre durante o dia (produto originado da diferença entre as simulações controle-queimadas).

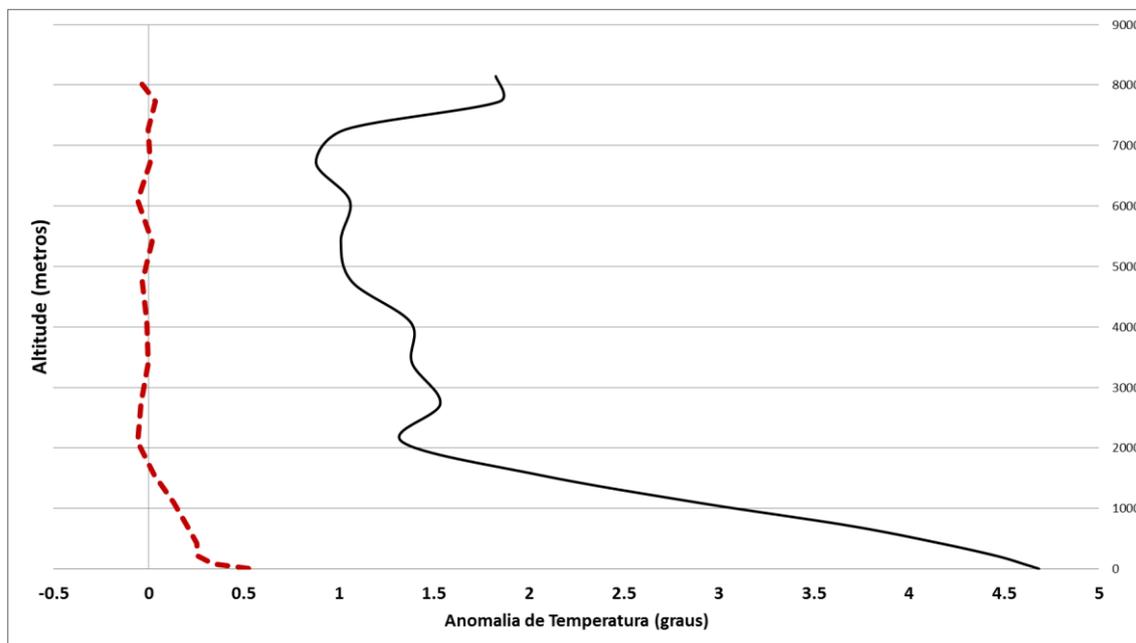


Figura 38 - Gráfico da anomalia da temperatura em diversos níveis da atmosfera no Estado de Rondônia.

Percebe-se que, em média, a temperatura do ar na superfície apresenta um aumento médio de 0,5°C, e dependendo da intensidade da queimada, a diferença entre as duas simulações (controle-queimada) pode atingir quase 5°C. Ao analisar a variação da temperatura do ar em altitude entre as duas simulações, percebe-se que a 1000 metros a temperatura do ar apresenta um aumento de 0,3 °C em média, sendo que nas áreas que apresentam grandes cicatrizes esse aumento pode chegar a 3°C devido à convecção do ar. Na altitude de 2000 metros percebe-se que os valores médios da temperatura do ar sofrem pouca variação, principalmente quando a cicatriz possui pouca extensão, porém dependendo da intensidade da queimada as temperaturas máximas podem atingir um aumento de 1,5°C neste nível.

6.3.6. Impactos na evapotranspiração

As modificações ocorridas nos parâmetros físicos da superfície devido às queimadas provocam a alteração também da evapotranspiração, conforme pode ser verificado na **Figura 39**.

