



Universidade Federal do Rio de Janeiro
Centro de Ciências Matemáticas e da Natureza
Instituto de Geociências
Departamento de Meteorologia

**IDENTIFICAÇÃO E DATAÇÃO DE ÁREAS QUEIMADAS EM PORTUGAL
COM BASE EM INFORMAÇÃO DOS CANAIS NIR E MIR DOS SATÉLITES
TERRA E AQUA**

Jéssica de Souza Panisset

Orientadora: Dra. Renata Libonati dos Santos (INPE)

Coorientador: Prof. Dr. Leonardo de Faria Peres (UFRJ)

Monografia submetida ao corpo docente do Departamento de Meteorologia da Universidade Federal do Rio de Janeiro como parte dos requisitos necessários à obtenção de grau de Bacharel em Meteorologia.

Rio de Janeiro, RJ

Agosto, 2014

IDENTIFICAÇÃO E DATAÇÃO DE ÁREAS QUEIMADAS EM PORTUGAL COM BASE
EM INFORMAÇÃO DOS CANAIS NIR E MIR DOS SATÉLITES TERRA E AQUA

Jéssica de Souza Panisset

Monografia submetida ao corpo docente do Departamento de Meteorologia da Universidade Federal do Rio de Janeiro como parte dos requisitos necessários à obtenção de grau de Bacharel em Meteorologia.

Aprovada por:

Prof.^a D. Sc. Renata Libonati dos Santos

Prof. D. Sc. Leonardo de Faria Peres

Prof. D. Sc. José Ricardo de Almeida França

Prof.^a D. Sc. Célia Maria Paiva

Rio de Janeiro, RJ

Agosto, 2014

Panisset, Jéssica de Souza.

Identificação e datação de áreas queimadas em Portugal com base em informação dos canais NIR e MIR dos satélites Terra e Aqua / Jéssica de Souza Panisset. -- Rio de Janeiro: UFRJ / Departamento de Meteorologia, 2014.

xiv, 60 f.: il.; 29,7 cm.

Orientadores: Renata Libonati dos Santos e Leonardo de Faria Peres.

Monografia (graduação) – UFRJ / Departamento de Meteorologia, 2014.

Referências bibliográficas: f. 55-60.

1. Áreas queimadas. 2. Sensoriamento remoto. 3. Infravermelho médio. I. Libonati, Renata. II. Peres, Leonardo de Faria. III. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Departamento de Meteorologia. IV. Título.

*"Os céus proclamam a glória de Deus
e o firmamento anuncia a obra das suas mãos."*

(Salmo 19:1)

AGRADECIMENTOS

A Deus, por ter me permitido realizar cada pequeno sonho que tive durante a graduação. A Deus, na verdade, por tudo.

À minha família, por ter me apoiado na escolha dessa tão incomum profissão e por todo o investimento, confiança e suporte dado desde sempre. Em especial às três pessoas mais importantes da minha vida: minha mãe, meu pai e meu irmão, por escutarem meus desabafos sobre o trânsito e a vida em geral, dia após dia, inclusive durante os 11 meses que morei em Lisboa, via Skype. Obrigada por terem sonhado os meus sonhos, mesmo quando isso significou a nossa distância.

A todas as dezenas de irmãos em Cristo que frequentemente me disseram, nos últimos cinco anos: “estou orando por você”. Suas orações fizeram toda a diferença.

Aos tantos que me ajudaram de alguma forma ao longo desses anos, em especial a Rutinaldo e a Pr. Glauner, cujas caronas São Gonçalo - Fundão em tempos em que eu ainda não ganhava nenhuma bolsa foram fundamentais para a minha manutenção na faculdade.

Aos meus professores, brasileiros e portugueses, pela sua colaboração dentro e fora de sala. Pelas inúmeras ajudas, indicações e conselhos. Em especial à Prof.^a Justi, minha “mãe acadêmica”, por ter acreditado que eu poderia dar cada passo que dei. Suas aulas inspiradoras e sua amizade foram fundamentais na minha formação. Também ao Prof. Alfredo, por ser o coordenador de curso mais prestativo imaginável.

Aos meus amigos, tanto os que a Meteorologia me trouxe como os outros, do colégio e da igreja, que sempre estiveram ansiosos por me ver como uma “garota do tempo”. Obrigada pela companhia, pelas risadas e pelo incentivo. Hoje sei que nem um oceano é capaz de nos separar. Também, aos amigos que conheci em Portugal, que, não sendo mais importantes que os demais, foram, no entanto, fundamentais no mais maravilhoso e aterrorizante ano da minha vida.

Aos meus supervisores e colegas de estágio, tanto da Marinha como de Furnas, que me ensinaram muito mais do que podem imaginar. Em especial à Daniele e ao Marcelo, pela confiança e pelo apoio dado nestes últimos meses de faculdade.

Aos meus orientadores Renata, Carlos e Leonardo, por toda a paciência e tempo dedicados à minha orientação, pessoalmente ou via Skype. Obrigada por todo o aprendizado que me proporcionaram nestes quase 2 anos, bem como seus conselhos e incentivos. Ao Carlos, em especial, por ter tão carinhosamente me acolhido em Lisboa. Eu não poderia ter encontrado orientadores melhores.

E por último, ao governo brasileiro, pelas várias bolsas que ao longo dos anos me possibilitaram arcar com todas as despesas de estudo. Em especial, ao programa Ciência sem Fronteiras, que me possibilitou cursar um ano acadêmico na Universidade de Lisboa, onde todo esse trabalho de conclusão de curso começou.

RESUMO

IDENTIFICAÇÃO E DATAÇÃO DE ÁREAS QUEIMADAS EM PORTUGAL COM BASE EM INFORMAÇÃO DOS CANAIS NIR E MIR DOS SATÉLITES TERRA E AQUA

Portugal é considerado o país mais propenso (por unidade de área) à ocorrência de queimadas, que são responsáveis por uma série de prejuízos, tais como a emissão de gases de efeito estufa e poluentes, contribuição para as mudanças climáticas, perda de vegetação e de vidas, erosão do solo, facilitação de enchentes no período posterior ao fogo, impacto econômico, entre outros. Além disso, este país tem experimentado, nas últimas décadas, um aumento na ocorrência de incêndios, cuja causa pode ser atribuída a modificações no uso do solo e às mudanças climáticas.

Todo ano, o Instituto da Conservação da Natureza e das Florestas (ICNF) de Portugal confecciona mapas anuais do perímetro do fogo, os quais utilizam imagens do satélite Landsat TM/ETM (*Land Remote Sensing Satellite Thematic Mapper/Enhanced Thematic Mapper*) de fim de estação para mapear as áreas queimadas maiores que 5 hectares. No entanto, estes mapas fornecem apenas a localização da cicatriz, não oferecendo qualquer estimativa da data dos incêndios. Tal informação é, contudo, de fundamental importância para se compreender o regime e a sazonalidade dos incêndios, bem como as complexas interações entre fogo, cobertura vegetal e meteorologia.

O objetivo deste trabalho foi aplicar o Índice de Queimadas (V,W) para a identificação e datação de áreas queimadas em Portugal recorrendo à informação de reflectâncias no infravermelho próximo (NIR) e no infravermelho médio (MIR), proveniente do instrumento *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer* (MODIS) a bordo dos satélites Aqua e Terra, além das informações dos focos de calor do mesmo sensor.

Utilizando apenas imagens de julho, agosto e setembro de 2005, foram gerados compostos mensais do índice de queimadas, aos quais foram aplicados limiares fixos e contextuais de acordo com a vizinhança do píxel. O algoritmo foi desenvolvido para detectar mudanças persistentes nas séries temporais de W e considerar o dia em que se identifica a mudança mais intensa como o dia da queima.

A comparação entre o mapa de áreas queimadas gerado pelo algoritmo e o gerado pelo ICNF com base em imagens Landsat de fim de estação resultou em um Acerto Global de 95,6%. A probabilidade de detecção foi de 62,9%, ou seja, o algoritmo identificou corretamente quase dois terços das cicatrizes de queimadas ocorridas em todo o ano de 2005.

O método de datação também se mostrou eficiente, sendo capaz de datar corretamente 63,5% dos píxeis, isto é, em quase dois terços dos píxeis a diferença entre a datação e as datas de ocorrência dos focos de calor é igual ou inferior a dois dias, para mais ou para menos. Se considerarmos como acertos de datação diferenças de cinco dias ou menos, a porcentagem de píxeis corretamente datados sobe para 75,0%.

ABSTRACT

DISCRIMINATING AND ASSIGNING DATES TO BURNED AREAS IN PORTUGAL USING MIR/NIR INFORMATION OF TERRA AND AQUA SATELLITES

Portugal is considered the European country most prone (per unit area) to fire occurrence, which are responsible for many damages, like the emission of greenhouse gases and pollutants, the contribution for climate change, the loss of vegetation and lives, the soil erosion, the facilitation of floods in the period posterior to the fire, the economic impact, and others. Besides, this country has experienced, in the last decades, an increase in the occurrence of the fires, due to modifications in the land use and to the climate change.

Every year, the Instituto de Conservação da Natureza e das Florestas (ICNF), the Portuguese authority for forests has been producing yearly maps of fire perimeters. The fire atlas uses end of fire season Landsat TM/ETM imagery to map all fire perimeters with area larger than 5ha. Because it relies on end-of-season imagery, the atlas provides a spatial snapshot of the yearly area burned, and dates of burn for individual events cannot be estimated. However, such information is required to understand the fire regime and fire seasonality and to disentangle the complex interactions among fire, land cover and meteorology.

The aim of this work was to apply the so-called (V,W) Burned Index to identify and date burned areas in Portugal using daily reflectance from NIR (near-infrared) and MIR (middle infrared) bands, obtained from the MODIS instrument on-board Aqua and Terra satellites. Also, the algorithm uses hotspots information from the same sensor.

Using only images from July, August and September 2005, monthly minimum value composites of W were computed and seed points of potentially burned areas were selected based on pre-specified thresholds of W and on temporal differences of W between composites. Burned areas were identified by expanding around selected seed points and pixels considered as burned were identified based on relative thresholds whose values were contextually derived from the pixels in the neighborhood. The algorithm detects persistent changes in the (V,W) burned index time series, and the day of maximum change is then identified as the burning day.

Comparison between the burned map as obtained from MODIS using our procedure and the one derived from scar vectors independently obtained from an end of season Landsat image by ICNF resulted in a Proportion Correct of 95.6%. Probability of Detection was equal to 62.9%, which means the algorithm was able to identify almost two thirds of the scars occurred in the 2005 year.

An assessment of the temporal accuracy of the dating procedure was conducted. Our results show that 63.5% of burnt pixels were correctly dated by the algorithm with differences to the hotspots dates up to two days. Considering as successful dating the differences up to five days, the percentage of correctly dated pixels rises to 75.0%.

ÍNDICE TEMÁTICO

1. INTRODUÇÃO	1
1.1. Motivação	1
1.2. Objetivo	3
2. ESTADO DA ARTE.....	5
2.1 Índice de queimadas (V,W).....	12
3. BASE TEÓRICA	16
3.1. Fundamentos de Radiação Solar.....	16
3.1.1. Conceito de Corpo Negro	16
3.1.2. Interferências atmosféricas	16
3.1.3. Espectro eletromagnético	18
3.1.4. O Infravermelho Médio	19
3.1.5. O problema do canal 3,9.....	21
4. DADOS E METODOLOGIA	24
4.1. Características do sensor MODIS	24
4.2. Obtenção dos dados	26
4.2.1. Dados do MODIS	26
4.2.2. Dados de hotspots.....	27
4.2.3. Dados de referência: cicatrizes Landsat	30
4.3. Metodologia.....	32
4.3.1. Área de estudo	32
4.3.2. Pré-processamento.....	34
4.3.3. Cálculo de V e W.....	35
4.3.4. Compostos temporais	35
4.3.6. Datação.....	39
5. RESULTADOS.....	41
5.1. Identificação de áreas queimadas	41
5.2. Validação de áreas queimadas	42
5.3. Datação	50
5.4. Validação da datação	51
6. CONCLUSÕES.....	52
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	55

ÍNDICE DE FIGURAS

- Figura 1. Assinaturas espectrais da amostra de material queimado (curvas sólidas), vegetação verde (curva pontilhada) e vegetação seca (curva a tracejado) (esquerda). Assinaturas espectrais de quatro amostras de carvão (curvas sólidas) e de três amostras de vegetação (curvas pontilhado-tracejadas) (direita). Fonte: Libonati (2010). 8
- Figura 2. Atenuação da transmitância atmosférica nos canais VIS a MIR do MODIS para três diferentes níveis de contaminação de fumaça devido à queima de biomassa. $\tau_a(0,55)$ indica a EOA em $0,55 \mu\text{m}$ e α denota o parâmetro Ångstrom, o qual caracteriza a distribuição dos tamanhos das partículas de aerossóis. Fonte: Libonati (2010). 9
- Figura 3. Reflectância no espaço bi-espectral 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). 13
- Figura 4. 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 “kite domain”. Fonte: Libonati (2010). 14
- Figura 5. Localização de píxeis pré e pós-fogo do Cerrado e da Amazônia brasileiros nos espaços η/ε (esquerda) e MIR/NIR (direita). Fonte: Libonati (2010). 15
- Figura 6. Transmitância da radiação eletromagnética através da atmosfera. As áreas em azul claro correspondem às regiões espectrais de transparências da atmosfera e as áreas em azul escuro correspondem às regiões espectrais onde os gases atmosféricos absorvem a radiação eletromagnética. Fonte: Meneses e Almeida (2012). 17
- Figura 7. O espalhamento atmosférico adiciona radiação na quantidade de energia refletida do alvo que chega ao sensor. Fonte: Meneses e Almeida (2012). 18
- Figura 8. Janelas atmosféricas, tal como determinado pelo espectro de transmissividade da atmosfera. Note-se que a janela espectral do infravermelho médio tem a transmissão variando principalmente devido à absorção seletiva de óxido nítrico, oxigênio e ozônio e o dióxido de carbono (A escala de comprimento de onda é logarítmica). Fonte: Boyd e Petitcolin (2004). 20
- Figura 9. Transferência radiativa em um comprimento de onda λ no MIR. Fonte: Libonati (2010). 20
- Figura 10. Espectros de emissão de Planck do Sol e da Terra, com destaque para a sobreposição no comprimento de onda $3,9 \mu\text{m}$. Fonte: Libonati (2010). 21

- Figura 11. Exemplos do que a detecção de um hotspot pode significar no chão. Disponível em: <https://earthdata.nasa.gov/data/near-real-time-data/faq/firms>.....28
- Figura 12. Gráfico da frequência relativa dos níveis de confiança dos hotspots. Em todos os meses, hotspots com confiança superior a 50% representam mais de 70% dos dados.29
- Figura 13. Cicatrizes de fogo do ano de 2005, maiores que 500ha, obtidas da base de dados do Instituto da Conservação da Natureza e das Florestas (ICNF).....31
- Figura 14. Localização de Portugal na Europa.32
- Figura 15. Mapas da área de estudo: Regiões de Portugal (a), altitude (b) e cobertura do solo (c).33
- Figura 16. Exemplo de imagem bruta do MODIS. Compósito do visível obtido pelo satélite Terra no dia 24/08/2005, às 10:45 UTC. Disponível em: <http://reverb.echo.nasa.gov/reverb/>.....35
- Figura 17. Área ao redor dos hotspots ocorridos em agosto e setembro de 2005, ou seja, regiões onde o algoritmo procurará por áreas queimadas.38
- Figura 18. Esquema de funcionamento do algoritmo de detecção de áreas queimadas.38
- Figura 19. Exemplo de série temporal dos valores dos índices W (esquerda) e S (direita) para um determinado píxel. Na figura da esquerda, círculos vermelhos indicam que os dados foram obtidos através do satélite Terra e azuis, do satélite Aqua. Na figura da direita, o círculo vermelho indica o maior valor de S. Observa-se o salto no dia 38, devido à variação do índice W antes e depois do fogo. Fonte: Libonati et al. (2012b).....40
- Figura 20. Compostos dos valores mínimos do Índice W nos meses de julho (painel superior esquerdo), agosto (painel superior central) e setembro (painel superior direito). Diferenças normalizadas entre os compostos de agosto e julho (painel inferior esquerdo) e entre os de setembro e agosto (painel inferior direito).41
- Figura 21. Mapa de áreas queimadas em Agosto e Setembro de 2005, gerado pelo algoritmo com base em imagens MODIS (a) e mapa de referência para o ano de 2005, gerado com base em imagens Landsat (b).42
- Figura 22. Proporção de área queimada nos píxeis de 1 km de acordo com o mapa ICNF de 30m.....43
- Figura 23. Dois mapas dicotômicos, cobrindo a mesma área, o primeiro derivado de um sensor de baixa resolução (painel esquerdo) e o outro derivado de um sensor de alta resolução (painel central). O mapa feito com o sensor de baixa resolução possui píxeis que cobrem áreas mistas (queimadas e não queimadas). Consequentemente, dependendo da classe a qual este píxel será classificado, levará a erros de omissão ou comissão (painel direito). Adaptado de Boschetti et al. (2004).45

