



ADAPTAÇÃO DOS ÍNDICES DE QUEIMADA (V, W) PARA OS DADOS LANDSAT UTILIZANDO INFORMAÇÕES NO NIR E SWIR

Fabício Rodrigues Teixeira

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Meteorologia, do Instituto de Geociências, do Centro de Ciências Matemáticas e da Natureza da Universidade Federal do Rio de Janeiro (PPGM-IGEO-CCMN-UFRJ), como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Ciências (área: Meteorologia).

Orientadores: *Prof. D. Sc. Renata Libonati dos Santos e Prof. D. Sc.. Leonardo de Faria Peres*

Rio de Janeiro

Junho /2016

**ADAPTAÇÃO DOS ÍNDICES DE QUEIMADA (V, W) PARA OS DADOS
LANDSAT UTILIZANDO INFORMAÇÕES NO NIR E SWIR**

Fabício Rodrigues Teixeira

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM METEOROLOGIA DO INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS DO CENTRO DE CIÊNCIAS MATEMÁTICAS E DA NATUREZA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO (PPGM-IGEO-CCMN-UFRJ) COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS (ÁREA: METEOROLOGIA).

Examinada por:

Prof. D. Sc. Renata Libonati dos Santos

Prof. D. Sc. Leonardo de Faria Peres

Prof. D. Sc. José Ricardo de Almeida França

Prof. D. Sc. Célia Maria Paiva

Prof. D. Sc. Rafael Silva de Barros

Rio de Janeiro

Junho / 2016

Teixeira, Fabrício Rodrigues
T266a Adaptação dos índices de queimada (V, W) para os dados Landsat utilizando informações no NIR e SWIR / Fabrício Rodrigues Teixeira. – Rio de Janeiro: UFRJ/ IGEO, 2016.
xvii, 105f. : il. ; 29,7cm.

Orientadores: Renata Libonati dos Santos e Leonardo de Faria Peres.
Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Instituto de Geociências,
Departamento de Meteorologia, Programa de Pós-graduação em Meteorologia, 2016.
Inclui referências: f. 100-105.
1. Sensoriamento remoto. 2. Monitoramento com satélites. 3. Mapeamento automatizado. 4.
Comportamento espectral. I. Santos, Renata Libonati dos. II. Peres, Leonardo de Faria. III. Título.

*Aos eternos,
Ayrton Vasconcelos Teixeira e Adilson César da Silva,
dedico.*

*“Se eu vi mais longe, foi por estar de pé sobre ombros de gigantes.” ISAAC
NEWTON.*

AGRADECIMENTOS

Aos Professores Renata Libonati dos Santos e Leonardo de Faria Peres, pela oportunidade, orientação, ensinamentos, confiança e motivação;

Aos Professores do Programa de Pós-Graduação em Meteorologia, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, por todos os ensinamentos;

A Coordenação do Curso de Pós-Graduação em Meteorologia, pela organização e dedicação com o Curso de Mestrado;

À Universidade Federal do Rio de Janeiro, por me receber como aluno e pelo apoio institucional;

A CAPES pelo Apoio financeiro durante a realização do Mestrado;

A todos os colegas de Pós-Graduação, pelas trocas de informações e os bons momentos de conversa;

Aos meus Pais, Ronaldo Luiz Paes Teixeira e Eliana Maria Rodrigues Teixeira, pelo incansável apoio e dedicação durante a realização do Mestrado;

À esposa Maria Luísa Ribas d'Avila, pelo incentivo e por me ajudar a perseverar;

A todos os meus familiares e amigos, pelo apoio e palavras de incentivo;

A todos os nossos amigos caninos pelo excelente convívio;

RESUMO

Comunidades científicas que lidam com modelos climáticos e de emissões, requerem informações precisas sobre o quantitativo de áreas queimadas no globo. A série Landsat fornece conjuntos de dados contínuos e de longo prazo, que contribuem para gerar informações de estimativas de áreas queimadas. Esta pesquisa consiste em adaptar o índice de queima (V, W) às características do TM/Landsat, para o mapeamento automatizado de superfícies queimadas no Cerrado brasileiro. O índice de queimada (V, W) foi projetado para as características do sensor MODIS utilizando os canais do infravermelho próximo (NIR, 0,8 μm) e do infravermelho médio (MIR, 3,9 μm). Os autores que projetaram o índice enfatizam que, embora testado com o sensor MODIS, a transformação proposta pode ser diretamente adaptada a outros sensores e a outras combinações de bandas, como o infravermelho de ondas curtas (SWIR2, 2.1 μm) e o infravermelho próximo (NIR, 0.8 μm), no TM/Landsat. O domínio do SWIR2, como o MIR, tem características adequadas para o monitoramento da superfície terrestre após episódios de incêndio, considerando que a resposta espectral das cicatrizes de incêndio no domínio do SWIR2 é semelhante ao observado na região do MIR. Além disso, a região do SWIR2 não é afetada pela presença de aerossóis. A abordagem de adaptação utiliza dados de reflectância de bibliotecas espectrais e imagens TM/Landsat. Os resultados apontam que o índice de queimada (V, W) é apropriado para a discriminação de áreas queimadas em cenas TM/Landsat, abrindo perspectivas para mapeamento automatizado de superfícies queimadas usando imagens do sensor OLI/Landsat.

Palavras-chave: sensoriamento remoto, monitoramento com satélites, mapeamento automatizado e comportamento espectral.

ABSTRACT

Scientific communities that deal with climate and emissions models require accurate information on the amount of burned areas on the globe. The Landsat series provides continuous and long-term data sets that contribute to generate estimates of burned area estimates. This research consists in adapting the burn rate (V, W) to TM/Landsat characteristics, for the automated mapping of burned surfaces in the Brazilian Cerrado. The burn rate (V, W) was designed for MODIS sensor characteristics using the near infrared (NIR, 0.8 μm) and medium infrared (MIR, 3.9 μm) channels. The authors who designed the index emphasize that, although tested with the MODIS sensor, the proposed transformation can be directly adapted to other sensors and other combinations of bands, such as short-wave infrared (SWIR2, 2.1 μm) and near-infrared (NIR, 0.8 μm) in TM/Landsat. The SWIR2 domain, such as the MIR, has adequate characteristics for the monitoring of the Earth's surface after fire episodes, considering that the spectral response of fire scars in the SWIR2 domain is similar to that observed in the MIR region. In addition, the SWIR2 region is unaffected by the presence of aerosols. The adaptation approach uses reflectance data from spectral libraries and TM/Landsat images. The results indicate that the burn rate (V, W) is suitable for the discrimination of burned areas in TM/Landsat scenes, opening perspectives for automated mapping of burned surfaces using OLI/Landsat sensor images.

Keywords: remote sensing, satellite monitoring, automated mapping and spectral behavior.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	xi
LISTA DE TABELAS.....	xv
1. INTRODUÇÃO	18
1.1. OBJETIVO.....	20
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	20
3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	23
3.1. PRINCÍPIOS DE RADIOMETRIA.....	23
3.2. CONCEITO DE CORPO NEGRO	24
3.3. CONSERVAÇÃO DE ENERGIA INCIDENTE E O FLUXO DE ENERGIA	25
3.4. ASPECTOS RELACIONADOS À VEGETAÇÃO	28
3.4.1. Comportamento espectral da vegetação.....	28
3.4.1.1. Região do visível (0,4 – 0,7 μm).....	29
3.4.1.2. Região do infravermelho próximo (0,8 – 1,5 μm).....	29
3.4.1.3. Região do infravermelho de onda curta (1,5 – 3,5 μm).....	29
3.4.1.4. Região do infravermelho médio (3,0 – 5,0 μm).....	30
3.4.2. Comportamento espectral da vegetação queimada.....	31
3.4.2.1. Porque Substituir o MIR pelo SWIR2?.....	33
3.5. SISTEMAS SENSORES	34
3.5.1. Thematic Mapper (TM) Landsat-5	34
3.5.2. Oli/Landsat 8.....	36
4. ÁREA DE ESTUDO.....	38
5. MATERIAL E MÉTODOS	39
5.1. MATERIAL UTILIZADO.....	39
5.1.1. Dados de reflectância de bibliotecas espectrais	39
5.1.2. Dados do TM/Landsat e cicatrizes de referência de área queimada produzidos pelo INPE	40
5.2. METODOLOGIA.....	45
5.2.1. Desenvolvimento	47

5.2.1.1.	<i>Índices de queimada (V, W)</i>	47
5.2.1.2.	<i>Considerações iniciais na adaptação dos índices (V, W) para as bandas NIR e SWIR2 do TM/Landsat</i>	50
5.2.1.3.	<i>Cálculo das reflectâncias a partir de dados das bibliotecas espectrais</i> ..	53
5.2.1.4.	<i>Coleta das amostras de reflectâncias nas imagens TM/Landsat (dados de 2010)</i>	56
5.2.1.5.	<i>Determinação dos pontos de convergência e cálculo dos índices V e W – transformação dos valores de reflectância nas imagens em valores de V e W (dados de 2010)</i>	61
5.2.1.6.	<i>Escolha do ponto de convergência com base no índice de separabilidade M – considerações finais para adaptação (dados de 2010)</i>	61
5.2.1.7.	<i>Cálculo de V e W com base no ponto de convergência escolhido e verificação da adaptação realizada com base no índice de separabilidade M (dados de 2005 e 2008)</i>	62
5.2.2.	Aplicação	63
5.2.2.1.	<i>Definição de limiares espacial e temporal do índice W (dados de 2005 e 2008)</i>	64
5.2.2.2.	<i>Mapeamento de cicatrizes utilizando os limiares espacial e temporal (dados de 2006, 2007 e 2009)</i>	65
5.2.2.3.	<i>Validação do mapeamento automático de cicatrizes obtido com o índice W (dados de 2006, 2007 e 2009)</i>	66
6.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	69
6.1.	<i>RESULTADOS DA ADAPTAÇÃO DO ÍNDICE V E W</i>	69
6.1.1.	Cálculo dos pontos de convergência	70
6.1.2.	Escolha do ponto de convergência com base no índice M	74
6.1.3.	Verificação da adaptação dos índices (V, W) com base no índice M	79
6.2.	<i>APLICAÇÃO DO ÍNDICE W (RESULTADOS)</i>	80
6.2.1.	Limiares espacial e temporal (imagens anos 2005 e 2008)	81
6.2.2.	Aplicação do índice W (Imagens anos 2006, 2007 e 2009)	84
6.2.3.	Validação dos resultados	86
7.	CONCLUSÕES	97
8.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	100

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1.** A intensidade de fluxo radiante emitida pelo Sol. Fonte: Swain & Davis (1978). 24
- Figura 2.** Densidade de Fluxo Radiante para uma área sobre a superfície da Terra. a) Irradiância; b) Reflectância. Fonte: Jensen (2009). 26
- Figura 3.** Apresenta o conceito de radiância com trajetória a partir de uma área fonte projetada específica no terreno, em direção específica, formando um ângulo sólido específico. Fonte: Jensen, 2009. 27
- Figura 4.** Curva típica da reflectância da vegetação e os fatores dominantes que controlam a reflectância da folha em cada região. FONTE: Adaptado de Swain & Davis (1978). 28
- Figura 5** (a) Gráfico, com as assinaturas espectrais da vegetação verde, vegetação seca e material queimado, nas regiões do visível, infravermelho próximo (NIR) e infravermelho de ondas curtas $< 2 \mu\text{m}$ (SWIR1), obtido nas bibliotecas espectrais ASTER e MODIS. (b) Gráfico com as assinaturas espectrais de carvão e vegetação, nas regiões do infravermelho de ondas curtas $> 2 \mu\text{m}$ (SWIR2) e infravermelho médio (MIR), obtidos nas bibliotecas espectrais ASTER e MODIS. Fonte: Adaptado de Libonati (2010). 32
- Figura 6.** Gráfico da função resposta, nas regiões espectrais do NIR e SWIR2, dos sensores OLI/Landsat (vermelho e azul) e TM/Landsat (amarelo e verde) respectivamente. 37
- Figura 7.** Localização da região de estudo com a delimitação da cena do TM/Landsat que recobre a área. 39
- Figura 8.** Dados mensais de precipitação obtidos no Sistema de Informações Hidrológicas: hidroweb, da Agência Nacional das Águas para o ano de 2010. Disponível em <http://hidroweb.ana.gov.br>. Acesso em: 04 de outubro de 2016. 42

Figura 9. Fluxograma com as rotinas realizadas na metodologia, desde a aquisição de informações até a validação do índice V, W.	46
Figura 10. Reflectância no espaço biespectral MIR e NIR mostrando o ponto de convergência da reflectância de amostras de áreas recentemente queimadas extraídas a partir de imagens MODIS que cobrem o norte, o noroeste e o centro-oeste do Brasil. Linhas pontilhado-tracejadas delimitam os limites superior e inferior no MIR e no NIR e a sua interseção é o ponto de convergência. Fonte: Libonati (2010).....	48
Figura 11. Linhas de coordenadas $V = \text{constante}$ (de -1 a 1, de cima para baixo, linhas grossas) e $W = \text{constante}$ (de 0 a 1, da esquerda para a direita, linhas finas) sobre o espaço η/ξ . Fonte: Libonati (2010).	49
Figura 12. Localização de pixels de área queimada, solo, vegetação e nuvem do Cerrado e da Amazônia brasileira nos espaços MIR/NIR (esquerda) e η/ϵ (direita). Fonte: Libonati et al. (2011).	50
Figura 13. Curvas espectrais de reflectância das bibliotecas espectrais. As curvas em preto, verde, vermelho e azul, representam respectivamente material carbonizado, vegetação, solo e água.	55
Figura 14. Reflectâncias nas bandas 4 (NIR) e 7 (SWIR2) do sensor TM/Landsat calculadas a partir da função resposta de cada banda e dos dados de reflectância espectral das bibliotecas espectrais com base na equação (10).	56
Figura 15. Composição TM/Landsat RGB 547 (órbita ponto 221/067) e as cicatrizes de área queimada mapeadas pelo INPE em vermelho. Imagem pré-fogo de 07/09/2010, superfície vegetada.	60
Figura 16. Composição TM/Landsat RGB 547 (órbita ponto 221/067) e as cicatrizes de área queimada mapeadas pelo INPE em vermelho. Imagem pós-fogo de 23/09/2010, superfície queimada.	60
Figura 17. Vetor deslocamento no espaço SWIR2/NIR ligando os pontos de convergência representando vegetação e queimada para a fisionomia Agricultura,	

calculados com base no critério máximo-mínimo (primeira linha) e média (segunda linha) e as isolinhas dos índices η (primeira coluna) e ξ (segunda coluna).	71
Figura 18. Como na Figura 17, mas para a fisionomia Campo Limpo.	72
Figura 19. Como na Figura 17, mas para a fisionomia Campo Sujo.....	72
Figura 20. Como na Figura 17, mas para as fisionomias Campo Limpo e Campo Sujo.	73
Figura 21. Como na Figura 17, mas para as fisionomias Agricultura, Campo Limpo e Campo Sujo.	73
Figura 22. Como na Figura 17, mas limitado pelo percentil de 5% e 95%.....	74
Figura 23. Valores do índice V, W para vegetação (pontos em verde) e queimada (pontos em preto) apresentados no diagrama <i>kitedomain</i> com as coordenadas η e ξ , considerando os critérios de limite e média para a amostra agricultura.	75
Figura 24. Como na Figura 23, mas para a amostra campo limpo.	76
Figura 25. Como na Figura 23, mas para a amostra campo sujo.....	76
Figura 26. Como na Figura 23, mas para a amostra campo sujo e campo limpo.....	77
Figura 27. Como na Figura 23, mas para a amostra agricultura, campo sujo e campo limpo.....	77
Figura 28. Como na Figura 23, mas para o percentil 5 e 95% da amostra agricultura, campo sujo e campo limpo.	78
Figura 29. Imagem TM/Landsat, órbita ponto 221/06 com valores de W e cicatrizes de áreas queimadas mapeadas pelo INPE.	80
Figura 30. Gráfico de dispersão dos valores de W coletados de superfícies queimadas em vermelho e vegetação em verde, para estabelecimento dos limiares.....	81

Figura 31. Gráfico de dispersão da diferença de valores de W queimada e de vegetação para estabelecimentos dos limiares.....	82
Figura 32. <i>Box plot</i> de valores de W de queimada e de vegetação para estabelecimentos dos limiares.....	83
Figura 33. <i>Box plot</i> da diferença de valores de W de queimada e de vegetação para estabelecimentos dos limiares.	83
Figura 34. Imagem TM/Landsat de 24.06.2006 com valores de W calculados e as cicatrizes de áreas queimadas mapeadas pelo INPE.	85
Figura 35. Mapeamento automático com base no índice W adaptado e nos limiares estabelecidos para a imagem TM/Landsat de 24.06.2006.....	85
Figura 36. Arquivo <i>raster</i> (imagem TM/Landsat de 24.06.2006) gerado com as cicatrizes de áreas queimadas mapeadas pelo INPE (condição real no terreno), utilizada como referência no processo de validação.	87
Figura 37. Mapeamento automático de áreas queimadas (imagem TM/Landsat de 24.06.2006) com base no índice W.	87
Figura 38. Gráfico com o percentual de todas as medidas de verificação por data, referente à validação do índice W aplicado nas imagens de 2006.	95
Figura 39. Gráfico com o percentual de todas as medidas de verificação por data, referente à validação do índice W aplicado nas imagens de 2007 e 2009.	96
Figura 40. Gráfico comparativo do percentual de cada medida de verificação por data, referente à validação do índice W aplicado nas imagens de 2006.	96
Figura 41. Gráfico comparativo do percentual de cada medida de verificação por data, referente à validação do índice W aplicado nas imagens de 2007 e 2009.	97

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Reflectância por região espectral e tipo de superfície (MODIS e TM/Landsat).....	33
Tabela 2. Características do sensor TM/Landsat bandas espectrais e aplicações. Fonte: Adaptado de Richards (1986).....	35
Tabela 3. Características do sensor OLI/Landsat bandas espectrais e aplicações. Fonte: USGS (2016).....	36
Tabela 4. Datas das imagens do sensor TM/Landsat e dos dados de cicatrizes produzidas pelo INPE utilizados em diferentes etapas no presente estudo.....	44
Tabela 5. Dados de referência para calibração das imagens obtidas pelo sensor TM/Landsat. Fonte: Chander, 2009.....	58
Tabela 6. Tabela de contingência para os pixels classificados como áreas queimadas e não queimadas.	67
Tabela 7. Significado técnico dos indicadores estatísticos nas medidas de verificação utilizadas na validação do índice W adaptado. Fonte: Congalton & Green (1999).	69
Tabela 8. Pontos de convergência para o critério limite e média por tipo de superfície e suas diferentes combinações.....	70
Tabela 9. Resultados dos valores do índice de separabilidade M para cada ponto de convergência, definido com base nos critérios limite (máximo e mínimo) e média, para cada tipo fisionômico e suas diferentes combinações.	79
Tabela 10. Limiares, espacial e temporal, para os cinco critérios adotados.....	84
Tabela 11. Resultado do cálculo das métricas a, b, c e d da tabela de contingência para a diferença obtida entre os arquivos <i>raster</i> das cicatrizes do INPE e as cicatrizes do W para a imagem obtida em 28.09.2006, valores expressos em número de <i>pixel</i>	88

Tabela 12. Resultado do cálculo das métricas a, b, c e d da tabela de contingência para a diferença obtida entre os arquivos <i>raster</i> das cicatrizes do INPE e as cicatrizes do W para imagem obtida em 27.08.2006, valores expressos em número de pixel.....	89
Tabela 13. Resultado do cálculo das métricas a, b, c e d da tabela de contingência para a diferença obtida entre os arquivos <i>raster</i> das cicatrizes do INPE e as cicatrizes do W para imagem obtida em 11.08.2006, valores expressos em número de pixel.....	89
Tabela 14. Resultado do cálculo das métricas a, b, c e d da tabela de contingência para a diferença obtida entre os arquivos <i>raster</i> das cicatrizes do INPE e as cicatrizes do W para imagem obtida em 26.07.2006, valores expressos em número de pixel.....	89
Tabela 15. Resultado do cálculo das métricas a, b, c e d da tabela de contingência para a diferença obtida entre os arquivos <i>raster</i> das cicatrizes do INPE e as cicatrizes do W para imagem obtida em 24.06.2006, valores expressos em número de pixel.....	90
Tabela 16. Resultado do cálculo das métricas a, b, c e d da tabela de contingência para a diferença obtida entre os arquivos <i>raster</i> das cicatrizes do INPE e as cicatrizes do W para a imagem obtida em 01.10.2007.....	90
Tabela 17. Resultado do cálculo das métricas a, b, c e d da tabela de contingência para a diferença obtida entre os arquivos <i>raster</i> das cicatrizes do INPE e as cicatrizes do W para imagem obtida em 30.08.2007.....	90
Tabela 18. Resultado do cálculo das métricas a, b, c e d da tabela de contingência para a diferença obtida entre os arquivos <i>raster</i> das cicatrizes do INPE e as cicatrizes do W para a imagem obtida em 14.08.2007.....	91
Tabela 19. Resultado do cálculo das métricas a, b, c e d da tabela de contingência para a diferença obtida entre os arquivos <i>raster</i> das cicatrizes do INPE e as cicatrizes do W para a imagem obtida em 29.07.2007.....	91
Tabela 20. Resultado do cálculo das métricas a, b, c e d da tabela de contingência para a diferença obtida entre os arquivos <i>raster</i> das cicatrizes do INPE e as cicatrizes do W para a imagem obtida em 13.07.2007.....	91

Tabela 21. Resultado do cálculo das métricas a, b, c e d da tabela de contingência para a diferença obtida entre os arquivos <i>raster</i> das cicatrizes do INPE e as cicatrizes do W para a imagem obtida em 10.08.2009.....	92
Tabela 22. Resultados das medidas de verificação AO, OE, CE e B utilizadas para validação do mapeamento automático de áreas queimadas nas imagens de 2006 com base no índice W.....	92
Tabela 23. Resultados das medidas de verificação AO, OE, CE e B utilizadas para validação do mapeamento automático de áreas queimadas nas imagens de 2007 com base no índice W.....	93
Tabela 24. Resultados das medidas de verificação AO, OE, CE e B utilizadas para validação do mapeamento automático de áreas queimadas na imagem de 2009 com base no índice W.....	93

1. INTRODUÇÃO

A queima da superfície vegetal no globo proporciona um aumento na concentração de aerossóis na atmosfera, ocasionando uma diminuição no quantitativo de radiação fotossintética nos dosséis vegetais, interferindo no balanço de energia com os fluxos de calor latente e sensível na superfície da Terra (Procopio et al., 2004).

O ciclo do carbono é afetado diretamente por estes eventos de fogo, considerando que a queima da fitomassa, libera gases de efeito estufa que vão sofrer reações químicas com os constituintes naturais presentes na atmosfera (Sousa et al., 2003).

Pesquisadores que lidam com modelos meteorológicos e climáticos, possuem interesse comum na obtenção de dados com exatidão, da quantidade de biomassa queimada e das emissões associadas, utilizando para tal, as informações geradas pela comunidade científica dos estudos de sensoriamento remoto, que envolvem o comportamento espectral da vegetação e da vegetação afetada pelo fogo.

Diante deste cenário, observações contínuas de áreas queimadas a partir do espaço, são relevantes para quantificar e estudar variáveis de interesse, como o total de emissões de biomassa. Para isso dados obtidos por sensores remotos, configuram uma alternativa promissora para o monitoramento espacial e temporal destes eventos de fogo (Grégoire et al., 2003).

Pesquisadores têm se aproveitado das características dos diferentes sensores, para desenvolver e adaptar técnicas avançadas, na tentativa de obter resultados ótimos, com melhor precisão da informação.

O sensor orbital *Thematic Mapper* (TM) que está a bordo do satélite Landsat-5, é capaz de gerar um conjunto contínuo de imagens de longo prazo, contribuindo de forma singular, para constituir uma série longa de dados com estimativas de área queimada. Este satélite começou a operar em 1984, na aquisição de dados da superfície terrestre, sendo desativado em novembro de 2011 (27 anos), constituindo assim, a mais extensa série histórica de dados (Xie et al., 2008), com uma vasta quantidade de informações espectrais, inclusive nas diferentes fisionomias vegetais afetadas pelo fogo.

Neste contexto, cientistas buscam adequar o uso de técnicas matemáticas e computacionais para explorar os dados obtidos nas diferentes regiões espectrais por sensores remotos com características de interesse, contribuindo assim para o

desenvolvimento de técnicas automatizadas, na obtenção e tratamento da informação espacial, em áreas remotas afetadas pela queima da vegetação.

Com isso, são desenvolvidos e testados diferentes índices espectrais com o propósito de identificar um índice ideal, que melhor se ajusta as bandas e características de cada sensor de acordo com o propósito da área a ser estudada.

Os índices de queimada (V, W) foram inicialmente desenvolvidos para os bandas do infravermelho próximo (NIR - 0,8 μm) e infravermelho médio (MIR - 3,9 μm) do sensor *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer* (MODIS) (Libonati et al., 2010, 2011), se mostrando promissor na detecção de áreas queimadas em imagens obtidas por este sensor nestas faixas espectrais. Estes autores têm enfatizado que, embora testados com o MODIS, o índice de queimadas (V, W) também pode ser adaptado para outros sensores e a outras combinações de faixas do espectro eletromagnético, como as bandas do sensor TM/Landsat, que operam nas regiões também do NIR (0,8 μm) e do infravermelho de ondas curtas (SWIR2 - 2,1 μm), produzindo imagens com maior resolução espacial (30 m) em relação à banda 3,9 μm do sensor MODIS (1 km).

O sensor MODIS possui a capacidade de operar na obtenção de informações do globo com alta frequência temporal. No entanto, ao realizar estas observações, a ampla abertura de visada da câmera, compromete a resolução radiométrica, espectral e espacial. Assim, as informações adquiridas por este sensor, podem ser inadequadas para a detecção de regiões que apresentam alterações dinâmicas em nível de subpixel, sendo desta forma menos eficiente na obtenção de informações associadas aos pixels observados com grandes ângulos de visão, como os localizados na borda da imagem (Shimabukuro & Rudorff, 2006).

O sensor TM/Landsat, apresenta uma resolução temporal (16 dias) menor que a do sensor MODIS (2 dias), o que pode comprometer a detecção de áreas queimadas, levando em conta também a eventual presença de nuvens em biomas que apresentam uma alta capacidade de regeneração da vegetação. Entretanto, as imagens obtidas com o sensor TM/Landsat apresentam resolução espacial de 30 m para as bandas do infravermelho próximo e de ondas curtas, superando a resolução espacial das imagens obtidas pela banda do NIR (250m) e do MIR (1km) do sensor MODIS.

No presente trabalho é proposta uma adaptação do índice de queimada (V, W), utilizando as seguintes informações referentes as bandas 4 NIR (0,8 μm) e 7 SWIR2

(2,1 μm): 1) função resposta do sensor TM/Landsat; 2) dados de reflectância de bibliotecas espectrais; e 3) dados de reflectância coletados em imagens TM/Landsat.

1.1. OBJETIVO

O objetivo deste trabalho é adaptar o índice de queimada (V, W), desenvolvido para os bandas do NIR (0,8 μm) e do MIR (3,9 μm) presentes no sensor MODIS (Libonati, et al., 2010, 2011), para uma nova combinação de faixa espectral, nos bandas do NIR (0,8 μm) e SWIR2 (2,1 μm) do sensor TM/Landsat.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Os índices de vegetação, concebidos a partir de imagens de satélites, constituem um método simples e dinâmico no mapeamento da vegetação. Estes índices foram previamente utilizados para detecção e mapeamento de áreas queimadas pelos sensores *Advanced Very High Resolution Radiometer* (AVHRR) e TM (Pereira, 1999; Barbosa et al., 1999; Libonati et al., 2010; 2011; 2012; 2015).

Para que um índice espectral seja considerado ótimo, este deve ser sensível a qualquer fenômeno de interesse particular, desde que o fenômeno afete de forma direta a reflectância do alvo e insensível a qualquer fenômeno específico que cause interferência. Estas duas propriedades podem ser consideradas ou não na concepção do índice de forma simultânea (Verstraete & Pinty, 1996). Estes autores consideram como centro de interesse da pesquisa, do índice, identificar a origem do sinal objeto de estudo e as fontes de perturbações, buscando um método adequado para tratar esta sensibilidade relativa dos índices, para os respectivos fatores de interferência. Eles acreditam que o comportamento espectral representado por uma superfície, apresenta uma tendência de convergir para um ponto comum do espaço espectral (*i.e.*, ponto de convergência), diferindo de acordo com o tipo de cobertura ou de suas características particulares. Estes autores estabeleceram como primeira hipótese para construção do índice, assumir que uma mudança na propriedade de interesse do alvo resultará em uma mudança significativa das medidas espectrais. Com isso, o ponto representativo do sistema em estudo irá se deslocar no espaço espectral quando a propriedade de interesse sofrer a mudança. Estas considerações propostas por Verstraete e Pinty (1996), para o

desenvolvimento do índice *Global Environment Monitoring Index* (GEMI), tem a finalidade de demonstrar por que o índice foi concebido e porque sua utilização admite melhores resultados que os outros índices utilizados.

De acordo com Pereira (1999) o índice amplamente utilizado em estudos com o sensor AVHRR foi o Índice de Vegetação de Diferença Normalizada (NDVI), que foi desenvolvido na década de 70 (Rouse et al., 1973), apesar de problemas como interferência atmosférica e efeitos de espalhamento de fundo do solo. Pereira também avaliou a capacidade de diferentes índices de vegetação para discriminar áreas queimadas de áreas não queimadas, testando a hipótese de que os índices que obtiverem melhor desempenho para uma única data, também serão os mais adequados para estudos multitemporais. O resultado obtido aponta para o GEMI3 (Barbosa et al., 1999), como o índice que obteve o melhor desempenho, seguido do GEMI (Pinty & Verstraete, 1992), IV3 (Kaufman & Remer, 1994) e NDVI. O índice GEMI3 trata-se de uma versão modificada do índice GEMI, em que se utiliza a banda 3 do AVHRR posicionada na região do infravermelho médio - MIR. Pereira ainda sugere que antes de proceder à escolha dos índices, deve ser considerada a análise do potencial das bandas do sensor para a discriminação de áreas queimadas.

De acordo com Martin (1998) o efeito de fatores externos sobre os índices impede a sua interpretação, quando se trata de análise em áreas extensas e longa série de dados. Dentre os fatores que afetam a interpretação dos índices estão a reflectância devida ao solo seco, alterações causadas pela atmosfera, à geometria de observação e o ângulo de elevação solar.

Martin (1998) sugere que para atenuar as interferências como a sensibilidade atmosférica e o espalhamento causado pelo solo, devem ser considerados a utilização de novos índices como SAVI - *Soil Adjusted Vegetation Index* (Huete, 1988) e GEMI, que foram especialmente desenvolvidos com o propósito de atenuar as distorções do solo e da atmosfera, respectivamente. Este autor menciona que a proposta de índices ideais pode apresentar ótimos resultados, para discriminar zonas com vegetação e sem vegetação, mas, no entanto, estes índices não seriam ótimos para diferenciar superfícies sem vegetação como áreas afetadas pelo fogo. Neste sentido, este autor considera apropriado o desenvolvimento de um índice ótimo para diferenciar áreas queimadas, considerando o comportamento espectral das áreas afetadas pelo fogo, quando utilizados as bandas disponíveis para coleta de informação do sensor AVHRR.

Alguns autores têm explorado formas de trabalhar com dados na faixa espectral do MIR (Milne, 1986; Ponzoni et al., 1986; López & Caselles, 1991; Pereira & Setzer, 1993; Silva, 1996). Libonati et al. (2011) propôs o desenvolvimento dos índices de queimada (V, W), que foram testados com êxito, pela primeira vez para as características do sensor MODIS, considerando as bandas 2 no NIR (0,8 μm) e a banda 20 no MIR (3,9 μm). Apesar de o sensor MODIS apresentar uma boa resolução temporal, 2 dias, este possui limitação na resolução espacial (de 1km), quando comparado a outros sensores. Em resumo o índice de queimada (V, W) foi desenvolvido para proporcionar o aumento na informação espectral do espaço NIR x MIR, com a transformação para um novo sistema de coordenadas, com ganho de informação espectral.