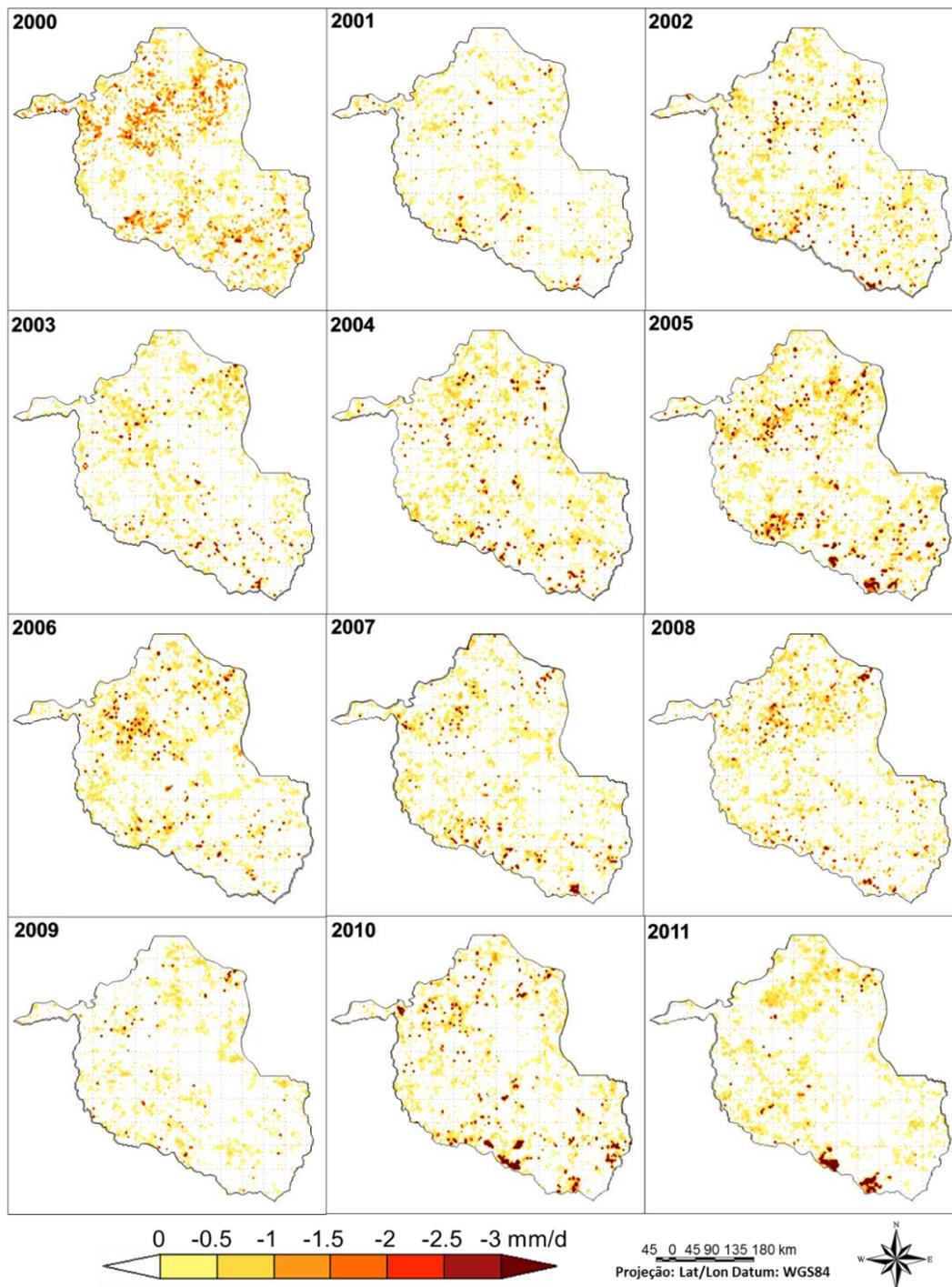


Figura 39 - Mudanças ocorridas na evapotranspiração devido às queimadas no Estado de Rondônia (2000 a 2011).

O transporte de água para a atmosfera a partir da remoção da água da superfície ocorre pela evaporação, que é a transferência da água para a atmosfera sob a forma de vapor e dependerá do suprimento externo de energia, grau de saturação do ar, velocidade do vento e disponibilidade de água; e pela transpiração, que é a evaporação da água que foi

utilizada nos processos metabólicos necessários ao crescimento e desenvolvimento das plantas. Em áreas queimadas o transporte de água para a atmosfera ocorre principalmente pela evaporação da água presente no solo ou nos resíduos das queimadas presentes na superfície (HARTMANN, 1994; PEREIRA et al., 1997).

Assim, a modificação no balanço de ondas curtas e nas temperaturas da superfície e do ar ocasiona a alteração da quantidade de água disponível na planta e, conseqüentemente, na liberação da mesma, afetando a evapotranspiração da vegetação. Estimativas indicam que na Amazônia as taxas da evapotranspiração são de 4 mm ao dia, e podem apresentar variações sazonais (FISCH et al., 1998). Neste contexto, percebe-se na **Figura 39** que nas áreas queimadas as taxas médias das modificações na evapotranspiração das plantas podem apresentar uma diminuição que ultrapassa 3 milímetros (mm) ao dia, representadas na cor vermelho escuro dos mapas, sendo que os valores máximos de redução podem chegar a 4 mm ao dia, principalmente nas áreas que apresentam as queimadas de maior intensidade e que variam de acordo com os anos analisados.

De uma forma geral a diminuição na evapotranspiração ocorre por todo o Estado e em todos os anos, coincidindo sempre com as áreas queimadas, com exceção dos anos de 2001, 2003 e 2009, em que as áreas queimadas apresentaram menores proporções nas ocorrências. Destaca-se ainda as grandes cicatrizes de queimadas que ocorreram nos anos de 2005, 2010 e 2011 no sul do Estado, associadas com áreas de vegetação com influência fluvial e/ou lacustre, áreas de cerrado compostas pela savana parque, pela savana arborizada e com pecuária, que apresentam uma diminuição de 4 mm ao dia na evapotranspiração provocadas pelas queimadas.

Desta forma, percebe-se que no Estado de Rondônia as modificações ocorridas no balanço de radiação provocam o aumento da energia disponível para a realização dos processos físicos da superfície, o que demonstra o aumento na temperatura do ar, na temperatura da superfície e na diminuição da evapotranspiração, e as maiores alterações são verificadas nas áreas que apresentam queimadas intensas, como nas grandes cicatrizes localizadas no sul do Estado, além da região norte e no centro-leste do Estado, e estas modificações estão relacionadas com o uso e cobertura da terra, principalmente para a abertura e manutenção de áreas destinadas à agropecuária.

Estudos indicam que as alterações provocadas na cobertura vegetal da Amazônia provocam consequências de ordem climática e estão relacionados com o aumento da temperatura do ar próximo à superfície e com a diminuição da evapotranspiração e da precipitação, que ocorrem principalmente durante a estação seca (OLIVEIRA, 2008). Neste caso, os resultados deste trabalho indicaram que a precipitação não apresentou mudanças significativas em relação à ocorrência das queimadas (significante a $p < 0,05$, teste T *Student*), conforme **Figura 40**, que indica a correlação entre a precipitação ocorrida na área de estudo durante os meses analisados simulados para os experimentos controle-queimada.

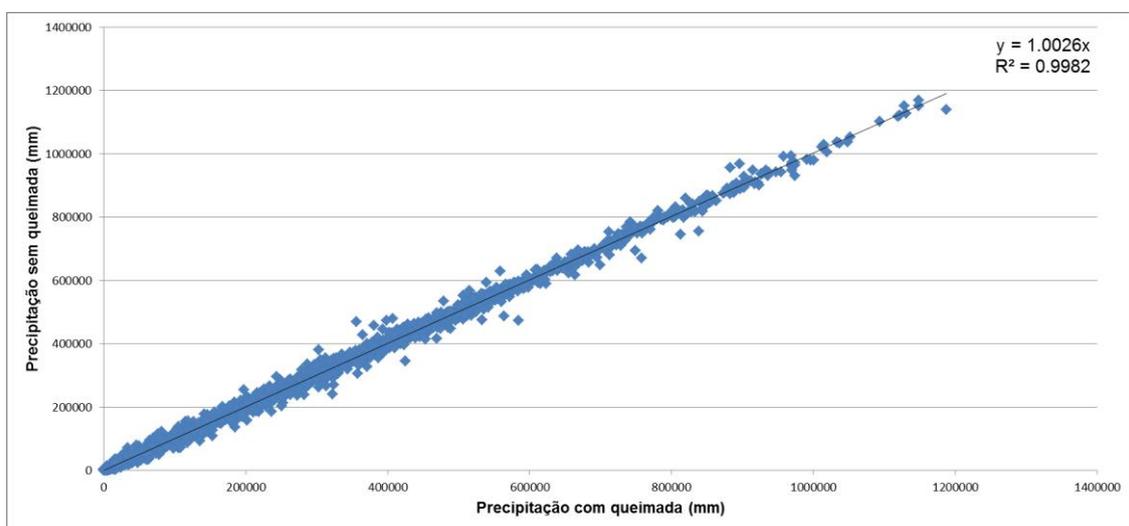


Figura 40 - Gráfico da precipitação (em mm) simulada para Rondônia nos anos de 2000 a 2011 com queimadas (eixo x) e sem queimadas (eixo y).