- Figura 24. Validação da identificação de áreas queimadas. Píxeis da cor verde indicam áreas corretamente identificadas como queimadas; píxeis da cor vermelha indicam erros de comissão; e píxeis da cor magenta indicam erros de omissão.47
- Figura 25. Gráfico da frequência relativa dos meses dos hotspots em píxeis caracterizados como casos de omissão.48
- Figura 26. Gráfico da Proporção de área queimada nos píxeis caracterizados como casos de omissão. Apenas 14,9% das omissões correspondem a píxeis em que 90 a 100% da área queimou.49
- Figura 27. Gráfico da frequência relativa dos meses dos hotspots em píxeis caracterizados como casos de comissão. 20,7% das comissões possuem hotspots em agosto e setembro, o que pode ser um indicativo de acerto do algoritmo e omissão do mapa de referência. .49
- Figura 28. Dias de ocorrência das queimadas corretamente identificadas pelo algoritmo, em dias. O dia 1 refere-se a 1 de agosto e o dia 61, a 30 de setembro de 2005. Os tons mais escuros de azul referem-se a píxeis não-queimados (valor zero) e píxeis fora de Portugal (valores negativos) (painel esquerdo). No painel direito, são representados os dias de ocorrência dos hotspots nos mesmos píxeis, quando disponíveis.50
- Figura 29. Gráfico da frequência relativa do erro de datação, representado pela diferença de dias d entre a datação do algoritmo e as datas de ocorrência de hotspots.51

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1. Definição de índices utilizados para mapear áreas queimadas. Adaptado de: Benito e Torralbo (2012).	11
Tabela 2. Índices modificados utilizando o infravermelho médio para a identificação de áreas queimadas.....	12
Tabela 3. Divisão do espectro eletromagnético. Fonte: Meneses e Almeida (2012).	19
Tabela 4. Intervalos espectrais possíveis de serem usados pelos sensores remotos. Fonte: Meneses e Almeida (2012).....	19
Tabela 5. Especificações do instrumento MODIS. As bandas 1-19 estão em nm; as 20-36, em μm . A resolução espacial é dada em metros. Adaptado de http://modis.gsfc.nasa.gov/about/specifications.php	25
Tabela 6. Tabela de contingência ou matriz de confusão para dados dicotômicos. Adaptado de Libonati (2013).....	43
Tabela 7. Tabela de Contingência construída de acordo com Binaghi et al. (1999). A classificação foi feita com dados do instrumento MODIS, enquanto os dados de referência foram baseados no Landsat.	46
Tabela 8. Índices de acurácia calculados a partir da Tabela de Contingência: Acerto Global (AG), Erro Global (EG), Erro de Comissão (EC), Erro de Omissão (EO) e Probabilidade de Detecção (POD).....	46

ÍNDICE DE ACRÔNIMOS

AFN	Autoridade Florestal Nacional
AG	Acerto Geral
ATSR	Along Track Scanning Radiometer
AVHRR	Advanced Very High Resolution Radiometer
BAI	Burned Area Index
BAIM	Burned Area Index MODIS
CART	Classification and Regression Trees
CN	Corpo Negro
DEF	Departamento de Engenharia Florestal
DGRF	Direcção Geral dos Recursos Florestais
EC	Erro de Comissão
EG	Erro Geral
ENVI	Environment for Visualizing Images
EO	Erro de Omissão
EOA	Espessura Ótica dos Aerossóis
EOS	Earth Observing System
ET	Equilíbrio Termodinâmico
ETL	Equilíbrio Termodinâmico Local
ETM	Enhanced Thematic Mapper
ETR	Equação de Transferência Radiativa
GEMI	Global Environmental Monitoring Index
GESAVI	Generalized Soil Adjusted Vegetation Index
GFMC	Global Fire Monitoring Centre
GPS	Global Positioning System
HDF	Hierarchical Data Format
ICNF	Instituto da Conservação da Natureza e das Florestas
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
ISA	Instituto Superior de Agronomia
Landsat	Land Remote Sensing Satellite
LWIR	Long-Wave Infrared
MCTK	Modis Conversion Toolkit

MIR	Middle Infrared
MODIS	Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer
NASA	National Aeronautics and Space Administration
NBR	Normalized Burnt Ratio
NDII	Normalized Difference Infrared Index
NDVI	Normalized Difference Vegetation Index
NIR	Near-infrared
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration
POD	Probabilidade de Detecção
R	Red
REM	Radiação Eletromagnética
RGB	Red Green Blue
SAVI	Soil Adjusted Vegetation Index
SMIR	Short-wave and Middle Infrared
SPOT	Satellite Pour l'Observation de la Terre
SWIR	Short-Wave Infrared
TIR	Thermal Infrared
TM	Thematic Mapper
TST	Temperatura da Superfície Terrestre
VI3	Vegetation Index 3
VIS	Visible
WIST	Warehouse Inventory Search Tool

1. INTRODUÇÃO

1.1. Motivação

O fogo constitui-se em um dos principais agentes transformadores do ambiente, seja ele usado de forma intencional pelo ser humano, como quando transforma florestas em pastagens, ou de forma acidental, quando o fogo pode alcançar grandes extensões de forma desordenada e fora de controle e destruir a vegetação local.

O fato é que de forma intencional ou não, as queimadas geram enormes prejuízos ao meio ambiente. Um deles é a emissão de aerossóis e gases do efeito estufa para a atmosfera, como o dióxido de carbono (CO_2), o metano (CH_4) e o óxido nitroso (N_2O) (Scholes, 1995).

Se, por um lado, as emissões associadas às queimadas têm importante papel nas mudanças climáticas, por outro, as mudanças climáticas também exercem influência nas queimadas. Em um clima futuro mais quente são esperados aumentos na intensidade do fogo, na área queimada ou na frequência de fogos e na duração da estação das queimadas (Pereira et al., 2013).

Além da emissão de gases de efeito estufa e da modificação da composição química da atmosfera, que têm proporções globais, a queima da vegetação também produz efeitos locais, tais como a destruição da fauna e da flora, o empobrecimento do solo, a redução da penetração de água no subsolo e, em alguns casos, mortes, acidentes e perda de propriedades (INPE, 2012; Viegas, 2006). No contexto regional, as queimadas alteram ou mesmo destroem ecossistemas. Além disso, elas poluem a atmosfera, perturbando a qualidade do ar e causando prejuízos à saúde de milhões de pessoas. Tais poluentes podem alcançar grandes altitudes e ser rapidamente transportados para locais bastante distantes, como outros países ou até mesmo outros continentes.

É também importante mencionar que as queimadas são parte integrante e necessária de alguns ecossistemas, onde ocorrem naturalmente devido a raios e permitem a renovação da floresta. No Canadá, por exemplo, cerca de 50% dos incêndios florestais são iniciados por descargas atmosféricas, as quais são responsáveis por 85% da área queimada. No entanto, mesmo possuindo uma causa natural, muitos destes incêndios atingem grandes áreas e são difíceis de serem controlados, devido à demora na detecção e à dificuldade de acesso (Wotton et al., 2012).

Queimadas ocorrem em todo o planeta, sendo bastante conhecidas as que ocorrem na Amazônia, onde a floresta é derrubada e queimada, abrindo espaço para as pastagens para uso agropecuário. Outros países além do Brasil também são conhecidos pela ocorrência de

grandes incêndios, tais como Austrália, Estados Unidos, Canadá, Indonésia e países mediterrânicos. Nestes países do sul da Europa (Portugal, Espanha, França, Itália e Grécia), todo ano são queimados milhares de quilômetros quadrados de florestas, matos e pastagens, que causam enormes perdas econômicas e ecológicas, além de frequentes perdas de vidas humanas (Quintano et al., 2011).

Segundo Pereira et al. (2013), desde 1980 uma área equivalente a 3/5 da superfície vegetada de Portugal foi queimada. Entre 2003 e 2005, por exemplo, a densidade de fogos em Portugal foi mais de oito vezes superior que na Espanha, e a área queimada, dez vezes superior, sendo a Espanha a segunda colocada em termos de incêndios florestais entre os países mediterrânicos naqueles três anos (Pereira et al., 2011).

Portugal é considerado o país mais propenso (por unidade de área) à ocorrência de queimadas, e uma série de fatores ambientais, tais como o clima, a topografia e a distribuição de espécies de árvores contribuem para tal. Além destes, há também os fatores antropogênicos, como a densidade populacional e a ocupação urbana e não-urbana do território (Pereira et al., 2011).

As condições meteorológicas exercem um papel bastante importante em todas as fases de um incêndio, contribuindo para a sua maior duração e o seu alastramento através do vento ou para a sua extinção através da precipitação. Sendo assim, a combinação de períodos secos com altas temperaturas favorece enormemente tanto o início como a duração de um evento de fogo. É exatamente esta perigosa combinação que toma lugar em Portugal, onde ambas a precipitação e a temperatura exibem uma característica sazonal muito bem marcada, com uma estação seca durante o período quente do verão (junho a agosto) e um período úmido durante os demais meses do ano, com um máximo nos meses frios do inverno (Pereira et al., 2011). É, portanto, durante os meses do verão que ocorre a maior parte dos incêndios florestais em Portugal.

O ano de 2005, o segundo pior da história em termos de incêndios florestais em Portugal, foi um ano atípico na medida em que as condições meteorológicas conduziram, logo nos meses de janeiro a março, à ocorrência de numerosos incêndios, devido à combinação de tempo seco e ventos fortes. No entanto, tais fogos ocorridos durante o inverno não corresponderam a uma área queimada significativa (DGRF, 2005). A falta de chuva neste ano persistiu até outubro, e ao todo foram queimados mais de 300.000 hectares (3.000 km²) de florestas e matagais, com 20 óbitos, dos quais 12 eram bombeiros.

Em Portugal, mais de 90% dos incêndios são causados pela atividade humana, e em 2005 mais de 100 pessoas foram acusadas de incêndios culposos (GFMC, 2006). De acordo

com um estudo feito pela Direcção Geral dos Recursos Florestais para o período de 2001 a 2005, as causas de origem humana diferem regionalmente: nas regiões litorâneas do centro e do norte, predominam as causas intencionais; no norte e no interior da região central, o uso negligente do fogo; no Alentejo, as causas acidentais; e no Algarve, onde a incidência de fogos é bem menor, há um equilíbrio entre as três causas citadas. As causas naturais correspondem a percentagens sempre reduzidas, com alguma expressão apenas no Alentejo (DGRF, 2005).

1.2. Objetivo

Com base em todos os efeitos nocivos que as queimadas trazem ao clima e aos ecossistemas locais e globais fica clara a necessidade e a importância em se estudar tais eventos. É importante, por exemplo, mapear as áreas queimadas, fundamentais para os estudos da química da atmosfera e de mudanças climáticas a nível regional e/ou global, sendo a área queimada uma das variáveis cruciais para quantificar as emissões associadas à queima de biomassa em escala global.

O mapeamento não é, no entanto, uma tarefa fácil, haja vista a quantidade enorme de pequenos focos de incêndio que ocorrem todo ano e, em menor quantidade, os incêndios que cobrem grandes áreas. É neste contexto que o sensoriamento remoto surge como ferramenta indispensável, devido à grande extensão da área afetada pelo fogo, à rápida dinâmica do processo e à baixa acessibilidade às áreas afetadas, tornando possível a identificação dos fogos em tempo quase real ou, posteriormente, o mapeamento das áreas queimadas com base nas cicatrizes deixadas pelos incêndios, inclusive em áreas de difícil acesso.

Sendo assim, anualmente, o Instituto da Conservação da Natureza e das Florestas (ICNF) de Portugal elabora, em conjunto com o Departamento de Engenharia Florestal do Instituto de Agronomia (DEF/ISA), mapas anuais do perímetro do fogo, os quais utilizam imagens do satélite Landsat (*Land Remote Sensing Satellite*) do fim da estação para mapear as áreas queimadas maiores que 5 hectares. No entanto, por se tratarem de imagens do fim da estação, o atlas produzido fornece apenas a localização da cicatriz, não oferecendo qualquer estimativa da data de cada evento de fogo. Contudo, a informação temporal dos fogos é de fundamental importância para se compreender o regime e a sazonalidade dos incêndios, bem como as complexas interações entre fogo, cobertura vegetal e meteorologia.

Deste modo, este trabalho teve como objetivo estudar, aplicar e avaliar um novo método de identificação e datação de áreas queimadas, baseado na detecção das cicatrizes

deixadas pelo fogo em Portugal continental. O método de identificação de áreas queimadas foi desenvolvido por Libonati et al. (submetido), o qual é baseado no Índice de Queimadas (V,W) (Libonati et al., 2011), que recorre à informação de reflectâncias no infravermelho próximo (NIR – do inglês *near-infrared*) e no infravermelho médio (MIR – do inglês *middle infrared*), proveniente do instrumento MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*) a bordo dos satélites Aqua e Terra. Com relação à datação dos fogos foi utilizado o método proposto por Roy et al. (1999) e mais recentemente também utilizado por Giglio et al. (2009). Tal método consiste na análise da série temporal dos valores de índices de vegetação, os quais em geral apresentam uma variação brusca no dia da queima do píxel. Com isso é possível, além de identificar as queimadas, atribuir-lhes datas. Neste trabalho, o referido método foi aplicado utilizando-se o Índice (V,W).

Resumidamente os três objetivos principais do presente trabalho foram:

- 1) Aplicar um novo método de identificação de áreas queimadas sobre Portugal Continental;
- 2) Datar as áreas queimadas identificadas no item anterior;
- 3) Validar os resultados anteriores com base nas cicatrizes de referência Landsat e com os focos de calor do sensor MODIS.

2. ESTADO DA ARTE

Diversos instrumentos têm vindo a ser extensivamente utilizados na detecção de focos de incêndio e na monitorização de áreas queimadas, tais como o Landsat TM/ETM e o National Oceanic and Atmospheric Administration/Advanced Very High Resolution Radiometer (NOAA/AVHRR). Mais recentemente, o instrumento VEGETATION a bordo do Satellite Pour l'Observation de la Terre (SPOT) tem vindo a ser utilizado com sucesso na monitorização de fogos. São de referir também os sensores da série Along Track Scanning Radiometer (ATSR) para os quais têm vindo a ser desenvolvidos algoritmos de identificação de focos de incêndio, e ainda o sensor MODIS que tem vindo a demonstrar capacidades ótimas no que diz respeito à observação global de fogos, plumas e áreas queimadas (Libonati, 2010).

Áreas queimadas caracterizam-se pela deposição de carvão e cinzas, pela remoção da vegetação e pela alteração da estrutura vegetal. Estas mudanças são favoráveis à detecção via sensoriamento remoto, mas variam temporal e espacialmente de acordo com o tipo de vegetação queimada, a evolução pós-queima e a regeneração da vegetação na área queimada (Roy et al., 1999).

Segundo Benito e Torralbo (2012), em termos gerais, um incêndio florestal modifica a cobertura vegetal, reduzindo o nível de clorofila e de umidade. Além disso, as porcentagens de solo descoberto, de mudança de cor e de área carbonizada aumentam. Esses efeitos na vegetação e no solo produzem alterações nos padrões de refletividade, as quais podem ser detectadas via imagens de satélite.

O sensoriamento remoto propicia dois tipos de detecção de queimadas: a de fogos ativos, ou seja, com a presença do fogo; e a das áreas queimadas, onde algoritmos estimam a área queimada com base nas cicatrizes espectrais deixadas pelo fogo após a sua extinção. A detecção de fogos ativos baseia-se no sinal térmico, uma vez que o local onde ocorre a queimada possui uma temperatura de algumas centenas de graus centígrados devido à combustão. O sinal térmico é, portanto, pouco equívoco, porém efêmero, isto é, só pode ser observado no momento da queima. Já a detecção de áreas queimadas é feita com base nos resíduos de carvão e/ou na cicatriz deixada na vegetação. Tais sinais são mais duradouros e podem permanecer por dias (Pereira, 2007).