Libonati et al. (2011) testou a separabilidade do índice M, entre as classes vegetação e queimada, no desenvolvimento do índice (V, W) para o MODIS, obtendo altos resultados de M, referente aos valores de “V, W”, indicando alta capacidade de discriminação do algoritmo entre as classes estudadas no MIR.

A banda 3,9 μm (MIR) no MODIS, utilizada para o desenvolvimento do índice de queimada (V, W), não aparece em sensores com longa série de dados como o TM/Landsat, o que justifica a adaptação do índice (V, W) para outras regiões espectrais sensíveis a detecção de áreas queimadas, como é o caso do infravermelho de ondas curtas (SWIR).

Alguns estudos que utilizam índices espectrais baseados na região do infravermelho de ondas curtas apontam a eficácia na discriminação de valores de reflectância de área queimada, utilizando a combinação das regiões espectrais do NIR com o SWIR como é o caso do *Normalized Burn Ratio* - NBR (Key & Benson, 1999). Outros estudos exploram a eficácia de índices espectrais restritos à região do infravermelho de ondas curtas, como o *Normalized Burn Ratio2* - NBR2 (Masek et al., 2006) e o *Mid-Infrared Burn Index* – MIRBI (Trigg & Flasse, 2001), utilizando as faixas do SWIR1 (1,6 μm) e SWIR2 (2,1 μm).

A banda espectral do SWIR2 no sensor TM/Landsat sensível para detecção de áreas queimadas, sendo o comportamento espectral, similar com a região do MIR no sensor MODIS, para o qual o índice de queimada (V, W) foi desenvolvido.

Conforme indicado por Libonati (2010) o índice de queimada (V, W), apresenta grandes perspectivas de adaptação para sensores de diferentes características e aplicações.

A adaptação de índices espectrais para bandas de outros sensores considera dados de referência, como: valores de reflectância provenientes de dados de bibliotecas espectrais, a função resposta das bandas de interesse do sensor e amostras de reflectâncias coletas em imagens obtidas pelo sensor.

De forma geral, a adaptação de um índice espectral ótimo consiste em estabelecer e selecionar a combinação de amostras de reflectância das superfícies de interesse, correspondente aos pontos de convergência que formam o ajuste mais ortogonal possível, entre o vetor deslocamento (formado quando ocorre uma mudança no valor de reflectância de uma classe estudada, quando esta se desloca no espaço) e as isolinhas do índice a ser adaptado, conforme na metodologia proposta por Verstraete & Pinty (1996). Com o melhor ajuste ortogonal do índice espectral definido, são testadas a separabilidade (M), nos valores do índice, das classes de interesse.

A estatística utilizada na verificação de consistência dos dados espectrais consiste na obtenção das médias e desvios padrão das classes de área queimada e não queimada, assim com o índice de separabilidade (M), derivado destas medidas anteriores, para testar a discriminação das classes de interesse (Libonati et al., 2012).

Na metodologia proposta por Libonati (2010) no desenvolvimento do índice de queimada (V, W) é necessário definir valores de limiares espaciais e temporais para o mapeamento automatizado das superfícies queimadas (aplicação do índice). Entende-se por limiar temporal de W os valores abaixo dos quais podem ser consideradas áreas queimadas, pelo algoritmo de mapeamento, considerando para tal as mudanças dos valores do pixel de área queimada nas imagens de diferentes datas (com a mudança na resposta espectral na superfície queimada, com a regeneração da vegetação). O limiar espacial de W são os valores abaixo dos quais podem ser consideradas áreas queimadas, pelo algoritmo de mapeamento, considerando a variação da resposta espectral dos pixels, na distribuição espacial da imagem.

3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1. PRINCÍPIOS DE RADIOMETRIA

A fonte, de grande parte da energia presente na Terra é proveniente do Sol, responsável pela emissão de energia radiante (Q). A constituição do Sol é

essencialmente gasosa, com $2,0 * 10^{29}$ kg de massa e $7,0 * 10^5$ km de raio e sua energia é resultante da fusão de dois constituintes, Hidrogênio e Hélio, sendo que esta reação produz no núcleo solar temperaturas elevadas, da ordem de milhões de graus Kelvin.

3.2. CONCEITO DE CORPO NEGRO

Contudo, no aspecto geral, o Sol apresenta uma temperatura aparente, que corresponde à observada em um corpo negro, da ordem de 6000 K, sendo este corpo negro uma abstração com espectro calculado pela Lei de Planck, conforme observado no espectro de irradiância de um corpo negro na Figura 1. Assim, um determinado corpo, com capacidade de absorção de toda a energia incidente sobre sua superfície e com habilidade de reemitir toda esta energia, na forma de espectro contínuo, é classificado por definição como corpo negro.

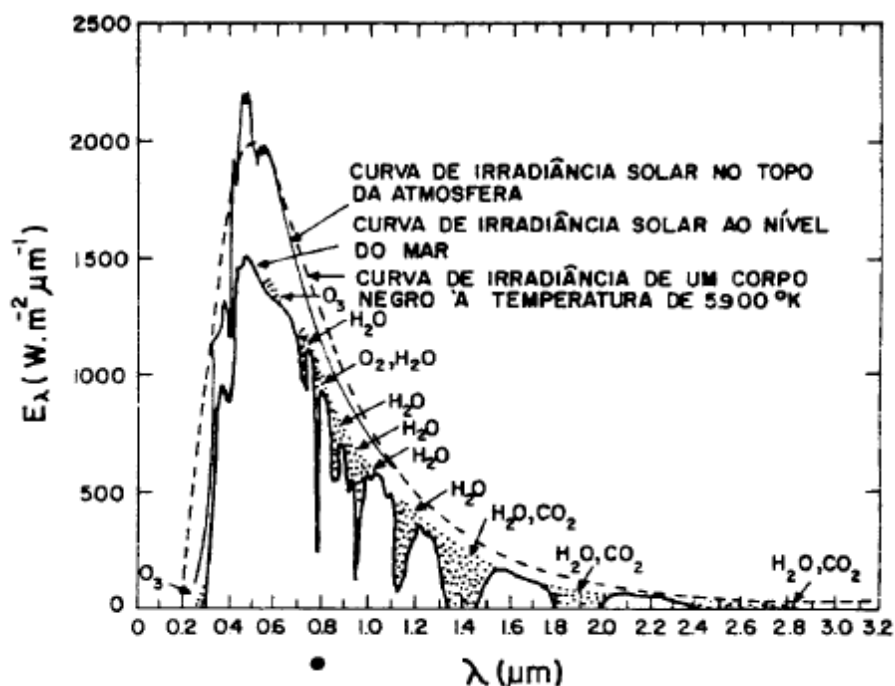


Figura 1. A intensidade de fluxo radiante emitida pelo Sol. Fonte: Swain & Davis (1978).

O Sol com a temperatura da calota externa de aproximadamente 5870 K apresenta 99% da emissão de sua energia concentrada nas regiões espectrais do ultravioleta, visível, infravermelho próximo e infravermelho médio. Os objetos terrestres de forma geral apresentam temperaturas próximas a 300 K e seu pico de

energia emitida ocorre na região espectral do infravermelho térmico. Contudo os alvos mais quentes na superfície do planeta, como o caso de uma queimada ativa, possuem temperaturas próximas de 1000 K, emitindo seu pico de energia na região espectral do infravermelho médio. Entretanto, tanto o Sol como os objetos terrestres emitem no infravermelho médio de forma significativa e com a mesma ordem de grandeza. Isto significa que há uma sobreposição de emissão da energia solar refletida e da energia terrestre emitida na faixa do infravermelho médio. Portanto nesta faixa do espectro eletromagnético, isto é, por volta de 3,9 μm , o sensor orbital captará o sinal proveniente destas duas fontes de energia.

3.3. CONSERVAÇÃO DE ENERGIA INCIDENTE E O FLUXO DE ENERGIA

A energia radiante (Q) emitida pelo Sol é tida como a grandeza radiométrica fundamental, a qual indica certa quantidade de energia, associada à emissão de radiação, sendo que a unidade desta grandeza é expressa em Joule (J).

Esta energia emitida pelo Sol, na forma de energia radiante (Q), se propaga no vácuo por todo o espaço como radiação eletromagnética. Assim, a radiação quando se propaga no espaço, promove a transferência da energia de um local para outro, sendo a quantidade desta energia radiante, que transita de uma posição no espaço por unidade de tempo, denominada de fluxo radiante (Φ).

$$\Phi = dQ/dt \tag{1}$$

Onde Φ representa o fluxo radiante em watts (W); dQ é a quantidade de energia radiante em Joule (J); dt é o intervalo de tempo em segundos (s).

A caracterização do fluxo radiante e as interações com as diferentes superfícies na Terra são objeto de estudo em sensoriamento remoto. Pesquisadores investigam a origem do fluxo radiante incidente nos diferentes comprimentos de onda e as interações com as diferentes superfícies, para quantificação de parâmetros biofísicos.

Quando o fluxo radiante incide em determinada porção na superfície da Terra, a razão entre o fluxo e a área da porção na superfície ou amostra é sua *Irradiância*.

$$E = d\Phi/dA \quad (2)$$

Onde dQ é a quantidade de energia radiante em Joule (J); dA é o elemento de área (m^2).

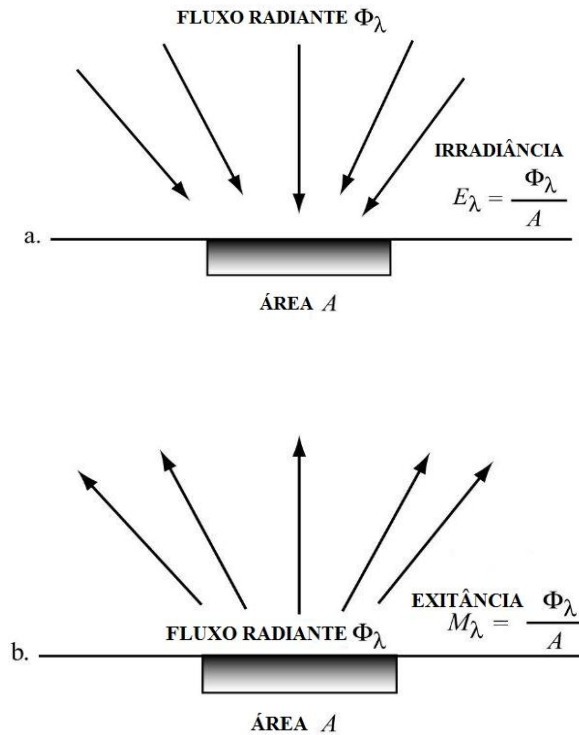


Figura 2. Densidade de Fluxo Radiante para uma área sobre a superfície da Terra. a) Irradiância; b) Reflectância. Fonte: Jensen (2009).

De acordo com Jensen (2009) a irradiância (Figura 2a) é definida como a medida da quantidade de fluxo radiante incidente na superfície por unidade de área da superfície medidas em $watts/m^2$. O mesmo autor define a emitância (Figura 2b) como a medida da quantidade de fluxo radiante deixando uma superfície por unidade de área da superfície, medida em $Watts/m^2$.

A *radiância* (Figura 3) é definida como a intensidade radiante por unidade de área fonte projetada em uma direção específica, expressa em *Watts* por metro quadrado por esterradiano ($W m^{-2} sr^{-1}$).

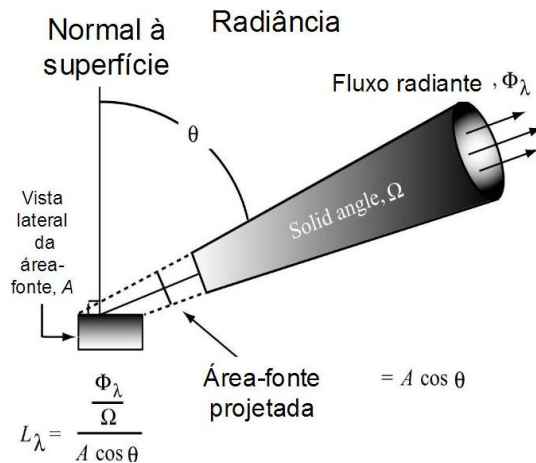


Figura 3. Apresenta o conceito de radiância com trajetória a partir de uma área fonte projetada específica no terreno, em direção específica, formando um ângulo sólido específico. Fonte: Jensen, 2009.

Com a incidência do fluxo de radiação eletromagnética em uma superfície, ocorre a interação com o objeto, sendo esta radiação parcialmente refletida, transmitida e absorvida. Os fluxos resultantes destas interações apresentam valores que dependem da propriedade do objeto. Ao considerarmos a lei de conservação de energia podemos escrever a equação do balanço de radiação:

$$\Phi_i = \Phi_r + \Phi_a + \Phi_t \quad (3)$$

Normalizando a equação de acordo com o fluxo incidente tem-se:

$$1 = \rho + \alpha + \tau, \text{ onde:}$$

ρ = reflectância;

α = absortância;

τ = transmitância;

Considerando as definições apresentadas, podemos concluir que a energia radiante deve ser conservada. Pela lei da conservação da energia, ela é refletida de volta por reflexão, transmitida através de um material ou absorvida e transformada outro tipo de energia de acordo com as características dos objetos no terreno.

3.4. ASPECTOS RELACIONADOS À VEGETAÇÃO

3.4.1. Comportamento espectral da vegetação

Estudo de diferentes superfícies vegetais, mediante o uso de técnicas de sensoriamento remoto, requer o entendimento do comportamento espectral da vegetação e os diferentes agentes que podem causar modificações neste comportamento. Assim, para o melhor entendimento deste assunto, é necessário que façamos uma análise em diferentes escalas, tendo como ponto de partida o estudo do comportamento espectral de uma folha isolada. A curva de reflectância típica da vegetação é apresentada na Figura 4 abaixo, sendo que os fatores que condicionam o comportamento da reflectância de uma folha são analisados em cada região espectral (visível, infravermelho próximo e infravermelho médio) de acordo com as características anatômicas e fisiológicas que vão determinar a intensidade da radiação refletida.

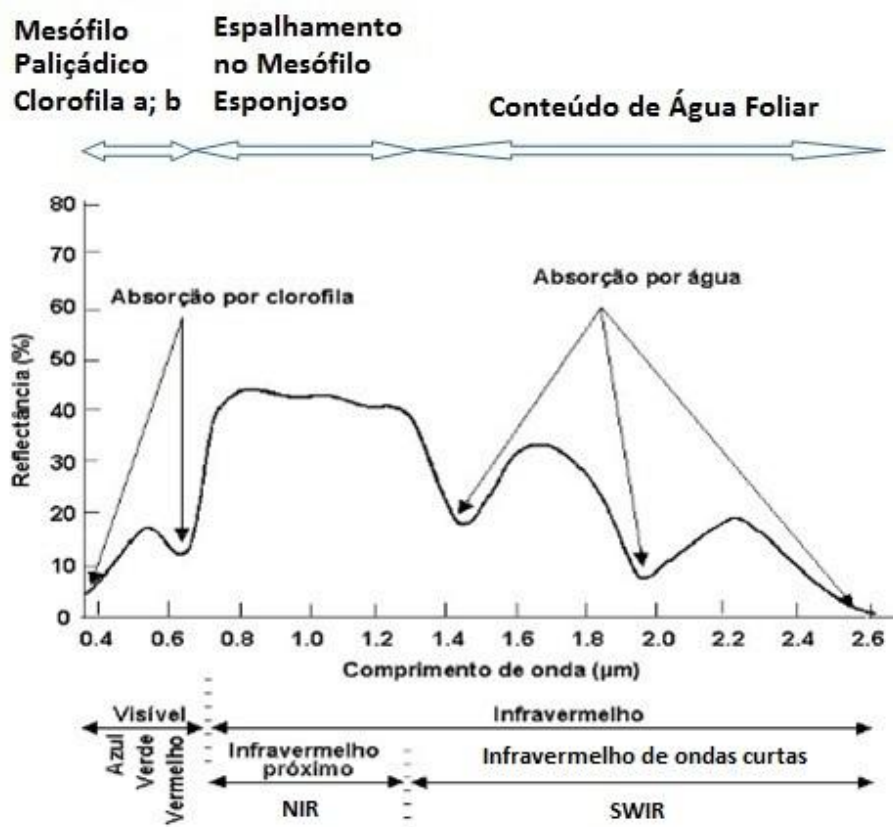


Figura 4. Curva típica da reflectância da vegetação e os fatores dominantes que controlam a reflectância da folha em cada região. FONTE: Adaptado de Swain & Davis (1978).

3.4.1.1. *Região do visível (0,4 – 0,7 μm)*

De acordo com Ponzoni et al. (2012), na região do espectro do visível, a reflectância é reduzida, devido a dominância que os pigmentos fotossintetizantes (clorofila 65%, carotenos 6% e xantofila 29%) exercem absorvendo a radiação eletromagnética para esta faixa espectral. Estes pigmentos presentes no cloroplasto da folha localizados no mesófilo paliádico absorvem a radiação incidente, sendo que esta energia radiante é absorvida de forma seletiva pela clorofila podendo ser transformada em calor ou fluorescência. Todos os pigmentos citados acima absorvem na região do azul (0,445 μm), contudo a baixa reflectância observada na região do vermelho (0,645 μm), é explicada somente pela absorção da clorofila que é o único pigmento capaz de absorver a energia radiante nesta região. Assim são os pigmentos presentes na folha que determinam o comportamento espectral da folha na região do visível.

3.4.1.2. *Região do infravermelho próximo (0,8 – 1,5 μm)*

A região espectral do infravermelho próximo (NIR) é caracterizada pela baixa absorção da radiação, sendo a estrutura celular responsável pelo constante espalhamento interno da radiação na folha. A interação da energia radiante, com a estrutura celular, explica o comportamento da curva de reflectância da vegetação nesta região, conforme comprovado por Gates et al. (1965).

O mesófilo foliar (esponjoso) consiste em uma estrutura celular lacunosa que pode sofrer variações de seu conteúdo de água e ar (solutos e gases), devido a fatores externos, podendo alterar, de maneira significativa, a reflectância da folha nesta região. Assim, considerando que quanto mais lacunosa for à estrutura celular, mais a radiação incidente desta faixa espectral, irá se espalhar dentro da folha, representado maiores valores de reflectância.

3.4.1.3. *Região do infravermelho de onda curta (1,5 – 3,5 μm)*

Esta faixa espectral, denominada de infravermelho de ondas curtas, do inglês *Shortwave Infrared* (SWIR1 < 2 μm ; SWIR2 > 2 μm), está compreendida entre os comprimentos de onda de 1,5 a 3,5 μm (Chen, 1985). Na região do infravermelho de

onda curta a interferência na reflectância tem como responsável o conteúdo de água líquida presente nas folhas. Ponzoni et al. (2012), observa que a influência do conteúdo de umidade nas folhas sobre a reflectância, pode ser observado nos comprimentos de onda de 2,0 μm , sendo a reflectância, por exemplo, menor que 10% para um ângulo de incidência de 65° e menor que 5% para um ângulo de incidência de 20°.

Assim, quando o teor de umidade da folha diminui, há um aumento expressivo da reflectância nesta faixa espectral. Observações feitas nesta região do espectro resultam no conhecimento do vigor da folha, de acordo com o conteúdo de umidade presente. É observado que esta faixa espectral apresenta três bandas de absorção de água, conforme ilustrado na Figura 1. Estas bandas estão localizadas exatamente nas faixas nos comprimentos de onda de 1,1 μm , 1,45 μm , 1,95 μm e 2,7 μm (Ponzoni et al., 2012). Sendo que a banda 2,7 μm é a maior, resultando da interação de duas bandas de absorção, no caso 2,66 μm e 2,73 μm .

3.4.1.4. Região do infravermelho médio (3,0 – 5,0 μm)

A curva espectral da vegetação do infravermelho médio, *midle infrared* (MIR) é condicionada por alterações na vegetação conforme o teor de água presente no mesófilo foliar, sendo maior a absorção da radiação pela vegetação, quanto maior for à quantidade de água presente nas folhas. Este comportamento espectral na região do MIR é similar ao comportamento espectral da vegetação verde, observado da região do infravermelho de ondas curtas por volta de 2,0 μm (SWIR2). Assim, quanto menor a quantidade de água presente nas folhas, maior será a refletividade da superfície vegetal nesta região espectral.

O domínio espectral na região MIR tem sido utilizado para estudos de discriminação de superfícies queimadas, considerando que esta faixa do espectro não é sensível aos aerossóis emitidos pela queima da biomassa, durante os eventos do fogo.

O comportamento espectral clássico observado no MIR é caracterizado pela baixa refletividade da vegetação verde, em relação aos altos valores de reflectância identificados após a queima da vegetação.

Assim, a região espectral do MIR é considerada transparente na atmosfera, apresentando baixa atenuação pelos efeitos provocados pelo espalhamento da radiação pelos aerossóis na atmosfera.

De acordo com Libonati (2010) a utilização da radiação na região espectral do MIR apresenta um problema difícil de distinguir em medição única, devido à diversidade de fontes de radiação como a emissão térmica e a reflexão solar, a partir da superfície e da atmosfera.

Por estas características e interações, a região espectral do MIR é indicada para estudo da vegetação queimada.

3.4.2. Comportamento espectral da vegetação queimada

O comportamento espectral de superfícies queimadas, em geral, é caracterizado por apresentar baixos valores de reflectância na região do NIR e altos valores de reflectância na região do SWIR2 e MIR, logo após o fogo. Este padrão espectral é o oposto ao observado para áreas de superfícies vegetadas em ambas as faixas espectrais como descrito na seção anterior.

Logo após o evento de queimada, o comportamento espectral das superfícies queimadas é afetado pelo volume de cinzas, ao qual está intimamente ligado ao quantitativo de biomassa consumida pelo fogo.

Em ambientes de savana, como o bioma Cerrado, a reflectância das superfícies queimadas, no início do evento pós queima, apresenta um padrão de comportamento espectral como caracterizado acima. No entanto, devido a sua alta adaptação e capacidade de regeneração da vegetação neste bioma, o tempo iniciado entre a queima e a rebrota da vegetação, tende a ser mais curto que o observado em outros biomas com vegetação ombrófila densa e perene. Com a crescente diminuição das cinzas e o início da rebrota, a reflectância passa a ser modulada pela mistura de pixels de duas superfícies, como o substrato de área queimada e a vegetação.

A Figura (5a) apresenta o comportamento espectral de três tipos de superfícies, como a vegetação verde, a vegetação seca e material queimado, em três regiões espectrais (as regiões espectrais do visível, infravermelho próximo e infravermelho de ondas curtas $< 2 \mu\text{m}$). Note que a curva da vegetação seca, apresenta alta refletividade nas regiões do NIR devido ao espalhamento da radiação no mesófilo foliar. No SWIR1 este comportamento é explicado pela baixa disponibilidade de água da vegetação seca para absorção da radiação. Na região do visível, as reflectâncias das superfícies “vegetação seca” e “vegetação verde” são menores. Este comportamento de ambas as

curvas se deve a alta absorção da radiação incidente, pelos pigmentos fotossintetizantes presentes na vegetação. O comportamento espectral da superfície material queimado se manteve praticamente constante na região do visível com pequeno aumento de brilho na região do NIR, sendo observado um aumento mais significativo na região do SWIR1. Este é o comportamento espectral clássico de uma superfície queimada, apresentando refletância menor na região do NIR e um aumento mais significativo na região do SWIR1. Este comportamento pode ser entendido como o inverso de uma superfície com vegetação, que apresenta alta refletividade no NIR e um menor brilho no SWIR1.

Na Figura (5b) é apresentado o comportamento espectral para as superfícies, carvão e vegetação, e duas regiões espectrais, infravermelho de ondas curtas SWIR2 e Infravermelho Médio MIR. O comportamento espectral do carvão na região do infravermelho de ondas curtas SWIR2 é caracterizado pela alta refletividade, sendo que padrão semelhante é observado na região do MIR para o este material. O comportamento espectral da vegetação é definido pela baixa refletividade na região do SWIR2 devido à absorção da água presente nos vegetais, sendo que este padrão no brilho continua a decrescer à medida que o comprimento de onda aumenta para regiões do espectro com menos energia como a do MIR.

A banda 3,9 do sensor MODIS (MIR) apresenta ótima resposta espectral para detecção de superfícies queimadas. Comportamento similar é observado na banda do SWIR2 do sensor TM/Landsat (Libonati, 2010).

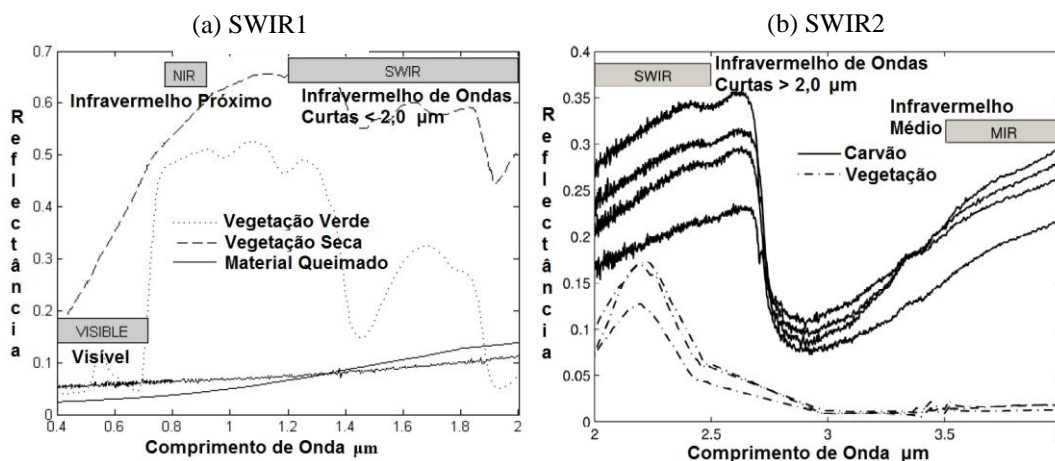


Figura 5 (a) Gráfico, com as assinaturas espectrais da vegetação verde, vegetação seca e material queimado, nas regiões do visível, infravermelho próximo (NIR) e infravermelho de ondas curtas $< 2 \mu\text{m}$ (SWIR1), obtido nas bibliotecas espectrais ASTER e MODIS. (b) Gráfico com as assinaturas espectrais de carvão e vegetação, nas regiões do infravermelho de ondas curtas $> 2 \mu\text{m}$ (SWIR2) e infravermelho médio (MIR), obtidos nas bibliotecas espectrais ASTER e MODIS. Fonte: Adaptado de Libonati (2010).

3.4.2.1. *Porque Substituir o MIR pelo SWIR2?*

Mas afinal, porque no presente trabalho está sendo proposta a substituição da região espectral do MIR encontrada no MODIS para o SWIR2 presente no TM/Landsat, para adaptação do índice de queimada (V, W)? Existem alguns aspectos que devem ser considerados como justificativa desta substituição do MIR pelo SWIR2, são eles:

- 1) A superfície vegetação e a superfície queimada apresentam comportamento espectral parecido nas regiões espectrais MIR e SWIR2 conforme Figura (5b);
- 2) A região espectral do SWIR2 e MIR apresentam baixa atenuação por aerossol de queimadas (Libonati et al., 2011);
- 3) As regiões do MIR e do SWIR2 apresentam o mesmo comportamento espectral condicionado pela absorção de água;
- 4) Disponibilidade do SWIR2 nos sensores de maior resolução espacial no caso do TM/Landsat 30m e o MSI/Sentinel-2;
- 5) A região espectral do MIR não se apresenta em outros sensores com longa série temporal de dados;
- 6) A região espectral do SWIR2 não apresenta sobreposição de fonte da radiação solar refletida pela superfície com a emitida pela faixa do termal.

A Tabela 1 mostra o comportamento das superfícies vegetação e vegetação queimada nas regiões do NIR, SWIR1 (< 2,0 μm) e SWIR2 (> 2,0 μm) do TM/Landsat e do MIR no sensor MODIS.

Tabela 1. Reflectância por região espectral e tipo de superfície (MODIS e TM/Landsat).

Regiões espectrais / Superfícies	NIR TM/Landsat (0,8 μm)	SWIR1 TM/ Landsat (1,6 μm)	SWIR2 TM/ Landsat (2,1 μm)	MIR MODIS (3,9 μm)
Vegetação	↑	↑	↓	↓
Queimada	↓	↓	↑	↑

3.5. SISTEMAS SENSORES

3.5.1. *Thematic Mapper* (TM) Landsat-5

O Satélite Landsat-5 foi lançado em 01 de março de 1984. Este satélite percorre uma órbita heliossíncrona em relação à Terra, com altitude de 705 km da superfície. O sensor TM que está a bordo do satélite Landsat-5, faz o recobrimento da superfície terrestre com visada no terreno de 185 km de largura e resolução espacial de 30 m. O sensor possui capacidade de coleta de informação em sete regiões espectrais (7 bandas), sendo as bandas 1, 2 e 3 referentes às faixas do azul, verde e vermelho, respectivamente. As bandas 4, 5, 6 e 7 operam na faixa do infravermelho, sendo a banda 4 correspondente à faixa do NIR, a banda 5(7) à faixa do SWIR1(SWIR2) e o banda 6 correspondente à faixa do TIR (*thermal infrared*) com uma resolução espacial de 120 m. As imagens produzidas pelo sensor TM/Landsat possuem uma baixa resolução temporal, considerando que este satélite realiza uma revisita para a mesma área a cada 16 dias. A resolução radiométrica deste sensor é de 8 bits, ou seja, possui capacidade para captar 256 diferentes níveis de energia em uma imagem, sendo que a escala de números digitais varia de 0 a 255. As principais características do sistema sensor TM/Landsat são apresentadas na Tabela 2. Neste trabalho foram utilizados as bandas 4 (NIR) e 7 (SWIR2) do TM/Landsat.

A escolha do sensor TM/Landsat para a adaptação do índice V, W proposta neste trabalho, considerou além da resolução espacial de 30m, que permite mapeamento de áreas com tamanho mínimo de 10 hectares (ha), outros aspectos desejáveis ao objeto de interesse do presente estudo. O primeiro aspecto é que o sensor TM/Landsat possui uma série temporal longa (1984-2011) de imagens orbitais. Com isso, a adaptação do índice “V, W” para as bandas NIR e SWIR2 do TM/Landsat, para o mapeamento automatizado de áreas queimadas de anos anteriores, contribuí de forma significativa na aquisição de informações para geração de estimativas de emissões.

O segundo aspecto considera que a formação desta extensa série de dados, obtidos por pelo TM/Landsat ao longo dos anos, possibilitou ao INPE o mapeamento e geração de produtos vetoriais de cicatrizes queimadas, utilizando outras bandas espectrais com imagens deste mesmo sensor. Assim, a grande quantidade de imagens obtidas pelo TM/Landsat, bem como as cicatrizes mapeadas usando estas imagens, é essencial para fundamentar o processo de validação do índice “V, W” após a adaptação deste índice para as bandas do NIR e do SWIR2.

Tabela 2. Características do sensor TM/Landsat bandas espectrais e aplicações. Fonte: Adaptado de Richards (1986).