Os valores da precipitação total originados da modelagem numérica com os dois tipos de usos (controle-queimada) foram plotados no gráfico. Percebe-se que a correlação entre eles foi de 99%, assim como a precipitação convectiva, destacando-se que a precipitação não é alterada com a ocorrência das queimadas na área de estudo (sem levar em consideração os gases e aerossóis liberados).

Cabe destacar, que a composição e a concentração em massa das partículas de aerossóis são afetadas pelo transporte das massas de ar a longas distâncias, fato observado nas brumas de fumaça perceptíveis nas imagens de satélites. Portanto, o regime de precipitação possui maior dependência da advecção de umidade proveniente de outras regiões da floresta Amazônica, e que a emissão de particulados carbonáceos provenientes

das queimadas não afetou a evolução das nuvens a ponto de ser detectável na alteração da precipitação local no período da estação seca.

Ainda, pode-se perceber que em muitos casos, a precipitação apenas se deslocou em relação ao ponto de origem na simulação controle, tendo pouca influência, desta forma, na soma total da precipitação. Na análise do gráfico, percebe-se que alguns pontos encontram-se abaixo da reta, indicando que em alguns casos a precipitação tende a diminuir na época queimada. Ressalta-se que por se tratar de uma época seca, na qual os índices pluviométricos são baixos, já era esperado que a alteração nesta variável não fosse tão evidente.

A **Tabela 5** mostra o RMSE e o erro absoluto da radiação de ondas curtas incidente, da temperatura do ar a 2m e da temperatura da superfície observados em campo e simulados no modelo RegCM4 para os meses de agosto, setembro e outubro do ano de 2003.

Tabela 5 - RMSE e erro absoluto da radiação de ondas curtas incidente, temperatura do ar a 2m e temperatura da superfície observados em campo e simulados no modelo RegCM4 para os meses de agosto, setembro e outubro do ano de 2003.

| Meses de simulações (2003) | Radiação de ondas curtas incidente | Temperatura do ar a 2m | Temperatura da superfície |
|----------------------------|------------------------------------|------------------------|---------------------------|
| | RMSE (W/m ²) | RMSE (°C) | RMSE (°C) |
| Agosto | 84,96 | 4,67 | 3,72 |
| Setembro | 38,31 | 3,31 | 2,39 |
| Outubro | 32,40 | 1,77 | 1,41 |
| | Erro Absoluto (%) | Erro Absoluto (%) | Erro Absoluto (%) |
| Agosto | 24.91 | -14.88 | -10.33 |
| Setembro | 26.23 | -9.06 | -3.16 |
| Outubro | 43.94 | -4.98 | 4.62 |

Os dados observados em campo foram obtidos de uma torre micrometeorológica do projeto LBA, localizada na região da Fazenda Nossa Senhora Aparecida (FNSA), localizada nas coordenadas 10° 45' 45'' S e 62° 21' 29'' W, possuindo 10 metros de altura. Este local está centralizado em uma área de 50 km de raio que forma uma imensa clareira, com vegetação predominante do tipo gramínea (OLIVEIRA, 2013).

Desta forma, percebe-se que a radiação de ondas curtas incidente foi subestimada pelo RegCM4 em aproximadamente 25% em relação aos dados observados, representando 85 W/m² a menos em relação aos dados observados no mês de agosto, 26,33% no mês de

setembro, representando 38,31 W/m² e 44% no mês de outubro, representando 32,40 W/m².

Em relação à temperatura do ar a 2m, o RegCM4 apresentou uma superestimativa de aproximadamente 15% no mês de agosto, representando 4,67°C a mais em relação aos dados observados, 9% no mês de setembro, representando 3,31 °C a mais e 5% no mês de outubro, representando 1,77 °C a mais em relação aos dados de campo.

Sobre a temperatura da superfície, o RegCM4 apresentou uma superestimativa de 10,33% no mês de agosto, representando 3,72 °C a mais em relação aos dados de campo, 3,16% no mês de setembro, representando 2,39 °C a mais e uma subestimativa de 4,62% no mês de outubro, representando 1,41 °C a menos do que os dados observados em campo.

Ressalta-se que esta validação foi realizada com o intuito de avaliar os resultados do modelo RegCM4 com os dados de campo existentes, desta forma, pode-se dizer que os dados pontuais não refletem as estimativas de um ponto da grade do modelo, sendo apenas um indicador da coerência deste com as demais variáveis.

7. CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

As queimadas que ocorrem em Rondônia estão associadas, em geral, com o uso e cobertura da terra, especialmente para a produção e expansão agropecuária, e essas práticas ocasionam diversos impactos tanto na superfície quanto na atmosfera, causando modificações nas componentes biosfera-atmosfera que podem extrapolar a escala de atuação local.

Os resultados mostraram que a validação dos mapeamentos das áreas queimadas nas imagens do sensor MODIS apresentam uma boa correlação com os dados de referência. As menores correlações estiveram relacionadas com a diferença na resolução espacial dos sensores TM/ETM+ e MODIS, principalmente devido à elevada presença de pequenas cicatrizes, que não são identificadas nas imagens MODIS, sendo que à medida que o tamanho das cicatrizes aumenta, também aumenta a correlação entre ambos os produtos. Desta forma, mesmo apresentando estas limitações de geometria, os resultados mostraram uma boa correlação entre os mapeamentos de ambos os produtos, o que torna os mapeamentos das imagens MODIS confiáveis.

A análise de regressão linear pode ser utilizada não somente como um procedimento de validação, mas também na calibração de estimativas de área queimada provenientes de sensores de baixa resolução espacial a partir de sensores de média resolução, sendo que os parâmetros de regressão devem ser utilizados no ajuste das estimativas. Neste contexto, embora o produto MODIS de 250 metros cause a omissão de uma parcela das queimadas, ainda assim é indicado na determinação das áreas queimadas por ser um produto diário e que possui melhor resolução espacial comparados com outros produtos de baixa resolução, sendo, portanto, uma boa alternativa para a obtenção de dados acerca de toda a estação queimada.