Na caracterização espectral da vegetação queimada é necessário considerar dois tipos diferentes de sinais: um que provém da formação e da deposição do carvão e das cinzas, e outro devido à modificação da estrutura e da quantidade de vegetação. O primeiro tipo de

sinal é uma consequência da combustão da vegetação, e possui a desvantagem de durar pouco tempo e ser sensível à ação do vento e da chuva. De fato, seus efeitos são eliminados em poucas semanas ou meses após o fogo. O segundo sinal é mais estável, mas é mais difícil de identificar os efeitos causados pelo fogo, porque a eliminação parcial ou total da vegetação pode ter sido causada por outros fatores, como desflorestamento, estresse da vegetação ou ação de pragas (Pereira et al., 1999).

A relação entre foco e queimada não é direta nas imagens de satélite. De acordo com INPE (2012), um foco indica a existência de fogo em um elemento de resolução da imagem (píxel), que no caso do MODIS é de 1 km x 1 km. Neste píxel pode haver uma ou várias queimadas distintas, mas a indicação será de um único foco. E se uma queimada for muito extensa, ela será detectada em alguns píxeis vizinhos, ou seja, vários focos estarão associados a uma única grande queimada.

Apesar de os produtos que detectam fogos ativos (também chamados “hotspots” ou focos de calor) fornecerem a informação sobre a localização e hora dos fogos em atividade no momento da passagem do satélite, eles em geral não permitem que a área queimada seja estimada de forma confiável. Contudo, mapas confiáveis de áreas queimadas são essenciais para diversas aplicações, entre elas a estimativa dos gases e aerossóis emitidos pela queima de biomassa. Consequentemente, uma variedade de métodos de estimativa de área queimada com base em dados de satélites foi desenvolvida, a maior parte não utilizando a informação dos hotspots, e uma minoria de algoritmos híbridos, que utilizam essa informação de forma complementar (Giglio et al., 2009).

Para a identificação de áreas queimadas os canais tradicionalmente utilizados são o infravermelho próximo (NIR – 0,84 μm) e o visível, na região do vermelho (R – 0,64 μm) do espectro eletromagnético, assim como o infravermelho de onda curta (SWIR – 1,2 - 2,1 μm).

No espectro visível, a refletividade de um píxel queimado aumenta, como consequência da perda de clorofila nas folhas e/ou do aumento na proporção de áreas descobertas. Contudo, em áreas recentemente queimadas, com fogos intensos, onde a vegetação foi afetada de forma severa e a predominância de carvão e cinzas é significativa, a refletividade diminui consideravelmente, resultando em confusão com áreas de baixa refletividade, como sombras, água, solos úmidos ou florestas densas de coníferas. Isso se deve ao fato de que tanto a clorofila quanto o carvão e as cinzas apresentam baixa refletividade no VIS. Essas similaridades reduzem a viabilidade de se usar o canal visível para a identificação de áreas queimadas.

Dentre os canais tradicionais utilizados, o infravermelho próximo é a região do espectro onde o sinal de queimadas recentes é mais evidente, especialmente quando a área queimada e a quantidade de carvão e cinzas produzidos são grandes, reduzindo a refletividade.

As alterações na resposta espectral do infravermelho de onda curta devido à queima causam um aumento na refletividade, tal qual no visível, sendo que no SWIR esse aumento é maior e devido à diminuição do teor de umidade nas plantas. Entretanto nesta região o carvão confunde-se com vegetação verde densa, água, solos muito escuros, zonas úmidas, etc.

Segundo Libonati (2010), diversos estudos têm mostrado que o uso da região do MIR é promissor para uma variedade de aplicações, como discriminação entre diferentes tipos de vegetação, estimativa da biomassa total e das folhas de diversos ecossistemas de florestas, monitoramento de mudanças temporais na vegetação e detecção de processos de desflorestamento. A reflectância no MIR também tem provado ser útil quando aplicada à discriminação de áreas queimadas (Roy et al., 1999; Pereira, 1999). A vegetação saudável possui baixa reflectância no MIR, devido à absorção de água. Portanto, a combustão da vegetação e a seca do solo causadas pelo fogo provocam o aumento de brilho no MIR. Os materiais naturais parecem exibir uma gama de valores de reflectância mais ampla no MIR do que no visível, facilitando a discriminação dos diferentes tipos de cobertura de terra (Figura 1). Por outro lado, o aumento na reflectância sobre superfícies queimadas é maior no MIR do que na região do SWIR (Figura 1), permitindo uma melhor discriminação entre as duas superfícies. Além disso, o espalhamento atmosférico é muito insignificante nesta gama de comprimentos de onda, e por conseguinte não reduz o contraste espectral na superfície.

De fato, em muitos estudos, a banda do MIR é comumente utilizada em conjunto com o NIR para identificar a vegetação e detectar as suas alterações, dado o forte contraste entre estas duas bandas, uma vez que a vegetação parece bastante brilhante no último e bastante escura na primeira (Figura 1).

A reflectância da vegetação no NIR, em torno de $0,8 \mu\text{m}$, é afetada principalmente pela estrutura da folha (Slaton et al., 2001). A vegetação verde apresenta altos valores de reflectância, porque conforme a folha amadurece as células aumentam, reduzindo o espaço intercelular, e conseqüentemente diminuindo a reflectância (Gates et al., 1965). Por outro lado, o uso do MIR em índices de vegetação como um substituto da tradicional banda do R (cerca de $0,6 \mu\text{m}$) baseia-se no fato de que a reflectância no MIR está bem correlacionada com a reflectância no R, mas não é sensível à maioria dos aerossóis. Vários autores têm apontado esta importante vantagem da região do MIR.

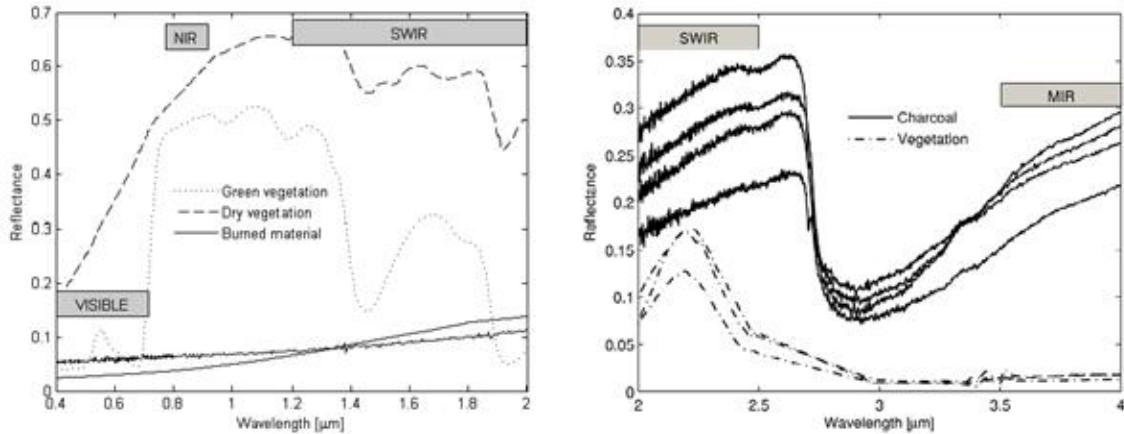


Figura 1. Assinaturas espectrais da amostra de material queimado (curvas sólidas), vegetação verde (curva pontilhada) e vegetação seca (curva a tracejado) (esquerda). Assinaturas espectrais de quatro amostras de carvão (curvas sólidas) e de três amostras de vegetação (curvas pontilhado-tracejadas) (direita). Fonte: Libonati (2010).

Kaufman e Remer (1994) mostraram que o espalhamento Mie de uma partícula aerossol típica (com exceção da poeira) em comprimentos de onda do MIR é consideravelmente menor do que em comprimentos de onda mais curtos utilizados no sensoriamento remoto; França e Setzer (1998) observaram a ausência de efeitos atmosféricos no ângulo de visão devido a pequenos efeitos dos aerossóis de fumaça no canal 3 do AVHRR (MIR), e mais recentemente Libonati et al. (2010) mostrou que o canal 20 do MODIS (MIR) não é afetado por aerossóis associados à fumaça de eventos de queima de biomassa. Esta característica do MIR se torna bem evidente quando a atenuação da transmitância atmosférica é calculada sobre as bandas do VIS ao MIR, para diferentes níveis de contaminação de fumaça devido à queima de biomassa. A atenuação da transmitância é definida aqui como a diferença entre a transmitância de uma atmosfera isenta de aerossóis e uma atmosfera com um determinado nível de contaminação de fumaça.

A Figura 2 mostra o impacto sobre os canais do visível ao infravermelho médio do MODIS resultante do aumento da espessura ótica dos aerossóis (EOA), associada à queima de biomassa. Durante a estação seca, em uma atmosfera fortemente contaminada pela fumaça (por exemplo, com uma EOA em $0,55 \mu\text{m}$ de cerca de 2,73), os canais VIS e NIR ($0,4 - 1,0 \mu\text{m}$) são inadequados para a observação da superfície. Mesmo em níveis mais baixos de contaminação por fumaça (com uma EOA em $0,55 \mu\text{m}$ menor que 0,72) o canal do VIS permanece fortemente afetado. Apesar de ser menos sensível aos aerossóis de fumaça, a transmitância atmosférica na região espectral do SWIR ($1,2 - 2,5 \mu\text{m}$) ainda é bastante atenuada. Por outro lado, o domínio do MIR praticamente não é afetado pela fumaça, permitindo a observação da superfície quase sem perturbações. A atenuação da transmitância

atmosférica apresenta baixos valores quase constantes de contaminação atmosférica por fumaça em todos os três casos analisados, inclusive em condições extremas de EOA. Este é um dos principais motivos que favorecem o domínio espectral do MIR para o monitoramento e o mapeamento de áreas queimadas.

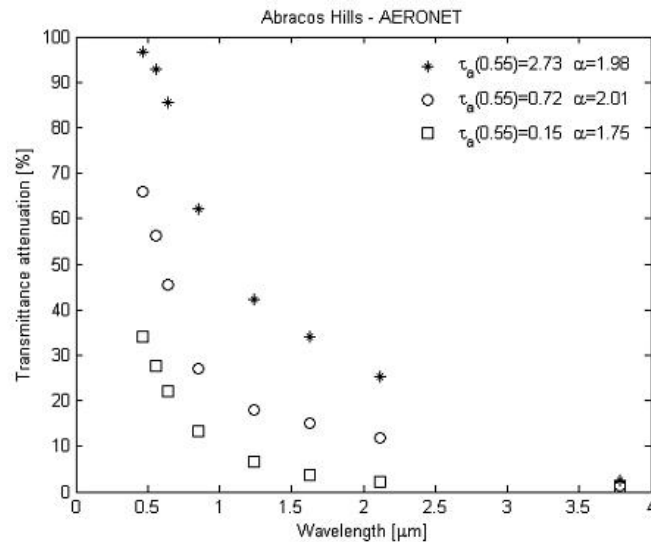


Figura 2. Atenuação da transmitância atmosférica nos canais VIS a MIR do MODIS para três diferentes níveis de contaminação de fumaça devido à queima de biomassa. $\tau_a(0,55)$ indica a EOA em $0,55 \mu\text{m}$ e α denota o parâmetro Ångstrom, o qual caracteriza a distribuição dos tamanhos das partículas de aerossóis. Fonte: Libonati (2010).

A identificação de áreas queimadas tem sido historicamente feita com base em índices espectrais. Tais índices são construídos com os valores das reflectâncias medidas por satélites dos canais visível (na banda do vermelho) e infravermelho próximo e, mais recentemente, do infravermelho médio.

Os primeiros índices empregados foram os índices de vegetação, inicialmente desenvolvidos para realçar o sinal da vegetação (uma vez que eles se baseavam principalmente no contraste entre as bandas do vermelho e infravermelho próximo), minimizando os efeitos da atmosfera e do solo. A Tabela 1 mostra uma lista com os índices mais usados. Embora os índices de vegetação permitam a identificação da perda e/ou o dano à vegetação causados pelo fogo, a resposta espectral da vegetação queimada pode causar confusão com outras superfícies, como água, áreas sombreadas e, em alguns casos, árvores coníferas. Conseqüentemente, o tradicional Índice de Vegetação por Diferenças Normalizadas (NDVI – do inglês *Normalized Difference Vegetation Index*) (Rouse et al., 1973) não resulta em um bom discriminador de áreas queimadas em imagens posteriores ao fogo, embora mostre bons resultados em comparações multitemporais (antes e depois do fogo). O SAVI

(*Soil Adjusted Vegetation Index*) (Huete, 1988) tem provado ser um bom identificador da quantidade de vegetação em áreas de densidade muito baixa. O GESAVI (*Generalized Soil Adjusted Vegetation Index*) (Gilabert et al., 1998) representa uma melhora do índice anterior, mas é muito dependente da escolha de um determinado parâmetro (parâmetro Z), o qual, para uma correta definição, necessita de um conhecimento prévio da área de estudo. Essa limitação reduziu bastante o seu uso. O GEMI (*Global Environmental Monitoring Index*) (Pinty e Verstraete, 1992) é menos afetado por variações da atmosfera e do solo que o NDVI, sendo também mais sensível à identificação das áreas queimadas. De forma a resolver esses problemas relacionados aos índices de vegetação, foram desenvolvidos índices específicos para mapear áreas queimadas (Benito e Torralbo, 2012).

O índice NBR (*Normalized Burnt Ratio*) (Key e Benson, 2006) é similar ao antigo NDII (*Normalized Difference Infrared Index*), desenvolvido por Hunt e Rock (1989), um dos mais utilizados índices tanto para mapear áreas queimadas quanto para identificar diferentes níveis de prejuízos que a vegetação tenha sofrido devido a fogos (García e Chuvieco, 2004).

Finalmente, Martín e Chuvieco (1998) propuseram o BAI (*Burned Area Index*), baseado na distância a um centro de convergência que identifica o sinal espectral do carvão. Recentemente, este índice foi modificado incluindo a banda SWIR (1,3 - 2 μm), mais efetiva na procura por fogos. Este novo índice, BAIM (Martín et al., 2005), foi desenvolvido especificamente para as bandas do sensor MODIS (B2 = NIR, B7 = SWIR).

Por motivos já mencionados, em estudos mais recentes, o canal visível tem sido substituído pelo infravermelho médio, e com isso surgiram os índices modificados (Tabela 2). No espaço bi-espectral MIR/NIR, destacam-se os índices VI3 (Kaufman e Remer, 1994) e o GEMI3 (Pereira, 1999), em que o VI3 (*Vegetation Index 3*) é uma versão modificada do tradicional NDVI, onde a reflectância na banda do R foi trocada pela componente refletida do MIR. Já o GEMI3 é a versão modificada do GEMI, proposto inicialmente com o objetivo de minimizar a contaminação do sinal da vegetação por fatores estranhos, como a atmosfera e o solo. Um procedimento similar foi aplicado ao BAI, em que a componente do visível foi trocada pela do infravermelho médio, resultando no BAI3 (Martín, 1998).

Tabela 1. Definição de índices utilizados para mapear áreas queimadas. Adaptado de: Benito e Torralbo (2012).