CARACTERÍSTICAS DO SENSOR - TM		
Bandas espectrais	Banda 1 - Azul (0,45 - 0,52 μm)	Banda 1 – Diferenciação entre solos e vegetação; tipos florestais e culturas;
	Banda 2 - Verde (0,52 - 0,60 μm)	Banda 2 – Medidas de reflectância da vegetação diferenciam tipos de vegetação e cultura; vigor da vegetação;
	Banda 3 - Vermelho (0,63 - 0,69 μm)	Banda 3 – Diferenciação entre espécies de plantas e culturas;
	Banda 4 - Infravermelho próximo (0,76 - 0,90 μm)	Banda 4 – Determinação do tipo de vegetação, vigor e biomassa;
	Banda 5 - Infravermelho de onda curta (1,55 - 1,75 μm)	Banda 5 – Determinação do conteúdo de umidade da vegetação e do solo; Queimadas;
	Banda 6 - Infravermelho termal (10,40 - 12,50 μm)	Banda 6 – Análise do estresse em plantas
	Banda 7 - Infravermelho de onda curta (2,08 - 2,35 μm)	Banda 7 – Determinação do conteúdo de umidade da vegetação; Queimadas;
Resolução espacial	Bandas 1-5 e 7 – 30 metros	Banda 6 – 120 metros
Largura da faixa imageada	185 km x 185 km	
Resolução radiométrica	8 bits (0-255 níveis digitais na matriz)	
Resolução temporal	16 dias	

3.5.2. Oli/Landsat 8

O sensor TM/Landsat parou de operar em novembro de 2011. Em 21 de dezembro de 2012, foi anunciado pela USGS que o satélite Landsat-5 seria desativado nos próximos meses devido a problemas técnicos apresentados em um dos seus giroscópios.

O Landsat-5 foi desativado em Janeiro de 2013. Para substituir o Landsat-5 a NASA lançou em 1 de Fevereiro de 2013 o Landsat-8, que alcançou órbita operacional em 10 de abril de 2013 (USGS, 2015).

A Tabela 3 apresenta as principais bandas espectrais do Landsat-8 e seus dois sensores (OLI e TIRS), com os comprimentos de onda e suas respectivas aplicações.

Tabela 3. Características do sensor OLI/Landsat bandas espectrais e aplicações. Fonte: USGS (2016).

LANDSAT-8 - CARACTERÍSTICAS DO SENSOR OLI		
Bandas espectrais	Banda 1 - Band 1 - Coastal Aerosol (0,43 - 0,45 μm)	Banda 1 – Estudos de aerossóis costeiros;
	Banda 2 - Azul (0,45 - 0,51 μm)	Banda 2 – Mapeamento Batimétrico, distinção de solo e vegetação caducifólia e vegetação de coníferas.
	Banda 3 - Verde (0,53 - 0,59 μm)	Banda 3 – Enfatiza o pico de vegetação para avaliar vigor da planta.
	Banda 4 Vermelho (0,64 - 0,67 μm)	Banda 4 – Discrimina vegetação de encosta.
	Banda 5 - Infravermelho próximo NIR (0,85 – 0,88 μm)	Banda 5 – Enfatiza o conteúdo de biomassa e linhas costeiras.
	Banda 6 – Infravermelho de onda curta SWIR1 (1,57 – 1,65 μm)	Banda 6 – Discrimina o conteúdo de água no solo e na vegetação e penetra em nuvens finas.
	Banda 7 – Infravermelho de onda curta SWIR2 (2,11 - 2,29 μm)	Banda 7 – Melhor discriminação do conteúdo de água em solo e vegetação e penetração em nuvens finas;
	Banda 8 - Banda Pancromática (0,50 – 0,68 μm)	Banda 8 - Resolução de 15 metros, definição de imagem mais nítida;
	Banda 9 – <i>Cirrus</i> (1,36 - 1,38 μm)	Banda 9 - Detecção melhorada da contaminação por nuvens <i>Cirrus</i> ;

O fato do Landsat-8 ter sido lançado recentemente, representa uma grande perspectiva na coleta de informações futuras durante o período de operação deste sensor.

A função resposta de um sensor consiste na função que descreve as regiões do espectro eletromagnético em que o sensor é sensível. A Figura 6 mostra a função resposta do sensor TM/Landsat e OLI/Landsat, para as bandas 4 (NIR) à esquerda e 7 (SWIR2) à direita. A região que descreve a curva da função resposta do sensor TM e OLI para a região do SWIR2 apresenta um comportamento bastante parecido. A curva do OLI está praticamente contida na região que descreve a curva do TM/Landsat. Na região do NIR é observado comportamento similar para a função resposta destes sensores.

As bandas do NIR (Banda 5) e do SWIR2 (Banda 7) do OLI, possuem uma função resposta parecida com as bandas do NIR (Banda 4) e SWIR2 (Banda 7) do TM com relação a superfícies vegetadas e queimadas.

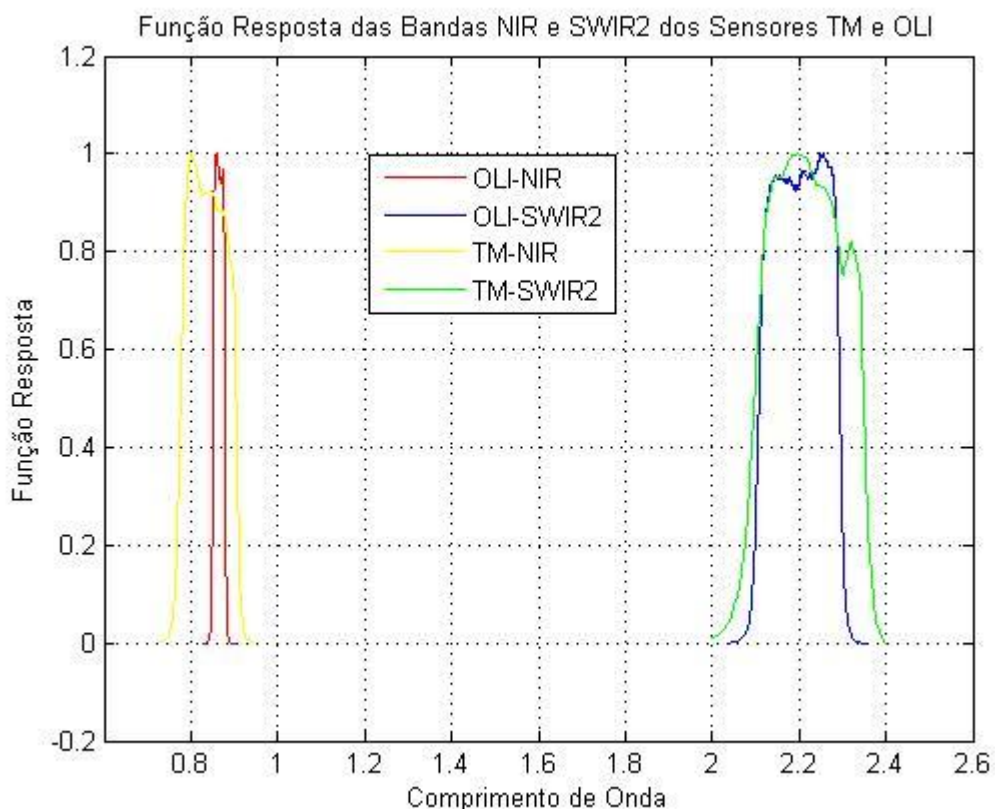


Figura 6. Gráfico da função resposta, nas regiões espectrais do NIR e SWIR2, dos sensores OLI/Landsat (vermelho e azul) e TM/Landsat (amarelo e verde) respectivamente.

4. ÁREA DE ESTUDO

As imagens do sensor TM/Landsat utilizadas neste estudo cobrem a região do Jalapão, no Estado do Tocantins – TO (Figura 7) e corresponde a órbita/ponto 221/67. Esta região está inserida no Bioma Cerrado e apresenta áreas ainda preservadas com grupos fisionômicos distintos e áreas antropizadas pela atividade agrícola.

O Cerrado ocupa uma área original de 1,783200 milhões de km² em território brasileiro, sendo que a vegetação primária remanescente representa 356.630 km² (20%). Apenas 22.000 km² desta vegetação primária remanescente são áreas protegidas por unidades de conservação, correspondendo a 6.2% de área preservada de *hotspot* no mundo. A vegetação do Cerrado brasileiro apresenta 10.000 espécies de plantas, sendo que 4.400 destas espécies são consideradas endêmicas e apresentam algum grau de ameaça (Myers et al., 2000).

A vegetação do Cerrado é classificada de forma genérica como: Cerrado *Lato Sensu*, sendo a vegetação composta por fisionomias florestais (como o Cerradão), Cerrado *Stricto Sensu*, sendo a vegetação constituída por formações savânicas e Campo Limpo e Campo Sujo, com vegetação composta por formações campestres (Ribeiro & Walter, 1998).

A queima de biomassa nesta região pode ocorrer de forma natural ou induzida de forma intencional por agentes externos. Por se tratar de ambiente com vegetação de Savana e possuir época seca definida, esta região apresenta alta incidência de áreas queimadas, segundo dados levantados pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE.

O INPE mapeia as áreas queimadas nesta região e os dados obtidos são convertidos em arquivos vetoriais, formando uma base de dados de cicatrizes de áreas em que ocorreram incêndios. O mapeamento de áreas queimadas realizado pelo INPE para esta região é feito com base nas imagens do sensor TM/Landsat.

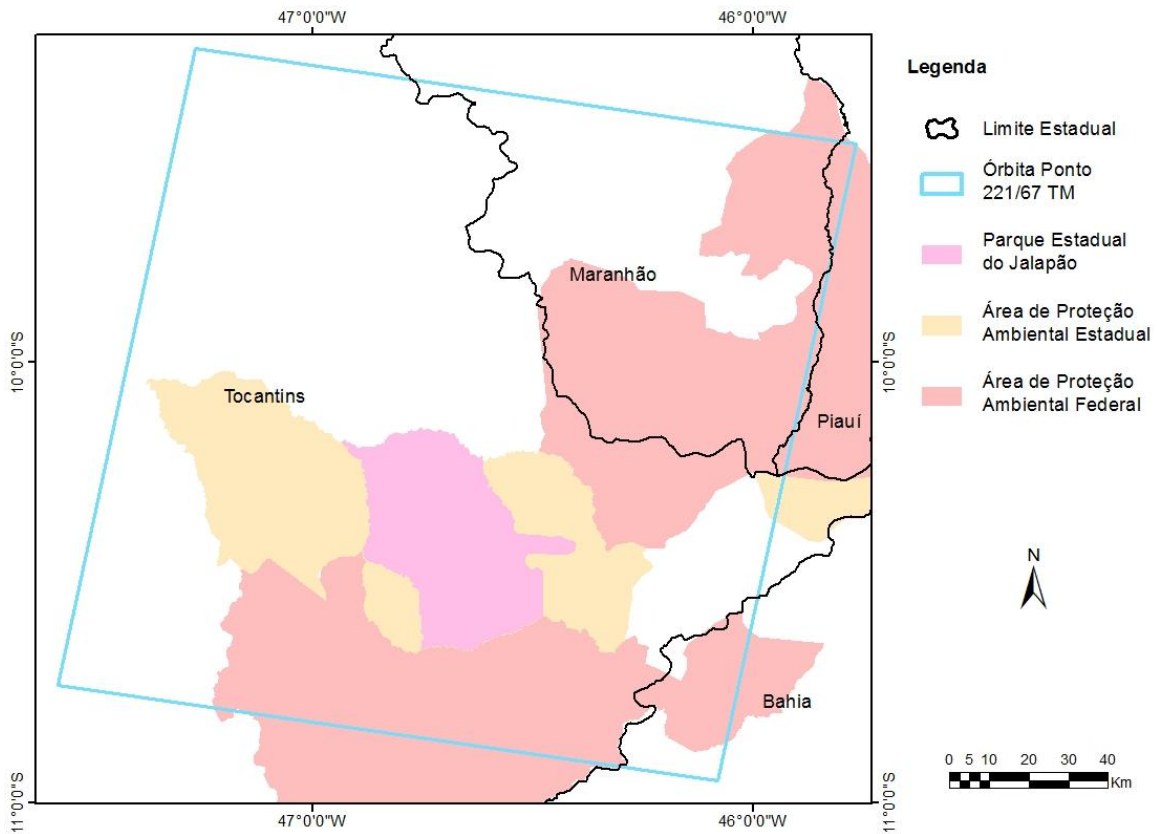


Figura 7. Localização da região de estudo com a delimitação da cena do TM/Landsat que recobre a área.

5. MATERIAL E MÉTODOS

5.1. MATERIAL UTILIZADO

As ferramentas utilizadas para a realização deste trabalho foram o SPRING (versão Linux), ENVI, Matlab, Octave (versão Linux) e o *Quantum Gis* (versão Linux). O material utilizado no desenvolvimento deste estudo é apresentado nas secções 5.1.1 e 5.1.2

5.1.1. Dados de reflectância de bibliotecas espectrais

Medidas de sensoriamento remoto, independentemente do nível de aquisição, orbital ou suborbital, como sensores acoplados em aeronaves ou ao nível do solo, é fonte de informações extremamente úteis para trabalhos de pesquisa e desenvolvimento. Dentre as medidas de sensoriamento remoto ao nível do solo, destacam-se as medidas

espectrais de reflectância / emissividade de diferentes tipos de materiais, realizadas em laboratório. Tais medidas são agregadas nas chamadas bibliotecas espectrais que incluem medidas espectrais de materiais naturais (rochas, minerais, solos, vegetação, neve e gelo) e não naturais (concreto, asfalto, entre outros), cobrindo desde a região do visível até o infravermelho termal (0.4–15.4 μm). Os dados de reflectância espectral utilizados para análise neste estudo foram obtidos em parte a partir das bibliotecas espectrais do *Advanced Space borne Thermal Emission and Reflection Radiometer* (ASTER - <http://speclib.jpl.nasa.gov/>) e do MODIS *University of California, Santa Barbara* (UCSB - <http://www.ices.ucsb.edu/modis/EMIS/html/em.html>). Dados de reflectância de superfícies como vegetação, água, rochas e solos foram obtidos a partir destas duas bibliotecas. Maiores informações sobre estas bibliotecas espectrais podem ser obtidas em Baldrige et al. (2009). Entretanto, tanto a biblioteca ASTER como a biblioteca MODIS-UCSB não possuem informações espectrais de material carbonizado. Os dados de reflectâncias de carvão e cinza utilizados neste trabalho foram obtidos por Libonati et al. (2011), a partir de quatro amostras de materiais carbonizados coletadas pelo Laboratório de Combustão do INPE (LCP/INPE) durante um incêndio ocorrido em Alta Floresta, Mato Grosso, Brasil. Amostras de material carbonizado também foram coletadas em Portugal, provenientes de biomassa da espécie “Pinheiro Bravo”. Os conjuntos de amostras de material carbonizado foram posteriormente enviados ao *Jet Propulsion Laboratory* (JPL) da *National Aeronautics and Space Administration* (NASA) para que fosse realizada a medição da reflectância espectral das amostras no intervalo espectral entre 0.4–15.4 μm . Os dados obtidos na análise das amostras de material carbonizado enviados ao JPL são da tese de doutorado de Libonati (2010), que os disponibilizou para a realização do presente estudo.

5.1.2. Dados do TM/Landsat e cicatrizes de referência de área queimada produzidos pelo INPE

Foram utilizadas imagens nas bandas 4 e 7 do sensor TM/Landsat em conjunto com dados de referência de cicatrizes de área queimada, derivados de imagens TM/Landsat da região do Jalapão, localizada no Estado de Tocantins. É importante notar que as imagens utilizadas são de mesma data e local das cicatrizes. As imagens são utilizadas para o cálculo da reflectância nas bandas 4 e 7 e dos índices V e W, e finalmente para a classificação de áreas queimadas com base nesses índices. As

cicatrices servem como referência para a coleta de dados (e.g., reflectância e W) em áreas queimadas e não queimadas durante a fase de desenvolvimento, e para se determinar a eficiência da classificação com base em W durante a fase de validação. O conjunto de dados de referência de cicatrizes de área queimada utilizado foi derivado de um algoritmo semiautomático desenvolvido pelo INPE (Melchiori et al., 2014, 2015). A metodologia baseia-se numa composição temporal de imagens TM/Landsat considerando-se imagens livres de nuvem e com intervalo entre imagens inferior a 32 dias. Para gerar as cicatrizes de áreas queimadas, o INPE utiliza além de imagens nas bandas do NIR e do SWIR, também imagens obtidas em outras regiões espectrais.

Em resumo, este método consiste na extração de áreas queimadas, mediante a análise visual de imagens do sensor TM/Landsat, realizada por especialista em fotointerpretação e com conhecimento da área des estudo. De acordo com Congalton (1991), a precisão de fotointerpretação é aceita como correta, sem qualquer confirmação, sendo as classificações digitais avaliadas com referência a esta técnica de interpretação.

Para a extração das cicatrizes foram implementadas rotinas para processar as imagens TM/Landsat e obter a avaliação estatística de ambos os: mapas cicatriz queimadas e as zonas não queimadas para a região de estudo. O programa realiza a descompressão de dados baixados, geração de camadas, corte, conversão para reflectância no topo da atmosfera, avaliação dos índices espectrais, detecção de mudanças de multi-temporal, cruzamento com dados de referência, qualidade de medições, avaliação do índice de separabilidade e gravação automática dos resultados obtidos. Portanto as cicatrizes de áreas queimadas utilizadas no presente estudo são consideradas referência por representarem a verdade no terreno devido a precisão das rotinas necessárias para serem obtidas.

A região do presente estudo abrange aproximadamente 187 x 187 km² e como mencionado na seção 4 encontra-se inserida na imagem TM/Landsat, órbita ponto 221/067. Esta região faz parte do bioma Cerrado e tem apresentado significativa ocorrência de eventos de fogo nos últimos anos. Por exemplo, durante a estação seca de 2010, na região do Jalapão, ocorreram 60% de todos os eventos de incêndio detectados no bioma Cerrado. Desta forma, os dados de cicatrizes e as respectivas imagens correspondem à estação seca (Figura 8), considerando também que esta época apresenta menor cobertura de nuvens. Neste caso foram consideradas datas com coberturas de nuvens menores que 90%.

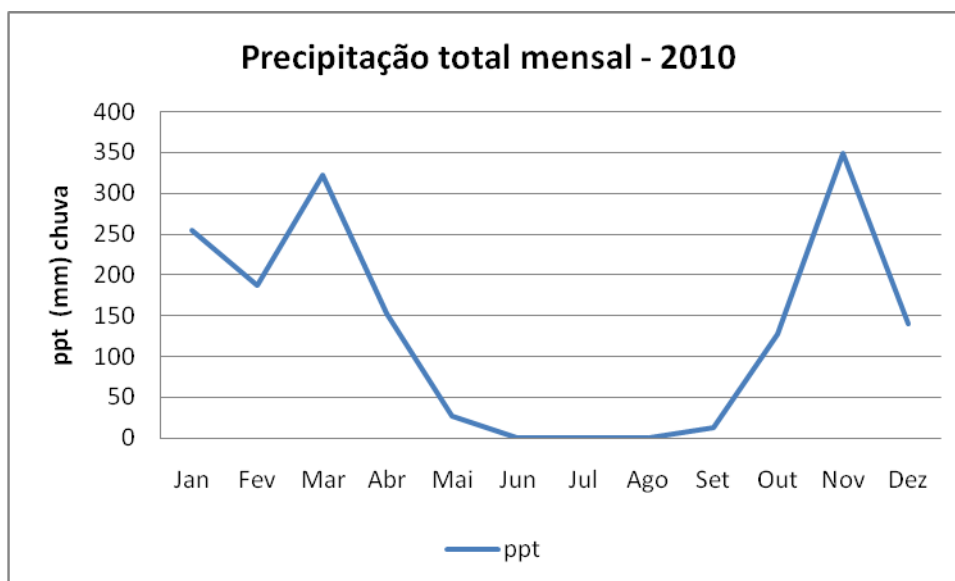


Figura 8. Dados mensais de precipitação obtidos no Sistema de Informações Hidrológicas: hidroweb, da Agência Nacional das Águas para o ano de 2010. Disponível em <<http://hidroweb.ana.gov.br>>. Acesso em: 04 de outubro de 2016.

A Tabela 4 relaciona as datas das imagens e dos dados de cicatrizes utilizados neste estudo. Como mostrado na Tabela 4, às imagens e as cicatrizes de áreas queimadas geradas pelo INPE são utilizados neste trabalho em quatro etapas distintas: 1) ETAPA 1 - coleta de amostras de reflectância nas cicatrizes de áreas queimadas e também em regiões de não queimada para a determinação do ponto de convergência; 2) ETAPA 2 - cálculo de W com base no ponto de convergência determinado na etapa 1 e posterior coleta de amostras de W nas cicatrizes de áreas queimadas e em regiões de não queimada. As amostras coletadas são utilizadas para verificar a adaptação de W realizada na etapa 1 com base em imagens distintas daquelas utilizadas para o cálculo do ponto de convergência; 3) ETAPA 3 – utilização das amostras de W coletadas na etapa 2 para o estabelecimento de limiares espaciais e temporais do índice W visando a utilização destes num algoritmo de área queimadas conforme a etapa 4; e 4) ETAPA 4 - mapeamento das áreas queimadas utilizando os limiares de W estabelecidos na etapa 3 e validação dos resultados com base nas cicatrizes de referência. Vale ressaltar, que são utilizados conjuntos de dados distintos nos procedimentos de desenvolvimento e validação, conforme Tabela 4.

De acordo com as datas das imagens apresentadas na Tabela 4, cada cena pode ser representativa para até duas condições distintas, podendo ser considerada como uma imagem pré-fogo ou uma imagem pós-fogo. A identificação da imagem pós-fogo tem

como referência a data da cicatriz utilizada. Como exemplo deste critério, a cicatriz correspondente à data 23/09/2010 indica que a imagem nesta mesma data é considerada como imagem pós-fogo e a imagem da data anterior, 07/09/2010, considerada como imagem pré-fogo e assim sucessivamente. Vale ressaltar que as imagens estão no sistema de projeção UTM, com sistema de referência e elipsoide WGS84 e fuso 23S.

Tabela 4. Datas das imagens do sensor TM/Landsat e dos dados de cicatrizes produzidas pelo INPE utilizados em diferentes etapas no presente estudo.

Ano	Data Cicatrizes* e Bandas 4 e 7 Órbita/ponto 221/067	Etapa
2010	03/06/2010	ETAPA 1
	19/06/2010	
	05/07/2010	
	06/08/2010	
	22/08/2010	
	07/09/2010	
	23/09/2010	
2005	23/07/2005	ETAPA 2
	08/08/2005	
	24/08/2005	
	09/09/2005	
2008	15/07/2008	ETAPA 3
	31/07/2008	
	16/08/2008	
	17/09/2008	
2006	06/06/2006	ETAPA 4
	24/06/2006	
	26/07/2006	
	11/08/2006	
	27/08/2006	
	28/09/2006	
2007	27/06/2007	ETAPA 4
	13/07/2007	
	29/07/2007	
	14/08/2007	
	30/08/2007	
	01/10/2007	
2009	03/08/2009	ETAPA 4
	19/08/2009	

* Arquivos vetoriais utilizados na coleta de valores de refletância de área queimada e V e W, e na validação.

5.2. METODOLOGIA

A metodologia utilizada para elaboração desta pesquisa ficou organizada em duas seções: desenvolvimento e aplicação.

A seção desenvolvimento (Item 5.2.1) apresenta aspectos teóricos, passos metodológicos e rotinas de programação com o objetivo de adaptar os índices V e W para as bandas NIR e SWIR2 do TM/Landsat, conforme as 7 (sete) fases abaixo:

- (5.2.1.1) Índices de queimada V e W;
- (5.2.1.2) Considerações iniciais na adaptação dos índices V e W para as bandas do NIR e SWIR2 do TM/Landsat;
- (5.2.1.3) Cálculo das reflectâncias a partir de dados das bibliotecas espectrais;
- (5.2.1.4) Coletas das amostras de reflectâncias nas imagens (dados de 2010);
- (5.2.1.5) Determinação dos pontos de convergência e cálculo dos índices V e W - transformação dos valores de reflectância nas imagens em valores de V e W (dados de 2010);
- (5.2.1.6) Escolha do ponto de convergência com base no índice de separabilidade M - considerações finais para adaptação (dados de 2010);
- (5.2.1.7) Cálculo de V e W com base no ponto de convergência escolhido e verificação da adaptação realizada com base no índice de separabilidade M (dados de 2005 e 2008);

Na seção aplicação (Item 5.2.2) consiste em utilizar o índice W adaptado para o mapeamento de cicatrizes. Esta etapa é dividida em 3 (três) fases:

- (5.2.2.1) Definição de limiões espacial e temporal do índice W (dados de 2005 e 2008);
- (5.2.2.2) Mapeamento de cicatrizes utilizando os limiões (dados de 2006, 2007 e 2009);
- (5.2.2.3) Validação do mapeamento automático de cicatrizes obtido com o índice W (dados de 2006, 2007 e 2009).

A figura 9 apresenta o fluxograma com as rotinas realizadas neste estudo na adaptação do índice (V, W) para as bandas NIR e SWIR do TM/Landsat.

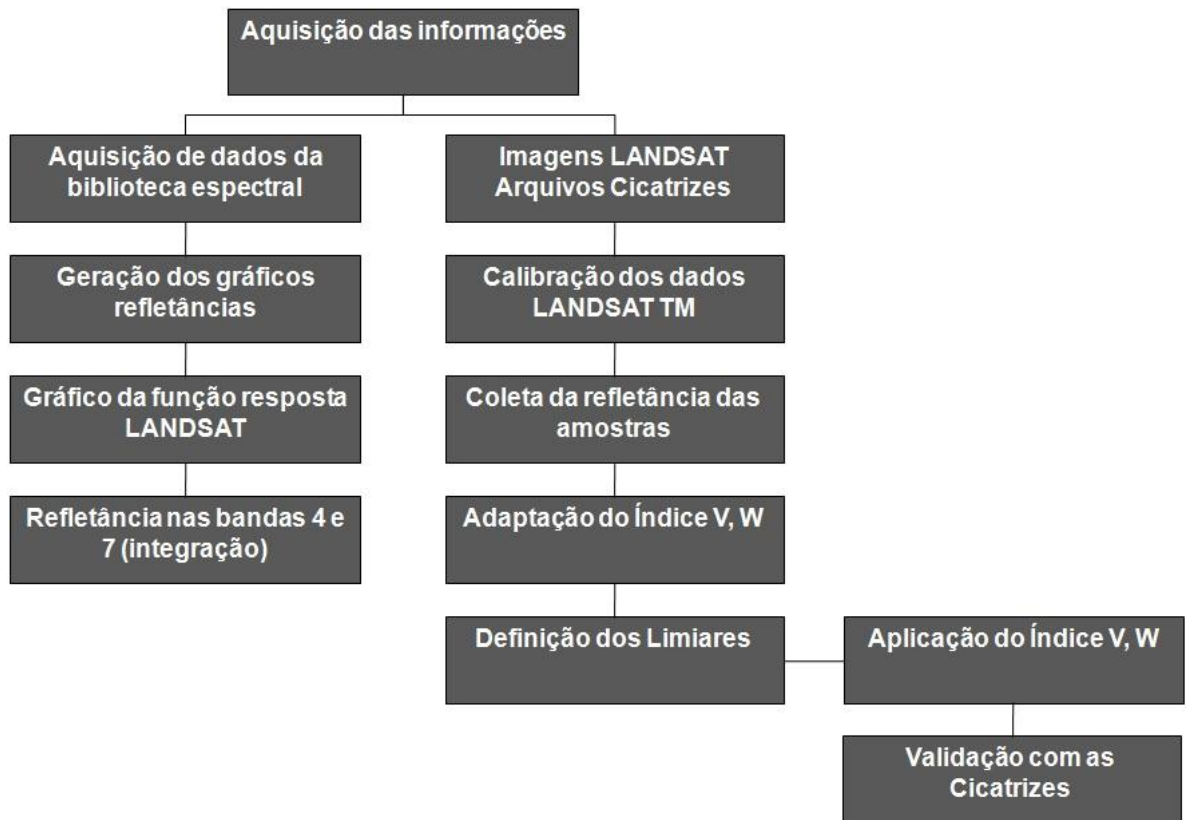


Figura 9. Fluxograma com as rotinas realizadas na metodologia, desde a aquisição de informações até a validação do índice V, W.

5.2.1. Desenvolvimento

5.2.1.1. Índices de queimada (V , W)

Os índices de queimadas V e W utilizados nesta pesquisa, foram desenvolvidos e testados com êxito por Libonati et al. (2010, 2011, 2015), para as bandas 2 e 20 do sensor MODIS, sendo obtidos mediante o cálculo de dados de reflectância diárias, nestas bandas, do produto 1km MODIS *Level 1B calibrated radiances*. Apesar de distintos, os índices V e W são utilizados geralmente em conjunto na identificação de áreas queimadas. Para o estabelecimento dos índices V e W foram desenvolvidos previamente os índices η e ξ que servem como coordenadas para a definição de um novo espaço espectral para os índices V e W (no presente texto, η e ξ podem aparecer referenciados como índice, espaço ou coordenadas). A transformação do espaço MIR/NIR desenvolvida por Libonati et al. (2011) gera um acréscimo de informação nos dados espectrais de vegetação. Desta forma, tal transformação resultou no desenvolvimento dos índices V e W , definidos no espaço η/ξ , em que η é um índice (coordenada) baseado na distância a um ponto de convergência no espaço MIR/NIR, representativo de uma superfície totalmente queimada, e ξ é um índice (coordenada) baseado na diferença entre as duas bandas, como segue:

$$\eta = \sqrt{(\rho_{MIR} - \rho c q_{MIR})^2 + (\rho_{NIR} - \rho c q_{NIR})^2} \quad (4)$$

$$\xi = \rho_{MIR} - \rho_{NIR} \quad (5)$$

Onde, ρ é a reflectância e $\rho c q_{MIR}$ e $\rho c q_{NIR}$ são os valores de reflectância que definem o ponto de convergência no espaço MIR/NIR, representativo de uma superfície totalmente queimada.

Os índices V e W são definidos como:

$$V = -\frac{\sqrt{2}}{2\eta} (\xi - \rho c q_{MIR} + \rho c q_{NIR}) \quad (6)$$

$$W = \frac{0.38}{\sqrt{6x_0}} \sqrt{\eta^2 + (\xi' - \rho c q_{MIR} + \rho c q_{NIR})^2} \quad (7)$$

Onde,

$$\xi' = -\frac{2}{\sqrt{2}}\eta + (\rho_{CQ_{MIR}} - \rho_{CQ_{NIR}}) \quad (8)$$

Resumidamente o desenvolvimento do índice “V, W” pode ser descrito esquematicamente nas seguintes etapas:

- 1) Considerando o espaço biespectral nas regiões do MIR (abscissa) e NIR (ordenada), conforme a Figura 10 define-se os pontos de convergência $\rho_{CQ_{MIR}}$ e $\rho_{CQ_{NIR}}$, como os valores de reflectância representativos de uma superfície totalmente queimada no MIR e NIR, respectivamente.

Ponto de Convergência

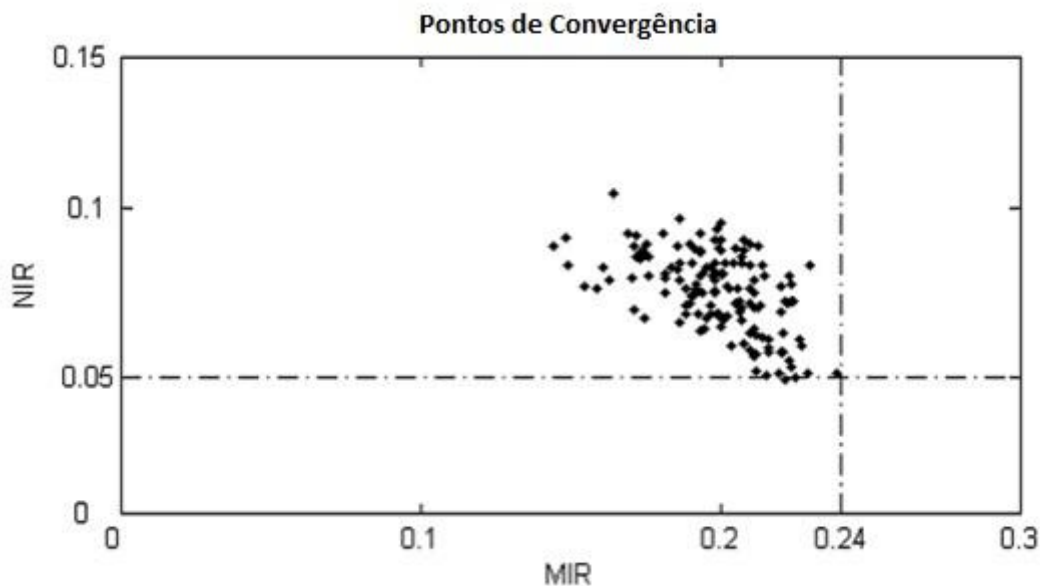


Figura 10. Reflectância no espaço biespectral MIR e NIR mostrando o ponto de convergência da reflectância de amostras de áreas recentemente queimadas extraídas a partir de imagens MODIS que cobrem o norte, o noroeste e o centro-oeste do Brasil. Linhas pontilhado-tracejadas delimitam os limites superior e inferior no MIR e no NIR e a sua interseção é o ponto de convergência. Fonte: Libonati (2010).