O MLME mostrou grande eficiência em destacar os alvos escuros da superfície, como é o caso das queimadas. Outra grande vantagem no uso deste método consiste na eficiência da aplicação da segmentação, que ocorre de forma muito rápida, facilitando o processo do mapeamento, principalmente quando o estudo envolve uma grande série temporal. Ainda, a edição manual no mapeamento foi imprescindível para a obtenção de estimativas mais precisas, evitando possíveis erros de omissão e inclusão nos resultados, já que esses

dados são de fundamental importância não apenas para a análise temporal e espacial das ocorrências, mas principalmente por ser um dos dados de entrada necessários em modelos numéricos do clima, que indicarão os impactos ocorridos nos parâmetros físicos da superfície e atmosfera.

Assim, percebe-se que as queimadas em Rondônia abrangeram grandes áreas anualmente, especialmente na porção central norte, no meio leste e no sul do Estado, com destaque para os anos de 2005, 2010 e 2004. As maiores áreas queimadas estão presentes em áreas de extrativismo vegetal, em áreas mistas de pecuária de animais de grande porte e cultivos permanentes diversificados e áreas exclusivas de pecuária de animais de grande porte. Desta forma, percebe-se que a ocorrência das queimadas está intrinsecamente vinculada ao uso e cobertura da terra, principalmente no que diz respeito à abertura e à manutenção de novas áreas destinadas à pecuária e agricultura, e que quando o uso da terra associa-se a episódios de eventos climáticos extremos, como as secas ocorridas em 2005 e 2010, a ocorrência das queimadas aumenta, assim como os seus impactos.

Neste contexto, percebeu-se a partir das simulações que as queimadas provocaram um aumento na absorção da irradiância solar incidente na superfície, cujo valor médio foi superior a 30 watts por metro quadrado (W/m^2), atingindo valores máximos de $90 W/m^2$ em áreas onde as queimadas foram mais intensas. A maior absorção da radiação solar incidente causa alterações nas trocas de calor e faz com que a temperatura da superfície se eleve, o que ocasiona a mudança no balanço de radiação de ondas longas. Este apresentou uma variação média diária superior a $6 W/m^2$, cujos valores máximos desta variação podem ultrapassar $40 W/m^2$ nas áreas que apresentam queimadas mais intensas.

Perceberam-se também alterações ocorridas no balanço de radiação da superfície provenientes das queimadas, apresentando em média uma alteração de $45 W/m^2$ ao dia, podendo ultrapassar $90 W/m^2$ ao dia, fator que provoca o aumento da energia disponível para a realização dos processos físicos da superfície, o que demonstra o aumento na temperatura da superfície e do ar e diminuição da evapotranspiração.

Assim, nota-se que todos os parâmetros físicos da superfície estão interligados, e que a alteração nas características da superfície podem afetar todo o balanço de energia e, conseqüentemente, o clima local, regional e até global. Desta forma, a diminuição no albedo da superfície altera o balanço de radiação de ondas curtas devido ao aumento da absorção da radiação incidente e, conseqüentemente, modifica o balanço de radiação de ondas longas devido ao aumento da temperatura da superfície e do ar. Verificou-se que a temperatura da superfície apresentou um aumento que pode ultrapassar em média 1,5 graus Celcius (°C) por dia, podendo atingir um valor máximo que chega a 18°C de variação, enquanto que a temperatura do ar apresentou um aumento médio de 1,5°C por dia, podendo atingir um valor máximo superior a 5°C. Esta modificação também foi percebida para a temperatura do ar em altos níveis, indicando um aumento máximo de 1,5°C até 2000 metros de altitude, dependendo da queimada ocorrida.

Desta forma, outro parâmetro que é modificado devido às queimadas é a evapotranspiração, pois a alteração no balanço de ondas curtas e nas temperaturas da superfície e do ar ocasiona a diminuição da quantidade de água disponível no solo e nas vegetações remanescentes e, conseqüentemente, na liberação para a atmosfera, apresentando modificações na ordem -3 milímetros (mm) ao dia, podendo chegar a uma redução de 4 mm ao dia aproximadamente.

Portanto, ressalta-se a importância da obtenção de estimativas mais precisas acerca das alterações provocadas pela queima da biomassa nos parâmetros físicos da superfície, e que, conseqüentemente, influenciam na modificação dos parâmetros da atmosfera. Para este propósito, a integração de dados de sensoriamento remoto com informações da superfície, como as coletadas em campo, utilizadas no modelo RegCM4 mostrou ser uma ferramenta de fundamental importância, possibilitando a estimativa e espacialização das modificações do balanço de radiação da superfície, que é essencial na obtenção da estimativa do balanço de energia.

Os resultados alcançados podem auxiliar em estudos futuros na avaliação dos impactos provocados pelas mudanças no uso e cobertura da terra provenientes da queima de biomassa na região Amazônica, subsidiando o entendimento acerca das modificações ocasionadas no clima da região.