	ÍNDICE	FORMULAÇÃO
ÍNDICES DE VEGETAÇÃO	Normalized Difference Vegetation Index (NDVI)	$NDVI_i = \frac{\rho_{i,NIR} - \rho_{i,R}}{\rho_{i,NIR} + \rho_{i,R}}$ <p>Onde $\rho_{i,NIR}$ e $\rho_{i,R}$ são as reflectâncias do píxel i nas bandas do NIR e do R, respectivamente.</p>
	Soil-Adjusted Vegetation Index (SAVI)	$SAVI = \frac{\rho_{NIR} - \rho_R}{\rho_{NIR} + \rho_R + L} * (1 + L)$ <p>Onde L é o parâmetro que considera a diferença na transmissividade do R e do NIR. Onde ρ_{NIR}, e ρ_R são as reflectâncias no NIR e no R</p>
	Generalized Soil Adjusted Vegetation Index (GESAVI)	$GESAVI = \frac{\rho_{NIR} - B\rho_R - A}{R + Z}$ <p>Onde Z é o coeficiente de ajuste de solo. Onde ρ_{NIR}, é a reflectância no NIR</p>
	Global Environmental Monitoring Index (GEMI)	$GEMI = \eta(1 - 0,25\eta) - \frac{\rho_R - 0,125}{1 - \rho_R}$ <p>Onde $\eta = \frac{2(\rho_{NIR}^2 - \rho_R^2) + 1,5\rho_{NIR} + 0,5\rho_R}{\rho_{NIR} + \rho_R + 0,5}$ Onde ρ_{NIR}, e ρ_R são as reflectâncias no NIR e no R</p>
	Normalized Burnt Ratio (NBR)	$NBR_i = \frac{\rho_{i,NIR} - \rho_{i,SWIR}}{\rho_{i,NIR} + \rho_{i,SWIR}}$ <p>Onde $\rho_{i,SWIR}$ é a reflectância do píxel i na banda do SWIR.</p>
ÍNDICES DE ÁREAS QUEIMADAS	Burned Area Index (BAI)	$BAI_i = \frac{1}{(\rho_{cR} - \rho_{i,R})^2 + (\rho_{cNIR} - \rho_{i,NIR})^2}$ <p>Onde ρ_{cR} e ρ_{cNIR} são as reflectâncias do centro de convergência para áreas queimadas no R e no NIR.</p>
	Burned Area Index MODIS (BAIM)	$BAIM_i = \frac{1}{(\rho_{cNIR} - \rho_{i,NIR})^2 + (\rho_{cSWIR} - \rho_{i,SWIR})^2}$ <p>Onde ρ_{cNIR} e ρ_{cSWIR} são as reflectâncias do centro de convergência para áreas queimadas no NIR e no SWIR.</p>

Tabela 2. Índices modificados utilizando o infravermelho médio para a identificação de áreas queimadas.

	ÍNDICE	FORMULAÇÃO
ÍNDICES MODIFICADOS	Vegetation Index 3 (VI3)	$VI3 = \begin{cases} (\rho_{NIR} - \rho_{MIR}) & , para \rho_{NIR} \geq \rho_R \\ (\rho_{NIR} + \rho_{MIR}) & , para \rho_{NIR} < \rho_R \\ 0 & \end{cases}$ <p>Onde ρ_{NIR}, ρ_R e ρ_{MIR} são as reflectâncias no NIR, no R e no MIR, respectivamente.</p>
	Global Environmental Monitoring Index 3 (GEMI3)	$GEMI3 = \Theta(1 - 0,25\Theta) - \frac{(\rho_{MIR} - 0,125)}{1 - \rho_{MIR}}$ $\Theta = \frac{2(\rho_{NIR}^2 - \rho_{MIR}^2) + 1,5\rho_{NIR} + 0,5\rho_{MIR}}{\rho_{NIR} + \rho_{MIR} + 0,5}$ <p>Onde ρ_{NIR}, e ρ_{MIR} são as reflectâncias no NIR e no MIR</p>
	Burned Area Index 3 (BAI3)	$BAI3 = \frac{1}{(\rho_{NIR} - \rho_{CNIR})^2 + (\rho_{MIR} - \rho_{CMIR})^2}$ <p>Onde ρ_{CNIR} e ρ_{CMIR} são as reflectâncias do centro de convergência para áreas queimadas no NIR e no MIR.</p>

Libonati et al. (2011) destaca, no entanto, que, apesar destes três índices modificados apresentarem resultados razoáveis na detecção de áreas queimadas, eles são meramente empíricos no que diz respeito à sua elaboração, sendo baseados no fato de que as reflectâncias no MIR e no R são fortemente correlacionadas. Contudo, os próprios autores salientam que não é esperado que os processos que governam as reflectâncias no R e no MIR levem a resultados similares e a existência de outros processos que possam mudar a reflectância nestes dois canais não pode ser ignorada.

Para suprir a falta de um índice que fosse especialmente projetado para detectar áreas queimadas no espaço amostral MIR/NIR, foi desenvolvido o Índice (V,W), adaptado às resoluções espectrais dos canais MIR/NIR do MODIS (Libonati et al., 2011).

2.1 Índice de queimadas (V,W)

Libonati et al. (2011) definiram uma transformação no espaço MIR/NIR que leva a um aumento da informação espectral sobre a vegetação. Para este propósito, e tendo em conta a metodologia proposta por Verstraete e Pinty (1996) para criar índices ótimos, um novo espaço foi proposto e um sistema de coordenadas apropriado foi em seguida definido, adequado para discriminar a vegetação e sensível ao estresse de água.

Tal transformação resultou no sistema de coordenadas V e W (Índice de queimadas “V,W”), definido no espaço η/ξ , em que η é um índice baseado na distância a um ponto de convergência no espaço MIR/NIR, representativo de uma superfície totalmente ardida (0,24 , 0,05), e ξ é um índice baseado na diferença entre os dois canais, como segue:

$$\xi = MIR - NIR \quad (1)$$

$$\eta = \sqrt{(MIR - 0,24)^2 + (NIR - 0,05)^2} \quad (2)$$

Pode-se notar que os índices η e ξ contêm as características relevantes do BAI3 e do VI3, ou seja, a distância a um ponto de convergência pré-definido e a diferença entre as reflectâncias do MIR e do NIR. A Figura 3 **Erro! Fonte de referência não encontrada.** apresenta o diagrama de dispersão de valores obtidos a partir de amostras de píxeis queimados recentemente extraídos de 12 cicatrizes de queimadas nas imagens MODIS, seis delas sobre a Amazônia e as outras seis sobre o Cerrado. Levando-se em conta que as áreas queimadas correspondem à faixa superior (inferior) de valores de reflectância no MIR (NIR) que são observadas em superfícies naturais, os valores de 0,24 e 0,05 foram designados como o Ponto de Convergência.

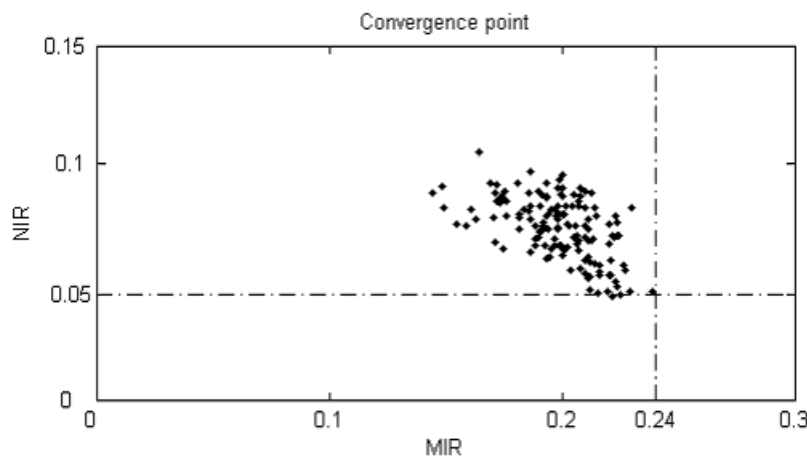


Figura 3. Reflectância no espaço bi-espectral MIR e NIR mostrando o ponto de convergência da reflectância de amostras de áreas recentemente queimadas extraídas a partir de imagens MODIS que cobrem o norte, o noroeste e o centro-oeste do Brasil. Linhas pontilhado-tracejadas delimitam os limites superior e inferior no MIR e no NIR e a sua interseção é o ponto de convergência. Fonte: Libonati (2010).

Levando-se em consideração o fato de que as superfícies vegetadas e queimadas tendem a se alinhar ao longo dos limites superior e inferior do chamado “kite domain” (por

sua forma se assemelhar a de uma pipa), o sistema de coordenadas foi desenvolvido de forma que os limites do domínio fossem as curvas das coordenadas (Figura 4).

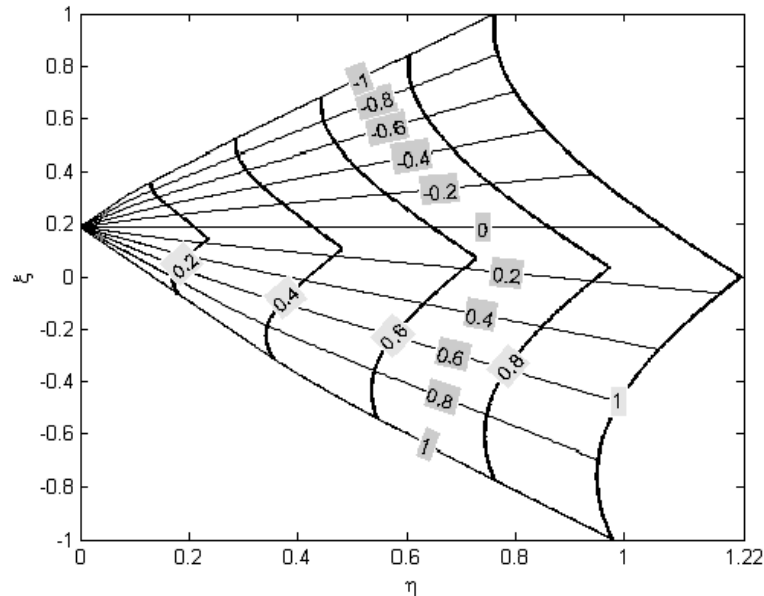


Figura 4. Linhas de coordenadas $V = \text{constante}$ (de -1 a 1, de cima para baixo – linhas grossas) e $W = \text{constante}$ (de 0 a 1, da esquerda para a direita – linhas finas) sobre o “kite domain”. Fonte: Libonati (2010).

A coordenada V apresenta reduzida dispersão para píxeis associados a superfícies com vegetação e a coordenada W cobre um amplo intervalo de valores, permitindo identificação do teor em água de superfícies vegetativas. Isto pode ser notado na Figura 5, correspondente às coordenadas V e W de píxeis pré e pós-fogo localizados no Cerrado e na Amazônia brasileiros. Todas as superfícies vegetadas e queimadas estão localizadas ao longo da curva $V = 1$ (alto teor de biomassa), e píxeis pré-fogo e pós-fogo com vegetação verde, seca e queimada sendo associados a valores decrescentes de W (valores decrescentes de quantidade de água).

Resumidamente, tem-se que:

- V é um bom *classificador* do tipo de superfície ao qual o píxel se refere, já que os píxeis associados à presença de biomassa tendem a alinhar-se ao longo da curva $V=1$ (como superfícies vegetadas, solos e áreas queimadas).
- W é um bom *quantificador* do conteúdo de água do píxel. Assim, superfícies vegetadas, solos e áreas queimadas estão respectivamente associados a altos ($\sim 0,6$), moderados ($\sim 0,2 - 0,4$) e baixos (~ 0) valores de W .

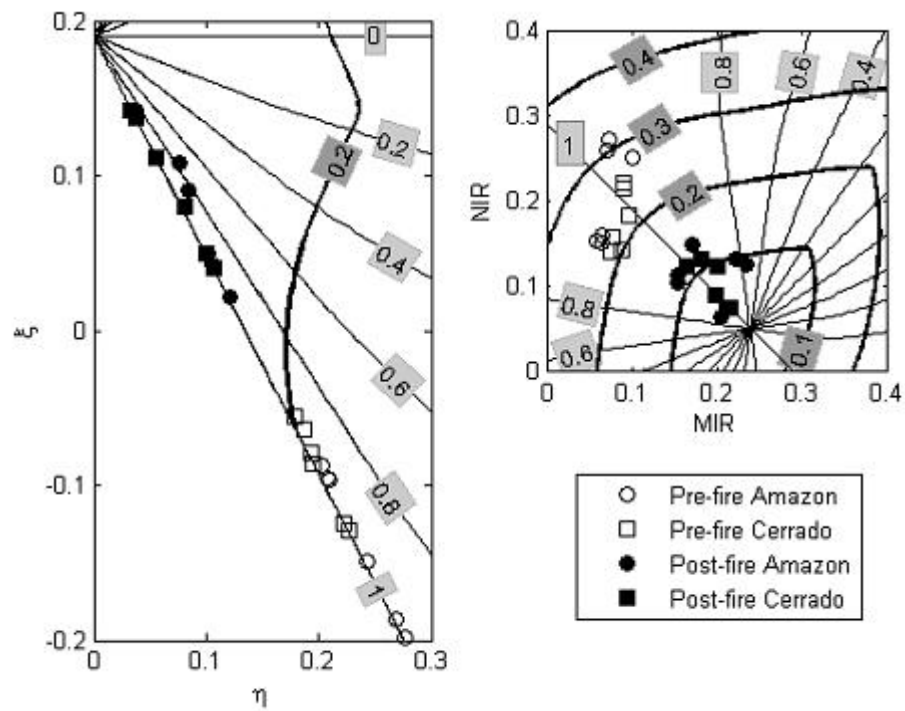


Figura 5. Localização de píxeis pré e pós-fogo do Cerrado e da Amazônia brasileiros nos espaços η/ϵ (esquerda) e MIR/NIR (direita). Fonte: Libonati (2010).

3. BASE TEÓRICA

3.1. Fundamentos de Radiação Solar

3.1.1. Conceito de Corpo Negro

Um corpo negro (CN) é definido como um material ideal perfeitamente opaco que absorve toda a radiação incidente em qualquer comprimento de onda e não reflete nada. Quando em equilíbrio termodinâmico (ET), a radiância emitida por um corpo negro é isotrópica e é determinada pela sua temperatura T , de acordo com a função de Planck, dada por:

$$B(\lambda, T) = \frac{2hc^2}{\lambda^5(e^{hc/K\lambda T} - 1)} = \frac{C_1}{\lambda^5(e^{C_2/\lambda T} - 1)} \quad (3)$$

onde $B(\lambda, T)$ é a radiância espectral do CN em um dado comprimento de onda λ , K é a constante de Boltzmann ($1,381 \times 10^{-23} \text{ J} \cdot \text{K}^{-1}$), h é a constante de Planck ($6,626 \times 10^{-24} \text{ J} \cdot \text{s}^{-1}$), c representa a velocidade da luz no vácuo ($2,998 \times 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$) e T é a temperatura absoluta do corpo negro. $C_1 = 2hc^2$ é dado por ($1,191 \times 10^8 \text{ W} \cdot \text{m}^2 \cdot \mu\text{m}^4 \cdot \text{Sr}^{-1}$) e $C_2 = hc/K$ é dado por ($1,438 \times 10^4 \mu\text{m} \cdot \text{K}$).

Um corpo negro emite mais que qualquer outro corpo em ET à mesma temperatura, sendo um perfeito emissor e um perfeito absorvedor de energia eletromagnética. A radiância emitida por um objeto que não é um CN em um dado comprimento de onda de uma superfície à temperatura termodinâmica T_s é dada pela multiplicação da função de Planck pela emissividade espectral $\varepsilon(\lambda)$ que define a eficiência de emissão de um corpo natural:

$$L(\lambda, T) = \varepsilon(\lambda)B(\lambda, T_s) \quad (4)$$

A atmosfera não está rigorosamente em equilíbrio termodinâmico, mas abaixo de 70 km se encontra em uma condição conhecida como equilíbrio termodinâmico local (ETL). Uma vez que as leis da radiação, estritamente válidas no ET, podem ser estendidas ao ETL, um certo volume de ar se comporta aproximadamente como um CN e a sua emissão radiativa pode ser considerada como dependente apenas da temperatura local.

3.1.2. Interferências atmosféricas

Durante a sua passagem através da atmosfera, a radiação eletromagnética vinda do Sol ou emitida pela Terra interage com as moléculas dos constituintes gasosos e com o material particulado suspenso na atmosfera. Nessa passagem, a atmosfera interfere na intensidade do

fluxo radiante, na distribuição espectral e na direção dos raios incidentes, tanto na sua trajetória descendente entre o Sol e a Terra como na trajetória ascendente da radiação refletida e emitida da superfície terrestre para o sensor. A parte da radiação eletromagnética que interage diretamente com a atmosfera sofre dois efeitos, absorção e espalhamento da radiação, e esse comportamento da atmosfera é questão crucial para o sensoriamento remoto orbital.