- 2) Definidos os pontos de convergência $\rho_{CQ_{MIR}}$ e $\rho_{CQ_{NIR}}$, o novo espaço η (abscissa)/ ξ (ordenada) é estabelecido conforme equações 3 e 4.
- 3) Neste novo espaço η (abscissa)/ ξ (ordenada), definem-se os índices V e W conforme equações 5, 6 e 7, como mostra a Figura 11.

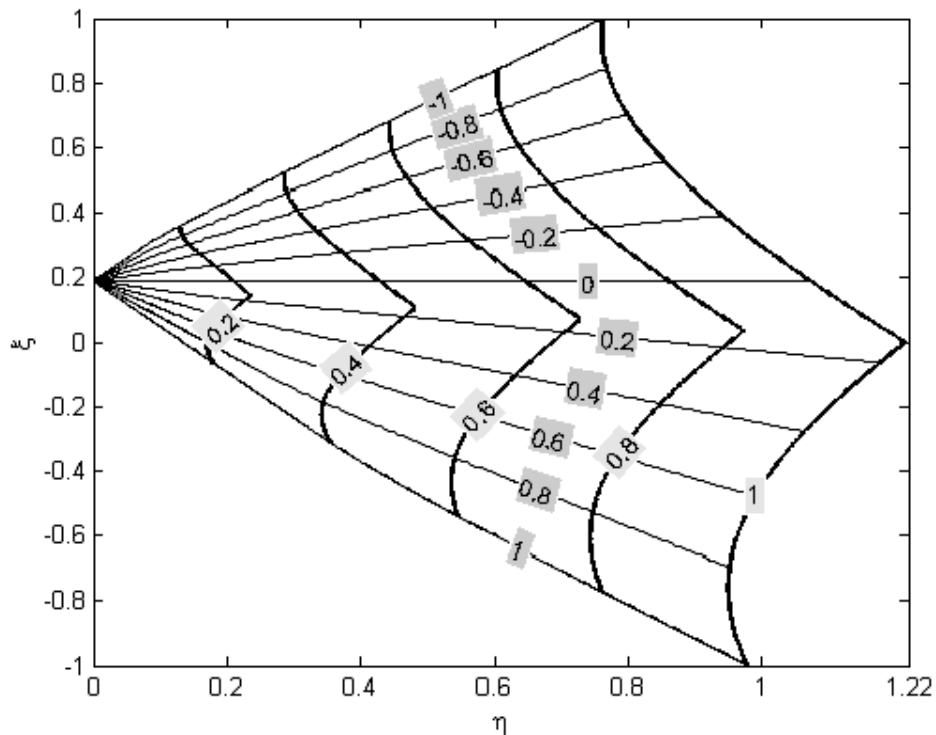


Figura 11. Linhas de coordenadas $V = \text{constante}$ (de -1 a 1, de cima para baixo, linhas grossas) e $W = \text{constante}$ (de 0 a 1, da esquerda para a direita, linhas finas) sobre o espaço η/ξ . Fonte: Libonati (2010).

Os dois índices, V e W , tentam levar em conta dois tipos de problemas que são conceitualmente diferentes: 1) identificação dos alvos observados e 2) quantificação de uma ou mais propriedades desses alvos. Desta forma, o problema de identificação qualitativa é considerado separadamente do problema de quantificar propriedades dos alvos, visto que eles necessitam de ferramentas diferentes. Os dois objetivos são muito difíceis de serem alcançados com uma única ferramenta e é difícil imaginar que um único índice espectral possa ser considerado ótimo para ambas as tarefas. O índice V apresenta reduzida dispersão para pixels associados a superfícies com vegetação e o W cobre um amplo intervalo de valores, permitindo a identificação do teor de água em superfícies vegetadas. Resumidamente, o índice V foi utilizado neste caso como um bom classificador, do tipo da superfície correspondente ao pixel. Enquanto que o índice W foi interpretado como um bom quantificador de umidade (presença de água) no pixel.

De acordo com Libonati et al. (2011) são evidentes as vantagens do espaço η/ξ em conjunto com os índices V e W , sendo que os pixels de área de vegetação, de área de solo e de área queimada possuem uma tendência de alinhamento ao longo de $V=1$. Também ficou constatado que a posição dos pixels restantes (nuvens e água) é sempre deslocada para fora da curva de V com esse valor. Os autores demonstraram que em

todas as 16 cenas analisadas existem uma tendência de alinhamento de pixels, nas superfícies com teor de matéria orgânica, ao longo da curva com valor de $V = 1$. Já os pixels sem teor de matéria orgânica (nuvens e água), apresentam distribuição para longe da curva de $V = 1$. Por outro lado, ao analisar os pixels em relação ao índice W , ficou constatado que os dois valores extremos de W estão associados com características opostas de superfícies com vegetação. Observa-se que superfícies queimadas tendem a ter valores de W próximos de zero, especialmente logo após o evento de fogo; e a vegetação tende a ser caracterizada por elevados valores de W . Com isso, superfícies vegetadas, solos e áreas queimadas ficam associados a altos ($\sim 0,6$), moderados ($\sim 0,2-0,4$) e baixos ($< 0,2$) valores de W , respectivamente, conforme a Figura 12.

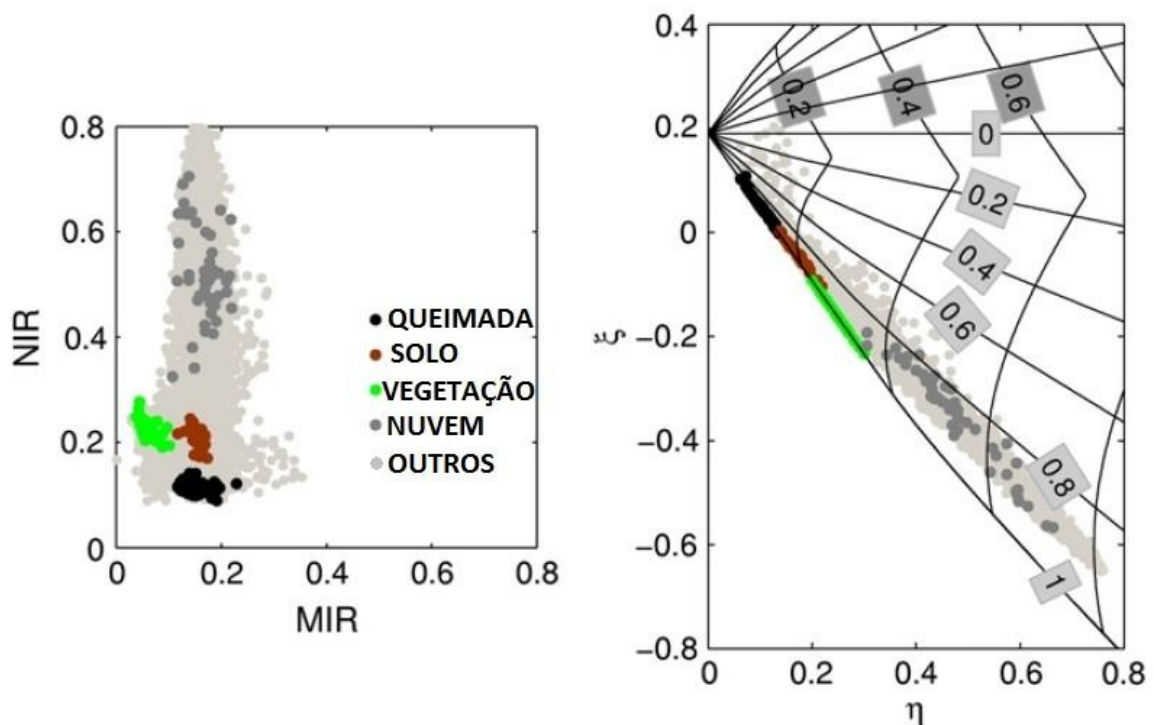


Figura 12. Localização de pixels de área queimada, solo, vegetação e nuvem do Cerrado e da Amazônia brasileira nos espaços MIR/NIR (esquerda) e η/ϵ (direita). Fonte: Libonati et al. (2011).

5.2.1.2. Considerações iniciais na adaptação dos índices (V , W) para as bandas NIR e SWIR2 do TM/Landsat

Para a adaptação dos índices V e W para as bandas no NIR e SWIR2 vamos considerar uma medida particular de reflectância espectral da seguinte forma:

$$\rho_b = \rho(\lambda_b, Y) \quad (9)$$

Onde λ_b ($b = 1, 2, \dots, B$) indica em qual banda espectral particular a medida de reflectância é obtida e o vetor $Y = y_1, y_2, \dots, y_m$ representa os parâmetros físicos que controlam a reflectância medida. No nosso caso, como mencionado anteriormente, as reflectâncias são obtidas em duas bandas, nomeadamente no NIR e SWIR2. Essas observações de reflectância podem ser consideradas como as coordenadas de um ponto que representa o alvo no espaço espectral SWIR2/NIR de duas dimensões. A maneira mais simples de interpretar estas medidas de reflectância é criar um método para obter a informação desejada sobre o alvo diretamente da posição do ponto que o representa no espaço espectral multidimensional. Na prática, este processo é geralmente desenvolvido pela definição de índices espectrais, os quais associam ao conjunto de medidas espectrais um único valor numérico. Esses índices assumem valores diferentes nas regiões do espaço espectral e esses valores atuam justamente como uma aproximação para a posição do alvo no espaço espectral. A primeira hipótese para a construção de um índice ótimo é assumir que uma mudança na propriedade de interesse y do alvo resultará numa variação significativa das medidas espectrais. Isso implica que o ponto representativo do sistema em estudo irá se deslocar no espaço espectral quando a propriedade de interesse sofre uma mudança. Para a construção de um índice espectral sensível à mudança da propriedade de interesse y , basta garantir que as isolinhas do índice cruzem no espaço espectral o vetor deslocamento correspondente a esta mudança. Obviamente, uma máxima sensibilidade é alcançada quando essas isolinhas são perpendiculares ao vetor deslocamento. Essa noção vem da definição e propriedades do vetor gradiente, que é um vetor que indica o sentido e a direção na qual, por deslocamento a partir do ponto especificado, obtém-se o maior incremento possível no valor de uma grandeza, e, portanto, o vetor gradiente sempre será ortogonal às curvas de nível.

Para a adaptação dos índices de queimada V e W para as regiões do NIR e SWIR2 é necessário previamente à construção dos índices η e ξ para a nova região espectral de interesse, já que esses índices servem posteriormente como um novo espaço para a definição dos índices V e W. Podemos observar na equação (4) que, para a adaptação do índice η , torna-se necessário definir o ponto de convergência no espaço SWIR2/NIR representativo de uma superfície totalmente queimada. O estabelecimento do ponto de convergência no espaço SWIR2/NIR foi obtido no presente trabalho a partir

de dados de reflectância de amostras presentes nas bibliotecas espectrais e coletados de imagens TM/Landsat com base nas cicatrizes processadas pelo INPE (ver seções 5.1.1, 5.1.2, 5.2.2 e 5.2.3). Torna-se também necessário a determinação do ponto no espaço SWIR2/NIR representativo de uma superfície totalmente vegetada ($\rho_{CV_{SWIR}}$, $\rho_{CV_{NIR}}$) simbolizando a condição pré-fogo. Vale ressaltar, que os valores de reflectância para a vegetação, utilizados no cálculo desse ponto, são também obtidos a partir das bibliotecas espectrais e das imagens TM/Landsat. Com base nos pontos que reproduzem uma superfície completamente vegetada ($\rho_{CV_{SWIR}}$, $\rho_{CV_{NIR}}$) e uma superfície completamente queimada ($\rho_{CQ_{SWIR}}$, $\rho_{CQ_{NIR}}$) é possível determinar o deslocamento (vetor deslocamento) do ponto que representa a vegetação no espaço SWIR2/NIR, quando esta sofre uma queima. Uma abordagem lógica para a construção de um índice espectral ótimo de queimada consiste então em derivar uma fórmula matemática para o índice de tal maneira que suas isolinhas sejam ortogonais ao vetor deslocamento na região SWIR2/NIR. No caso do presente trabalho, as fórmulas matemáticas dos índices η e ξ já estão definidas, de maneira que testaremos se as isolinhas desses índices são ortogonais ao vetor deslocamento, obtidos através dos pontos de convergência (vegetação e queimada) calculados neste estudo.

Seguindo as recomendações propostas por Verstraete & Pinty (1996), foi considerado que o comportamento radiativo representativo de dada superfície apresenta tendência a convergir no espaço espectral para um ponto comum, diferindo de acordo com o tipo de superfície e suas características. Com isso, para o conjunto de reflectâncias coletado nas imagens foram determinados os pontos de convergência de amostras de reflectância de vegetação e área queimada de três diferentes fisionomias vegetais do bioma Cerrado (Agricultura, Campo Limpo e Campo Sujo) que mais apresentavam incidências de cicatrizes mapeadas. Os pontos de convergência foram encontrados para seis diferentes combinações, considerando os tipos fisionômicos utilizados: a) agricultura; b) campo limpo; c) campo sujo, d) campo limpo e campo sujo; e) agricultura, campo limpo e campo sujo; e f) agricultura, campo limpo e campo sujo, mas limitado pelo percentil de 5% e 95%.

Na aplicação do percentil de 5-95%, as amostras de reflectância de superfícies queimadas obtidas nas imagens, consideradas *outliers* foram desconsideradas, durante o processo de adaptação dos índices de queimada (V, W). Os *outliers* se referem aos valores de reflectância que apresentaram comportamento atípico das demais

observações, apresentando com grandes desvios, sendo estes dados considerados inconsistentes para o estudo.

Adicionalmente, os pontos de convergência foram obtidos para as seis diferentes combinações citadas acima, considerando-se três critérios: a) máximo e mínimo; b) média; e c) *k-means*. Por conta do pequeno número de amostras oriundas das bibliotecas espectrais, os pontos de convergência para este conjunto de dados só foram calculados para o critério máximo e mínimo. Os valores encontrados para esse caso servirão como valores de referência para verificarmos a consistência dos dados de reflectância coletados das imagens. Vale ressaltar, que os pontos de convergência calculados com base no máximo e mínimo seguem os seguintes critérios: a) ponto de convergência para uma superfície totalmente queimada é dado pelo valor máximo de reflectância no SWIR2 e mínimo no NIR e b) ponto de convergência para uma superfície completamente vegetada é dado pelo valor mínimo de reflectância no SWIR2 e máximo no NIR. No caso da média, o valor de ponto de convergência é obtido simplesmente pelo cálculo da média das reflectâncias de cada amostra. O *k-means* é um algoritmo de análise de agrupamento não supervisionado (MacQueen, 1967). No nosso caso definiram-se *k* como dois grupos (queimada e vegetação) de forma que o algoritmo inicia de forma iterativa o cálculo dos centroides desses 2 grupos. O agrupamento é feito com base na distância de cada valor de reflectância da amostra em relação aos centroides iniciais, agrupando a reflectância ao grupo que possui a menor distância (mais similar) e recalculando o centroide do mesmo. O processo é repetido até que todos os elementos façam parte de um dos grupos (Seber, 1984).

Na seção 6 do presente documento são apresentados resultados referentes aos dados de reflectância coletados nas imagens mostrando os valores encontrados de ponto de convergência para todos os casos considerados, o vetor deslocamento no espaço SWIR2/NIR representando a mudança na vegetação quando esta é queimada e as isolinhas dos índices η e ξ a fim de verificar se essas são ortogonais ao vetor deslocamento.

5.2.1.3. *Cálculo das reflectâncias a partir de dados das bibliotecas espectrais*

Para calcular a reflectância nas bandas 4 e 7 do sensor TM/Landsat foram utilizados os dados da função resposta das respectivas bandas, conforme mostrado na

Figura 6 e dados de reflectância espectral de diferentes bibliotecas espectrais (ver seção 5.1.1). Dados das bibliotecas espectrais pré-existentes ASTER e MODIS/UCSB foram utilizadas para a caracterização de materiais como vegetação (e.g., floresta conífera, floresta decídua, grama, grama seca), solo (e.g., *alfisol*, *aridisol*, *entisol*, *inceptisol* e *molisol*) e água (e.g., *tapwater*). Como as bibliotecas espectrais pré-existentes não fornecem valores de reflectância de carvão, cinza ou biomassa carbonizada na região espectral de interesse deste trabalho (0,4 – 2,5 μm), foram empregados dados de coleta de quatro amostras de material carbonizado proveniente de incêndio da região de Alta Floresta – MT coletadas pelo LCP/INPE e amostras coletadas em Portugal provenientes de biomassa da espécie Pinheiro Bravo.

Como exemplo, a Figura 13 mostra as curvas espectrais de reflectância de alguns dos materiais utilizados nesta pesquisa. Os dados de materiais carbonizados são mostrados pelas curvas em preto, onde se destaca as cinzas (curva pontilhada) com valores de reflectância altos ao longo de toda a faixa espectral de interesse. Em relação aos dados de carvão, o comportamento espectral ao longo da faixa espectral de interesse é definido por valores bem baixos de reflectância na região do NIR e um aumento significativo destes valores na região do SWIR2.

Os dados de vegetação são indicados com curvas em verde e apresentam comportamento espectral inverso do material carbonizado, isto é, altos valores de reflectância na região do NIR e valores menores de reflectância na região do SWIR2. Um caso a parte é indicado pela curva pontilhada que representa a “gramínea seca”, que por um lado apresentou valores mais altos de reflectância no NIR do que as amostras de carvão, mas por outro lado mostrou valores mais altos também no SWIR2.

A curva espectral da água está representada pela cor azul e apresenta comportamento constante ao longo da região de interesse, sendo este comportamento, caracterizado pela alta absorção da radiação eletromagnética e, por conseguinte baixo valor de reflectância.

As curvas em vermelho representam o comportamento espectral dos dados das bibliotecas espectral, referentes às diferentes classes de solo. Como característica, os solos apresentam valores de reflectância intermediários entre o carvão e a vegetação na região do NIR e os maiores valores de reflectância na região do SWIR2.

Os dados de função resposta das bandas 4 e 7 e os dados de reflectância espectral foram utilizados para o cálculo dos valores de reflectância nas bandas 4 e 7 com base na equação (10):

$$\rho_b = \int_{\lambda_{min}}^{\lambda_{max}} \rho_{\lambda} f_{\lambda} d_{\lambda} / \int_{\lambda_{min}}^{\lambda_{max}} f_{\lambda} d_{\lambda} \quad (10)$$

Onde ρ_b , ρ_{λ} , e f_{λ} são a reflectância na banda, a reflectância espectral e a função resposta, respectivamente.

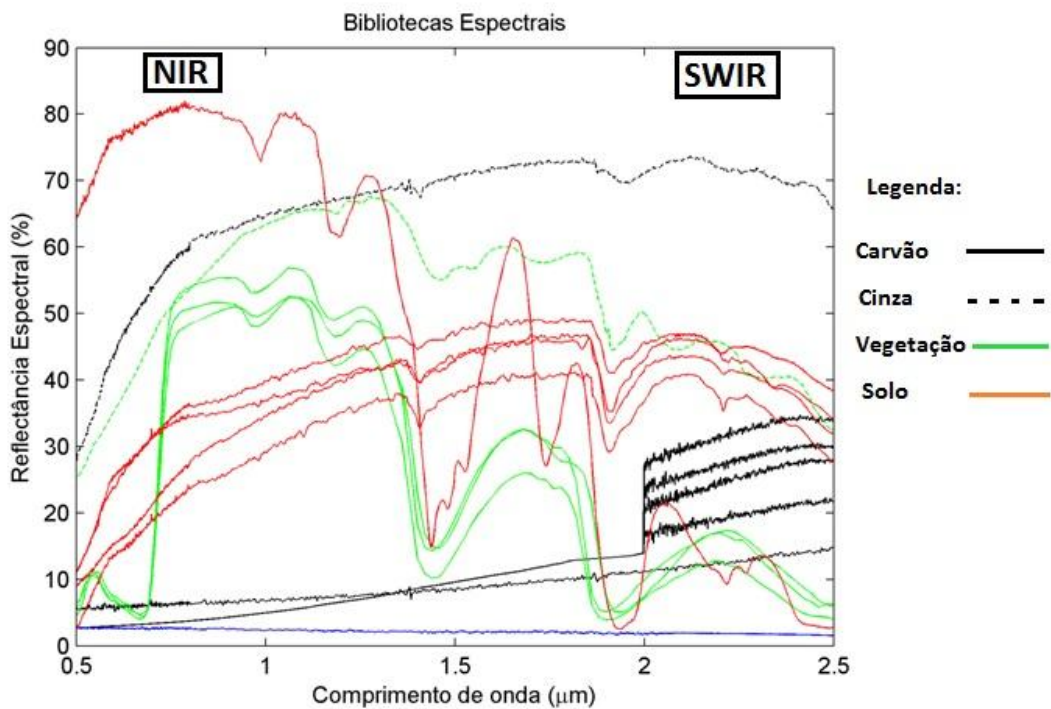


Figura 13. Curvas espectrais de reflectância das bibliotecas espectrais. As curvas em preto, verde, vermelho e azul, representam respectivamente material carbonizado, vegetação, solo e água.

Os valores de reflectância nas bandas 4 e 7 do sensor TM/Landsat obtidos com base na equação (10) são mostrados na Figura 14.

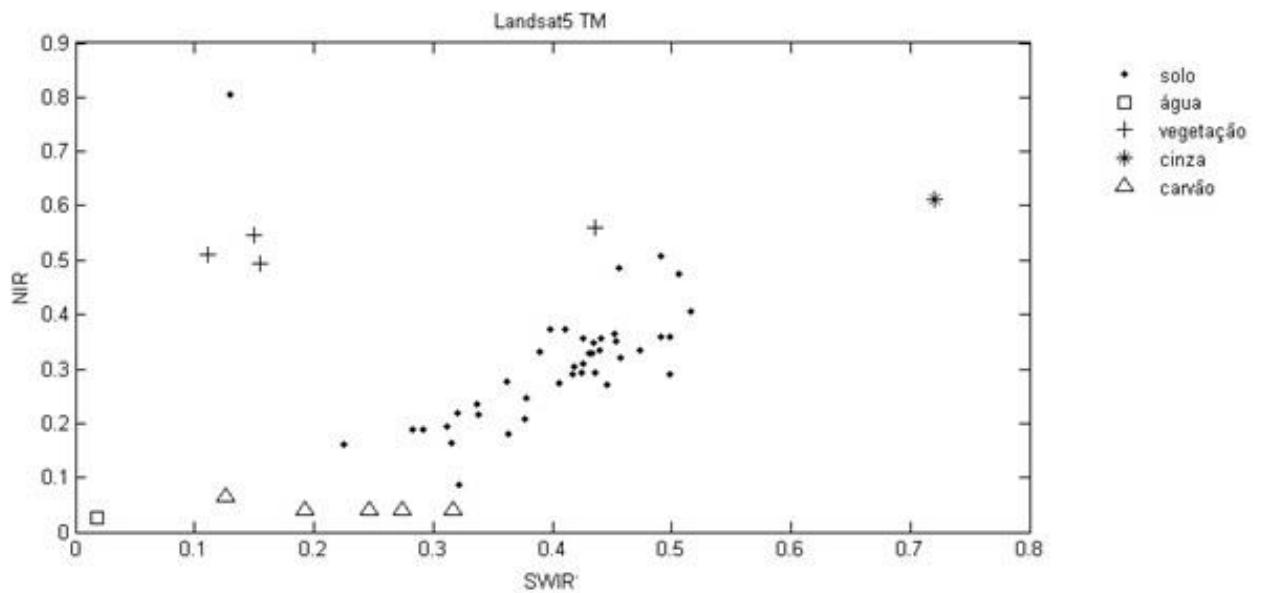


Figura 14. Reflectâncias nas bandas 4 (NIR) e 7 (SWIR2) do sensor TM/Landsat calculadas a partir da função resposta de cada banda e dos dados de reflectância espectral das bibliotecas espectrais com base na equação (10).

5.2.1.4. *Coleta das amostras de reflectâncias nas imagens TM/Landsat (dados de 2010)*

Como uma das etapas de pré-processamento, foi realizada a correção radiométrica das imagens brutas do TM/Landsat. Desta forma, as imagens passaram por um processo de transformação dos números digitais (NDs) originais para valores físicos. A transformação é caracterizada pela obtenção de valores de radiância e reflectância planetária aparente (reflectância no topo da atmosfera, isto é medida ao nível do satélite), considerando a resolução radiométrica de 8 bits das imagens do sensor TM/Landsat. Para proceder a transformação dos NDs para valores de radiância e reflectância para uma dada banda foram utilizadas as equações (11)-(15) e dados de calibração do sensor TM/Landsat (Tabela 5) propostos no trabalho realizado por Chander et al. (2009).

$$L_{\lambda} = \frac{(L_{MAX\lambda} - L_{MIN\lambda})}{(ND_{MAX} - ND_{MIN})} (ND - ND_{MIN}) + L_{MIN\lambda} \quad (11)$$

ou

$$L_{\lambda} = (G_{rescale} \times ND) + B_{rescale} \quad (12)$$

onde:

$$G_{rescale} = \frac{(L_{max\lambda} - L_{min\lambda})}{(ND_{MAX} - ND_{MIN})} \quad (13)$$

$$B_{rescale} = L_{MIN\lambda} \left(\frac{L_{MAX\lambda} - L_{MIN\lambda}}{ND_{MAX} - ND_{MIN}} \right) \times ND_{MIN} \quad (14)$$

Onde:

$$L_{\lambda} = \text{Radiância espectral na abertura do sensor} \left[\frac{W}{(m^2 \times sr \times \mu m)} \right]$$

ND = Número digital do pixel [ND]

$ND_{MIN\lambda}$ = Número digital mínimo correspondente ao $L_{MIN\lambda}$ [ND]

$ND_{MAX\lambda}$ = Número digital máximo correspondente ao $L_{MAX\lambda}$ [ND]

$$L_{MIN\lambda} = \text{Radiância espectral mínima no sensor} \left[\frac{W}{(m^2 \times sr \times \mu m)} \right]$$

$$L_{MAX\lambda} = \text{Radiância espectral máxima no sensor} \left[\frac{W}{(m^2 \times sr \times \mu m)} \right]$$

$$G_{rescale} = \text{Coeficiente angular de calibração para cada banda} \left[\frac{\left(\frac{W}{(m^2 \times sr \times \mu m)} \right)}{DN} \right]$$

$$B_{rescale} = \text{Coeficiente linear de calibração para cada banda} \left[\frac{W}{(m^2 \times sr \times \mu m)} \right]$$

Após a transformação dos ND em radiância, mediante o processamento dos dados no aplicativo Matlab, o resultado com as radiâncias obtidas, foi utilizado na transformação destes dados para reflectância, mediante o emprego da seguinte equação:

$$\rho_{\lambda} = \frac{(\pi \times L_{\lambda} \times d^2)}{(E_{SUN\lambda} \times \cos\theta_s)} \quad (15)$$

Onde:

ρ_{λ} = Reflectância planetária no topo da atmosfera [adimensional]

π = Constante matemática igual a 3,14159 [adimensional]

$$L_{\lambda} = \text{Radiância espectral na abertura do sensor} \left[\frac{W}{(m^2 \times sr \times \mu m)} \right]$$

d = Distância Terra-Sol [unidades astronômicas]

$E_{SUN\lambda}$ = Irradiância solar média no topo da atmosfera [$\frac{W}{(m^2 \times \mu m)}$]

θ_s = Ângulo zenital solar [grau]

Tabela 5. Dados de referência para calibração das imagens obtidas pelo sensor TM/Landsat. Fonte: Chander, 2009.

Sensor TM (NDmin = 1 e NDmax = 255)							
Banda	Intervalo espectral	Comprimento de onda central	LMIN λ	LMAX λ	Grescale	Brescale	ESUN λ
Unidade	μm		W/(m2 sr μm)		(W/m2sr μm) / DN	W/(m2 sr μm)	W/(m2 μm)
L5 TM (LPGS)							
1	0.452-0.518	0.485	-1.52	169	0.671339	-2.19	1983
			-1.52	193	0.765827	-2.29	
2	0.528-0.609	0.569	-2.84	333	1.322205	-4.16	1796
			-2.84	365	1.448189	-4.29	
3	0.626-0.693	0.660	-1.17	264	1.043976	-2.21	1536
4	0.776-0.904	0.840	-1.51	221	0.876024	-2.39	1031
5	1.567-1.784	1.676	-0.37	30,2	0.120354	-0.49	220.0
6	10.45-12.42	11.435	1.2378	15.3032	0.055376	1.18	N/A
7	2.097-2.349	2.223	-0.15	16.5	0.065551	-0.22	83.44

A calibração de dados de um sensor orbital é necessária quando pretende realizar a caracterização espectral de alguma superfície, no caso, a vegetação verde e a vegetação queimada. Assim esta operação de pré-processamento das imagens consiste na transformação radiométrica de NDs para parâmetros físicos, como radiância e reflectância. O resultado desta transformação é a geração de uma imagem com valores de reflectância aparente, ou seja, valores de reflectância no topo da atmosfera. Para obter os valores de reflectância de superfície se faz a correção atmosférica. Neste trabalho não foi realizada a correção atmosférica, considerando que a área de estudo, está inserida em uma região remota e por isso não apresentam dados de perfil atmosférico no momento da passagem do satélite. A obtenção de dados de um perfil atmosférico próximo poderia gerar incertezas e poderia não ser vantajoso no sentido de melhorar os resultados deste trabalho. Mesmos com os resultados satisfatórios apresentados ao final deste estudo, os valores obtidos podem conter alguma interferência causada pelo efeito da atmosfera.

Esta etapa é essencial e possibilita trabalhar com os dados coletados de imagens nas bandas 4 e 7 do sensor TM/Landsat em diferentes datas.

Concluída a transformação dos NDs para os parâmetros físicos mencionados, foi realizada a coleta dos dados de reflectância nas imagens do sensor TM/Landsat, no

ambiente do aplicativo ENVI, mediante a seleção de *region of interest* (ROIs), sendo que após esta operação os dados de reflectância foram salvos em arquivos ASCII.

Para a coleta das amostras de reflectâncias de vegetação e área queimada, foram estabelecidos seis tipos de classes, sendo três delas pertencentes à vegetação (agricultura, campo limpo e campo sujo) e três delas pertencentes e vegetação queimada (agricultura, campo limpo e campo sujo).

No total foram utilizadas para coleta das amostras de reflectância, as bandas 4 e 7 de imagens em sete diferentes datas (23/09/2010; 07/09/2010; 06/08/2010; 22/08/2010; 05/07/2010; 19/06/2010 e 03/06/2010). Os arquivos de reflectância foram abertos no aplicativo ENVI e feita uma composição RGB 547 para cada data. Os arquivos vetoriais referentes às cicatrizes mapeadas pelo INPE foram carregados no aplicativo ENVI e sobrepostos às imagens de reflectância para a respectiva data.