Neste contexto, sugere-se como trabalhos futuros a inserção dos gases do efeito estufa e aerossóis liberados pelas queimadas no modelo RegCM4, que proporcionarão a melhoria na estimativa da contra-radiação de ondas longas e, conseqüentemente, no cálculo do balanço de energia na superfície. Esses dados poderão ser inseridos mensalmente, subsidiando o entendimento acerca dos meses que causam mais impactos na região. Para isso, faz-se necessário a utilização de sistemas computacionais de alto desempenho para minimizar o tempo de processamento dos dados de satélites integrados no modelo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABIODUN, B. J.; PAL, J. S.; AFIESIMAMA, E. A.; GUTOWSKI, W. J.; ADEDOYIN, A. Simulation of West African monsoon using RegCM3 Part II: impacts of deforestation and desertification. **Theoretical and Applied Climatology**, n. 93, p. 245-261, 2008.
- ALVES, D. S.; SKOLE, D. Characterizing land cover dynamics using multitemporal imagery. **International Journal of Remote Sensing**, v. 17, n. 4, p. 835-839, 1996.
- ALVES, D. S.; ESCADA, M. I. S.; PEREIRA, J. L. G.; LINHARES, C. D. Land use intensification and abandonment in Rondonia, Brazilian Amazonia. **International Journal of Remote Sensing**, v. 24, n. 4, p. 899-903, 2003.
- 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**, The MIT Press, Cambridge, MA, p. 2-21, 1991.
- ANDREAE, M. O.; MERLET, P. Emission of trace gases and aerosols from biomass burning, **Global Biogeochem. Cycles**, v. 4, n. 15, p. 955-966, 2001.
- ARAÚJO, T. M.; CARVALHO, J. A.; HIGUCHI, N.; BRASIL, A.C.P.; MESQUITA, A. L. A. A tropical rainforest clearing experiment by biomass burning in the state of Pará, Brazil. **Atmospheric Environment**, v. 33, p. 1991-1998, 1999.
- ARINO, O.; PICCOLINI, I.; KASISCHKE, E.; SIEGER, F.; CHUVIECO, E.; MARTÍN, P.; LI, Z.; FRASER, R.; EVA, H.; STROPPIANA, D.; PEREIRA, J.; SILVA, J. M. N.; ROY, D.; BARBOSA, P. M. Methods of mapping burned surfaces in vegetation fires. In: AHERN, F. J.; GALDAMMER, J. G.; JUSTICE, C. O (ed.). **Global and regional vegetation fire monitoring from space: planning a coordinate international effort**. Kugler Publications, 2001, 302 p.
- BARBOSA, P.M.; GRÉGOIRE, J. M.; PEREIRA, J. M. C. An algorithm for extracting burned areas from time series of AVHRR GAC data applied at a continental scale. **Remote Sensing of Environment**, v. 69, p. 253-263, 1999.
- BASTABLE, H. G.; SHUTTLEWORTH, W. J.; DALLAROSA, R. L. G.; FISCH, G.; NOBRE, C. A. Observations of climate, albedo, and surface radiation over

cleared undisturbed Amazonian forest. **International Journal of Climatology**, v. 13, n. 7, p. 783-796, 1993.

BATISTA, I. X. **Desenvolvimento em Rondônia**: políticas públicas, desmatamento e evolução socioeconômica. 2001. 172 p. Dissertação (Mestrado em Geociências e Meio Ambiente) - Universidade Federal de Rio Claro, Rio Claro, 2001.

BECKER, B. K. A (des)ordem global, o desenvolvimento sustentável e a Amazônia. In: CHRISTOFOLETTI, A.; BECKER, B. K.; DAVIDOVICH, F. R. (Eds.). **Geografia e meio ambiente no Brasil**. São Paulo-Rio de Janeiro: Hucitec, 1995. p. 46-64.

BECKER, B. K. Geopolítica da Amazônia. **Estudos Avançados**, v. 19, p. 71-86, 2005.

BOWMAN, D. M. J. S.; BALCH, J. K.; ARTAXO, P.; BOND, W. J.; CARLSON, J. M.; COCHRANE, M. A.; D'ANTONIO, C. M.; DEFRIES, R. S.; DOYLE, J. C.; HARRISON, S. P.; JOHNSTON, F. H.; KEELEY, J. E.; KRAWCHUK, M. A.; KULL, C. A.; MARSTON, B.; MORITZ, M. A.; PRENTICE, C.; ROOS, C. I.; SCOTT, A. C.; SWETNAM, T. W.; WERF, G. R. V.; PYNE, S. J. Fire in the Earth System. **Science**, v. 324, p. 481-484, 2009.

BRIEGLEB, B. P. Delta-Eddington approximation for solar radiation in the NCAR Community Climate Model. **J. Geophys. Res.**, v. 97, p. 7603-7612, 1992.

CARDOSO, M.; NOBRE, C.A.; LAPOLA, D.; OYAMA, M.D.; SAMPAIO, G. Long-term potential for fires in estimates of the occurrence of savannas in the tropics. **Global Ecology and Biogeography**, n. 17, p. 222-235, 2008.

CARDOSO, M.; NOBRE, C.; SAMPAIO, G.; HIROTA, M.; VALERIANO, D.; CÂMARA, G. Long-term potential for tropical-forest degradation due to deforestation and fires in the Brazilian Amazon. **Biologia (Bratislava)**, v. 64, p. 433-437, 2009.

CARLSON, T. N.; RIPLEY, D. A. On the relation between NDVI, fractional vegetation cover, and leaf area index. **Remote Sensing of Environment**, v. 62, p. 241-252, 1997.

CAVIGLIA-HARRIS, J.; HARRIS, D. The impact of settlement design on tropical deforestation rates and resulting land cover patterns. **Agricultural and Resource Economics Review**, v. 40, n. 3, p. 451-470, 2011.

COCHRANE, M. A. Fire and fire ecology: concepts and principles. In: _____. **Tropical fire ecology, climate change, land use and ecosystem dynamics**, Chichester, UK: Springer, 2009. p. 60-97.

COSTA, O. B. C. **Avaliação espaço-temporal da expansão do plantio de soja na dinâmica do uso da terra no Estado de Rondônia - RO. 2013.** 131 p. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade de Brasília, Brasília, 2013.

CRUTZEN, P. J.; ANDREAE, M. O. Biomass burning in the tropics: Impact on atmospheric chemistry and biogeochemical cycles. **Science**, v. 250, n. 4988, p. 1669-1678, 1990.

CUADRA, S. V.; DA ROCHA, R. P. Simulação Numérica do Clima de Verão Sobre o Sudeste do Brasil e sua Variabilidade. **Rev. Bras. Meteorol.**, v. 21, p. 271 -282, 2006.

CULF, A. D.; ESTEVES, J. L.; MARQUES FILHO, A. O.; ROCHA, H. R. Radiation, temperature and humidity over forest and pasture in Amazonia. In: GASH, J. H. C.; NOBRE, C. A.; ROBERTS, J. M.; VICTORIA, R. L. (Ed.). **Amazonian deforestation and climate**. Chichester: John Wiley & Sons, 1996. p. 175-192.

DA ROCHA, R. P.; MORALES, C. A.; CUADRA, S. V.; AMBRIZZI, T. Precipitation diurnal cycle and summer climatology assessment over South America: An evaluation of Regional Climate Model version 3 simulations. **J. Geophys. Res.**, 114, 2009, D10108, doi:10.1029/2008JD010212.

DENICH, M. **Estudo da importância de uma vegetação secundária nova para o incremento da produtividade do sistema de produção na Amazônia Oriental brasileira**. Gottingem: Universidade George August de Gottingen, 1991.