Como pode ser observado na Figura 6, em vários intervalos de comprimentos de onda a atmosfera mostra-se parcial ou totalmente opaca à passagem da radiação solar e da radiação emitida pela Terra, em razão da absorção pelos gases nela presentes. Como consequência, a radiação solar pode ser impedida de atingir a superfície terrestre ou sua intensidade é atenuada, o mesmo acontecendo com a radiação emitida pela Terra. Dessa forma, o sensor colocado no espaço ficará impedido de obter imagens da superfície terrestre nesses comprimentos de onda. Esses intervalos de comprimentos de onda são chamados de bandas de absorção da atmosfera e são proibitivos para o uso de sensoriamento remoto da superfície terrestre. As demais regiões onde a atmosfera não absorve total ou intensamente a radiação solar são chamadas de janelas atmosféricas (Meneses e Almeida, 2012).

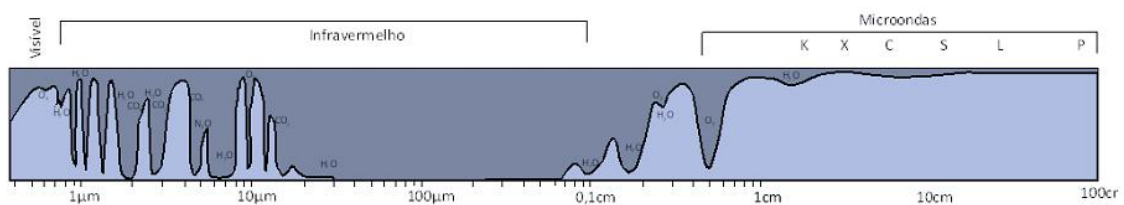


Figura 6. Transmitância da radiação eletromagnética através da atmosfera. As áreas em azul claro correspondem às regiões espectrais de transparências da atmosfera e as áreas em azul escuro correspondem às regiões espectrais onde os gases atmosféricos absorvem a radiação eletromagnética. Fonte: Meneses e Almeida (2012).

O espalhamento (difusão ou dispersão) corresponde à mudança aleatória da direção de propagação da radiação solar incidente devido à sua interação elástica com os componentes atmosféricos. A suposição comum é que a radiação espalhada não é atenuada, mas sim redirecionada. O espalhamento contribui para diminuir a eficiência do sensoriamento remoto na identificação dos objetos terrestres. Conforme mostra a Figura 7, os gases e particulados (aerossóis) da atmosfera podem espalhar a radiação incidente do Sol ou mesmo parte da radiação refletida pelas superfícies dos materiais. Nesse caso, o sensor receberá a energia refletida não somente do alvo (L_p), mas adicionada da radiação que a atmosfera espalhou (L_{atm}), antes que ela atingisse a superfície do solo. Isso é conhecido como o efeito aditivo da atmosfera.

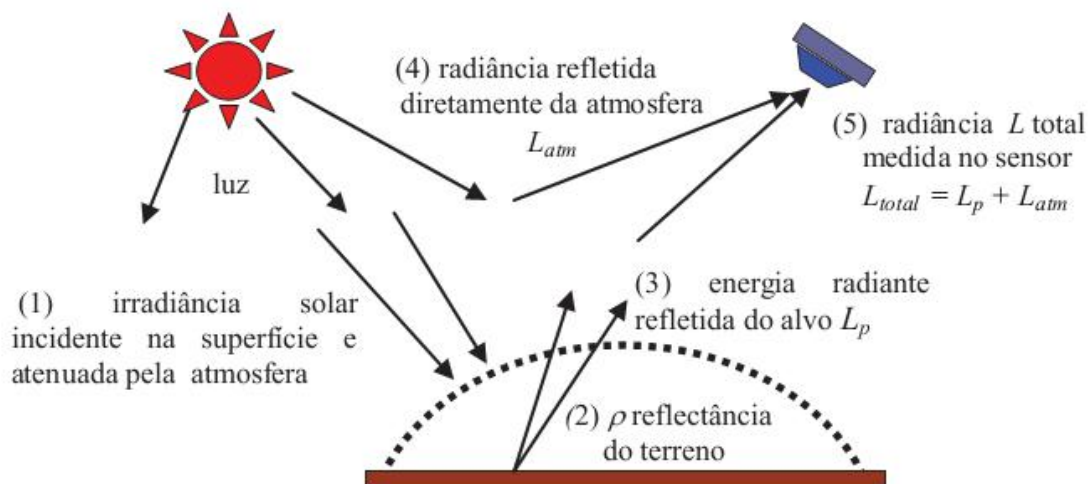


Figura 7. O espalhamento atmosférico adiciona radiação na quantidade de energia refletida do alvo que chega ao sensor. Fonte: Meneses e Almeida (2012).

3.1.3. Espectro eletromagnético

Denomina-se espectro eletromagnético as regiões espectrais da radiação eletromagnética (REM). O espectro eletromagnético se estende dos comprimentos de onda dos raios cósmicos aos comprimentos de corrente alternada emitidos pelas redes de alta tensão. A faixa de comprimento de onda da REM é praticamente ilimitada.

A REM deve ser vista como um espectro contínuo. Porém, o espectro eletromagnético foi arbitrariamente dividido em intervalos de comprimentos de onda com base nos mecanismos físicos geradores da energia eletromagnética e nos mecanismos físicos de sua detecção. A Tabela 3 apresenta a divisão que é a mais aceita no sensoriamento remoto. Não são limites rigorosamente precisos, sendo comum encontrarmos na literatura pequenas diferenças de limites dos intervalos espectrais. As faixas espectrais em negrito são as mais usadas em sensoriamento remoto.

Sabendo que a radiação eletromagnética de cada comprimento de onda interage de formas distintas e com intensidades diferentes com os objetos terrestres, um dos parâmetros mais importantes para definir as características de um sensor são os comprimentos de onda das imagens que o sensor irá adquirir. As imagens não são definidas num específico comprimento de onda, mas abrangendo pequenos intervalos, chamados de bandas espectrais. Em função das absorções da radiação eletromagnética pela atmosfera, os intervalos discriminados na Tabela 4 são aqueles em que, realmente, se podem obter imagens a partir de sensores instalados em aeronaves ou satélites.

Tabela 3. Divisão do espectro eletromagnético. Fonte: Meneses e Almeida (2012).

Intervalo Espectral	Comprimento de Onda
Raios C3smicos	0,01 A°
Raios gama	0,01 – 0,1 A°
Raios X	0,1 – 10 A°
Ultravioleta	100 nm – 0,38 μm
Visível	0,38 – 0,76 μm
Infravermelho pr3ximo	0,76 – 1,2 μm
Infravermelho de ondas curtas	1,2 – 3,0 μm
Infravermelho m3dio	3,0 – 5,0 μm
Infravermelho termal	5,0 μm – 1 mm
Microondas	1 mm – 100 cm
R3dio	1 m – 10 km
3udio	10 – 100 km
Corrente alternada	> 100 km

Tabela 4. Intervalos espectrais poss3veis de serem usados pelos sensores remotos. Fonte: Meneses e Almeida (2012).

0,45 – 0,76 μm	0,76 – 1,2 μm	1,2 – 3,0 μm	3,0 – 5,0 μm	5,0 μm – 1 mm	1 mm – 100 cm
<i>visível</i>	<i>infravermelho pr3ximo</i>	<i>infravermelho de ondas curtas</i>	<i>infravermelho m3dio</i>	<i>infravermelho termal</i>	<i>microondas</i>
toda a faixa	0,76 – 0,91	1,19 – 1,34	3,5 – 4,2	8,0 – 9,2	3,0 – 100
	1,00 – 1,12	1,55 – 1,75	4,5 – 5,0	10,2 – 12,5	
		2,05 – 2,40			

3.1.4. O Infravermelho M3dio

A regi3o espectral do infravermelho m3dio, localizada entre 3,0 e 5,0 μm, apresenta uma infinidade de janelas atmosf3ricas (Meier et al., 1997) e assim 3 favor3vel 3 penetra3o atmosf3rica de radia3o electromagn3tica (Figura 8). Esta regi3o tamb3m quase n3o 3 afetada pela presen3a de aeross3is. Mais ainda, a considera3o dos poss3veis efeitos da 3gua atmosf3rica na atenua3o do espectro electromagn3tico demonstrou que a regi3o espectral do MIR 3 uma das poucas regi3es com relativamente pouca atenua3o (Kerber e Schutt, 1986), sendo necess3rio aproximadamente 10 cm de 3gua precipit3vel para reduzir a transmissividade a menos de 90% (Bird, 1984) A fim de explorar esta janela atmosf3rica, diversas gera3es de instrumentos de sensoriamento remoto t3m operado nos comprimentos de onda do MIR desde 1978.

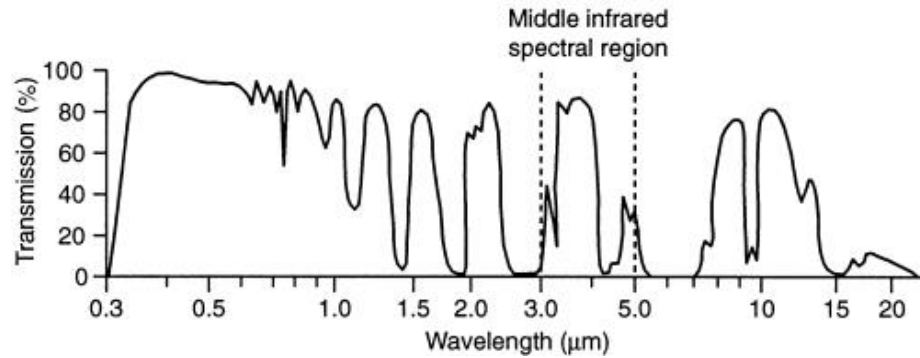


Figura 8. Janelas atmosféricas, tal como determinado pelo espectro de transmissividade da atmosfera. Note-se que a janela espectral do infravermelho médio tem a transmissão variando principalmente devido à absorção seletiva de óxido nítrico, oxigênio e ozônio e o dióxido de carbono (A escala de comprimento de onda é logarítmica). Fonte: Boyd e Petitcolin (2004).

A radiação do MIR que chega a um sensor a bordo de um satélite possui várias componentes, provenientes do Sol, da superfície ou da atmosfera. A atmosfera desempenha um papel importante ao longo dos caminhos que a radiação percorre (Sol – alvo e alvo – sensor) ou como uma fonte de emissão térmica. Dessa forma, sob condições de céu claro, absorção, espalhamento e emissão de radiação por constituintes gasosos e sólidos (aerossóis) devem ser considerados. As contribuições ao sinal no MIR devido ao espalhamento e à emissão atmosféricos são aproximadamente uma ordem de magnitude menor que devido à reflexão solar direta ou à emissão da superfície. As principais contribuições às radiancias no MIR, conforme medidas por um satélite, estão listadas a seguir e ilustradas na Figura 9:

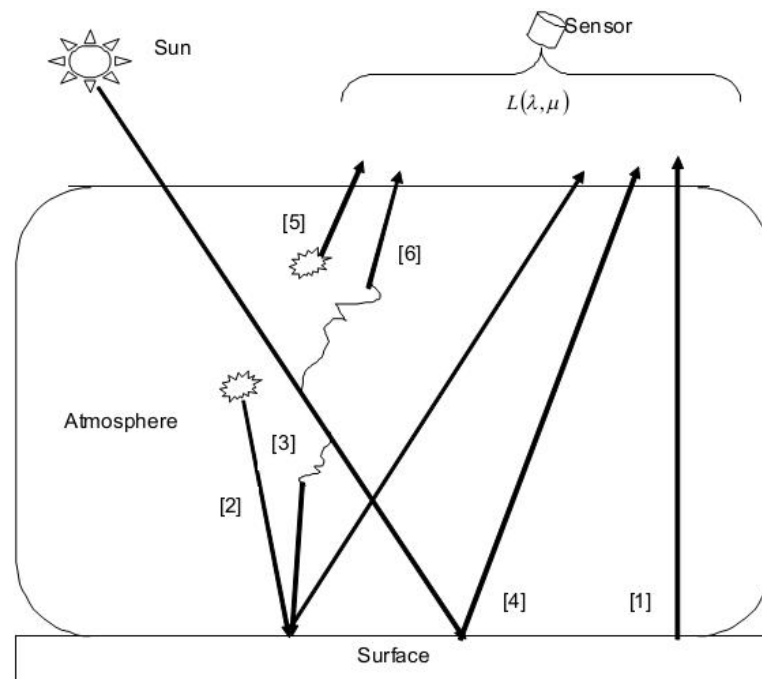


Figura 9. Transferência radiativa em um comprimento de onda λ no MIR. Fonte: Libonati (2010).

Portanto, sob condições de céu claro e para uma atmosfera em ETL, a radiância no topo da atmosfera $L(\lambda, \mu)$ medida por um sensor no comprimento de onda λ (pertencente ao MIR) possui as seguintes componentes:

- 1) emissão térmica da superfície;
- 2) radiância emitida pela atmosfera para baixo;
- 3) radiância solar difusa para baixo;
- 4) irradiância solar direta refletida pela superfície;
- 5) radiância emitida pela atmosfera para cima; e
- 6) espalhamento da radiação solar para cima.

3.1.5. O problema do canal 3,9

Apesar de todas as vantagens que o MIR oferece, esta banda espectral permanece subutilizada para estudos ambientais terrestres. A principal razão para isso é a sua natureza híbrida, que inclui uma combinação de ambas as componentes refletida e emitida da radiação nas medidas durante o dia. Os espectros de emissão de Planck do Sol e da Terra apresentam uma pequena região de sobreposição nos comprimentos de onda do infravermelho médio, e dessa forma os sensores remotos possuem a capacidade inerente de detectar simultaneamente ambas a reflexão solar e a emissão térmica da superfície terrestre (Figura 10).

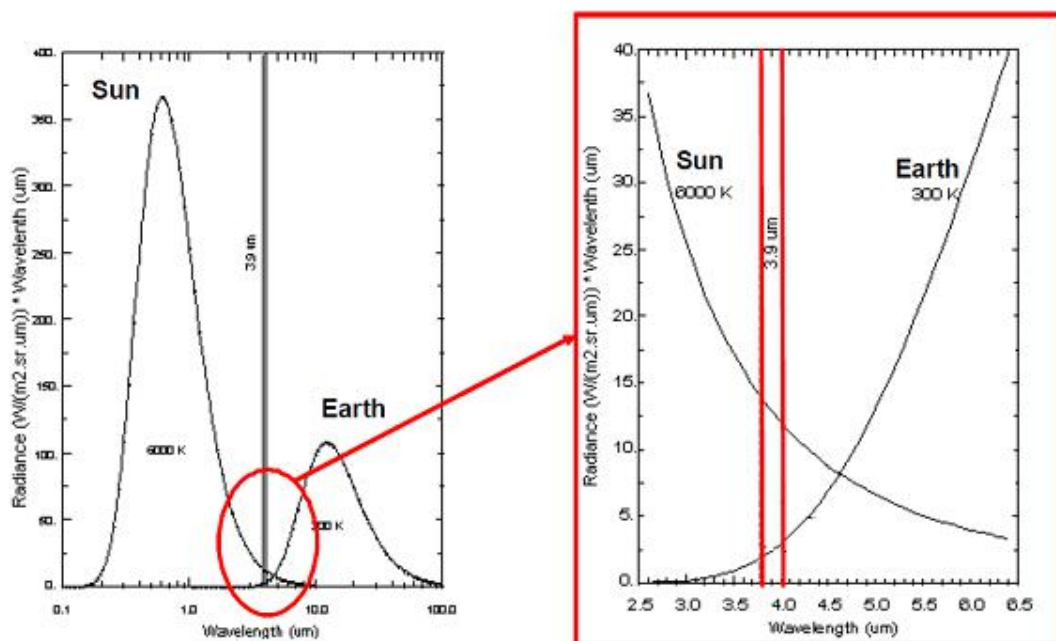


Figura 10. Espectros de emissão de Planck do Sol e da Terra, com destaque para a sobreposição no comprimento de onda 3,9 μm. Fonte: Libonati (2010).

O uso da radiação no MIR para estudos das propriedades da superfície da Terra à escala regional ou além dela pode não ser confiável (Boyd e Duane, 2001). Nestas escalas, a componente emitida da radiação pode estar sujeita a variáveis adicionais que confundem o sinal, não representando apenas as propriedades intrínsecas da superfície (Kaufman e Remer, 1994). Considerando o ambiente de florestas tropicais, a radiação emitida, apesar de relacionada às propriedades da cobertura florestal, pode também ser influenciada por condições atmosféricas locais variáveis, como velocidade do vento e condutividade do vapor, fatores específicos do local como topografia e aspecto e condições de umidade do solo. Dessa forma, é preferível utilizar apenas a componente refletida da radiação no MIR no estudo de florestas tropicais em escalas regional e global. De acordo com Pereira (1999), a componente refletida do MIR também provou ser especialmente adequada à discriminação entre superfícies queimadas e não queimadas nas latitudes médias.