Assim, cada imagem correspondente à determinada data pode assumir duas condições distintas quanto ao evento de queimada. A imagem foi considerada como evento pós-fogo, quando esta tinha a mesma data dos arquivos das cicatrizes mapeadas pelo INPE. Utilizando a data da cicatriz como mesmo referencial, a imagem era considerada pré-fogo quando esta apresentava data anterior à prevista na data da cicatriz utilizada naquele momento para coleta das amostras. As amostras de vegetação foram coletadas nas imagens pré-fogo (com data anterior a cicatriz utilizada) conforme apresentadas na Figura 15; e as amostras de queimada foram coletadas nas imagens pós-fogo (mesma data da cicatriz utilizada) conforme apresentadas na Figura 16. Os vetores das cicatrizes das áreas queimadas estão representados na cor vermelha, como é constatado na Figura 15, e na Figura 16. Neste caso, quando foi utilizado o arquivo da cicatriz referente à data do dia 23/09/2010, na imagem correspondente a esta mesma data, foram coletadas as amostras de queimada para cada fisionomia vegetal (agricultura, campo limpo e campo sujo) e na imagem correspondente a data anterior, 07/09/2010, foram coletadas amostras de vegetação das mesmas fisionomias.

Desta maneira, foram definidas regiões de interesse em cada composição RGB para cada tipo fisionômico em diferentes datas. Após a definição das regiões de interesse, foram extraídos os valores de reflectância para as bandas 4 e 7 das fisionomias agricultura, campo limpo e campo sujo, tanto para as áreas queimadas como para vegetação. Estes valores de reflectância foram exportados para cada banda da composição, e salvos em formatos ASCII na forma de Tabela.

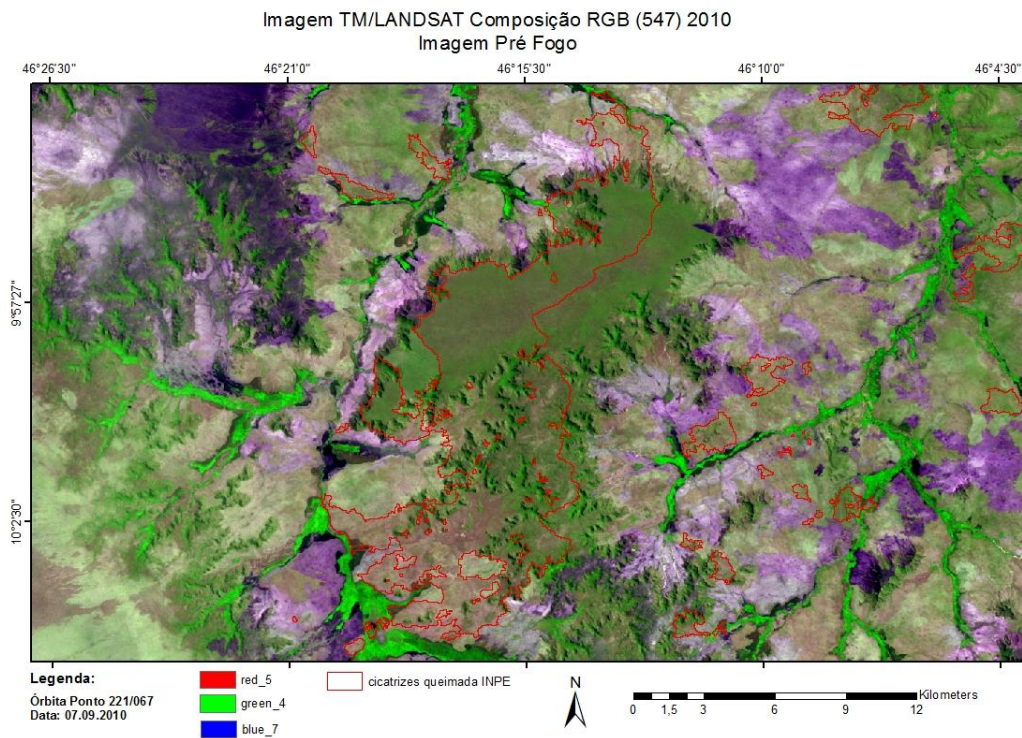


Figura 15. Composição TM/Landsat RGB 547 (órbita ponto 221/067) e as cicatrizes de área queimada mapeadas pelo INPE em vermelho. Imagem pré-fogo de 07/09/2010, superfície vegetada.

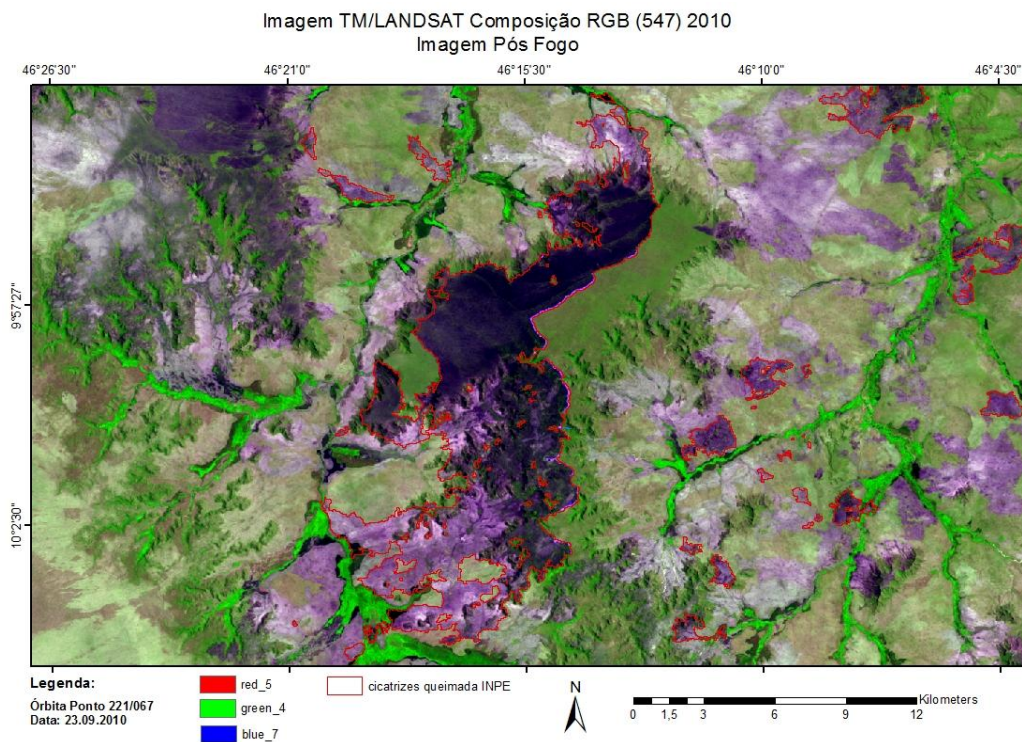


Figura 16. Composição TM/Landsat RGB 547 (órbita ponto 221/067) e as cicatrizes de área queimada mapeadas pelo INPE em vermelho. Imagem pós-fogo de 23/09/2010, superfície queimada.

5.2.1.5. *Determinação dos pontos de convergência e cálculo dos índices V e W – transformação dos valores de refletância nas imagens em valores de V e W (dados de 2010)*

Para a adaptação dos índices V e W, como mencionado na seção 5.2.1.2, os pontos de convergência foram encontrados para seis diferentes combinações, considerando os tipos fisionômicos utilizados: a) agricultura; b) campo limpo; c) campo sujo, d) campo limpo e campo sujo; e) agricultura, campo limpo e campo sujo; e f) agricultura, campo limpo e campo sujo, limitado pelo percentil de 5% e 95%. Adicionalmente, os pontos de convergência foram obtidos para as seis diferentes combinações citadas acima, considerando-se três critérios: a) máximo e mínimo; b) média; e c) *k-means*. Com base nesses pontos (ver seção 6), foram calculados os índices de queimada V e W adaptados para a região espectral SWIR2/NIR.

A Tabela com os valores dos pontos de convergência calculados para queimada e vegetação, considerando os critérios dos limites máximos e mínimos, média e *k-means* será apresentada na seção 6 deste trabalho.

Assim, após os valores de refletância nas bandas 4 e 7 do sensor TM/Landsat serem transformados em valores de V e W, utilizando cada um dos pontos de convergência obtidos, foi calculado o índice de separabilidade M para escolha do ponto de convergência, ou seja, o ponto de convergência que apresenta maior separabilidade entre as classes de vegetação e queimada, como veremos na próxima seção.

5.2.1.6. *Escolha do ponto de convergência com base no índice de separabilidade M – considerações finais para adaptação (dados de 2010)*

Após a obtenção dos valores dos índices V e W para os pontos de convergência definidos na etapa anterior, foi verificado, mediante aplicação do cálculo do índice de separabilidade M, qual ponto de convergência correspondente apresentou melhor adaptação para as bandas NIR e SWIR2 do TM/Landsat.

O cálculo do índice M foi realizado com o objetivo de verificar a sobreposição dos histogramas de frequência das superfícies analisadas. Assim a separabilidade entre as superfícies é classificada como alta, quando o resultado do cálculo de M for maior

que 1 ($M > 1$), e a separabilidade é considerada baixa entre as superfícies, quando o valor de M for menor que 1 ($M < 1$). O índice M é calculado da seguinte forma:

$$M = \frac{|\mu_v - \mu_b|}{(\sigma_v + \sigma_b)} \quad (16)$$

Onde:

μ_v = o valor médio das superfícies vegetadas;

μ_b = o valor médio das cicatrizes das superfícies queimadas;

σ_v = o desvio padrão das superfícies vegetadas;

σ_b = o desvio padrão das cicatrizes das superfícies queimadas;

Vale ressaltar, que o termo M se trata do estimador da razão sinal ruído, ou seja, consiste na diferença absoluta entre os valores médios das duas classes que representam o sinal (associado à variabilidade entre grupo) e a soma dos desvios padrão representam o ruído.

5.2.1.7. Cálculo de V e W com base no ponto de convergência escolhido e verificação da adaptação realizada com base no índice de separabilidade M (dados de 2005 e 2008)

O índice M foi calculado em dois momentos neste trabalho, no primeiro momento, o índice M é utilizado na escolha do ponto de convergência, (na fase de adaptação) com o propósito de verificar qual resultado obtido pela transformação das reflectâncias em valores de V e W teve melhor separabilidade entre as classes de vegetação e queimada, conforme descrito na seção anterior. No segundo momento, é feito o cálculo do índice V e W com base no ponto de convergência estabelecido na seção anterior e utiliza-se o índice de separabilidade M para testar a adaptação do índice V e W em imagens de 2005 e 2008. A escolha das imagens de 2005 e 2008 se deve ao fato delas terem padrões diferentes de áreas queimadas (Libonati et al., 2015), onde 2005 foi um ano com uma grande quantidade de queimadas, enquanto que em 2008 ocorreram poucas queimadas.

Desta forma, foram feitas coletas de amostras de V e W de pixels de áreas de vegetação (V_v, W_v) e de áreas queimadas (V_b, W_b), utilizando o aplicativo ENVI. Para isso, foram definidas *region of interest* (ROIs) dentro das áreas das cicatrizes de áreas queimadas produzidas pelo INPE, e em áreas de superfícies vegetadas fora das cicatrizes. Os arquivos contendo dados de V e W das amostras coletadas foram exportados no formato ASCII para diferentes datas dos anos de 2005 e 2008, conforme Tabela 4 na seção 5.1.2. Estes arquivos ASCII foram carregados no Matlab para cálculo do índice M, com o propósito de verificar a separabilidade entre as classes vegetação e queimada dos valores de V e W.

5.2.2. Aplicação

É importante notar que o índice V possui a característica de classificar corretamente grupos gerais de tipos de superfície, mas que para as datas e a região de estudo escolhidas no presente trabalho, as imagens apresentam somente pixels de áreas de vegetação, áreas de solo e áreas queimada. Desta forma, a utilização do índice V na etapa de aplicação não se faz necessária, visto que não há outros tipos de alvos, como nuvem e água, que precisariam ser identificados antes da classificação automática.

Nesta seção fica claro também uma das razões pela qual o sensor TM/Landsat foi escolhido para a adaptação dos índices de queimada V e W, apesar de consistir num sistema de sensoriamento remoto que se encontra fora de operação desde 2012. Para compreender este fato, é necessário mencionar que durante esta seção de “aplicação” do índice adaptado, são requeridas imagens de um sensor que apresenta uma série temporal longa de dados. Esta série longa de imagens possibilitou ao INPE, o mapeamento de cicatrizes de áreas queimadas ao longo dos anos, nas imagens obtidas pelo sensor TM/Landsat. Esta informação de cicatrizes de áreas queimadas, obtidas pelo INPE a partir das imagens do TM/Landsat, representa neste trabalho a verdade de ocorrência de um evento de queimada no terreno, servindo de base para validação das áreas queimadas que são geradas neste trabalho de forma automatizada pela aplicação somente do índice de queimada W adaptado, conforme descrito acima. Não foram utilizadas nesta etapa, imagens do ano de 2010, devido estas já terem sido utilizadas na adaptação do índice V e W. Assim foram consideradas nesta seção cenas da órbita ponto 221/67 dos anos 2005, 2006, 2007, 2008 e 2009.

O processamento destes dados nesta seção de “aplicação” foi realizado em três fases:

- 1) Definição dos limiares de W (dados de 2005 e 2008);
- 2) Mapeamento de áreas queimadas utilizando os limiares de W (dados de 2006, 2007 e 2009);
- 3) Validação das áreas queimadas obtidas automaticamente com base em W (dados de 2006, 2007 e 2009).

Na primeira fase (i.e., definição dos limiares temporais e espaciais), as cenas referentes aos anos de 2005 e 2008 foram utilizadas com a finalidade de calcular limiares de W com base em diferentes critérios. Na segunda fase, as cenas referentes aos anos de 2006, 2007 e 2009, foram utilizadas para o mapeamento automático de áreas queimadas utilizando os limiares estabelecidos na primeira fase (aplicação do índice W). Na terceira fase, as áreas queimadas resultantes da aplicação do W referente aos anos de 2006, 2007 e 2009 foram validadas com base nas cicatrizes de áreas queimadas de referência mapeadas pelo INPE (que representam a verdade de ocorrência de um evento de queimada no terreno).

5.2.2.1. *Definição de limiares espacial e temporal do índice W (dados de 2005 e 2008)*

Nesta fase, imagens dos anos de 2005 e 2008 foram utilizadas para o cálculo de W a partir do ponto de convergência a previamente definido, com base no índice M de separabilidade, com o propósito de estabelecer os limiares temporais e espaciais de W, para serem utilizados na próxima fase de aplicação, onde o W é utilizado no mapeamento automático de áreas queimadas, conforme Libonati et al. (2015). A definição destes limiares tem como objetivo principal estabelecer valores limites que sejam capazes de diferenciar área queimada de não queimada com base em W, de forma que ocorra o mínimo de sobreposição (confusão de classes) de valores de W para pixels de áreas queimadas e não queimadas. A ideia é que os limiares permitam identificar o máximo possível de pixels de áreas queimadas sem classificar erroneamente os pixels de áreas não queimadas.

É importante ressaltar que o limiar espacial é definido com base em valores absolutos de W, enquanto que o limiar temporal é definido com base na diferença entre valores de W de pixels de áreas queimadas e de áreas de vegetação. Esta diferença representa a variação temporal de W causada por uma queimada, isto é condição pré-fogo e pós-fogo.

Foram considerados cinco critérios para o cálculo dos limiares de W com base nas amostras coletadas:

- 1) $\mu_{W_b} + \sigma_{W_b}$;
- 2) $\mu_{W_b} + 2\sigma_{W_b}$;
- 3) Percentil 85% da amostra W_b ;
- 4) Percentil 90% da amostra W_b ;
- 5) Percentil 95% da amostra W_b ;

Onde μ_{W_b} e σ_{W_b} são a respectivamente a média e o desvio padrão da amostra de W de pixels de áreas queimadas (W_b). A distribuição dos valores das amostras de W de pixels de áreas de vegetação (W_v) e de áreas queimadas (W_b) e da diferença entre as amostras foram plotadas em gráficos de dispersão e na forma de *box plot*. Os gráficos foram elaborados para auxiliar na análise e escolha dos limiares escolhidos com base nos cinco critérios acima descritos. A definição de qual limiar usar foi realizada por análise visual dos gráficos a fim de classificar o máximo possível de pixels de áreas queimadas, mas ao mesmo tempo minimizar a classificação de área vegetada como queimada.

5.2.2.2. *Mapeamento de cicatrizes utilizando os limiares espacial e temporal (dados de 2006, 2007 e 2009)*

Para a fase de mapeamento de áreas queimadas, as datas das imagens e das cicatrizes, utilizadas, são referentes aos anos de 2005, 2006 e 2009. Estas imagens também foram obtidas mediante *download* dos arquivos, no site da USGS e já estavam georreferenciadas, no formato GeoTIFF, no sistema de projeção WGS 84. Após o *download* das imagens foram feitos recortes na região de interesse utilizando como base um arquivo vetorial definido para que todas as imagens utilizadas nesta etapa ficassem com o mesmo número de linhas e colunas. Este procedimento foi realizado utilizando o

aplicativo *Quantum Gis Desktop* versão 2.10.1 e os arquivos foram salvos no formato GeoTIFF. É importante ressaltar que as imagens selecionadas para aplicação do índice W apresentam datas diferentes tanto das imagens e cicatrizes utilizadas para adaptação dos índices V e W no início do trabalho (ano de 2010) como das datas utilizadas para o estabelecimento dos limiares (anos de 2005 e 2008). Esta condição tem o propósito de não favorecer o desempenho do índice W adaptado no mapeamento de áreas queimadas. As datas das imagens desta seção estão relacionadas na Tabela 4 na seção 5.1.2 desta pesquisa.

Estas imagens foram utilizadas para calcular os valores de W e mapear as áreas queimadas para todas as datas. Para isto, foram consideradas no cálculo deste algoritmo imagens de W referentes às condições de pré-fogo e pós-fogo, para obtenção de uma imagem diferença de W. Posteriormente, foi criado um algoritmo de cálculo de áreas queimadas considerando os valores dos limiares escolhidos. Este processo resultou em arquivos *raster*, na extensão GeoTIFF com áreas queimadas mapeadas pelo quantificador W.

5.2.2.3. *Validação do mapeamento automático de cicatrizes obtido com o índice W (dados de 2006, 2007 e 2009)*

Para testar o desempenho do índice W adaptado no espaço SWIR2/NIR no mapeamento de áreas queimadas serão utilizadas como dados de referência as cicatrizes de área queimada produzidas pelo INPE (ver seção 5.1.2). Nesta etapa foram utilizadas para validação, as imagens resultantes da aplicação do índice W, na etapa anterior. Estas imagens mapeadas com o índice W correspondem às datas dos anos de 2006, 2007 e 2009. Para proceder a esta etapa foi necessário criar arquivos *raster* com as cicatrizes de áreas queimadas que são a princípio arquivos vetoriais. Assim, as imagens dos anos de 2006, 2007 e 2009 foram abertas no aplicativo ENVI e aberta uma camada vetorial referente às cicatrizes das áreas queimadas para criação da máscara. Após a criação da máscara os arquivos foram salvos no formato GeoTIFF.

A avaliação estatística da comparação entre a área queimada mapeada a partir do índice W e as cicatrizes de área queimada produzidas pelo INPE é feita considerando quatro medidas de verificação derivadas dos valores das métricas da Tabela de contingência (Wilks, 2006), como apresentado na Tabela 6.

Tabela 6. Tabela de contingência para os pixels classificados como áreas queimadas e não queimadas.

TABELA DE CONTINGÊNCIA		Mapa de Referência		
		Queimado	Não-Queimado	Soma
Algoritmo	Queimado	a	b	a + b
	Não-Queimado	c	d	c + d
	Soma	a + c	b + d	a + b + c + d

A primeira medida de verificação é a precisão global, que é definida como a fração de pixels corretamente classificados, sejam os pixels de áreas queimadas e não queimadas:

$$OA = \left(\frac{a+d}{a+b+c+d} \right) \quad (17)$$

A segunda medida de verificação é o erro de omissão, *Omission error (OE)*, definida como a fração de pixels de áreas queimadas no mapa de referência, que não foram classificados como tal no algoritmo com W adaptado no presente trabalho:

$$OE = \frac{c}{a+c} \quad (18)$$

A terceira medida de verificação proposta é o Erro de Comissão, *Commission Error (CE)*, definida com a fração de pixel classificados como área queimada, no algoritmo com W adaptado, que são pixels de áreas não queimadas no mapa de referência:

$$CE = \frac{b}{a+b} \quad (19)$$

A quarta medida de verificação consiste no viés, *Bias* (B), definida como a razão entre o número de pixels classificados como de áreas queimadas no algoritmo com W adaptado, e o número de pixels de áreas queimadas no mapa de referência:

$$B = \frac{a+b}{a+c} \quad (20)$$

É a comparação da média de eventos previstos com a média de eventos observados. Não é considerada uma medida de acerto de previsão. Os resultados são interpretados da seguinte forma:

B=1 classificação não enviesada;

B>1 evento foi classificado com mais frequência do que ocorreu (superestimado);

B<1 evento for classificado com menos frequência do que ocorreu (subestimado).

A medida de verificação OA reflete o acordo entre o algoritmo com W adaptado e o mapa de referência. As medidas OE e CE fornecem informações sobre a discriminação e o poder de confiabilidade do classificador desenvolvido, de forma respectiva. Quanto mais próximo de um (zero) for o valor de OA, mais acertado (desacertado) o acordo entre observação e classificação. Os valores de OE e CE variam entre 0 e 1, onde os valores próximos de zero representam melhores resultados (baixa omissão e baixo falso alarme). Na medida de verificação Bias, um valor de viés igual a 1 representa uma classificação imparcial, enquanto que um viés maior (menor), indica que o evento foi superestimado (subestimado) durante a classificação. O resumo dos indicadores estatísticos das medidas de verificação é apresentado na Tabela 7.

Tabela 7. Significado técnico dos indicadores estatísticos nas medidas de verificação utilizadas na validação do índice W adaptado. Fonte: Congalton & Green (1999).

MEDIDAS DE VERIFICAÇÃO	INDICADORES
- ACERTO GLOBAL DAS INFORMAÇÕES = <i>OVERALL ACCURACY</i> (AO);	$OA = \left(\frac{a+d}{a+b+c+d} \right)$
- ERRO GLOBAL DAS INFORMAÇÕES = <i>OVERALL ERROR</i> ;	100% - OA
- ACERTO DE QUEIMADAS = <i>PRODUCT ACCURACY</i> ;	100% - OE
- ERRO DE OMISSÃO DE QUEIMADAS = <i>OMISSION ERROR</i> (OE);	$OE = \frac{c}{a+c}$
- CONFIABILIDADE DO ALGORITMO, QUEIMADAS = <i>USER ACCURACY</i> ;	100% - CE
- ERRO COMISSÃO DO ALGORITMO, QUEIMADAS = ALARME FALSO = <i>COMISSION ERROR</i> (CO);	$CE = \frac{b}{a+b}$
- <i>BIAS</i> (B) = VIÉS;	$B = \frac{a+b}{a+c}$
- Subestimado;	B<1
- Superestimado;	B>1
- Imparcial;	B=1

6. RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.1. RESULTADOS DA ADAPTAÇÃO DO ÍNDICE V E W

Os resultados desta seção de adaptação do índice W são apresentados em três tópicos:

- a) Cálculo dos pontos de convergência (dados de 2010);
- b) Escolha do ponto de convergência com base no índice M (dados 2010);
- c) Verificação da adaptação do índice V e W com base no índice M (dados de 2005 e 2008);

6.1.1. Cálculo dos pontos de convergência

A Tabela 8 mostra os valores encontrados de ponto de convergência para todos os casos considerados, exceto para o critério *k-means* visto que este produziu resultados semelhantes aos encontrados para a média. Foram considerados para uma superfície queimada (vegetada) os valores de máximo (mínimo) na região espectral do SWIR2 e valores de mínimo (máximo) na região do NIR. Esta condição foi estabelecida com base no comportamento espectral clássico que uma superfície queimada (vegetada) apresenta, ou seja, maiores valores de reflectância no SWIR2 (NIR) e menores valores de reflectância no NIR (SWIR2). Ainda foram apresentados os pontos de convergência para os dados de reflectância das amostras obtidas na biblioteca espectral ASTER com a finalidade de termos valores de referência para comparação com os demais resultados obtidos.

Tabela 8. Pontos de convergência para o critério limite e média por tipo de superfície e suas diferentes combinações.

Superfícies	Queimada				Vegetação			
	Min NIR				Max SWIR2			
Bandas e Critérios	Min NIR	Max SWIR2	MÉDIA		Max NIR	Min SWIR2	MÉDIA	
			NIR	SWIR2			NIR	SWIR2
Agricultura	0.072	0.2348	0.1412	0.1682	0.2610	0.0786	0.1969	0.1185
Campo Limpo	0.0482	0.3440	0.0974	0.1291	0.2248	0.0553	0.1962	0.0972
Campo Sujo	0.0495	0.2585	0.1091	0.1495	0.2505	0.0495	0.2013	0.0938
Campo Limpo e Campo Sujo	0.0482	0.3440	0.1038	0.1402	0.2505	0.0495	0.1989	0.09539
Superfícies	0.0482	0.3440	0.1073	0.1429	0.2061	0.0495	0.1987	0.0876
Percentil 5% - 95% de Todas as Superfícies	0.0692	0.2045	0.10590	0.1422	0.2248	0.0712	0.1982	0.0968
Amostras das Bibliotecas	0.0400	0.3200	-	-	0.5600	0.1200	-	-

As Figuras de 17-22 mostram as isolinhas dos índices η e ξ e o vetor deslocamento no espaço SWIR2/NIR ligando os pontos de convergência representando vegetação e queimada com base nos critérios selecionados para as seis diferentes combinações dos três tipos fisionômicos do Cerrado (agricultura, Campo Limpo e Campo Sujo). Estes resultados foram obtidos a partir de coleta de amostras de pixels, em seis cicatrizes selecionadas referente ao ano de 2010. A visualização do vetor deslocamento no espaço SWIR2/NIR representando a mudança na vegetação quando esta é queimada, permite verificar se as isolinhas dos índices η e ξ são ortogonais ao vetor deslocamento.

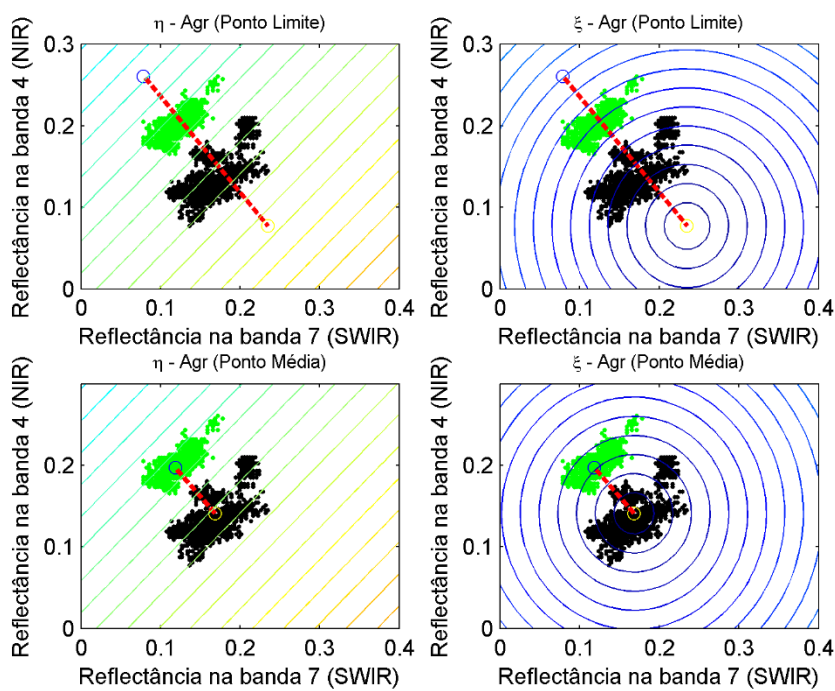


Figura 17. Vetor deslocamento no espaço SWIR2/NIR ligando os pontos de convergência representando vegetação e queimada para a fisionomia Agricultura, calculados com base no critério máximo-mínimo (primeira linha) e média (segunda linha) e as isolinhas dos índices η (primeira coluna) e ξ (segunda coluna).

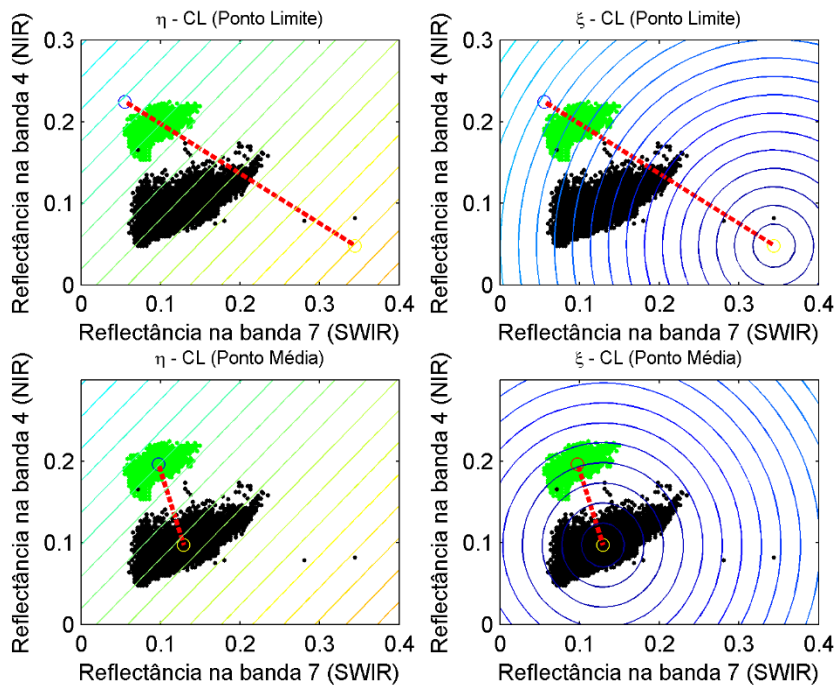


Figura 18. Como na Figura 17, mas para a fisionomia Campo Limpo.

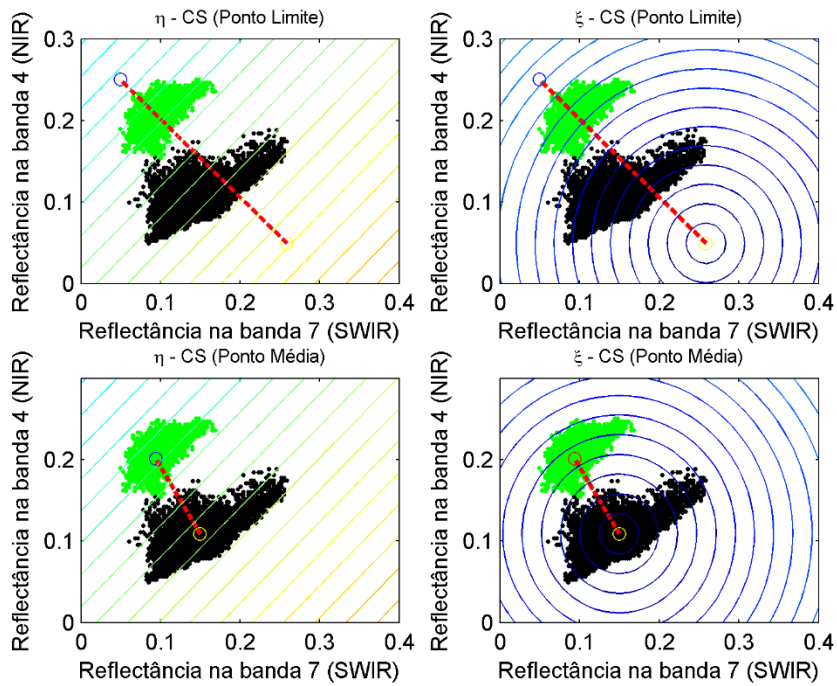


Figura 19. Como na Figura 17, mas para a fisionomia Campo Sujo.