DIAS, R. J. **Rondônia - urbanização e expansão da fronteira agrícola**. 1980. 159f. Dissertação (Mestrado em Planejamento Urbano) - Universidade de Brasília, Brasília, 1980.

DICKINSON, R. E.; KENNEDY, P. J.; HENDERSON-SELLERS, A.; WILSON, M. **Biosphere-atmosphere transfer scheme (bats) for the ncar community climate model**. National Center for Atmospheric Research, 1986. Tech. Rep. NCARE/TN-275+STR

DICKINSON, R. E.; ERRICO, R. M.; GIORGI, F.; BATES, G. T. A regional climate model for the western United States. **Climatic Change**, v. 15, p. 383-422, 1989.

DRUYAN, L. M.; FULAKEZA, M.; LONERGAN, P. Dynamic downscaling of seasonal climate predictions over Brazil, **J. Clim.**, 15, p. 3411 - 3426, 2002.

EMANUEL, K. A. A scheme for representing cumulus convection in large-scale models. **Journal of the Atmospheric Sciences**, v. 48, p. 2313-2335, 1991.

EVA, H.; LAMBIN, E. F. Remote sensing of biomass burning in tropical regions: sampling issues and multi sensor approach. **Remote Sensing of Environment**, v. 64, p. 292-315, 1998.

FAMINOW, M. D. **Cattle, deforestation and development in the Amazon: an economic, agronomic and environmental perspective**. New York - USA: CAB international, 1998. 253p.

FEARNSIDE, P. M.; RIGHI, C. A.; GRAÇA, P. M. L. A.; KEIZER, E. W. H.; CERRI, C. C.; NOGUEIRA, E. M.; BARBOSA, R. I. Biomass and greenhouse gas emissions from land-use change in Brazil's Amazonian "arc of deforestation": the states of Mato Grosso and Rondônia. **Forest Ecology and Management**, n. 258, p. 1968-1978, 2009.

FERRAZ, S. F. de B.; VETTORAZZI, C.; THEOBALD, D. D.; BALLESTER, M. Landscape dynamics of Amazonian deforestation between 1984 and 2002 in central Rondônia, Brazil: assessment and future scenarios. **Forest Ecology and Management**, v. 204, n. 1, p. 69-85, 2005.

FERRAZ, S. F. de B.; CANTEIRO CAPÃO, L. M. S.; VETTORAZZI, C. A. Temporal scale and spatial resolution effects on Amazon Forest fragmentation assessment in Rondônia. **International Journal of Remote Sensing**, v. 27, n.3, p. 459-472, 2006.

FISCH, G.; MARENGO, J. A.; NOBRE, C. A. Uma revisão geral do clima da Amazônia. **Acta Amazonica**, v. 28, n. 2, p. 101-126, 1998.

FIORINO, M. **A multi-decadal daily sea surface temperature and sea ice concentration data set for the ERA-40 reanalysis**. ECMWF: Reading, UK, 2004. ERA-40 Project Report Series No. 12.

FRANÇA, D. A.; FERREIRA, N. J. Considerações sobre o uso de satélites na detecção e avaliação de queimadas. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 12. (SBSR), 2005, Goiânia. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2005. p. 3017-3024. CD-ROM, On-line. ISBN 85-17-00018-8. (INPE-12708-PRE/7998). Disponível em: <<http://urlib.net/ltid.inpe.br/sbsr/2004/11.20.11.30>>. Acesso em: 16 jun. 2014.

FRANCHITO, S. H.; MORAES, E. C.; RAO, V. B. Simulations with a radiation model and comparisons with LBA data sets. **Journal of Geophysical Research**, v. 107, n. D20, p. 1-11, 2002.

FREITAS, S. R.; LONGO, K. M.; DIAS, M. A. F. S.; DIAS, P. L. S.; CHATFIELD, R.; PRINS, E.; ARTAXO, P.; GRELL, G. A.; RECUERO, F.S. Monitoring the transport of biomass burning emissions in South America. **Environmental Fluid Mechanics**, n. 5, p. 135-167, 2005.

FRITSCH, J. M.; CHAPPELL, C. F. Numerical prediction of convectively driven mesoscale pressure systems. part i: Convective parameterization, **J. Atmos. Sci.**, v. 37, p. 1722-1733, 1980.

GALVÃO, J. A. C.; FISCH, G. Balanço de energia em áreas de floresta e de pastagem na Amazônia (Ji-Paraná, RO). **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 15, n. 2, p. 25-37, 2000.

GIGLIO, L.; KENDALL, J. D.; MACK, R. A multi-year active fire data set for the tropics derived from TRMM VIRS. **International Journal of Remote Sensing**, v. 24, p. 4505-4525, 2003.

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

GIORGI, F. Two-dimensional simulations of possible mesoscale effects of nuclear war fires. **J. Geophys. Res.**, v. 94, p. 1127-1144, 1989.

GIORGI, F.; HUANG, Y.; NISHIZAWA, K.; FU, C. A seasonal cycle simulation over eastern Asia and its sensitivity to radiative transfer and surface processes. **J. Geophys. Res.**, v. 104, p. 6403-6423, 1999.

GIORGI, F.; COPPOLA, E.; SOLMON, F.; MARIOTTI, L.; SYLLAN, M. B.; BI, X.; ELGUINDI, N.; DIRO, G. T.; NAIR, V.; GIULIANI, G.; TURUNCOGLU, U. U.; COZZINI, S.; GUTTLER, I.; O'BRIEN, T. A.; TAWFIK, A. B.; SHALABY, A.; ZAKAY, A. S.; STEINER, A. L.; STORDAL, F.; SLOAN, L. C.; BRANKOVIC, C. RegCM4: model description and preliminary tests over multiple CORDEX domains. **Climate Research**. v. 57, p. 7-29, 2012.

HARTMANN, D. L. **Global physical climatology**. New York: Academic Press, 1994. 441p.

HOLTSLAG, A. A. M.; Bruijn, E. I. F.; Pan, H. L. A high resolution air mass transformation model for short-range weather forecasting, **Mon. Wea. Rev.**, v. 118, p. 1561-1575, 1990.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Mapa de vegetação do Brasil**. Rio de Janeiro, 2004.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Manual técnico da vegetação Brasileira**. Rio de Janeiro, 2012.