Os métodos utilizados para obter a componente refletida com base nos principais componentes do sinal no MIR necessitam de conjuntos de dados auxiliares (isto é, perfis atmosféricos) e requerem grande capacidade computacional (para o cálculo das equações de transferência radiativa). Um método bem mais simples foi proposto por Kaufman e Remer em 1994, em que diferentes suposições são feitas de forma a se separar as componentes refletida e térmica do sinal do MIR. Este método não requer cálculos numéricos pesados e apresenta a importante vantagem de evitar o uso de dados auxiliares.

Libonati et. al (2012a) estudou as vantagens e desvantagens da obtenção da reflectância no MIR através da Equação de Transferência Radiativa (ETR) quando comparado ao método de Kaufman e Remer (KR94) para a identificação de áreas queimadas com imagens do MODIS. Apesar do melhor desempenho da ETR, particularmente no caso de ambientes tropicais, a correção atmosférica e a estimativa da temperatura da superfície terrestre (TST) são processos muitos demorados, e há o problema adicional relacionado à necessidade de dados atmosféricos e da TST, os quais não estão sempre disponíveis operacionalmente e/ou de forma precisa. O método desenvolvido por Kaufman e Remer apresenta a vantagem de não precisar nem de dados auxiliares (isto é, perfis atmosféricos) nem de grande capacidade computacional (para o cálculo das equações de transferência radiativa). Conforme mostrado por Libonati et al. (2010), com exceção de pequenos ângulos de elevação solar e altos valores de temperatura da superfície terrestre, a discriminação entre superfícies queimadas e não queimadas pode ser obtida de modo razoável quando usando valores de reflectância do MIR estimados pelo método KR94. Além disso, a obtenção da reflectância do MIR pelo método da ETR é um problema mal posto; sua solução não depende

apenas dos dados, isto é, pequenas perturbações nas medidas (devido a, por exemplo, ruído do sensor e incertezas nos perfis atmosféricos e na TST) podem induzir grandes erros na solução. Tal problema ocorre para as mesmas combinações de pares de valores de temperatura e ângulos solares zenitais em que o KR94 não leva a valores adequados de reflectância no MIR.

4. DADOS E METODOLOGIA

4.1. Características do sensor MODIS

O MODIS é um instrumento a bordo dos satélites Terra e Aqua. O Aqua é um satélite da NASA cujo nome refere-se à enorme quantidade de informações que tem coletado sobre o ciclo da água da Terra, incluindo evaporação dos oceanos, vapor d'água na atmosfera, nuvens, precipitação, umidade do solo, gelo marinho e cobertura de neve. Outras variáveis também têm sido medidas pelo Aqua, como fluxos radiativos de energia, aerossóis, cobertura vegetal, fitoplâncton e matéria orgânica dissolvida nos oceanos e temperaturas do ar, solo e água. Já o Terra, primeiro e principal satélite do Sistema de Observação Terrestre da NASA, fornece dados globais sobre o estado da atmosfera, terra e oceanos, assim como as suas interações entre si e com a radiação solar.

Ambos os satélites possuem uma órbita síncrona solar, quase polar e circular a uma altitude nominal de 705 km. A órbita do satélite Terra é programada de tal forma que cruza o equador de norte a sul durante a manhã, enquanto o Aqua o cruza no sentido sul - norte à tarde. Os satélites Terra e Aqua varrem toda a superfície da Terra a cada um ou dois dias, adquirindo através do sensor MODIS dados em 36 bandas espectrais (conforme Tabela 5), que vão desde o visível (0,415 μm) ao infravermelho (14,235 μm) em três diferentes resoluções espaciais: 250 metros (bandas 1 – 2), 500 metros (bandas 3 – 7) e 1 quilômetro (bandas 8 – 36). As bandas de 1 a 19 e 26 são as bandas de reflexão solar, coletando dados apenas durante o dia. Já as bandas 20 a 25 correspondem ao MIR e 27 a 36 são as bandas de emissão térmica, fazendo medições contínuas durante o dia e a noite.

Tabela 5. Especificações do instrumento MODIS. As bandas 1-19 estão em nm; as 20-36, em μm . A resolução espacial é dada em metros. Adaptado de <http://modis.gsfc.nasa.gov/about/specifications.php>.

Principal Uso	N° da Banda	Largura da Banda	Resolução Espacial
Limites de terra, nuvens e aerossóis	1	620 – 670	250
	2	841 – 876	
Propriedades da terra, nuvens e aerossóis	3	459 – 479	500
	4	545 – 565	
	5	1230 – 1250	
	6	1628 – 1652	
	7	2105 – 2155	
Biogeoquímica, Cor do Oceano, Fitoplâncton	8	405 – 420	1000
	9	438 – 448	
	10	483 – 493	
	11	526 – 536	
	12	546 – 556	
	13	662 – 672	
	14	673 – 683	
	15	743 – 753	
Vapor d'água atmosférico	16	862 – 877	
	17	890 – 920	
	18	931 – 941	
Temperatura da Superfície e das Nuvens	19	915 – 965	
	20	3,660 – 3,840	
	21	3,929 – 3,989	
	22	3,929 – 3,989	
Temperatura Atmosférica	23	4,020 – 4,080	
	24	4,433 – 4,498	
Vapor d'água e Nuvens Cirrus	25	4,482 – 4,549	
	26	1,360 – 1,390	
	27	6,535 – 6,895	
Propriedades das Nuvens	28	7,175 – 7,475	
Ozônio	29	8,400 – 8,700	
Temperatura da Superfície e das Nuvens	30	9,580 – 9,880	
	31	10,780 – 11,280	
Altitude Máxima das Nuvens	32	11,770 – 12,270	
	33	13,185 – 13,485	
	34	13,485 – 13,785	
	35	13,785 – 14,085	
	36	14,085 – 14,385	

4.2. Obtenção dos dados

Para o desenvolvimento do algoritmo apresentado neste trabalho, foram utilizados como dados de entrada as imagens do instrumento MODIS a bordo dos satélites Terra e Aqua no período de julho a setembro de 2005, para Portugal continental. Tais imagens possuem valores no topo da atmosfera da radiação no infravermelho médio (banda 21), da reflectância no infravermelho próximo (banda 2) e da temperatura de brilho no infravermelho termal (banda 31), assim como informações acerca do ângulo zenital solar e ainda máscara terra/mar.

Também foram utilizados, para a validação dos resultados, dados das cicatrizes de incêndios elaboradas pelo ICNF com base em imagens Landsat TM/ETM de fim de estação e dados de focos de calor do MODIS (hotspots) para o mesmo período.

Resumindo, os seguintes dados foram utilizados neste trabalho:

i. Dados de Entrada

- MODIS Level 1B radiances 1km (Terra e Aqua), para julho, agosto e setembro de 2005:

- Banda 2 (NIR, centrado em 0,858 μm)
- Banda 20 (MIR, centrado em 3,785 μm)
- Banda 31 (TIR, centrado em 11,017 μm)
- Máscara terra-mar
- Ângulo solar zenital

- Fogos ativos do MODIS (hotspots)

ii. Dados de Validação

- Fogos ativos do MODIS (hotspots)
- Dados das cicatrizes do Landsat (ICNF)

4.2.1. Dados do MODIS

Os dados do MODIS foram obtidos através do site: <http://reverb.echo.nasa.gov>, da NASA. O Reverb é a mais nova ferramenta da NASA disponibilizadora de dados e metadados de satélites e seus sensores, tendo recentemente substituído o WIST (Warehouse Inventory Search Tool). A plataforma permite o acesso, de forma interativa, aos dados de 219 plataformas, 460 instrumentos e 511 sensores.

Os produtos utilizados como dados de entrada foram os seguintes:

- MYD021KM - *MODIS/Aqua Calibrated Radiances 5-Min L1B Swath 1km V005*, ou seja, dados calibrados e georreferenciados de radiância (unidades: $W \cdot m^{-2} \cdot \mu m^{-1} \cdot sr^{-1}$) para todas as 36 bandas espectrais do instrumento MODIS a bordo do satélite Aqua, com 1 km de resolução.

- MYD03 - *MODIS/Aqua Geolocation Fields 5-Min L1A Swath 1km V005*, contém os metadados do sensor MODIS a bordo do satélite Aqua, tais como: latitude e longitude geodéticas, altura da superfície acima do geoide, ângulos zenital e azimutal solares e do satélite, além de uma máscara terra/mar para cada amostra de 1 km.

- MOD021KM - *MODIS/Terra Calibrated Radiances 5-Min L1B Swath 1km V005*: ou seja, dados calibrados e georreferenciados de radiância (unidades: $W \cdot m^{-2} \cdot \mu m^{-1} \cdot sr^{-1}$) para todas as 36 bandas espectrais do instrumento MODIS a bordo do satélite Terra, com 1 km de resolução.

- MOD03 - *MODIS/Terra Geolocation Fields 5-Min L1A Swath 1km V005*, contém os metadados do sensor MODIS a bordo do satélite Terra, tais como: latitude e longitude geodéticas, altura da superfície acima do geoide, ângulos zenital e azimutal solares e do satélite, além de uma máscara terra/mar para cada amostra de 1 km.

O formato para distribuição aos usuários dos dados do MODIS é o HDF (Hierarchical Data Format). Os dados são entregues com um único nível de processamento, definido como 1B. O formato HDF é um formato que independe da plataforma utilizada e sua estrutura lógica o converte em um dado auto-descritivo, permitindo a inclusão de uma grande quantidade de dados de diferentes tipos e origens em um mesmo arquivo. Um arquivo HDF contém, além das imagens propriamente ditas, dados de calibração, navegação, informações a respeito da missão, características do sensor, indicadores de qualidade, tipo e lugar do processamento, estação receptora, tempo de início e fim da tomada da imagem e referências geográficas, entre outros.

O conjunto dos dados correspondentes ao nível 1B do MODIS contém as radiâncias calibradas e georreferenciadas para as 36 bandas geradas a partir das contagens dadas pelo nível 1A. As radiâncias se apresentam em unidades $W \cdot m^{-2} \cdot \mu m^{-1} \cdot sr^{-1}$.

4.2.2. Dados de hotspots

Os dados de hotspots do MODIS para o ano de 2005 foram obtidos através do site: <https://earthdata.nasa.gov/data/near-real-time-data/firms/active-fire-data>, também da NASA. Um fogo ativo detectado pelo MODIS representa o centro de um píxel de 1 km

(aproximadamente), sinalizado como contendo um ou mais focos de calor. Os incêndios são detectados usando os dados do instrumento MODIS, a bordo dos satélites Aqua e Terra da NASA. Os satélites tiram um "instantâneo" dos eventos ativos conforme passam sobre a Terra. Na maioria dos casos, os hotspots do MODIS são queimadas, mas às vezes correspondem a erupções vulcânicas ou a chamas referentes à queima de gás. Não há nenhuma maneira de saber qual o tipo de anomalia térmica é detectada com base apenas nos dados do MODIS.

A Figura 11 exemplifica o que a detecção de um hotspot em um píxel pode significar no chão. Um hotspot pode corresponder a um ou mais fogos ativos em um píxel, ou mesmo vários hotspots podem estar associados a um único evento de queimada, grande o suficiente para corresponder a mais de um píxel da imagem.

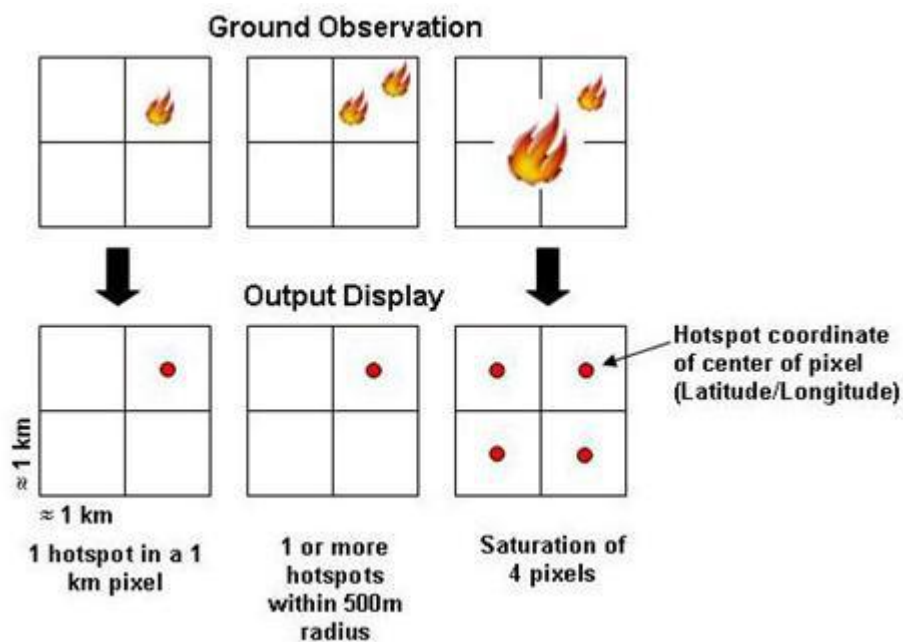


Figura 11. Exemplos do que a detecção de um hotspot pode significar no chão. Disponível em: <https://earthdata.nasa.gov/data/near-real-time-data/faq/firms>.

O tamanho mínimo detectável de um incêndio é função de diversas variáveis (ângulo de leitura do sensor, bioma, posição do sol, temperatura da superfície da terra, cobertura de nuvens, quantidade de fumaça e direção do vento, etc), de modo que o valor exato varia ligeiramente de acordo com estas condições. O MODIS detecta rotineiramente ambos os incêndios flamejantes (muitas chamas, pouca fumaça) e latentes (sem chamas, muita fumaça) de 1000 m² de tamanho. Sob boas condições de observação (por exemplo, perto do nadir, com pouca ou nenhuma fumaça, uma superfície terrestre relativamente homogênea, etc) incêndios

flamejantes com apenas um décimo desse tamanho podem ser detectados (<https://earthdata.nasa.gov/data/near-real-time-data/faq/firms>). Sob condições de observação imaculadas (e extremamente raras) fogos com a presença de chamas ainda menores (50 m^2) podem ser detectados. No entanto, estudos não recomendam a estimativa de área queimada a partir dos dados de hotspots, devido à amostra temporal inadequada, à variabilidade das condições dos combustíveis e da cobertura de nuvens, às diferenças no comportamento do fogo e a problemas relacionados à resolução espacial (van der Werf et al., 2010). Entretanto, os hotspots são bastante úteis por possuir a informação temporal, permitindo a estimativa da data de ocorrência do incêndio e também oferecendo informação sobre a dinâmica dos fogos.

Cada hotspot possui informações como local (latitude e longitude), data (dia, mês e ano) e horário em que foi detectado pelo satélite. Além disso, a cada uma das ocorrências também é associado um nível de confiança, que varia de 1 a 100%. Este valor é baseado em diversas variáveis usadas no processo de detecção pelo algoritmo do MODIS. Destina-se a ajudar os usuários a avaliar a qualidade de cada hotspot, ou seja, se ele representa um incêndio com alta ou baixa confiança (<https://earthdata.nasa.gov/data/near-real-time-data/firms/about>).

Considerando os dados de hotspots de 2005, mais de 70% deles possuem nível de confiança acima de 50%. Entre julho e setembro, em especial, eles representam mais de 80% dos hotspots (Figura 12). Desta forma, nesse trabalho, optou-se por utilizar-se hotspots com confiança acima de 50% tanto no método de identificação das áreas queimadas quanto de validação dos resultados.