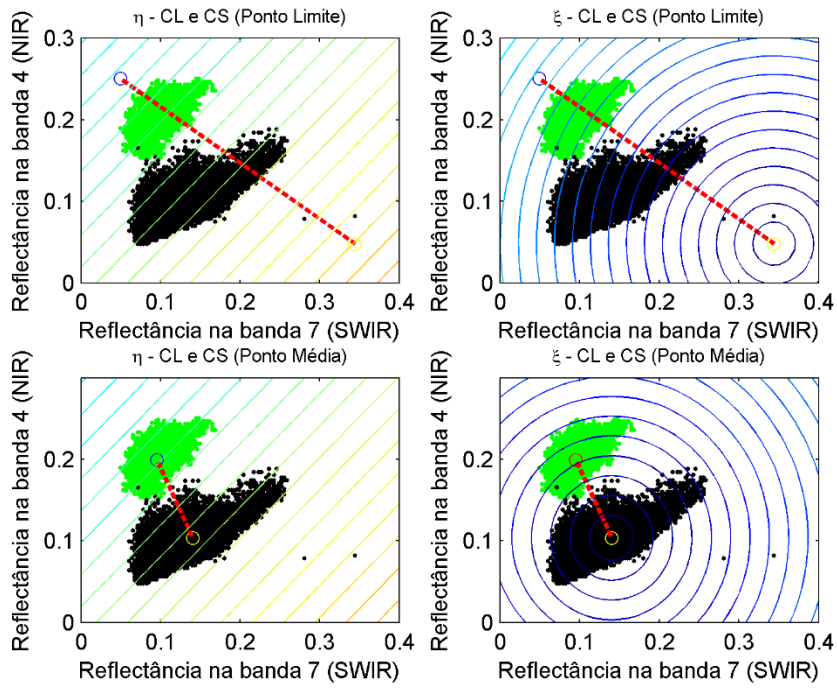


Figura 20. Como na Figura 17, mas para as fisionomias Campo Limpo e Campo Sujo.

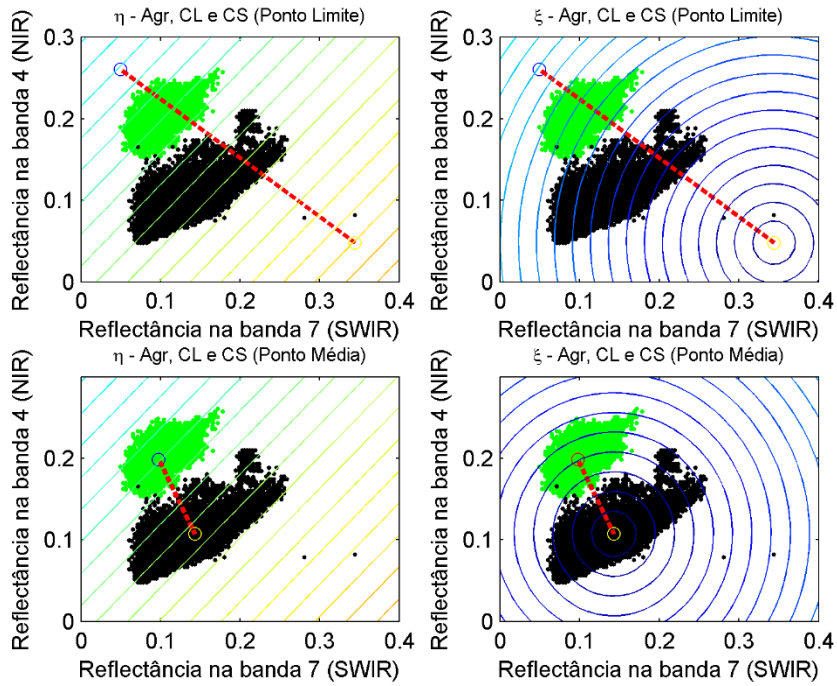


Figura 21. Como na Figura 17, mas para as fisionomias Agricultura, Campo Limpo e Campo Sujo.

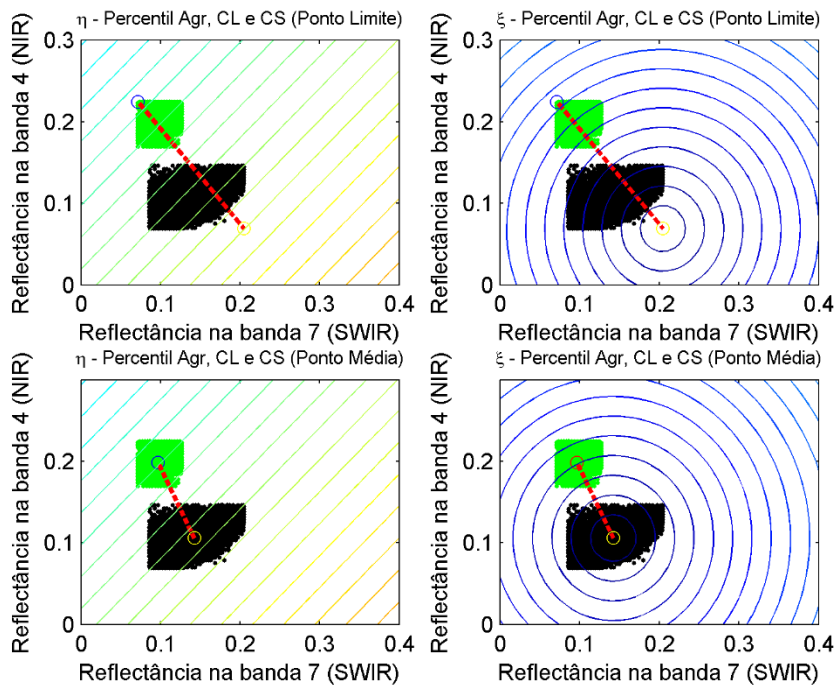


Figura 22. Como na Figura 17, mas limitado pelo percentil de 5% e 95%.

6.1.2. Escolha do ponto de convergência com base no índice M

Utilizando os diferentes pontos de convergência mostrados na Tabela 8, calcularam-se os valores de V e W, os quais são apresentados nos gráficos do chamado *kitedomain* (devido à forma similar a de uma pipa), onde os limites do domínio são estabelecidos pelo novo sistema de coordenadas η e ξ . As Figuras de 23 a 28 apresentam gráficos destes domínios com a distribuição dos valores (V, W) para superfícies vegetadas e queimadas.

Nos gráficos que utilizaram o critério dos pontos de convergência dos limites máximos e mínimos, os valores de V apresentaram uma distribuição mais alinhada aos limites do domínio, do que os gráficos que utilizaram o critério da média. Pixels de áreas queimadas apresentaram uma distribuição no gráfico em regiões que apresentam valores baixos de W. Já os pixels de áreas de vegetação apresentaram uma distribuição em regiões que apresentam valores altos de W. Esta condição foi sempre observada em todos os gráficos gerados com valores (V, W) (Figuras 23-28).

Os gráficos apresentam um padrão similar ao que foi verificado por Libonati et al. (2011) para a região do MIR, sendo que os valores de V, para a região do SWIR2, associados à superfície de vegetação verde, seca e queimada aparecem com pequena dispersão, enquanto os valores de W cobrem uma série de valores. Desta forma, a

adaptação dos índices (V, W) para as bandas do TM/Landsat, confirmaram que V é um bom classificador do tipo de superfície ao qual o *pixel* se refere, já que os pixels associados à presença de biomassa tendem a alinhar-se ao longo da curva V=1 (como superfícies vegetadas, solos e áreas queimadas). Para W, ficou comprovado que se trata de um bom quantificador quanto ao teor de umidade. Os resultados mostram que as superfícies vegetadas, solos e áreas queimadas estão associados respectivamente a valores altos ($\sim 0,6$), moderados ($\sim 0,2 - 0,4$) e baixos ($< 0,2$) de W.

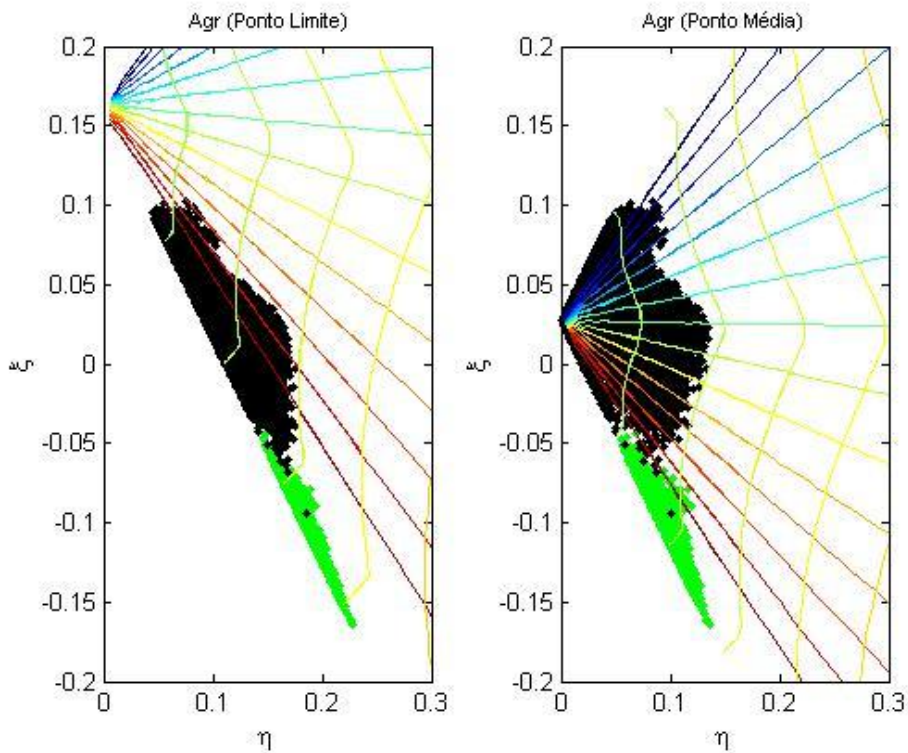


Figura 23. Valores do índice V, W para vegetação (pontos em verde) e queimada (pontos em preto) apresentados no diagrama *kitedomain* com as coordenadas η e ξ , considerando os critérios de limite e média para a amostra agricultura.

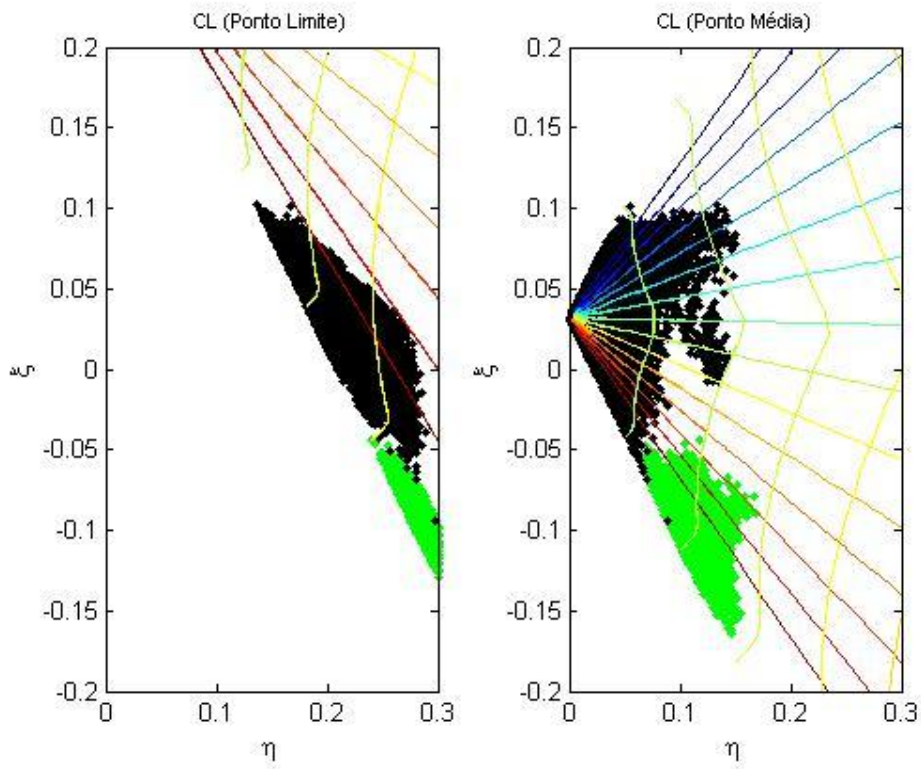


Figura 24. Como na Figura 23, mas para a amostra campo limpo.

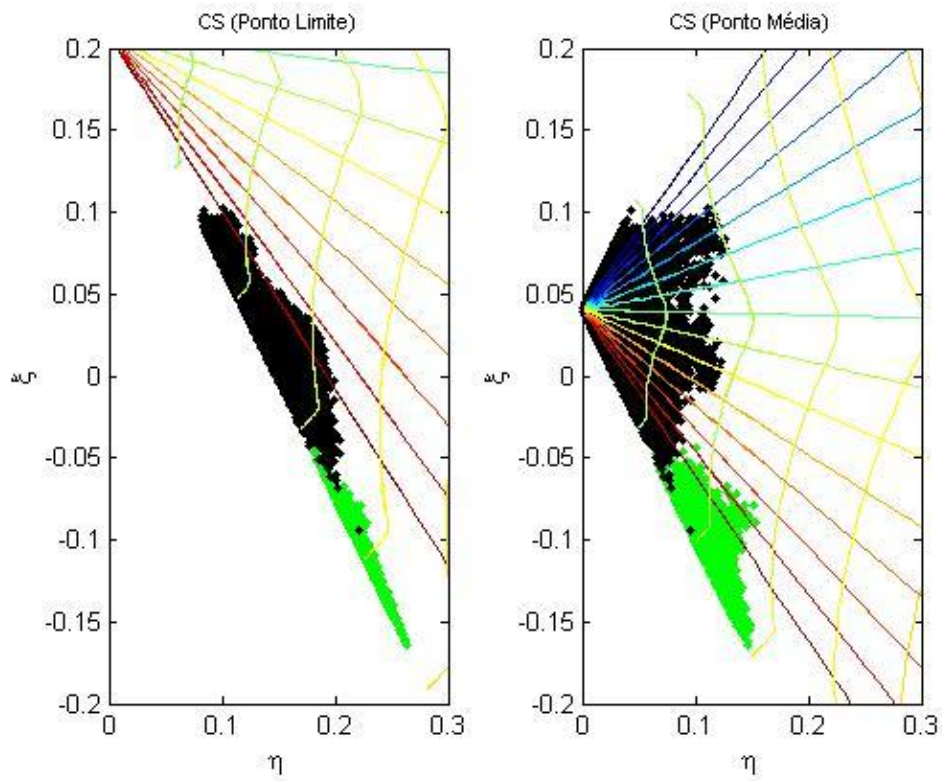


Figura 25. Como na Figura 23, mas para a amostra campo sujo.

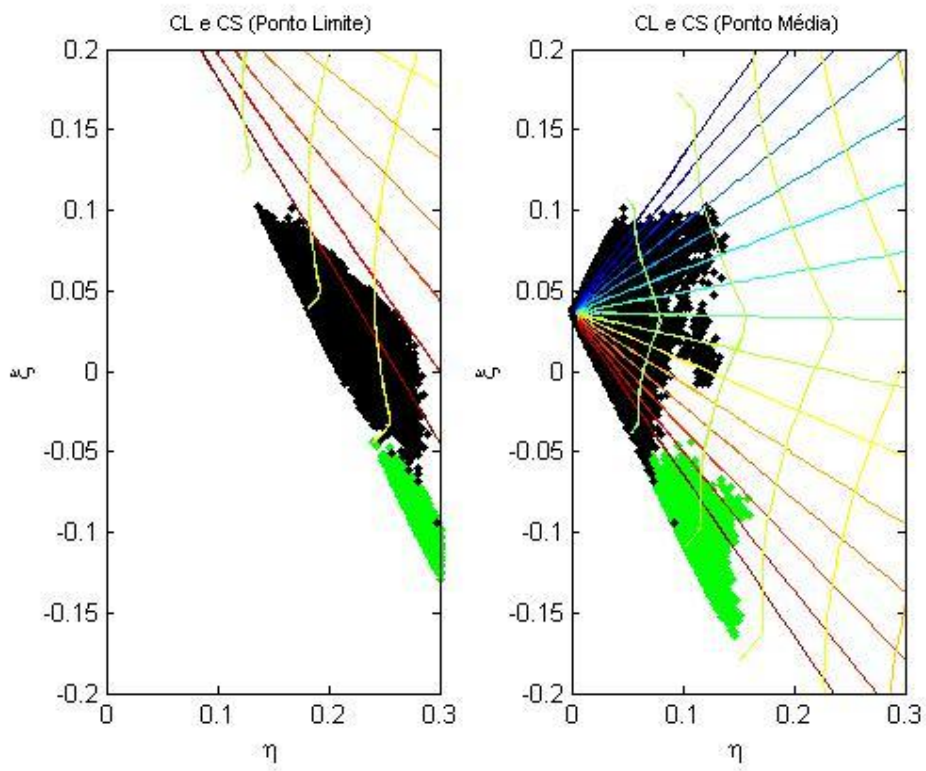


Figura 26. Como na Figura 23, mas para a amostra campo sujo e campo limpo.

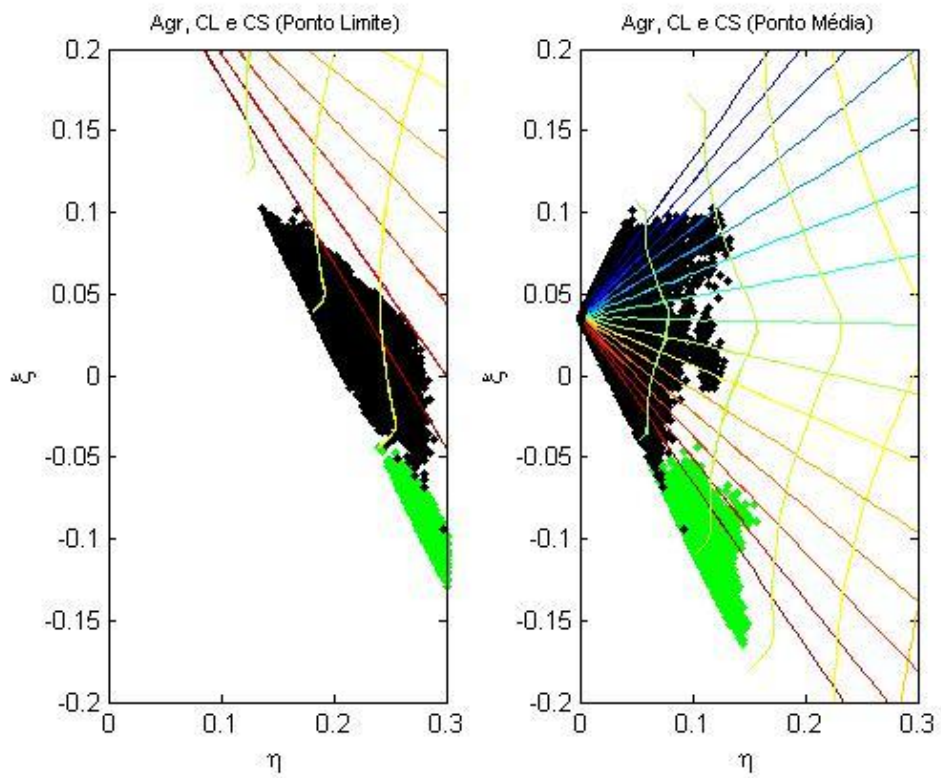


Figura 27. Como na Figura 23, mas para a amostra agricultura, campo sujo e campo limpo.

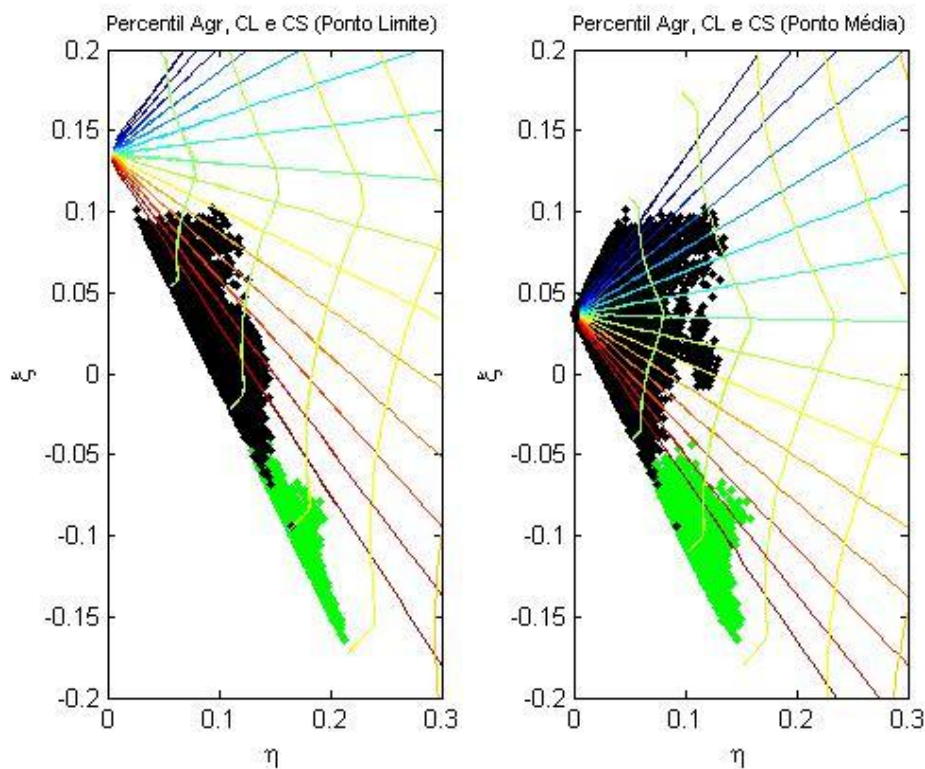


Figura 28. Como na Figura 23, mas para o percentil 5 e 95% da amostra agricultura, campo sujo e campo limpo.

Nesta fase, realizou-se o cálculo do índice M com o propósito de verificar qual ponto de convergência, utilizado para o cálculo dos índices (V, W), apresenta maior separabilidade entre as classes vegetação e queimada. O resultado deste processo nos fornece qual ponto de convergência possibilita a melhor adaptação dos índices (V, W) considerando as superfícies estudadas. Os resultados obtidos com o cálculo do índice de separabilidade M são apresentados na Tabela 9. Todos os valores de M são maiores do que 1, indicando que a aplicação de diferentes pontos de convergência, para as diferentes amostras, resultam boa separabilidade. O índice M que apresentou maior separabilidade entre a classe “queimada” e a classe “vegetação” corresponde à combinação do ponto limite com a amostra agricultura, campo limpo e campo sujo, delimitada pelo percentil 5-95%, com $M = 2.8$. Este resultado nos indica que este ponto de convergência (0.0692; 0.2045) é o que resulta numa melhor adaptação dos índices (V, W), portanto sendo utilizado nas etapas seguintes de adaptação e aplicação do índice.

Tabela 9. Resultados dos valores do índice de separabilidade M para cada ponto de convergência, definido com base nos critérios limite (máximo e mínimo) e média, para cada tipo fisionômico e suas diferentes combinações.

SUPERFÍCIES / BANDAS e CRITÉRIOS	ÍNDICE (M)	
	Limite	Média
Agricultura	2.5	1.6
Campo Limpo	1.9	2.2
Campo Sujo	2.7	2.4
Campo Limpo e Campo Sujo	1.9	2.4
Superfícies	1.9	2.4
Percentil 5% - 95% Todas as Superfícies	2.8	2.4

A escolha do ponto de convergência se mostrou adequada para as combinações das regiões espectrais do NIR e SWIR2, do sensor TM/Landsat, apresentando valor máximo de separabilidade (M) de 2.8, indicando alta separabilidade na combinação de todas as superfícies com o percentil de 5%-95%.

6.1.3. Verificação da adaptação dos índices (V, W) com base no índice M

Nesta seção é feito o cálculo dos índices (V, W) com base no ponto de convergência estabelecido na seção anterior e verifica-se a adaptação do índice aplicando-se o índice de separabilidade M em amostras (V, W) de pixels de áreas de vegetação (V_v, W_v) e de áreas queimadas (V_b, W_b) colhidas em imagens de 2005 e 2008.

A Figura 29 mostra como exemplo uma imagem de W para o dia 23/07/2005, a qual foi obtida com base nos valores de reflectância no NIR e SWIR2, e no ponto de convergência pré-estabelecido. Os valores baixos de W correspondem às áreas queimadas apresentando coloração mais escura que as superfícies não queimadas. Por outro lado, as superfícies não queimadas correspondem a valores altos de W, apresentando uma coloração cinza claro. Vale ressaltar mais uma vez, que as datas das imagens que foram utilizadas nesta etapa são diferentes das datas das imagens utilizadas na etapa anterior para adaptação do índice, que correspondem ao ano de 2010.

Os valores do índice M obtidos são iguais a 2.2 para o ano de 2005 e 2.4 para o ano de 2008. Estes valores ajudam a corroborar a adaptação dos índices (V, W)

realizada neste trabalho a partir da escolha do ponto de convergência. Estes valores de M indicam alta separabilidade, ficando próximo do melhor resultado de separabilidade (M) 3.32, encontrado por Libonati (2010), para a combinação das bandas NIR e MIR do sensor MODIS. Este resultado indica que a combinação das bandas espectrais NIR x SWIR2, mostram-se adequadas a adaptação do índice de queimada (V, W), devido a alta separabilidade M, no mapeamento automatizado da classe queimada, quando comparado a combinação das bandas NIR e MIR.

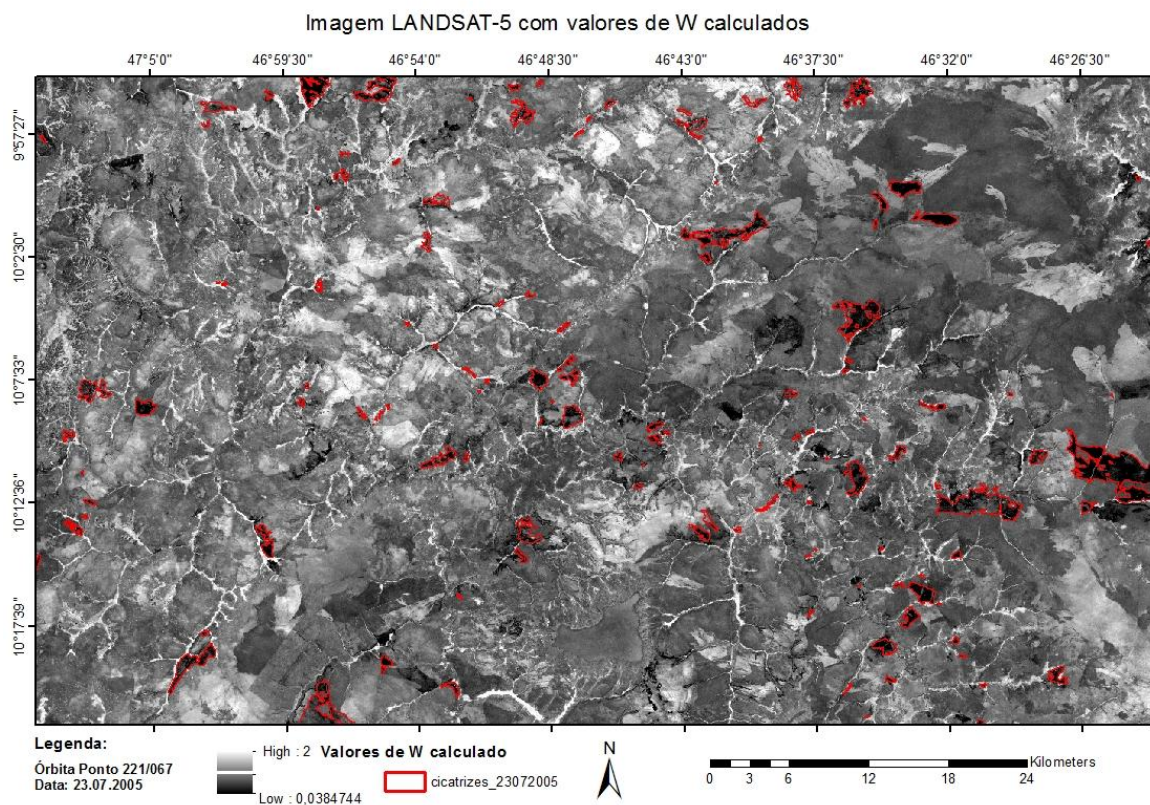


Figura 29. Imagem TM/Landsat, órbita ponto 221/06 com valores de W e cicatrizes de áreas queimadas mapeadas pelo INPE.

6.2. APLICAÇÃO DO ÍNDICE W (RESULTADOS)

Os resultados desta seção de aplicação do índice W serão apresentados em três tópicos:

- d) Limiares Espaciais e Temporais (Imagens anos 2005 e 2008);
- e) Aplicação do índice W (Imagens anos 2006, 2007 e 2009);
- f) Validação dos Resultados;

6.2.1. Limiares espacial e temporal (imagens anos 2005 e 2008)

As amostras de W para vegetação e queimada obtidas na seção anterior são utilizadas para estabelecer limiares temporais e espaciais de W , os quais permitirão posteriormente mapear automaticamente áreas queimadas. A distribuição dos valores das amostras de W dos *pixels* de áreas com vegetação (W_v) e de áreas queimadas (W_b) e da diferença entre as amostras são apresentadas inicialmente como gráficos de dispersão nas Figuras 30 e 31, respectivamente. Desta forma, a dispersão dos *pixels* de área queimada (representados na cor vermelha) e de áreas de vegetação (representados na cor verde) das amostras de W coletadas nas imagens dos anos de 2005 e 2008 é utilizada na definição do limiar espacial. A região que apresenta sobreposição dos valores de W de área queimada com *pixels* de área de vegetação indica que estes *pixels* de área queimadas com altos valores de W , podem ser identificados como *pixels* de áreas de vegetação pelo classificador.

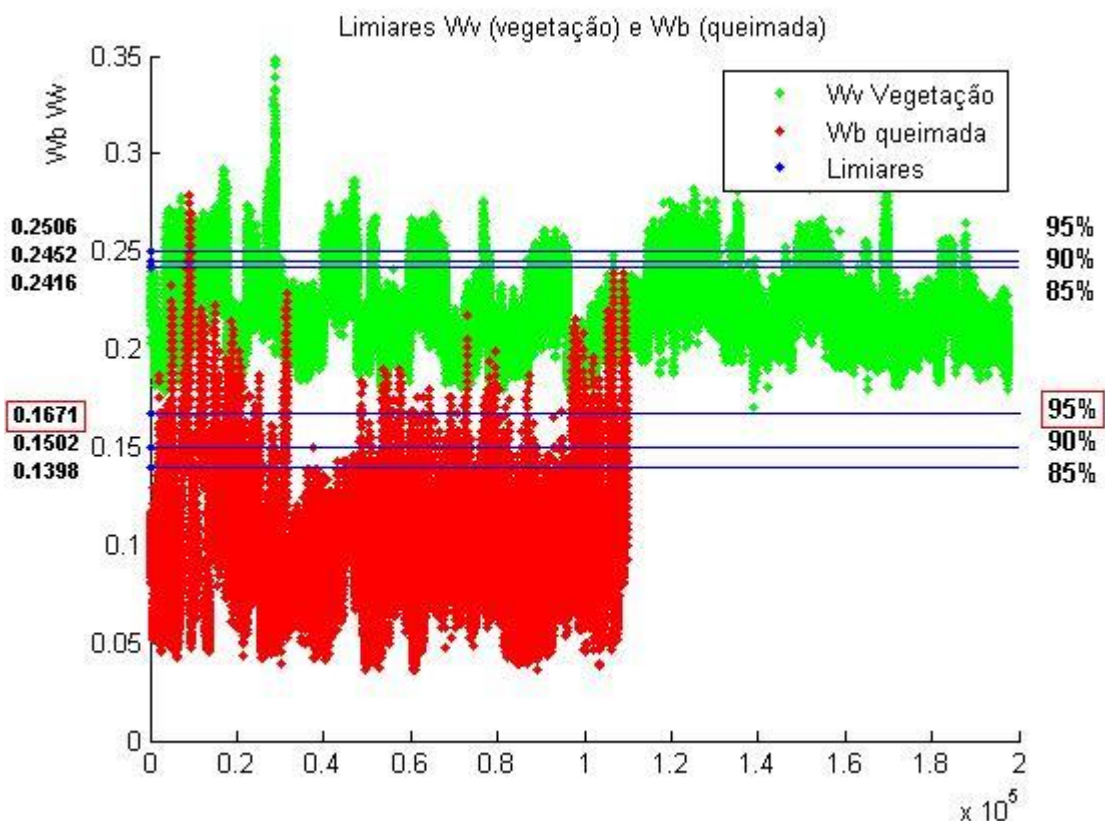


Figura 30. Gráfico de dispersão dos valores de W coletados de superfícies queimadas em vermelho e vegetação em verde, para estabelecimento dos limiares.