ICHOKU, C.; KAUFMAN, Y. J. A method to derive smoke emission rates from MODIS fire radiative energy measurements. **IEEE Trans. on Geosc. & Rem. Sens.**, v. 43, n. 11, p. 2636-2649, 2005.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS (INPE). **Monitoramento da Cobertura Florestal da Amazônia por Satélites**. São José dos Campos, 2008.

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

KIEHL, J. T. J. J.; HACK, G. B.; BONAN, B. A.; BOVILLE, B. P.; BREIGLEB, D.; WILLIAMSON, P.; RASCH, P. **Description of the ncar community climate model (ccm3)**, Tech. Rep. NCAR/TN-420+STR, National Center for Atmospheric Research, 1996.

LEWIS, S. L.; BRANDO, P. M.; PHILLIPS, O. L.; HEIJDEN, G. M. F. VAN DER; NEPSTAD, D. The 2010 Amazon drought. **Science (New York, N.Y.)**, v. 331, n. 6017, p. 554, 4 fev. 2011.

LIANG, S. Narrowband to broadband conversions of land surface albedo I algorithms. **Remote Sensing of Environment**, v. 76, p. 213-238, 2000.

LIMA, A. **Influência da cobertura da terra na extensão e configuração espacial de áreas queimadas em anos de seca extrema na Amazônia Oriental**. 2013. 110 p. (sid.inpe.br/mtc-m19/2013/03.08.16.30-TDI). Tese (Doutorado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos. 2013.

LIU, Y. Q.; AVISSAR, R.; GIORGI, F. A simulation with the regional climate model RegCM2 of extremely anomalous precipitation during the 1991 East Asian flood: An evaluation study, **J. Geophys. Res.**, n. 101, p. 26199-26216, 1996.

LIU, Y. Atmospheric response and feedback to radiative forcing from bio-mass burning in tropical South America. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 133 (1-4), p. 40-53, 2005.

LOHMANN, U.; FEITCHER, J. Global indirect aerosol effects: a review. **Atmos. Chem. Phys.**, v. 5, p. 715-737, 2005.

MALINGREAU, J.-P.; TUCKER, C. J. Large-scale deforestation in the southeastern Amazon basin of Brasil. **Ambio**, v. 17, n. 1, p. 49-55, 1988.

MARENGO, J. A.; NOBRE, C. A.; TOMASELLA, J.; OYAMA, M. D.; OLIVEIRA, G. S. DE; OLIVEIRA, R. DE; CAMARGO, H.; ALVES, D. S.; BROWN, I. F. The drought of Amazonia in 2005. **Journal of Climate**, v. 21, n. 3, p. 495-516, 2008.

MARENGO, J. A.; NOBRE, C.; SALAZAR, L. F. Regional climate change cenarios in South America in the Late XXI Century: projections and expected impacts. **Nova Acta Leopoldina**, n. 112, p. 251-265, 2010.

MIGUEL, S. M.; HUESCA, M.; GONZÁLEZ-ALONSO, F. Modis reflectance and active fire data for burn mapping and assessment at regional level. **Ecological Modelling**, v. 221, p. 67-74, 2010.

MOOSMULLER, H., CHAKRABARTY, R. K., ARNOTT, W. P. Aerosol light absorption and its measurement: A review. **J. Quant. Spect. & Rad. Transfer.**, v. 10, p. 844-878, 2009.

MORAES, E. C.; FRANCHITO, S.H.; BRAHMANANDA RAO, V. Effects of biomass burning in Amazonia on climate: A numerical experiment with a statistical-dynamical model. **Journal of Geophysical Research**, v. 109, n. D05109, p. 1-12, 2004.

OLESON, K. **Technical description of the Community Land Model (CLM)**. Tech. Rep. Technical Note NCAR/TN-461+STR, NCAR, 2004. DOI: 10.5065/D6N877R0.

OLIVEIRA, G. S. **Conseqüências climáticas da substituição gradual da floresta tropical amazônica por pastagem degradada ou por plantação de soja: um estudo de modelagem**. 2008. 417 p. (INPE-15263-TDI/1346). Tese (Doutorado em Meteorologia) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2008.

PEDLOWSKI, M.; DALE, V.; MATRICARDI, E. A. T. A criação de áreas protegidas e os limites da conservação ambiental em Rondônia. **Ambiente e Sociedade**, n. 5, p. 93-108, 1996.

PERDIGÃO, F.; BASSEGIO, L. **Migrantes Amazônicos, Rondônia: a trajetória da ilusão**. Loyola ed. São Paulo - SP, 1992. 221p.

PEREIRA, A. R.; VILLA NOVA, N. A.; SEDIYAMA, G. C. **Evapo(transpi)ração**. 1. ed. Piracicaba: FEALQ, 1997. 183 p.

PEREIRA, E. B.; MARTINS, F. R.; ABREU, S. L.; COUTO, P.; STUHLMANN, R.; COLLE, S. Effects of burning of biomass on satellite estimations of solar irradiation in Brazil. **Solar Energy**, v. 68, n. 1, p. 91-107, 2000.

PEREIRA, G. **Impactos das atualizações do uso e cobertura da terra e das características físico-químicas da vegetação na América do Sul em modelos climáticos**. 2012. 111 p. Tese (Doutorado em Geografia Física) – Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2012.

PEREIRA, G.; FREITAS, S. R.; MORAES, E. C.; FERREIRA, N. J.; SHIMABUKURO, Y. E.; RAO, V. B.; LONGO, K. M. Estimating trace gas and

aerosol emissions over South America: Relationship between fire radiative energy released and aerosol optical depth observations. **Atmospheric Environment**, v. 43, p. 6388-6397, 2009.

RAHMAN, M.; AKHTER, N. Variations in aerosol distributions over SAARC regions by using RegCM. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON NUCLEATION AND ATMOSPHERIC AEROSOLS, 19., 2013, Fort Collins, Colorado, USA. **Proceedings...** Fort Collins, Colorado, USA: AIP, 2013. n. 1527, p. 683-687.

RegCM Team. **RegCM version 4.0 core description**. Disponível em: <<http://eforge.escience-lab.org/gf/download/docmanfileversion/4/235/regcm-guide.pdf>>. Acesso: 13 de janeiro de 2014.

ROCHA, J. C.; ROSA, A. H.; CARDOSO, A. A. **Introdução à química ambiental**. 2. Ed. Porto Alegre: Bookman, 2009.