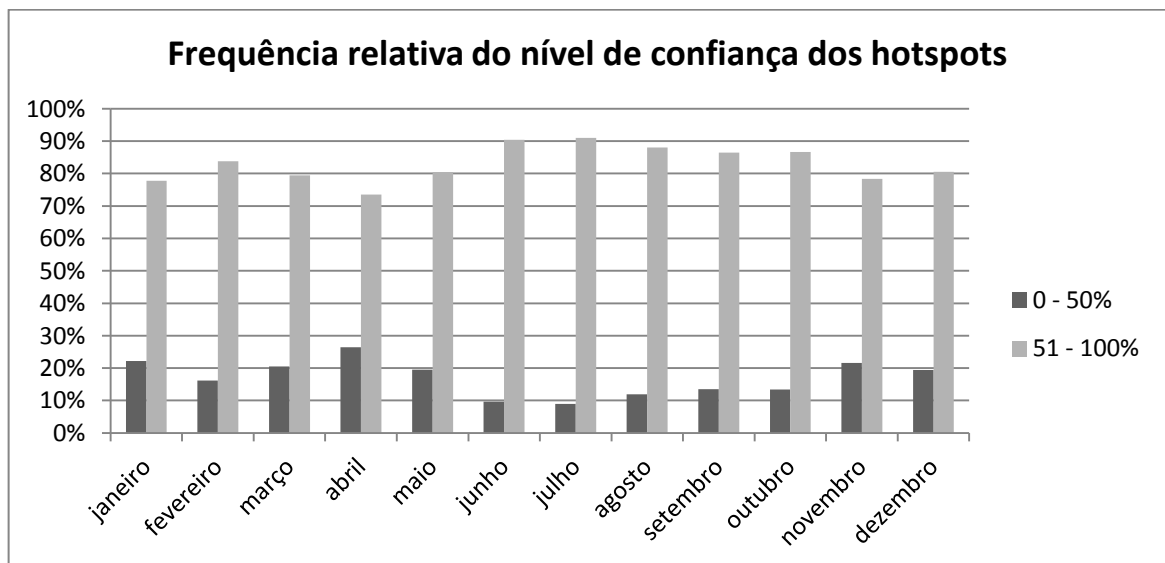


Figura 12. Gráfico da frequência relativa dos níveis de confiança dos hotspots. Em todos os meses, hotspots com confiança superior a 50% representam mais de 70% dos dados.

4.2.3. Dados de referência: cicatrizes Landsat

A validação em sensoriamento remoto determina de forma quantitativa a habilidade de um produto obtido a partir do espaço em descrever um dado parâmetro geofísico medido por meios independentes. A importância em validar produtos de satélites se deve aos seguintes fatores: 1) informações quantitativas sobre a qualidade do produto são fundamentais para diferentes usuários; 2) informações resultantes do próprio processo de validação ajudam a melhorar a geração dos produtos e 3) utilização crescente de produtos de satélite como suporte para a detecção de eventuais mudanças climáticas.

Usualmente a validação se baseia em medidas realizadas *in situ* obtidas durante campanhas de campo e consideradas como verdades. Entretanto, a validação de estimativas de área queimada por meio da comparação direta com medidas em campo apresenta dificuldades relacionadas não só com a larga extensão e localização remota da maioria das ocorrências, mas também devido à rápida alteração do sinal radiométrico da cicatriz de queimada. Ademais, muitas ocorrências de queimadas localizam-se em propriedades privadas, o que dificulta a sua validação *in situ*. Neste sentido, torna-se necessário que informações *in situ* acerca da extensão e localização das áreas queimadas sejam obtidas simultaneamente, ou no máximo após alguns dias/semanas depois da ocorrência do fogo, em locais de livre acesso. Informações com estas características podem ser coletadas através de sobrevoos sobre o local com equipamento adequado (isto é, aparelhos de *Global Positioning System* (GPS) e câmeras fotográficas), o que nem sempre está disponível devido ao alto custo envolvido.

Na ausência de dados *in-situ*, uma forma possível de solucionar o problema consiste na comparação visual e estatística com informações de satélites de alta resolução espacial, que permitem observar a superfície terrestre com o detalhamento adequado. Outro método de validação comumente utilizado para validar a localização e extensão aproximada da área queimada consiste na comparação com os focos de queimada obtidos por satélites.

No presente trabalho, o processo de validação foi conduzido utilizando-se dois tipos de dados de referência: 1) cicatrizes de áreas queimadas derivadas de dados de média resolução (Landsat TM), neste caso as cicatrizes do ICNF e 2) informações acerca dos focos de calor do MODIS (conforme descrito no item anterior).

As cicatrizes de áreas queimadas utilizadas como referência foram desenvolvidas pelo ICNF (antiga AFN, Autoridade Florestal Nacional) em conjunto com o Departamento de Engenharia Florestal do Instituto Superior de Agronomia (DEF/ISA), com base nos dados do sensor Landsat TM/ETM, de alta resolução (30 m). No presente estudo, foram utilizadas as cicatrizes de fogos ocorridos no ano de 2005, conforme a Figura 13.

Esse mapa anual de cicatrizes foi obtido a partir de um procedimento semi-automático, no qual é feita uma classificação supervisionada de imagens usando uma combinação de canais Landsat (sobretudo no infravermelho próximo e médio), bem como índices baseados nesses canais. O algoritmo de classificação utilizado foi o CART (Classification and Regression Trees). Posteriormente, foi feita uma edição manual dos resultados da classificação gerados pelo CART, usando como base uma composição colorida RGB com os canais Landsat 7-4-3.

Nestes mapas constam cicatrizes de áreas queimadas maiores que 5 ha, mas neste trabalho apenas aquelas maiores que 500 ha foram utilizadas. No entanto, por serem imagens de fim de estação, isto é, imagens obtidas apenas uma vez ao ano, após a estação seca em que ocorre a maior parte dos incêndios, o mapa produzido fornece apenas a localização espacial da cicatriz, não sendo possível estimar em qual dia ou mês cada evento de fogo aconteceu.

Mapa de áreas queimadas Landsat - 2005

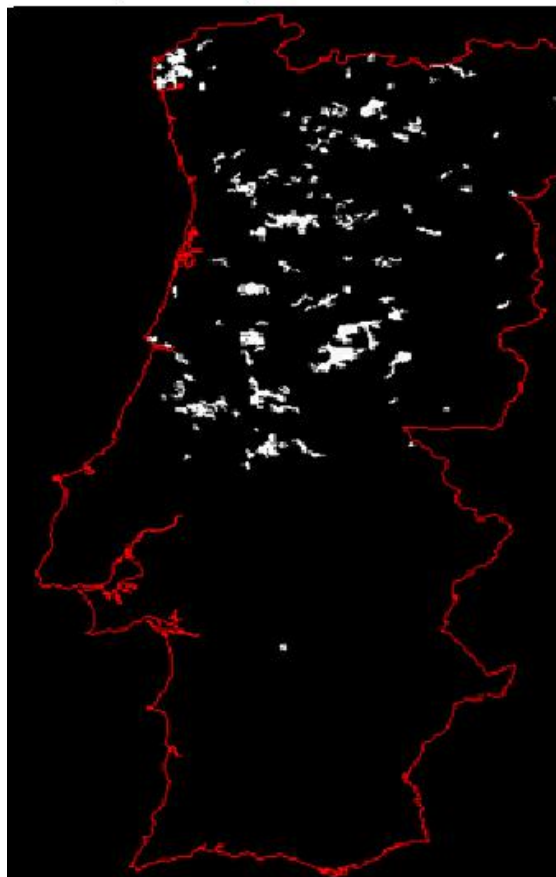


Figura 13. Cicatrizes de fogo do ano de 2005, maiores que 500ha, obtidas da base de dados do Instituto da Conservação da Natureza e das Florestas (ICNF).

4.3. Metodologia

4.3.1. Área de estudo

Portugal é um país localizado no Sudoeste da Europa, na zona ocidental da Península Ibérica (Figura 14). O território português é delimitado a norte e a leste pela Espanha e a sul e a oeste pelo oceano Atlântico, compreendendo uma parte continental e duas regiões autônomas: os arquipélagos dos Açores e da Madeira. Como mencionado anteriormente, no entanto, este estudo foi aplicado apenas a Portugal continental, isto é, excetuam-se desta análise os arquipélagos.

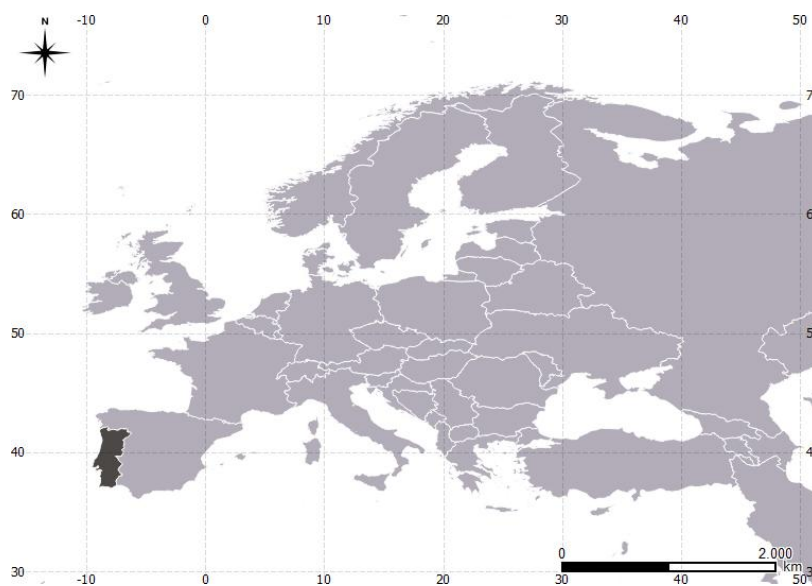


Figura 14. Localização de Portugal na Europa.

Embora seja um país pequeno (cerca de 700 km de comprimento por 350 km de largura), Portugal possui uma costa extensa: tem 1.230 km. É dividido administrativamente em 18 distritos, que se subdividem em concelhos e freguesias. Com uma área de 89.000 km², é cortado ao meio pelo seu principal rio, o Tejo. A norte, a paisagem é montanhosa, intercalando locais de altitude superior a 800 m com vales e depressões pronunciadas. A sul do Tejo, até ao Algarve, o relevo é dominado por colinas suaves e planícies, com a altitude raramente excedendo os 600 m (Figura 15 b). Outros rios principais são o Minho, o Douro e o Guadiana, que tal como o Tejo nascem na Espanha (Barros et al., 2012).

O clima em Portugal é mediterrânico, Csa no sul (clima temperado com inverno chuvoso e verão seco e quente) e Csb no norte (clima temperado com inverno chuvoso e verão seco e pouco quente), de acordo com a classificação climática de Köppen-Geiger. Os verões são amenos nas terras altas e na região litorânea do norte e do centro do País. O outono e o inverno são caracterizados pela maior intensidade do vento e maiores índices

pluviométricos, além de temperaturas negativas durante os meses mais frios nos distritos mais a norte. Em geral, os meses de primavera e verão são ensolarados, com temperaturas que ocasionalmente passam dos 40°C nos meses secos de julho e agosto (em especial no interior do Alentejo). Já a precipitação total anual média varia de pouco mais de 3000 mm nas montanhas do norte a menos de 600 mm em zonas do sul do Alentejo. Nos distritos do norte do país, a ocorrência de neve é bastante comum, diminuindo em direção ao sul, até não ser observada no Algarve.

Florestas e bosques cobrem cerca de um terço da área de estudo. As áreas agrícolas, apesar de presentes em todo o país, dominam a planície costeira central, os vales ao longo dos principais rios e a metade sul do país. No centro e no norte de Portugal, as propriedades de terra são muito fragmentadas e a paisagem agrícola é um grande mosaico de pequenas parcelas de diversas culturas, vinhas e olivais. Já na porção sul do país, as áreas agrícolas são mais extensas e homogêneas, dominadas pela agricultura de sequeiro, em especial a cultura de cereais (Figura 15 c).

A vegetação natural é pirofítica (isto é, adaptada ao fogo) e resistente à seca. A incidência de fogos é maior na metade norte do país, onde o verão tipicamente mediterrânico coexiste com a alta produtividade primária, levando a uma grande quantidade de combustíveis disponíveis (Oliveira et al., 2012). A maior parte das áreas queimadas em Portugal (80%) deve-se a eventos de incêndio que ocorrem durante um pequeno número (10%) dos dias de verão, de acordo com um padrão de circulação atmosférica típico dominado por uma forte crista localizada sobre a Península Ibérica (Pereira et al., 2005).

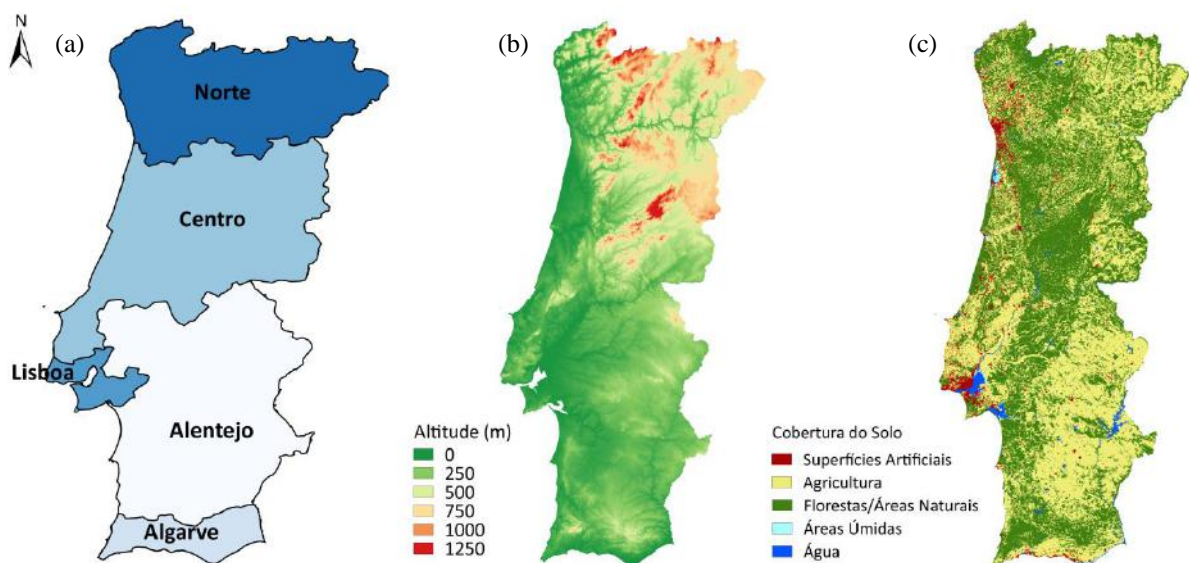


Figura 15. Mapas da área de estudo: Regiões de Portugal (a), altitude (b) e cobertura do solo (c).

4.3.2. Pré-processamento

A lista de imagens disponíveis para o período analisado (julho a setembro de 2005) abrangia todas as passagens dos satélites Aqua e Terra na área de interesse. Assim, fez-se necessária uma escolha prévia das imagens, não sendo utilizadas aquelas que:

- Eram noturnas, uma vez que naturalmente as reflectâncias no MIR e NIR só podem ser obtidas durante o dia;
- Continham a maior parte do território encoberta por nuvens, inviabilizando a obtenção dos dados do solo/vegetação;

Foram utilizadas, ao todo, 83 imagens do satélite Terra e 87 do Aqua, entre julho e setembro de 2005.

Uma vez obtidas as imagens relativas às passagens dos satélites Aqua e Terra sobre a região de estudo, foi necessário georreferenciá-las, o que foi feito no programa ENVI (*ENvironment for Visualizing Images*). Para tanto, também foi necessária a instalação do MCTK (*Modis Conversion Toolkit*), um plugin para o ENVI que permite que o georreferenciamento do produto *Calibrated Radiance 1km* (MOD021KM e MYD021KM) seja feito com base no produto *Geolocation Fields 1km* (MOD03) respectivo a cada passagem dos satélites.

Georreferenciar uma imagem é tornar suas coordenadas conhecidas num dado sistema de referência, tendo desta forma a finalidade de inserir nas imagens um sistema de projeção de coordenadas. Em processamento de imagens, o georreferenciamento é executado simultaneamente, em uma única operação, em todas as bandas. A projeção utilizada neste trabalho foi a Projeção Geográfica Lat/Lon, Datum WGS-84. Após a passagem pelo programa ENVI, as imagens passaram a possuir o formato img, juntamente com um arquivo descritor de extensão hdr.

Considerando que as imagens obtidas não representavam exatamente a mesma região e, em geral, abrangiam uma área muito maior que a de interesse (Figura 16), fez-se necessário que as mesmas fossem cortadas, de forma a representarem todas exatamente a mesma área. O corte também foi realizado com o software ENVI, sendo extraídas neste processo apenas as bandas a serem utilizadas neste trabalho (2, 20 e 31), as quais foram convertidas para o formato GEOTIFF.