Neste sentido, para o estabelecimento do limiar espacial, foi realizada uma análise visual dos valores de W no gráfico de dispersão da Figura 30, para definição de uma região que com boa precisão de acerto pelo índice W, mas que não fosse uma região com sobreposição de *pixels* de áreas queimadas sobre *pixels* de vegetação, de forma a obter o mínimo de resultados com falsos alarmes. No entanto, este limiar pode ser aumentado, com o propósito de verificar se com isso ocorre um aumento no número de acertos de áreas queimadas, caso a quantidade de falsos alarmes não aumente de forma significativa (Viés).

Por outro lado, a Figura 31 apresenta a dispersão da diferença entre valores de *pixels* de W queimada e W vegetação, a qual auxiliará na escolha do limiar temporal.

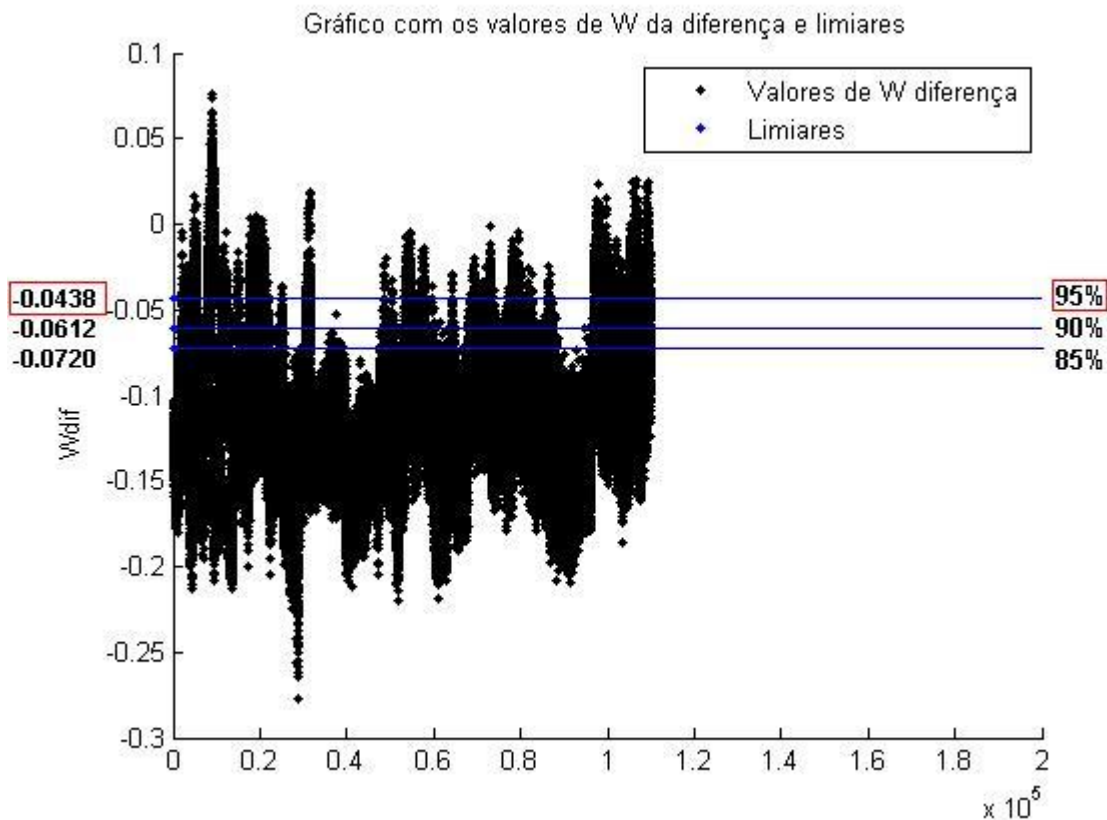


Figura 31. Gráfico de dispersão da diferença de valores de W queimada e de vegetação para estabelecimentos dos limiares.

A distribuição dos valores das amostras de W de *pixels* de áreas de vegetação e de áreas queimadas, assim como a diferença entre elas, é mostrada também na forma de *box plot* nas Figuras 32 e 33. A distribuição dos valores de W, para superfície queimada, apresenta mediana com valor próximo a 0,11 e de 0,14 no segundo quartil (75%). Enquanto que os valores correspondentes para a diferença são por volta de -0.12 e -0.75.

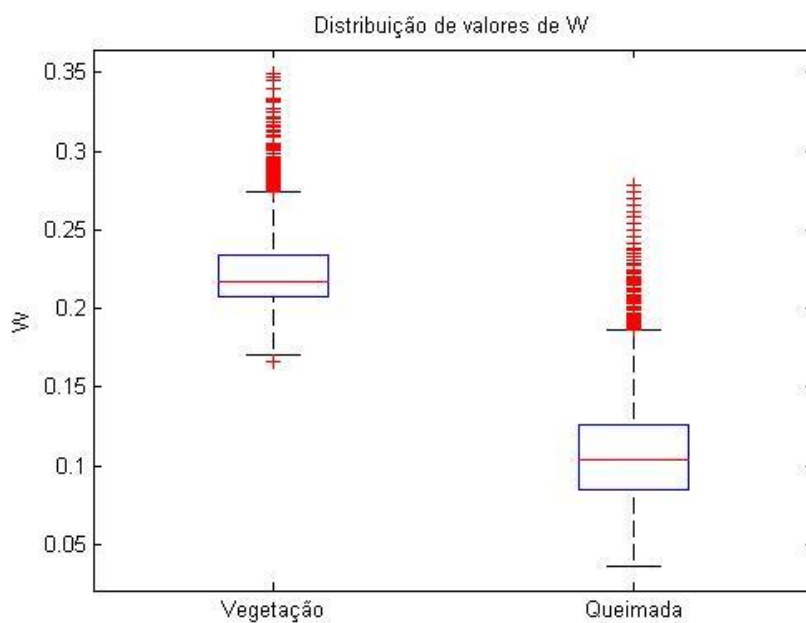


Figura 32. Box plot de valores de W de queimada e de vegetação para estabelecimentos dos limiares.

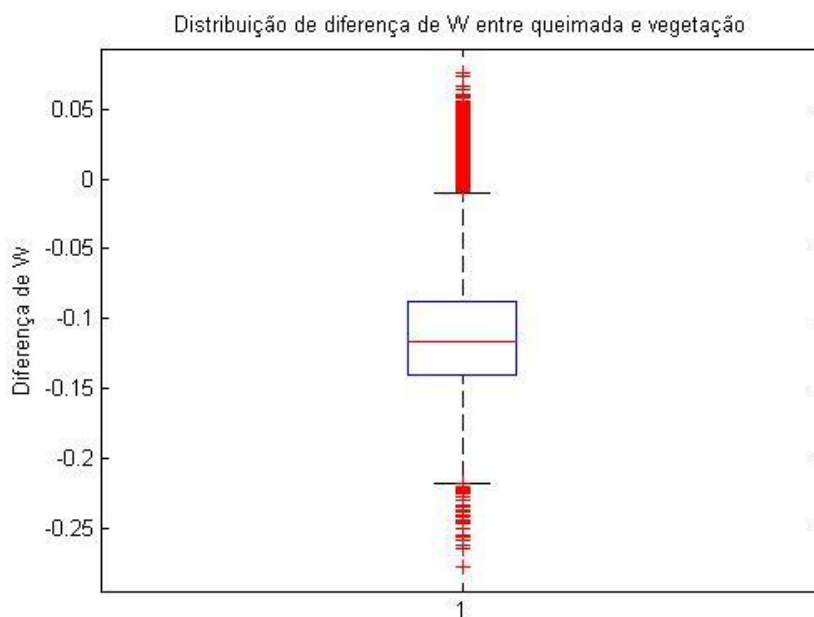


Figura 33. Box plot da diferença de valores de W de queimada e de vegetação para estabelecimentos dos limiares.

A Tabela 10 mostra os valores de limiares, espacial e temporal de W, para os cinco critérios adotados com base na distribuição das amostras coletadas na seção anterior.

Tabela 10. Limiares, espacial e temporal, para os cinco critérios adotados.

Critérios	Limiar Espacial	Limiar Temporal
$\mu_{W_b} + \sigma_{W_b};$	0.1404	-0.0739
$\mu_{W_b} + 2\sigma_{W_b};$	0.1732	-0.0352
Percentil 85% da amostra W_b	0.1398	-0.0720
Percentil 90% da amostra W_b	0.1502	-0.0612
Percentil 95% da amostra W_b	0.1671	-0.0438

A definição do limiar mais adequado foi realizada visualmente com base na sobreposição de linhas de cada valor de limiar aos gráficos de dispersão e de *box plot*. A escolha se baseia em definir aquele limiar que consegue o balanço de classificar o máximo possível de *pixels* de áreas queimadas e ao mesmo tempo minimizar a classificação de área vegetada como queimada. Com base neste preceito e na análise visual, o critério escolhido foi o percentil de 95% da amostra W_b , de forma que os limiares, espacial e temporal, assumem valores de 0.1671 e – 0.0438, respectivamente.

6.2.2. Aplicação do índice W (Imagens anos 2006, 2007 e 2009)

Neste tópico são inicialmente calculados, a partir da reflectância, valores de W para as imagens de 2006, 2007 e 2009. No processo foi considerado o ponto de convergência escolhido na etapa de adaptação do índice (ponto limite e percentil 5%-95% de todas as fisionomias, NIR = 0.0692 e SWIR2 = 0.2045). Como resultado, a Figura 34 apresenta um exemplo do cálculo de W para o dia 24 de junho de 2006. O resultado final deste processo consiste na geração de 14 imagens de W para os anos acima referidos. Observam-se mais uma vez que nas regiões mais escuras podem ter ocorrido queimadas (valores baixos), enquanto que os *pixels* mais claros (valores altos) representam superfícies não queimadas. As áreas delimitadas em vermelho correspondem aos arquivos vetoriais referentes às cicatrizes de áreas queimadas mapeadas pelo INPE, que foram incorporadas na imagem acima com a finalidade de destacar os valores de W delimitados por estes arquivos vetoriais.

Como exemplo, a Figura 35 apresenta o resultado do mapeamento automático de áreas queimadas com base na imagem do índice W adaptado mostrado na Figura 34 e nos limiares espacial e temporal definidos na seção anterior. As áreas queimadas estão

representadas pela cor cinza claro, enquanto que a área não queimada é representada pela cor preta.

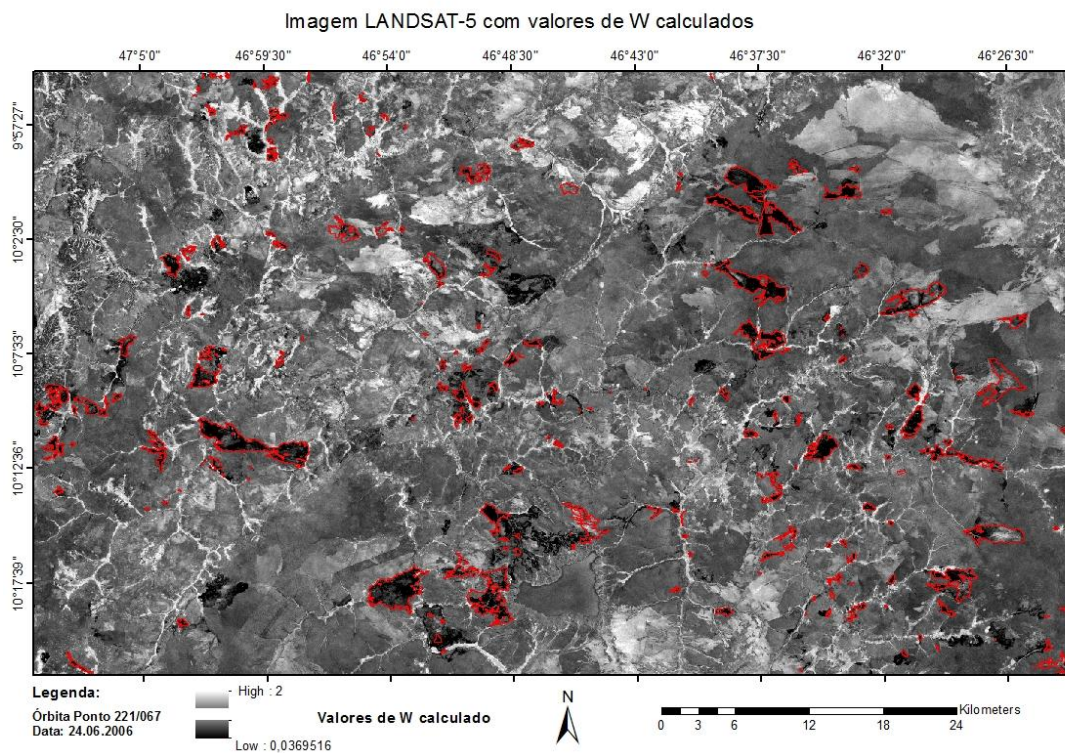


Figura 34. Imagem TM/Landsat de 24.06.2006 com valores de W calculados e as cicatrizes de áreas queimadas mapeadas pelo INPE.

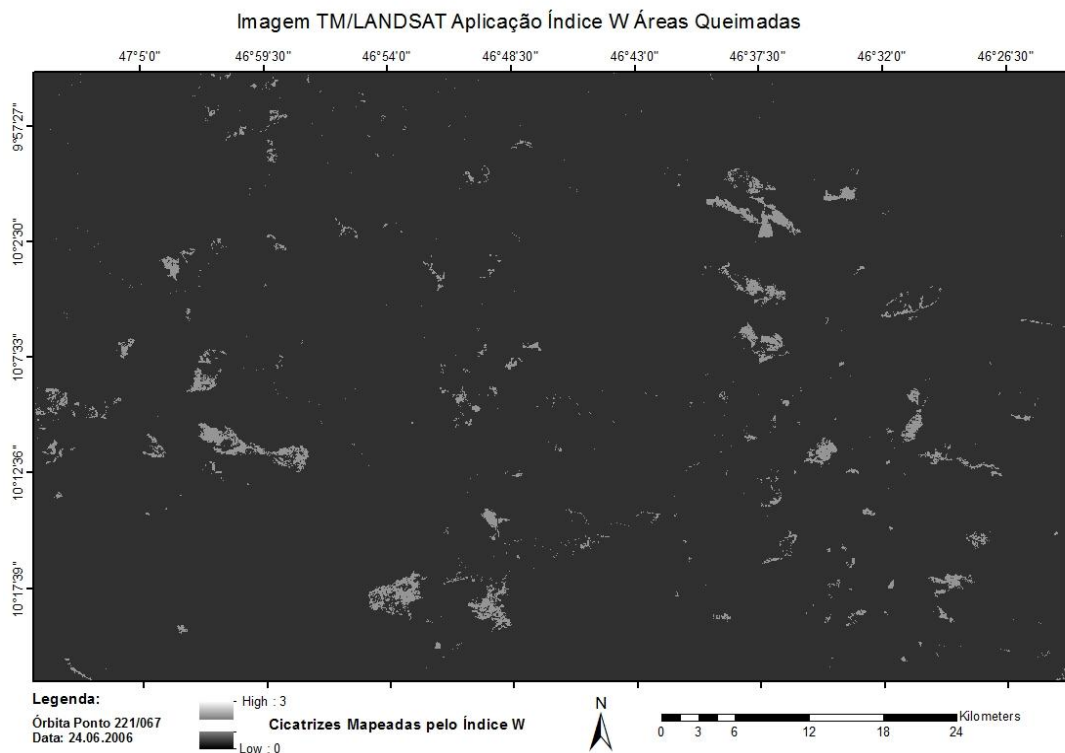


Figura 35. Mapeamento automático com base no índice W adaptado e nos limiares estabelecidos para a imagem TM/Landsat de 24.06.2006.

6.2.3. Validação dos resultados

A validação dos resultados foi obtida pela diferença das cicatrizes de área queimada mapeadas pelo INPE, no formato *raster*, pelas cicatrizes de área queimada mapeadas pelo índice W adaptado para as bandas 4 e 7 do TM/Landsat. A Figura 36 apresenta um arquivo no formato *raster* que foi obtido, mediante a transformação do arquivo vetorial das cicatrizes de queimadas mapeadas pelo INPE, pela criação de uma máscara entre as cicatrizes do INPE e as imagens TM/Landsat de mesmas datas, utilizando o aplicativo ENVI. Neste arquivo *raster*, os *pixels* em branco representam superfícies queimadas, enquanto que a preta representa aqueles não queimados. O resultado apresentado refere-se à data de 24 de junho de 2006. Esta imagem da Figura 36 representa a condição real de ocorrência de queimada no terreno, mapeada pelo INPE e estas informações estão sendo consideradas como referência no processo de validação para comprovar a eficácia do mapeamento automático com base no índice W adaptado.

A Figura 37 mostra o resultado do mapeamento automático de áreas queimadas para a mesma data de 24 de junho de 2006 com base no índice W e os limiares espaciais e temporais estabelecidos. As cicatrizes mapeadas pelo índice W estão representadas por cinza claro.

Os resultados da validação, que são feitos pela comparação entre as cicatrizes mapeadas pelo INPE e aquelas mapeadas automaticamente com base em W, são apresentados para as imagens de 2006, 2007 e 2009 em forma de tabela de contingência (ver seção 5.2.2.3) nas Tabelas 11-21.

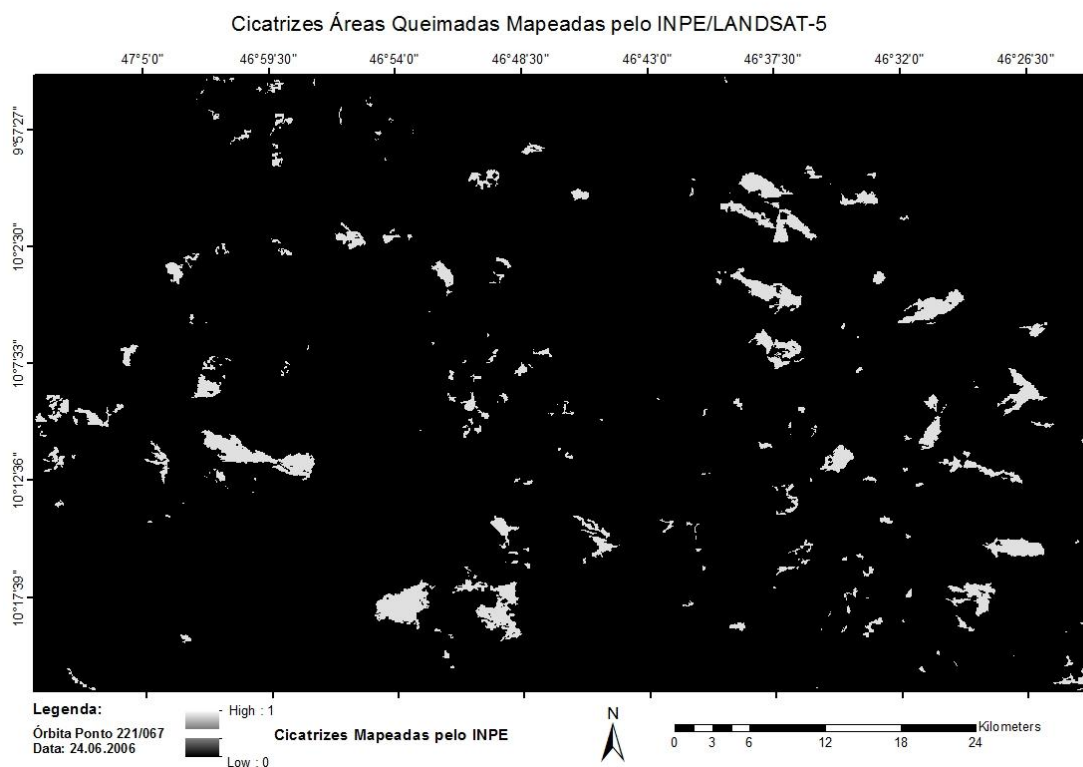


Figura 36. Arquivo *raster* (imagem TM/Landsat de 24.06.2006) gerado com as cicatrizes de áreas queimadas mapeadas pelo INPE (condição real no terreno), utilizada como referência no processo de validação.

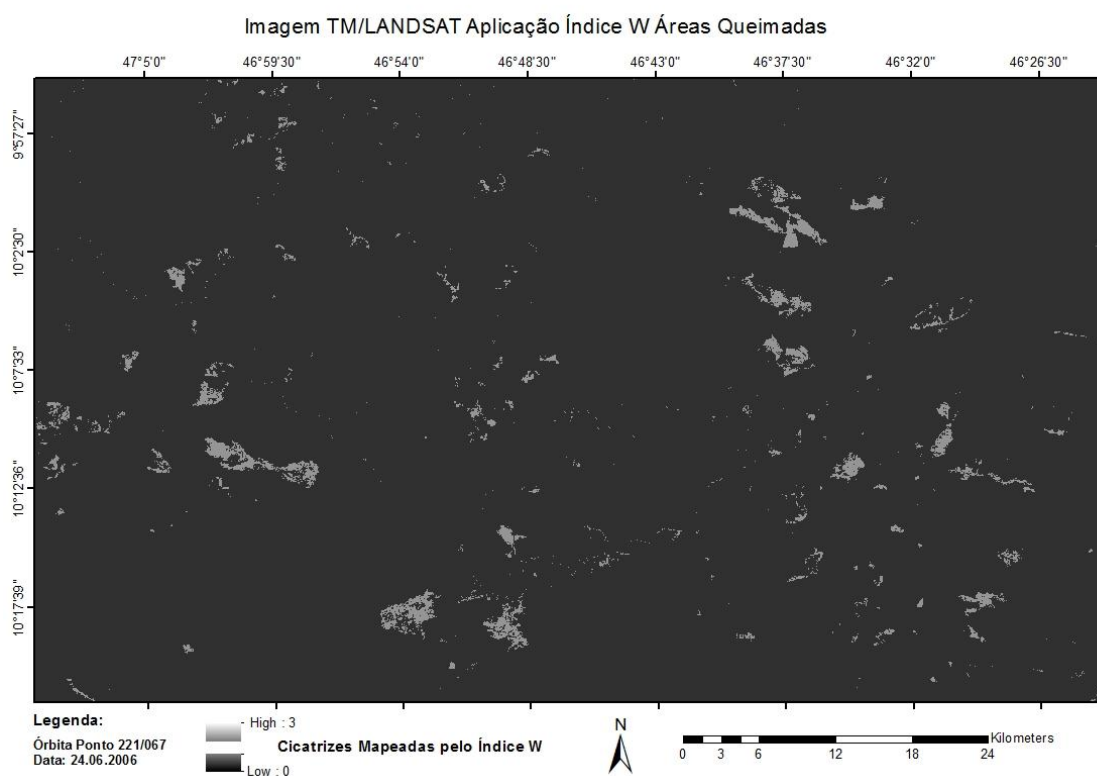


Figura 37. Mapeamento automático de áreas queimadas (imagem TM/Landsat de 24.06.2006) com base no índice W.

A Figura 37 apresenta o mapeamento automatizado pelo algoritmo das áreas queimadas em cinza, com nível de acerto global (*Overall Accuracy*) das informações de 94,2%, com erro global de 5,8% (*Overall Error*) em relação às cicatrizes de áreas queimadas (INPE) utilizadas como referência.

O percentual de acerto de áreas queimadas nesta cena foi obtido pela diferença do total (100%) pelo valor percentual do erro de omissão. Neste caso o valor do erro de omissão foi 70,3%, portanto o acerto de áreas queimadas foi baixo nesta imagem, da ordem de 29,7% nesta data. O mesmo comportamento foi observado em imagem de mesmo período no ano de 2007.

Nesta imagem a confiabilidade do algoritmo está representada pelo erro de comissão (CE) encontrado no mapeamento apresentado na Figura 37. O valor do erro de comissão foi de 13,2%, significando que a confiabilidade do algoritmo no mapeamento automatizado nesta cena foi de 86,8%, ou seja, obteve uma boa precisão.

Tabela 11. Resultado do cálculo das métricas a, b, c e d da tabela de contingência para a diferença obtida entre os arquivos *raster* das cicatrizes do INPE e as cicatrizes do W para a imagem obtida em 28.09.2006, valores expressos em número de *pixel*.

TABELA DE CONTINGÊNCIA <u>28/09/2006</u>		Mapa de Referência		
		Queimado	Não-Queimado	Soma
Algoritmo	Queimado	259789 (a)	29596 (b)	289385 (a + b)
	Não-Queimado	203131 (c)	29575342 (d)	29778473 (c + d)
	Soma	462920 (a + c)	29604938 (b + d)	30067858 (a + b + c + d)

Tabela 12. Resultado do cálculo das métricas a, b, c e d da tabela de contingência para a diferença obtida entre os arquivos *raster* das cicatrizes do INPE e as cicatrizes do W para imagem obtida em 27.08.2006, valores expressos em número de pixel.

TABELA DE CONTINGÊNCIA <u>27/08/2006</u>		Mapa de Referência		
		Queimado	Não-Queimado	Soma
Algoritmo	Queimado	508814 (a)	47430 (b)	556244 (a + b)
	Não-Queimado	539288 (c)	28972314 (d)	29511602 (c + d)
	Soma	1048102 (a + c)	29019744 (b + d)	30067846 (a + b + c + d)

Tabela 13. Resultado do cálculo das métricas a, b, c e d da tabela de contingência para a diferença obtida entre os arquivos *raster* das cicatrizes do INPE e as cicatrizes do W para imagem obtida em 11.08.2006, valores expressos em número de pixel.

TABELA DE CONTINGÊNCIA <u>11/08/2006</u>		Mapa de Referência		
		Queimado	Não-Queimado	Soma
Algoritmo	Queimado	339384 (a)	25864 (b)	365248 (a + b)
	Não-Queimado	487130 (c)	29215484 (d)	29702614 (c + d)
	Soma	826514 (a + c)	29241348 (b + d)	30067862 (a + b + c + d)

Tabela 14. Resultado do cálculo das métricas a, b, c e d da tabela de contingência para a diferença obtida entre os arquivos *raster* das cicatrizes do INPE e as cicatrizes do W para imagem obtida em 26.07.2006, valores expressos em número de pixel.

TABELA DE CONTINGÊNCIA <u>26/07/2006</u>		Mapa de Referência		
		Queimado	Não-Queimado	Soma
Algoritmo	Queimado	613380 (a)	19544 (b)	632924 (a + b)
	Não-Queimado	561942 (c)	28872996 (d)	29434938 (c + d)
	Soma	1175322 (a + c)	28892540 (b + d)	30067862 (a + b + c + d)

Tabela 15. Resultado do cálculo das métricas a, b, c e d da tabela de contingência para a diferença obtida entre os arquivos *raster* das cicatrizes do INPE e as cicatrizes do W para imagem obtida em 24.06.2006, valores expressos em número de pixel.

TABELA DE CONTINGÊNCIA <u>24/06/2006</u>		Mapa de Referência		
		Queimado	Não-Queimado	Soma
Algoritmo	Queimado	692025 (a)	105686 (b)	797711 (a + b)
	Não-Queimado	1641189 (c)	27628962 (d)	29270151 (c + d)
	Soma	2333214 (a + c)	27734648 (b + d)	30067862 (a + b + c + d)

Tabela 16. Resultado do cálculo das métricas a, b, c e d da tabela de contingência para a diferença obtida entre os arquivos *raster* das cicatrizes do INPE e as cicatrizes do W para imagem obtida em 01.10.2007.

TABELA DE CONTINGÊNCIA <u>01.10.2007</u>		Mapa de Referência		
		Queimado	Não-Queimado	Soma
Algoritmo	Queimado	528441 (a)	26343 (b)	554784 (a + b)
	Não-Queimado	701638 (c)	28811440 (d)	29513078 (c + d)
	Soma	1230079 (a + c)	28837783 (b + d)	30067862 (a + b + c + d)

Tabela 17. Resultado do cálculo das métricas a, b, c e d da tabela de contingência para a diferença obtida entre os arquivos *raster* das cicatrizes do INPE e as cicatrizes do W para imagem obtida em 30.08.2007.

TABELA DE CONTINGÊNCIA <u>30.08.2007</u>		Mapa de Referência		
		Queimado	Não-Queimado	Soma
Algoritmo	Queimado	502553 (a)	24653 (b)	527206 (a + b)
	Não-Queimado	428905 (c)	29111751 (d)	29540656 (c + d)
	Soma	931458 (a + c)	29136404 (b + d)	30067862 (a + b + c + d)

Tabela 18. Resultado do cálculo das métricas a, b, c e d da tabela de contingência para a diferença obtida entre os arquivos *raster* das cicatrizes do INPE e as cicatrizes do W para a imagem obtida em 14.08.2007.

TABELA DE CONTINGÊNCIA <u>14.08.2007</u>		Mapa de Referência		
		Queimado	Não-Queimado	Soma
Algoritmo	Queimado	416058 (a)	23854 (b)	439912 (a + b)
	Não-Queimado	528042 (c)	29099908 (d)	29627950 (c + d)
	Soma	944100 (a + c)	29123762 (b + d)	30067862 (a + b + c + d)

Tabela 19. Resultado do cálculo das métricas a, b, c e d da tabela de contingência para a diferença obtida entre os arquivos *raster* das cicatrizes do INPE e as cicatrizes do W para a imagem obtida em 29.07.2007.

TABELA DE CONTINGÊNCIA <u>29.07.2007</u>		Mapa de Referência		
		Queimado	Não-Queimado	Soma
Algoritmo	Queimado	934038 (a)	32937 (b)	966975 (a + b)
	Não-Queimado	747441 (c)	28353446 (d)	29100887 (c + d)
	Soma	1681479 (a + c)	28386383 (b + d)	30067862 (a + b + c + d)

Tabela 20. Resultado do cálculo das métricas a, b, c e d da tabela de contingência para a diferença obtida entre os arquivos *raster* das cicatrizes do INPE e as cicatrizes do W para a imagem obtida em 13.07.2007.

TABELA DE CONTINGÊNCIA <u>13.07.2007</u>		Mapa de Referência		
		Queimado	Não-Queimado	Soma
Algoritmo	Queimado	885610 (a)	825849 (b)	1711459 (a + b)
	Não-Queimado	978033 (c)	27378370 (d)	28356403 (c + d)
	Soma	1863643 (a + c)	28204219 (b + d)	30067862 (a + b + c + d)

Tabela 21. Resultado do cálculo das métricas a, b, c e d da tabela de contingência para a diferença obtida entre os arquivos *raster* das cicatrizes do INPE e as cicatrizes do W para a imagem obtida em 10.08.2009.

TABELA DE CONTINGÊNCIA <u>19.08.2009</u>		Mapa de Referência		
		Queimado	Não-Queimado	Soma
Algoritmo	Queimado	308882 (a)	13127 (b)	322009 (a + b)
	Não-Queimado	366293 (c)	29379560 (d)	20745853 (c + d)
	Soma	675175 (a + c)	29392687 (b + d)	30067862 (a + b + c + d)

Os resultados dos valores das métricas **a**, **b**, **c** e **d** das Tabelas 11-21, foram utilizados no cálculo estatístico das medidas de verificação utilizadas na validação do mapeamento automático de áreas queimadas com base no índice W aplicado às imagens TM/Landsat. Os resultados do cálculo estatístico das medidas de verificação foram obtidos com a utilização das equações apresentadas na seção 5.2.2.3. As Tabelas 22-24 apresentam os resultados obtidos para as seguintes medidas de verificação: *overall accuracy* (AO), *Omission error* (OE), *Commission Error* (CE) e *Viés*, *Bias* (B).