RONDÔNIA - Governo do Estado de Rondônia. Secretaria de Estado de Planejamento e Coordenação Geral (SEPLAN/RO). **2ª Aproximação do zoneamento sócio-econômico e ecológico do Estado de Rondônia (ZSEE-RO)**. Porto Velho-RO, 2002.

ROY, D. P.; LEWIS, P. E.; JUSTICE, C. O. Burned area mapping using multitemporal moderate spatial resolution data-a bi-directional reflectance model based expectation approach. **Remote Sensing of Environment**, v. 83, p. 263–286, 2002.

SAITO, K. Flames. In: JOHNSON, E. A.; MIYANISHI, K. (Eds.). **Forest fires behavior and ecological effects**. Academic Press, San Diego, CA, 2001.

SAMPAIO, G.; NOBRE, C.; COSTA, M. H.; SATYAMURTY, P.; SOARES-FILHO, B. S.; CARDOSO, M. F. Regional climate change over eastern Amazonia caused by pasture and soybean cropland expansion. **Geophysical Research Letters**, n. 34, p. 1-7, 2007.

SANDRADEWI, J.; PRÉVÔT, A. S. H.; SZIDAT, S.; PERRON, N.; ALFARRA, M. R.; LANZ, V. A.; WEINGARTNER, E.; BALTENSBERGER, U. Using aerosol light absorption measurements for the quantitative determination of wood burning and traffic emission contributions to particulate matter. **Environ. Sci. Technol.**, v. 42, p. 3316-3323, 2008.

SHIMABUKURO, Y. E.; SMITH, J. A. The least squares mixing models to generate fraction images derived from remote sensing multispectral data. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 29, n. 1, p. 16-20, 1991.

SCHLINDWEIN, J. A.; MARCOLAN, A. L.; FIORELI-PERIRA, E. C.; PEQUENO, P. L. L.; MILITÃO, J. S. T. L. Solos de Rondônia: Usos e Perspectivas. **Revista Brasileira de Ciências da Amazônia**, v. 1, n. 1, p. 213-231, 2012.

SECRETARIA ESTADUAL DE DESENVOLVIMENTO AMBIENTAL (SEDAM). **Atlas Ambiental 2002**. Disponível em: <http://www.sedam.ro.gov.br>. Acesso em: 22 de março de 2014.

Secretaria Estadual de Desenvolvimento Ambiental (SEDAM). **Meteorologia: boletins climatológicos anuais**. Disponível em: <http://www.sedam.ro.gov.br>. Acesso em: 22 de março de 2014.

SILVA, J. M.; LINHARES, D. P.; NUNES, D. D.; ASSUNÇÃO, A. G.; LIMA, T. R.; FURLAN, D. N.; CARVALHO, A. C.; SOUZA, R. C. Evolution of deforestation and natural resources degradation in Rondônia. **Sociedade & Natureza**, Special Issue, p. 502-511, 2005.

SKOLE, D.; TUCKER, C. Tropical deforestation and habitat fragmentation in the Amazon: satellite data from 1978 to 1988. **Science**, v. 260, n. 5116, p. 1905-10, 1993.

SOLMON, F., GIORGI, F.; LIOUSSE, C. Aerosol modelling for regional climate studies: application to anthropogenic particles and evaluation over a European/African domain. **Tellus B**, 58, p. 51-72, 2006.

TEIXEIRA, C. G. **Validação do modelo linear de mistura espectral em imagens ASTER/TERRA a partir de dados Ikonos**. 2004. 127 p. (INPE-13183-TDI/1029). Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos. 2004.

TERRACLASS. **Sumário executivo: levantamento de informações de uso e cobertura da terra na amazônia**. Brasília/São José dos Campos: Embrapa/Inpe, 2011.

TUMMON, F.; SOLMON, F.; LIOUSSE, C.; TADROSS, M. Simulation of the direct and semidirect aerosol effects on the southern Africa regional climate during the biomass burning season, **J. Geophys. Res.**, n. 115, D19206, doi:10.1029/2009JD013738, 2010.

VAN DER WERF, G. R.; RANDERSON, J. T.; GIGLIO, L.; COLLATZ, G. J.; KASIBHATLA, P. S.; ARELLANO JR., A. F. Interannual variability in global biomass burning emissions from 1997 to 2004. **Atmospheric Chemistry and Physics**, n. 6, p. 3423-3441, 2006.

WARD, D. Combustion chemistry and smoke. In: JOHNSON, E. A.; MIYANISHI, K. (Eds.). **Forest fires behavior and ecological effects**. Academic Press, San Diego, CA, 2001.

YANAGI, S. N. M. **Albedo de uma floresta tropical Amazônica: medições de campo, sensoriamento remoto, modelagem, e sua influência no clima regional**. 2006. 128 f. Tese (Doutorado em Meteorologia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa. 2006.

ZENG, N.; YOON, J.-H.; MARENGO, J. A.; SUBRAMANIAM, A.; NOBRE, C. A.; MARIOTTI, A.; NEELIN, J. D. Causes and impacts of the 2005 Amazon drought. **Environmental Research Letters**, v. 3, n. 1, p. 1-9, 2008.

ZHAN, X.; SOHLBERG, R. A.; TOWNSHEND, J. R. G.; DIMICELI, C.; CARROLL, M. L.; EASTMAN, J. C.; HANSEN, M. C.; DEFRIES, R. S. Detection of land cover changes using MODIS 250 m data. **Remote Sensing of Environment**, n. 83, v. 2, p. 336-350, 2002.

ZHANG, Y. **Influences of biomass burning on land-atmosphere interactions and dry-to-wet transition over Amazônia**. 2005. 48 p. Thesis (Science in School of Earth and Atmospheric Sciences) - Georgia Institute of Technology, Georgia, 2005.

ZHANG, J.; YIN, Y. Numerical simulations of the effect of black carbon aerosol on regional climate in China. **Bioinformatics and Biomedical Engineering**, p. 3831-3834, doi: 10.1109/ICBBE.2008.459, 2008.

ZHANG, Y. R.; FU, H.; YU, Y.; QIAN, R.; DICKINSON, M. A. F.; SILVA DIAS, P. L.; FERNANDES, K. Impact of biomass burning aerosol on the monsoon circulation transition over Amazonia, **Geophys. Res. Lett.**, n. 36, L10814, doi:10.1029/2009GL037180, 2009.