Tabela 22. Resultados das medidas de verificação AO, OE, CE e B utilizadas para validação do mapeamento automático de áreas queimadas nas imagens de 2006 com base no índice W.

Medidas de Verificação / Datas (2006)	<u>28/09/2006</u>	<u>27/08/2006</u>	<u>11/08/2006</u>	<u>26/07/2006</u>	<u>24/06/2006</u>
AO – Precisão Global / Erro Global	0.992 (99.2%)	0.98 (98%)	0.983 (98.3%)	0.981 (98.1%)	0.942 (94.2%)
	0.008 (0.8%)	0.02 (2%)	0.017 (1.7%)	0.019 (1.9%)	0.058 (5.8%)
OE – Erro de Omissão / Acerto de Queimadas	0.439 (43.9%)	0.515 (51.5%)	0.589 (58.9%)	0.478 (47.8%)	0.703 (70.3%)
	0.561 (56.1%)	0.485 (48.5%)	0.411 (41.1%)	0.522 (52.2%)	0.297 (29.7%)
CE – Erro de Comissão/ Confiabilidade do Algoritmo	0.102 (10.2%)	0.085 (8.5%)	0.071 (7.1%)	0.031 (3.1%)	0.132 (13.2%)
	0.898 (89.8%)	0.915 (91.5%)	0.929 (92.9%)	0.969 (96.9%)	0.868 (86.8%)
B - Viés	0.62 (62%)	0.53 (53%)	0.44 (44%)	0.53 (53%)	0.34 (34%)

Tabela 23. Resultados das medidas de verificação AO, OE, CE e B utilizadas para validação do mapeamento automático de áreas queimadas nas imagens de 2007 com base no índice W.

Medidas de Verificação / Datas (2007)	<u>01.10.2007</u>	<u>30.08.2007</u>	<u>14.08.2007</u>	<u>29.07.2007</u>	<u>13.07.2007</u>
AO – Acerto Global / Erro Global	<i>0.977 (97.7%)</i>	<i>0.985 (98.5%)</i>	<i>0.982 (98.2%)</i>	<i>0.965 (96.5%)</i>	<i>0.94 (94%)</i>
	<i>0.023 (2.3%)</i>	<i>0.015 (1.5%)</i>	<i>0.018 (1.8%)</i>	<i>0.035 (3.5%)</i>	<i>0.06 (6%)</i>
OE – Erro de Omissão / Acerto de Queimadas	<i>0.57 (57%)</i>	<i>0.46 (46%)</i>	<i>0.559 (55.9%)</i>	<i>0.445 (44.5%)</i>	<i>0.052 (52.5%)</i>
	<i>0.43 (43%)</i>	<i>0.54 (54%)</i>	<i>0.441 (44.1%)</i>	<i>0.555 (55.5%)</i>	<i>0.475 (47.5%)</i>
CE – Erro de Comissão/ Confiabilidade do Algoritmo	<i>0.04 (4.7%)</i>	<i>0.04 (4.7%)</i>	<i>0.054 (5.4%)</i>	<i>0.034 (3.4%)</i>	<i>0.483 (48.3%)</i>
	<i>0.953 (95.3%)</i>	<i>0.953 (95.3%)</i>	<i>0.946 (94.6%)</i>	<i>0.996 (96.6%)</i>	<i>0.517 (51.7%)</i>
B - Viés	<i>0.45 (45%)</i>	<i>0.56 (56%)</i>	<i>0.46 (46%)</i>	<i>0.57 (57%)</i>	<i>0.92 (92%)</i>

Tabela 24. Resultados das medidas de verificação AO, OE, CE e B utilizadas para validação do mapeamento automático de áreas queimadas na imagem de 2009 com base no índice W.

Medidas de Verificação / Datas (2009)	<u>19.08.2009</u>
AO – Acerto Global / Erro Global	<i>0.987 (98.7%)</i>
	<i>0.013 (1.3%)</i>
OE – Erro de Omissão / Acerto de Queimadas	<i>0.543 (54.3%)</i>
	<i>0.457 (45.7%)</i>
CE – Erro de Comissão/ Confiabilidade do Algoritmo	<i>0.041 (4.1%)</i>
	<i>0.959 (95.9%)</i>
B - Viés	<i>0.47 (47%)</i>

O resultado da primeira medida de verificação “precisão global” (AO), apresentou valores muito próximos de 1 que significa um resultado com grande acerto. Isto indica que a quantidade de *pixels* classificados corretamente como queimada e vegetação pelo algoritmo, tiveram um resultado preciso, quando utilizado o limiar de 95%. As imagens dos anos de 2007 e 2009 apresentaram valores de precisão global superiores aos valores obtidos para o ano de 2006, no entanto nenhum resultado apresentou valores próximos de zero (resultado ífero).

A medida de verificação erro de omissão (*omission error - OE*) representou o resultado do mapeamento de *pixels* considerados queimadas, do mapa de referência, que não foram classificados como áreas queimadas pelo algoritmo. O resultado que apresenta menor acerto pelo algoritmo foi o que apresentou maior valor para o erro de omissão 0.70 (referente à imagem datada de 24.06.2006). O resultado que apresentou maior acerto pelo algoritmo foi o que apresentou o menor valor para o erro de omissão 0.44 (referente à imagem datada de 28.09.2006). A maior parte dos valores, referentes às outras datas se mantiveram entre (0.44 – 0.59), significando que existe aproximadamente metade das quantidades de *pixels* de áreas queimadas no mapa de referência, que deixaram de ser classificados como áreas queimadas pelo algoritmo, considerando o limiar utilizado de 95%, sendo o resultado mais promissor, quando *OE* se aproxima de zero e o resultado menos promissor quando *OE* for próximo de 1.

Os resultados da medida de verificação erro de comissão (*comission error - CE*) indicaram a fração de *pixels* classificados como áreas queimadas pelo algoritmo do índice W adaptado, mas que se apresentaram como *pixels* de áreas não queimadas no mapa de referência (os falsos alarmes). Os resultados apresentaram valores baixos para as quantidades de falsos alarmes, variando de (0.03 – 0.13).

O resultado ífero do CE (0.03) foi obtido nas imagens de 26.07.2006, sendo considerado o resultado mais acertado, por ser o valor que mais se aproxima de zero. Este resultado indica excelente eficácia do algoritmo de classificação, no mapeamento de áreas queimadas com o índice W adaptado, para as bandas do TM/Landsat, considerando o limiar de 95%.

Boschetti et al. (2004) consideram que é possível estabelecer um erro de omissão mínimo considerando o limiar escolhido para aplicação do classificador. Os mesmos autores sugerem que em alguns casos, erros de comissão e omissão podem estar interligados, não sendo possível a alteração de um deles sem implicação no outro, significando que, diminuir erros de omissão, poderia implicar no aumento dos os erros de comissão e vice-versa. Mas esta condição nem sempre ocorre de forma sistemática, pois é possível minimizar os erros de omissão sem crescer na mesma proporção dos erros de comissão, sendo que para isso é necessário à criação de mais classes ou ajuste de coeficientes em um modelo matemático.

No presente estudo, considerando o limiar utilizado (95%), os resultados obtidos com a aplicação do algoritmo apresentaram tendência conservativa, no sentido de não ter falsos alarmes a ter uma maior detecção de queimadas, mas esta condição não foi

considerada essencial para obter o melhor resultado, devido às incertezas na classificação do índice e considerando o limiar utilizado que ainda pode ser ajustado dentro de um limite aceitável de desacerto.

O ajuste dos limiares, com o propósito de aumentar a quantidade de *pixels* classificados como áreas queimadas devem considerar como limite nas observações, resultados com maior erro de comissão em relação ao de omissão, sendo que no presente estudo os resultados dos valores do erro de comissão foram considerados muito baixos em relação ao erro de omissão.

A quarta medida de verificação Bias apresentou valores que indicam melhor eficácia do algoritmo na imagem de 13.07.2007 (0.92), indicando que existe um enviesamento (próximo de 1, melhor caso) entre a razão de *pixels* classificados como áreas queimadas pelo algoritmo e os *pixels* classificados como áreas queimadas no mapa de referência.

Os resultados obtidos pela medida de verificação Bias, que apresentaram $B < 1$ (valores subestimados), indicam que os *pixels* de área queimada mapeados pelo algoritmo com W adaptado, ficaram aquém do número de *pixels* de áreas queimadas previsto no mapa de referência, ou seja, o evento foi classificado com menor frequência que ocorreu. Sendo esta razão observada na maior parte das cenas dos anos 2006, 2007 e 2009 (Figuras 38, 39, 40 e 41).

Diante destes resultados foi observado que o indicador de precisão global apresentou ótimas respostas, no entanto recomenda-se continuar investigando ajustes nos limiares com o propósito de melhorar o resultado do Viés.

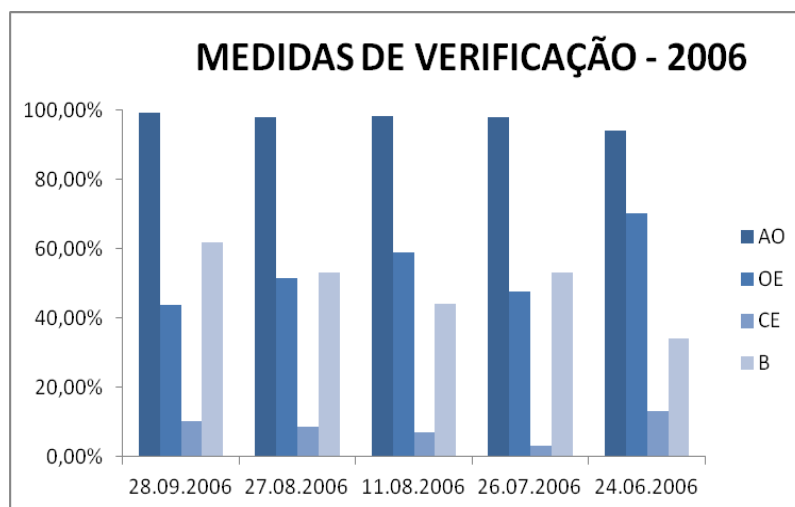


Figura 38. Gráfico com o percentual de todas as medidas de verificação por data, referente à validação do índice W aplicado nas imagens de 2006.

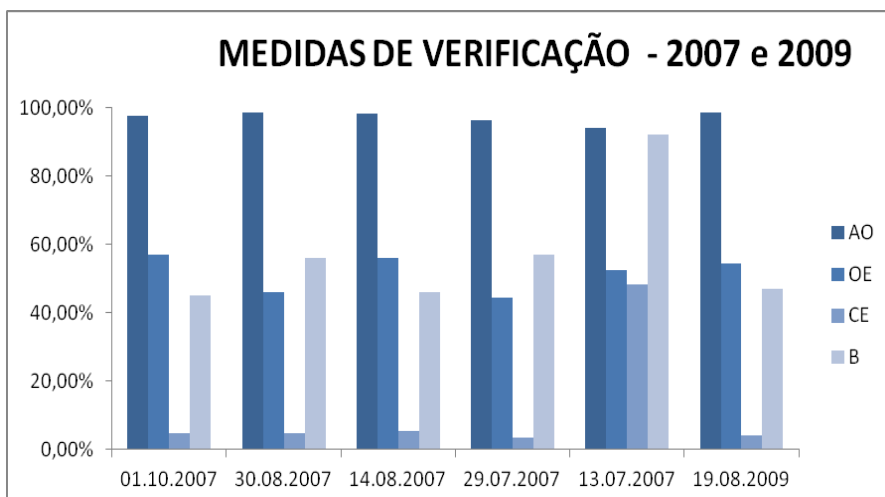


Figura 39. Gráfico com o percentual de todas as medidas de verificação por data, referente à validação do índice W aplicado nas imagens de 2007 e 2009.

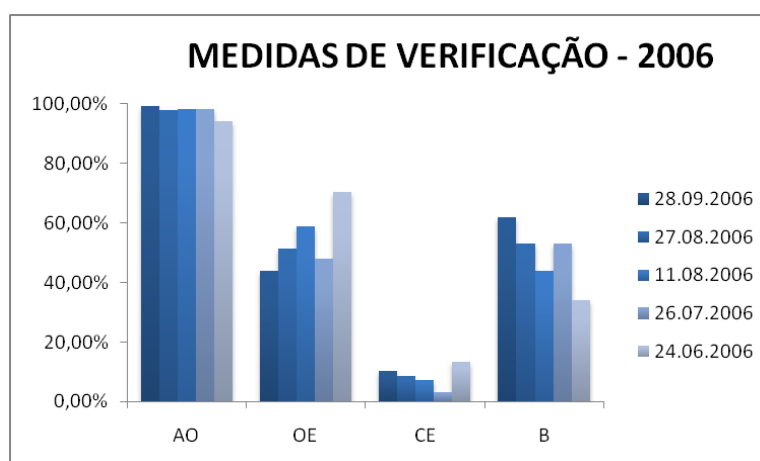


Figura 40. Gráfico comparativo do percentual de cada medida de verificação por data, referente à validação do índice W aplicado nas imagens de 2006.

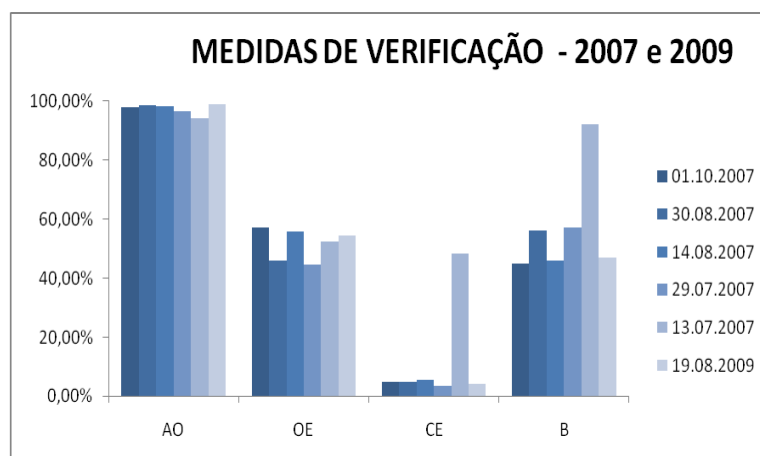


Figura 41. Gráfico comparativo do percentual de cada medida de verificação por data, referente à validação do índice W aplicado nas imagens de 2007 e 2009.

7. CONCLUSÕES

Os métodos propostos na criação de índices espectrais ótimos (Verstraete & Pinty, 1996) e os métodos propostos no desenvolvimento dos índices de queimada “V, W” para as bandas do MODIS (Libonati, 2010), apresentaram êxito quando aplicados nesta pesquisa, para a adaptação do índice (V, W) para as bandas do NIR e do SWIR2 do TM/Landsat.

A combinação das bandas espectrais do NIR (Banda 4) e do SWIR2 (Banda 7) do sensor TM/Landsat, proposta para adaptação dos índices (V, W), foi a que apresentou melhor resultado, considerando que o índice adaptado demonstrou maior sensibilidade na identificação de áreas queimadas para a região do SWIR2 (Banda 7) do que a região do SWIR1 (Banda 5), sendo a região espectral do SWIR1, desconsiderada antes mesmo do processo de adaptação.

Algumas amostras de reflectância de área queimada, coletadas em imagens no NIR, apresentaram aumento nos valores após o evento de queimada, diferindo do comportamento de uma queimada clássica, nesta região espectral. Este efeito pode ter sido causado pela alta refletividade do solo arenoso na região do Jalapão. Portanto, estas amostras de reflectância de áreas queimadas no presente estudo foram desconsideradas no processo de adaptação dos índices (V, W), por apresentarem comportamento atípico nos padrões de reflectância da vegetação após ocorrência de queimada. Esta condição merece ser mais bem compreendida, sendo objeto de investigação em estudos futuros, como forma de se obter um padrão deste comportamento associada à característica da vegetação e solo desta região de Cerrado no Jalapão.

As amostras de áreas queimadas definidas como *outliers* foram desconsideradas, durante o processo de adaptação dos índices de queimada (V, W), mediante a aplicação do percentil de 5-95% nos dados.

A exclusão dos *outliers* e das amostras de reflectância com resposta espectral diferente de uma queimada clássica, favoreceu um bom ajuste ortogonal no processo de adaptação dos índices de queimada (V, W) para as bandas do TM/Landsat, mediante o estabelecimento dos pontos de convergência de uma superfície totalmente queimada e de uma superfície totalmente vegetada.

A adaptação do índice (V, W) para as bandas do TM/Landsat apresentou o aumento da informação espectral das superfícies, vegetação e área queimada, com a transformação dos dados de reflectância para um novo domínio de valores e sistema de coordenadas quando adaptados as bandas do TM/Landsat, conforme já havia sido observado por Libonati (2010) quando o índice (V,W) foi testado para as bandas do MODIS.

O sucesso na adaptação do índice de queimada (V, W) ficou comprovado pelo bom ajuste ortogonal proporcionado entre as isolinhas do índice (no espaço η e ξ) e do vetor deslocamento (produzido pela mudança nos valores de reflectância dos pontos de convergência de uma superfície totalmente vegetada e de uma superfície totalmente queimada). Das combinações referentes aos valores de reflectância das superfícies testadas, o percentil de 5-95% (pelo critério do limite máximo e mínimo) na combinação de todas as superfícies vegetais estudadas, foi o que apresentou o melhor ajuste ortogonal, portanto o que apresentou pontos de convergência escolhidos para adaptação. Os pontos de convergência referentes ao percentil 5-95% que apresentaram o melhor ajuste ortogonal foram $\rho_{CQ_{SWIR}} 0.2045$; $\rho_{CQ_{NIR}} 0.0692$.

A combinação NIR e SWIR2 do TM/Landsat, para adaptação do índice de queimada (V, W), apresentou separabilidade (M) de 2.2 (anos 2005) e 2.4 (ano 2008) para a classe queimada, significando alta separabilidade, sendo estes resultados próximos do resultado do índice de separabilidade (M) de 3.32 obtido por Libonati (2010).

Os limiares, espacial e temporal, selecionados para a aplicação do índice de queimada (V, W), correspondem ao percentil de 95% da amostra W_b , correspondendo aos valores 0.1671 e - 0.0438, respectivamente. A análise no gráfico de dispersão dos valores de W considerou o percentil de 95%, como uma região de pouca sobreposição de *pixels* e com grande precisão no acerto de áreas classificadas como queimadas. Após a validação da classificação do algoritmo, o indicador de precisão global (AO) apresentou bons resultados, próximo de 1, no entanto os valores do Viés (B) se mantiveram abaixo de 1, indicando que alguns *pixels* foram subestimados pelo algoritmo. Ainda foram obtidos resultados com baixos valores de erro de comissão (CE), falsos alarmes, indicando boa confiabilidade do algoritmo. No entanto, foram registrados valores elevados das medidas de verificação erro de omissão (OE) e Viés (B), indicando pouco acerto de áreas queimadas. Recomenda-se em trabalhos futuros que se continue a testar novos valores de limiares acima do percentil de 95%. Com este

teste espera-se encontrar um limiar que promova o aumento na classificação de áreas queimadas pelo algoritmo, sem que ocorra aumento expressivo na quantidade de falsos alarmes, com um valor de Viés mais imparcial possível, próximo de 1.

Como vantagem na adaptação dos índices (V, W) utilizando a banda SWIR2, tivemos que esta região espectral é pouco afetada pelo efeito dos aerossóis. A região do SWIR2 do TM/Landsat apresenta resolução espacial de 30 metros, para o mapeamento automatizado de áreas queimadas, favorecendo o aumento na detecção de áreas queimadas quando comparado a sensores de baixa resolução espacial. Entretanto, o TM/Landsat apresenta limitações quanto à resolução temporal (16 dias para revisita), o que interfere na resposta espectral de área queimada, considerando a intensa regeneração da vegetação do Cerrado durante este período.

Mediante a adaptação dos índices de queimada (V, W), para estas bandas NIR e SWIR2 do TM/Landsat, desenvolvida nesta pesquisa, surge uma nova perspectiva para geração de informações de áreas queimadas em dados de sensores que apresentam maior resolução espacial e bandas espectrais com função resposta sensíveis aos eventos de queimada, como é o caso da região do SWIR2 (2,1 μ m).

Como sugestão em estudos futuros, a adaptação do índice (V, W) para outros sensores mostra-se promissora, como é o caso do sensor OLI/Landsat, operando com bandas espectrais na região do NIR (Banda 5) e SWIR 2 (Banda 7), com resolução espacial de 30 m e frequência de revisita de 16 dias. Outro sensor que opera em regiões espectrais sensíveis aos eventos de queimada é o MSI/Sentinel a bordo do satélite Sentinel-2, com as bandas espectrais operando no NIR (Bandas 6, 7 e 8a) e SWIR 2 (Banda 12), de resolução espacial de 20m e revisita do satélite de 5 dias.

Esta proposta futura de investigação considera dois aspectos: 1) que os bandas do NIR (Banda 5) e do SWIR2 (Banda 7) no OLI e MSI/Sentinel, possuem função resposta parecida com os bandas NIR (Banda 4) e SWIR 2 (Banda 7) do TM; e 2) pelo fato do Landsat-8 e MSI/Sentinel apresentar melhorias e terem sido lançados recentemente, o que pode representar uma grande perspectiva na coleta de informações futuras durante o período de operação destes sensores.

Aprimoramentos nesta técnica vêm acrescentar uma grande perspectiva na obtenção de informação por meio de sensoriamento remoto, no monitoramento de superfícies queimadas e de vegetação, visto que são sugeridas novas adaptações, com o propósito de testar as bandas de outros sensores na adaptação do índices espectrais para

comparação com outros índices e no estabelecimento de limiares temporais e espaciais do índice, para mapeamento automatizado das superfícies queimadas.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ANA (2009). Agência Nacional de Águas. Sistema de informações hidrológicas: hidroweb. Disponível em <<http://hidroweb.ana.gov.br>>. Acesso em: 04 outubro de 2016.
2. BALDRIDGE, A.M.; Hook, S. J.; GROVE, C. I.; RIVERA, G. The Aster Spectral Library version 2.0, *Remote Sensing of Environment*, v. 113,711-715, 2009.
3. BARBOSA, P. M.; GREGOIRE, 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, 253-263, 1999.
4. BOSCHETTI, L.; FLASSE, S.P.; BRIVIO, P.A. Analysis of the conflict between omission and commission in low spatial resolution dichotomic thematic products: The Pareto Boundary. *Remote Sensing of Environment*, v. 91, 280-292, 2004.
5. CHANDER, G.; MARKHAM, B. L.; HELDER, D. L. Summary of current radiometric calibration coefficients for Landsat MSS, TM, ETM+, and EO-1 ALI sensors. *Remote Sensing of Environment*, v. 113, 893-903, 2009.
6. CHEN, H. S. *Space remote sensing systems: An introduction*. Orlando: Academic Press, Inc., 1985, 269 p.
7. CONGALTON, R. G. A Review of Assessing Accuracy of Classification of Remotely Sensed Data. *Remote Sensing of Environment*, 58:289-298, 1991.
8. CONGALTON, R. G.; GREEN, K. *Assessing the accuracy of remotely sensed data: principles and practices*. Boca Raton, FL: Lewis Publishers, 1999.

9. GATES, D. M.; KEEGAN, H. J.; SCHLETER, J. C.; WEIDNER, V. R. Spectral properties of plants. *Applied Optics*, v. 4, n. 1, 11-20, 1965.
10. GRÉGOIRE, J. M.; TANSEY, K.; SILVA, J. M. N. The GBA2000 initiative: Developing a global burned area database from SPOT-VEGETATION imagery. *International Journal of Remote Sensing*, v. 24, n. 6, 1369-1376, 2003.
11. HUETE, A. R. A Soil-Adjusted Vegetation Index (SAVI). *Remote Sensing of Environment*, v. 25, n. 3, p.205-309, Aug. 1988.
12. JENSEN, J. R. Sensoriamento Remoto do Ambiente: uma perspectiva em Recursos Terrestres. Tradução de J. C. N. Epiphânio. São José dos Campos, SP: Parênteses, 2009. 598p. (Prentice Hall Series in Geographic Information Science) Tradução de: Remote Sensing of the environment: earth resource perspective.
13. KAUFMAN, Y.; REMER, L. "Detection of forests using mid-IR reflectance: An application for aerosol studies," *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, vol. 32, pp. 672-683, May 1994.
14. LIBONATI, R. Using Middle-Infrared Reflectance For Burned Area Detection. 2010. 249f. Tese (Doutorado em Ciências) – Universidade de Lisboa, Lisboa, Portugal.
15. LIBONATI, R.; DaCAMARA, C. C.; PEREIRA, J. M. C.; PERES, L. F. Retrieving middle-infrared reflectance for burned area mapping in tropical environments using MODIS. *Remote Sensing of Environment*, 114, 831-843, 2010.
16. LIBONATI, R.; DaCAMARA, C. C.; PEREIRA, J. M. C.; PERES, L. F. On a new coordinate system for improved discrimination of vegetation and burned areas using MIR/NIR information. *Remote Sensing of Environment*, 114, 831-843, 2011.
17. LIBONATI, R.; DaCAMARA, C.; PEREIRA, J.M.C.; PERES, L.F. Retrieving Middle-Infrared Reflectance Using Physical and Empirical Approaches: Implications

for Burned Area Monitoring. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 50, 1, 281-294, 2012.

18. LIBONATI, R.; DaCAMARA, C.; SETZER, A.; MORELLI, F.; MELCHIORI, A. An Algorithm for Burned Area Detection in the Brazilian Cerrado Using 4 μ m MODIS Imagery. *Remote Sensing*, v. 7, p. 15782-15803, 2015.

19. LIOU, Kuo N. *An introduction to atmospheric radiation*. 2.ed. London: Academic Press, 1980.

20. LÓPEZ, M. J.; CASELLES, V. Mapping burns and natural reforestation using thematic mapper data. *Geocarto Int.*, 1, 31-37, 1991.

21. MACQUEEN, J. B. Some methods for classification and analysis of multivariate observations. Proceedings of the Fifth Berkeley Symposium on Mathematical Statistics and Probability, Volume 1: Statistics, 281-297, University of California Press, Berkeley, Calif., 1967.

22. MASEK, J.G., VERMOTE, E.F., SALEOUS, N., WOLFE, R., HALL, F.G., HUENNRICH, F., GAO, F., KUTLER, J., and LIM, T.K. A Landsat surface reflectance data set for North America, 1990-100, *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 3: 68-72, 2006.

23. MARTIN, M. P. *Catografía e inventário de incêndios florestais em la Península Ibérica a partir de imágenes NOAA-AVHRR*. Departamento de Geografía, Universidad de Alcalá, 1998.

24. MELCHIORI, E. A.; SETZER, A. W. ; MORELLI, F.; LIBONATI, R.; CANDIDO, P.; JESUS, S. A Landsat-Tm/Oli Algorithm for Burned Areas in the Brazilian Cerrado? Preliminary Results. In: VII International Conference on Forest Fire Research, 2014, Coimbra. VII International Conference on Forest Fire Research, 2014.

25. MELCHIORI, E. A. ; CANDIDO, P. ; LIBONATI, R. ; MORELLI, F.; SETZER, A.; JESUS, S. Spectral indices and multi-temporal change image detection algorithms for burned area extraction in the Brazilian Cerrado. In: XVII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 2015, Joao Pessoa. XVII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 2015.
26. MILNE, A. K. The use of remote sensing in mapping and monitoring vegetational change associated with bushfire events in eastern Australia. *Geocarto Int.*, 1, 25-34, 1986.
27. MYERS, N.; MITTERMEIER, R. A.; MITTERMEIER, C. G.; FONSECA, G. A. B. & KENT, J. Biodiversity hotspots for conservation priorities. *Nature*, 403, 853-858, 2000.
28. PEREIRA, J. M. C., SETZER, A. W. Spectral characteristics of fire scars in Landsat-5 TM images of Amazonia. *Int. J. Remote Sensing*, 14, 2061-2078, 1993.
29. PEREIRA, J. M. C. A Comparative Evaluation of NOAA/AVHRR Vegetation Indexes for Burned Surface Detection and Mapping. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 3, 1, 217-226, 1999.
30. PINTY, B.; VERSTRAETE, M. GEMI – A nonlinear index to monitor global vegetation from satellites. *Vegetation*, 101, 15-20, 1992.
31. PROCOPIO, A. S., ARTAXO, P., KAUFMAN, Y. J., REMER, L. A., SCHAFFER, J. S., HOLBEN, B. N. Multiyear analysis of amazonian biomass burning smoke radiative forcing of climate. *Geophysical Research Letters*, 31, L03108, 2004.
32. PONZONI, F. J.; LEE, D. C. L.; FILHO, P. H. Avaliação da área queimada e da regeneração da vegetação afetada pelo fogo no Parque Nacional de Brasília através de dados do TM/Landsat. In Proc. Latin-Amer. Remote Sensing Symp., IV Brazilian Remote Sensing Symp. 615–621, 1986.

33. PONZONI, F. J., SHIMABUKURO, Y. E., KUPLICH, T. M. *Sensoriamento remoto da vegetação*. São José dos Campos: Oficina de Textos, 2012.
34. RICHARDS, J.A. *Remote sensing digital image analysis: An introduction*. Berlin: Springer-Verlag, 1986.
35. RIBEIRO, J. F.; WALTER, B. M. T. Fitofisionomias do Cerrado. In: Sano, S.M.;Almeida, S.P. (Eds). *Cerrado: Ambiente e Flora*. Planaltina: EMBRAPA-Cerrados, 89-166, 1998.
36. ROUSE, J.W.; HASS, R.H.; SCHELL, J.A.; DEERING, D.W.; HARLAN, J.C. **Monitoring the vernal advancement of retrogradation of natural vegetation**. Greenbelt: National Aerospace Spatial Administration, 1973. 371p. MD., NASA/GSFC Type III, Final Report. Disponível em <<http://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/19730017588.pdf>>. Acesso em 28 dez. 2014.
37. SEBER, G. A. F. *Multivariate Observations*. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, Inc., 1984.
38. SILVA, J. M. N. Comparação entre os índices de vegetação NDVI e IV7 para cartografia de áreas ardidadas com imagens Landsat-5 TM. ISA/UTL, Project Rep. 1996.
39. SHIMABUKURO, Y. E. & RUDORFF, B. F. T. Dados do sensor MODIS para o mapeamento e monitoramento da cobertura vegetal e uso da terra. *Anais 1º Simpósio de Geotecnologias no Pantanal, Campo Grande, Brasil*, p.929-938, 2006.
40. SOUSA, A. M. O., PEREIRA, J. M. C., SILVA, J. M. N. Evaluating the performance of multitemporal image compositing algorithms for burned area analysis. *International Journal of Remote Sensing*, 24, 6, 1229-1236, 2003.
41. SWAIN, P.H. ; DAVIS, S. M. *Remote Sensing: the quantitative approach*. New York: McGraw-Hill, 1978.

42. TRIGG, S., & FLASSE, S. An evaluation o different bi-spectral spaces for discriminating burned shrub-savannah. *International Journal of Remote Sensing*, v. 22, n. 13. p. 2641-2647, 2001.
43. U.S. GEOLOGICAL SURVEY, 2015 U.S. Geological Survey. Landsat 8 (L8) Data Users Handbook. Department of the interior U. S. Geological Survey. Version 1.0. Junho, 2015. Acesso em 07 de março de 2016. Disponível em <<http://landsat.usgs.gov/documents/Landsat8DataUsersHandbook.pdf> >.
44. VERSTRAETE, M. M., PINTY, B. Designing optimal spectral indexes for remote sensing applications. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 34, 5, 1254-1265, 1996.
45. WILKS, D. *Statistical methods in the atmospheric sciences*. 2.ed. Academic Press, 2006.
46. XIE, Y. C., SHA, Z. Y., YU, M. Remote sensing imagery in vegetation mapping: a review. *Journal of Plant Ecology*, 1, 1, 9-23, 2008.