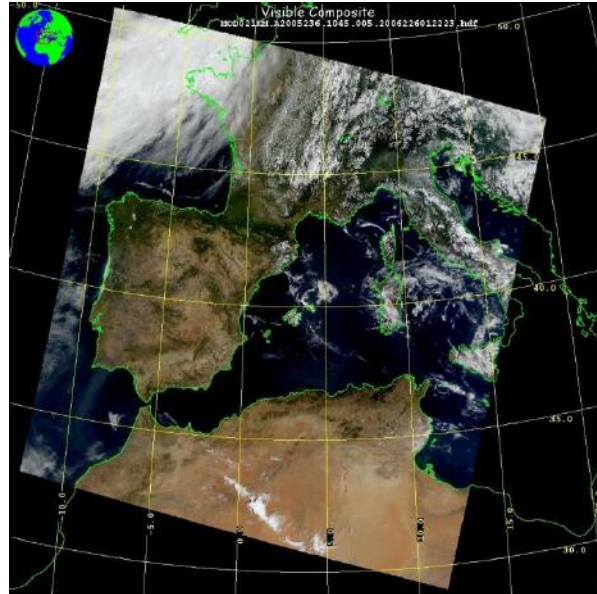


Figura 16. Exemplo de imagem bruta do MODIS. Compósito do visível obtido pelo satélite Terra no dia 24/08/2005, às 10:45 UTC. Disponível em: <http://reverb.echo.nasa.gov/reverb/>.

4.3.3. Cálculo de V e W

As coordenadas V e W foram calculadas através de programas escritos em linguagem Matlab, que primeiramente liam as imagens em formato tif dos satélites Aqua e Terra, utilizando os seguintes dados: Radiâncias nos canais 2, 20 e 31 do MODIS (NIR, MIR e TIR, respectivamente) e ângulo solar zenital. Em seguida, foi calculada a Temperatura de Brilho no canal 31 do MODIS (TIR), a qual foi utilizada para o cálculo da Função de Planck no canal 20 (MIR), de onde chegou-se à Reflectância do MIR, através do método de Kaufman e Remer (1994).

Posteriormente, ainda nestes programas, foram obtidos os índices ξ (que é a diferença entre a componente refletida do MIR e o NIR) e η (que é a distância entre determinado ponto no espaço MIR/NIR ao ponto de convergência (0,24, 0,05), representativo de uma superfície totalmente queimada (de acordo com Libonati et al., 2011).

Finalmente, foram calculados os valores de V e W para cada píxel e cada passagem dos satélites. Quando houve mais de um valor de V e W disponível para determinado dia, prevaleceu o menor valor de W (e o V correspondente).

4.3.4. Compostos temporais

Segundo Libonati et al. (2013), a identificação de áreas queimadas com apenas uma data de aquisição é prejudicada, porque esta única imagem pode estar repleta de nuvens, que impossibilitam a observação da superfície. Dessa forma, é mais útil gerar uma composição de

diversas imagens diárias, a fim de se obter uma imagem composta multitemporal correspondente a um determinado período (por exemplo, 15 ou 30 dias). A técnica dos compostos temporais é válida não somente para remover a contaminação por nuvens e sombras de nuvens, mas também para mitigar os efeitos da variabilidade da reflectância devido a fatores que nada têm a ver com mudanças na superfície associadas a queimadas, tais como variações da geometria de iluminação e visão do satélite. Além disso, neste trabalho, o relevo da área de estudo e sua possível influência na obtenção dos valores do Índice V,W não foram levados em consideração. Contudo, o uso da técnica de compostos temporais minimiza tal influência.

Com base em tais argumentos, o algoritmo gera compostos mensais (30 ou 31 dias) baseados nos valores mínimos de W. Esta condição garante que o sinal da queimada seja retido, já que são os menores valores de W que estão associados a queimadas. No total, foram gerados três compostos: um com os valores mínimos de W para o mês de julho, outro com os mínimos de agosto e outro com os de setembro.

4.3.5. Seleção de píxeis queimados

O método de identificação de áreas queimadas aplicado neste trabalho baseia-se naquele desenvolvido por Libonati et al. (submetido).

Para a detecção das áreas queimadas, foram utilizados dados auxiliares acerca da localização dos hotspots, que deram origem a duas matrizes de focos: uma para agosto e uma para setembro. Nestas matrizes, a cada píxel da área de estudo foi associada a informação “queimou” ou “não queimou” (onde “queimou” significa que houve pelo menos um hotspot naquele píxel durante o mês, e “não queimou”, que não houve).

Essas matrizes binárias foram utilizadas na realização do filtro espacial, que consistia no seguinte teste lógico: se há um hotspot em um determinado píxel, ele queimou, e se ele queimou, é muitíssimo provável que os píxeis ao redor também tenham queimado. Assim, os píxeis da vizinhança (2 linhas e 2 colunas ao redor, ou seja, uma matriz 5x5) passavam a ser considerados como potenciais candidatos a píxeis queimados, formando uma matriz chamada de *buffer_focos*. Dessa forma, o algoritmo se restringe a áreas ao redor de onde foram encontrados focos de calor. Isto se justifica pelo fato de que áreas onde não foi detectado sequer um foco de calor ao longo de todo o mês dificilmente corresponderão a áreas queimadas. A Figura 17 exemplifica a área abrangida pelo buffer dos hotspots em agosto e setembro.

Cada píxel é classificado como queimado ou não através de técnicas de segmentação de imagem conhecidas como limiarização, utilizadas por vários produtos atuais de área queimada. Entretanto, de acordo com Barbosa et al. (1999), a utilização de limiares fixos é prejudicada pelas variações dos efeitos atmosféricos e pelos diferentes tipos de cobertura vegetal, das quais as reflectâncias e as temperaturas são dependentes. Para contornar este problema, foram utilizados, em conjunto com os limiares fixos, técnicas de geração automática de limiares variáveis, desenvolvidas a partir do cálculo da média e do desvio padrão na vizinhança do píxel (Roy et al., 1999; Barbosa et al., 1999; Libonati et al., 2013).

Para os píxeis contidos no buffer dos focos de calor, foi aplicado o Filtro do Limiar Fixo. São classificados como queimados os píxeis que atendem a um dos dois critérios a seguir:

$$\text{a) } W_t \leq 0,10; \text{ ou} \tag{5}$$

$$\text{b) } \frac{\Delta W_{t-(t-1)}}{W_t} \leq -0,2 \text{ e } W_t \leq 0,18. \tag{6}$$

Em que W_t corresponde ao valor do índice de queimadas W no mês t e $\Delta W_{t-(t-1)}$ corresponde à diferença de W entre os meses t e $t-1$. Os píxeis que correspondem a estes critérios formam a matriz *burned* de “píxeis-semente” (do inglês “seed points”).

Aos píxeis que fazem parte do buffer de hotspots, mas que não alcançaram os limiares fixos foi então aplicado o Algoritmo Contextual, em que um píxel é considerado como queimado ou não através da comparação de suas características com as da sua vizinhança, definida como uma matriz de 5x5 píxeis ao redor de um píxel-semente. A estatística da vizinhança é composta pelo cálculo da média e do desvio padrão do índice W . São adicionados à matriz de píxeis queimados aqueles que satisfazem a seguinte condição: $W \leq (\text{média de } W + \text{desvio padrão de } W)$ da vizinhança. Cada novo píxel detectado como queimado nesta etapa é considerado uma nova semente na iteração subsequente. Novas iterações são realizadas até não haver nenhuma nova semente. Porém, a fim de remover os *outliers*, se em uma janela 5x5 só há um único *Seed Point*, este é então removido e deixa de ser considerado como queimado.

O referido algoritmo de detecção de píxeis queimados pode ser resumido no esquema apresentado na Figura 18.

Buffer dos hotspots de agosto e setembro de 2005

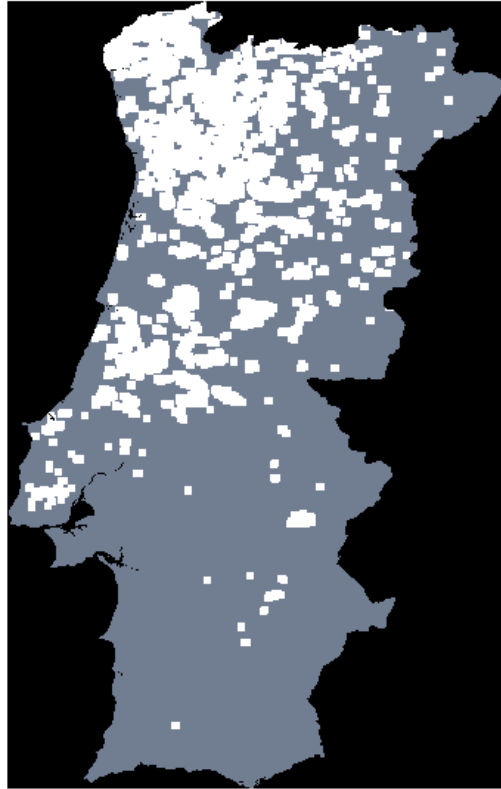


Figura 17. Área ao redor dos hotspots ocorridos em agosto e setembro de 2005, ou seja, regiões onde o algoritmo procurará por áreas queimadas.

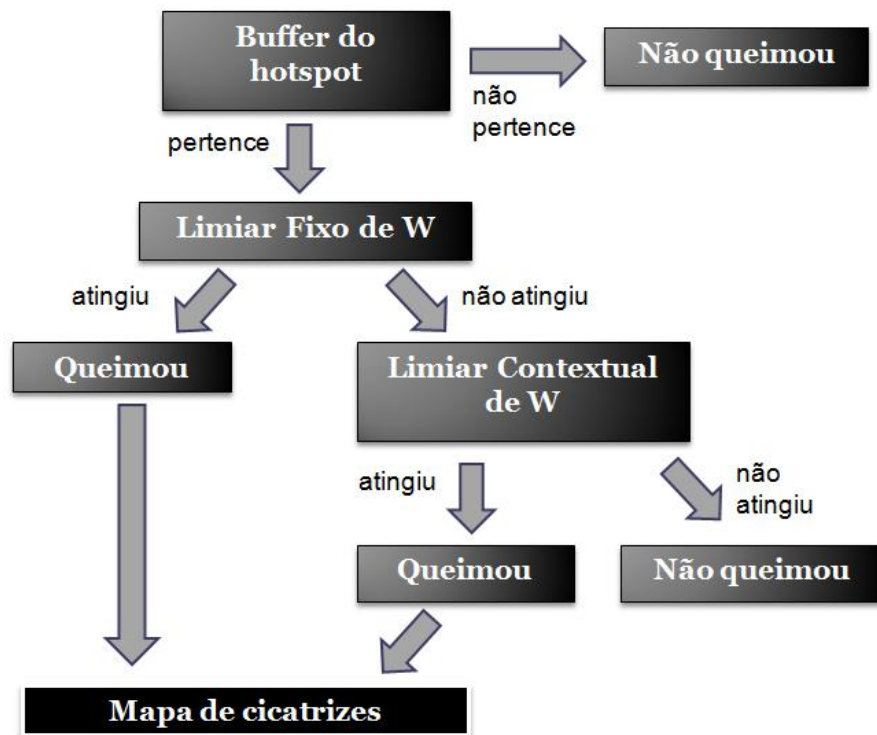


Figura 18. Esquema de funcionamento do algoritmo de detecção de áreas queimadas.

4.3.6. Datação

O método de datação consiste em identificar o dia em que há uma queda brusca do valor de W naqueles píxeis previamente identificados como queimados no item anterior, o que seria indicativo do dia da queima. Para cada dia D são considerados os valores médios de W de n dias anteriores e n dias posteriores (neste trabalho, o número n de dias foi 6). A seguir o algoritmo calcula a separabilidade temporal (S) entre os dois grupos de observações, selecionando o dia com o máximo valor de separabilidade, ou seja, seleciona o dia em que ocorreu a mudança brusca do índice W. Tal método de datação segue a metodologia proposta por Giglio et al. (2009), e as equações utilizadas estão discriminadas abaixo:

$$\bar{W}_{pre}(x, y) = \text{média}(W_i(x, y)), i = \{D - 6: D\} \quad (7)$$

$$\sigma_{pre}(x, y) = \text{desvio padrão}(W_i(x, y)), i = \{D - 6: D\} \quad (8)$$

$$\bar{W}_{pos}(x, y) = \text{média}(W_i(x, y)), i = \{D: D + 6\} \quad (9)$$

$$\sigma_{pos}(x, y) = \text{desvio padrão}(W_i(x, y)), i = \{D: D + 6\} \quad (10)$$

$$S(x, y) = \frac{\Delta W(x, y)}{[\sigma_{pre}(x, y) - \sigma_{pos}(x, y)]/2} \quad (11)$$

$$\Delta W(x, y) = \bar{W}_{pre}(x, y) - \bar{W}_{pos}(x, y) \quad (12)$$

Assim, como pode ser visto na Figura 19, diminuições repentinas e grandes nos valores de W implicam em S positivos; valores constantes ou variações graduais levam a um S próximo de zero, enquanto que aumentos de W implicam em um valor de S negativo. O maior valor positivo de S é então considerado como o dia da queima.

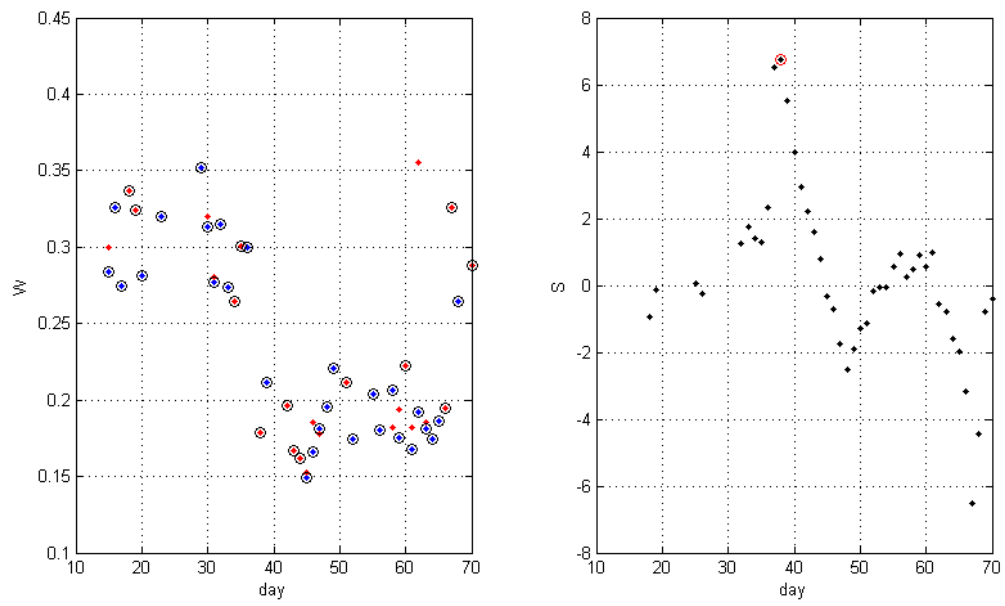


Figura 19. Exemplo de série temporal dos valores dos índices W (esquerda) e S (direita) para um determinado píxel. Na figura da esquerda, círculos vermelhos indicam que os dados foram obtidos através do satélite Terra e azuis, do satélite Aqua. Na figura da direita, o círculo vermelho indica o maior valor de S. Observa-se o salto no dia 38, devido à variação do índice W antes e depois do fogo. Fonte: Libonati et al. (2012b).

5. RESULTADOS

Os resultados serão apresentados em duas componentes: a primeira se refere ao método de identificação de áreas queimadas e a segunda é relativa ao método de datação.

5.1. Identificação de áreas queimadas

A Figura 20 mostra os valores de W_t e $\Delta W_{t(t-1)}/W_t$ para julho, agosto e setembro de 2005, calculados pelo algoritmo. As áreas queimadas se concentraram em píxeis com baixos valores de W (baixos valores de umidade) e/ou com valores negativos de $\Delta W_{t(t-1)}/W_t$ (diferença normalizada entre o valor de W no mês corrente e o mês anterior), ou seja, píxeis em que o valor de W diminuiu de um mês para o outro.

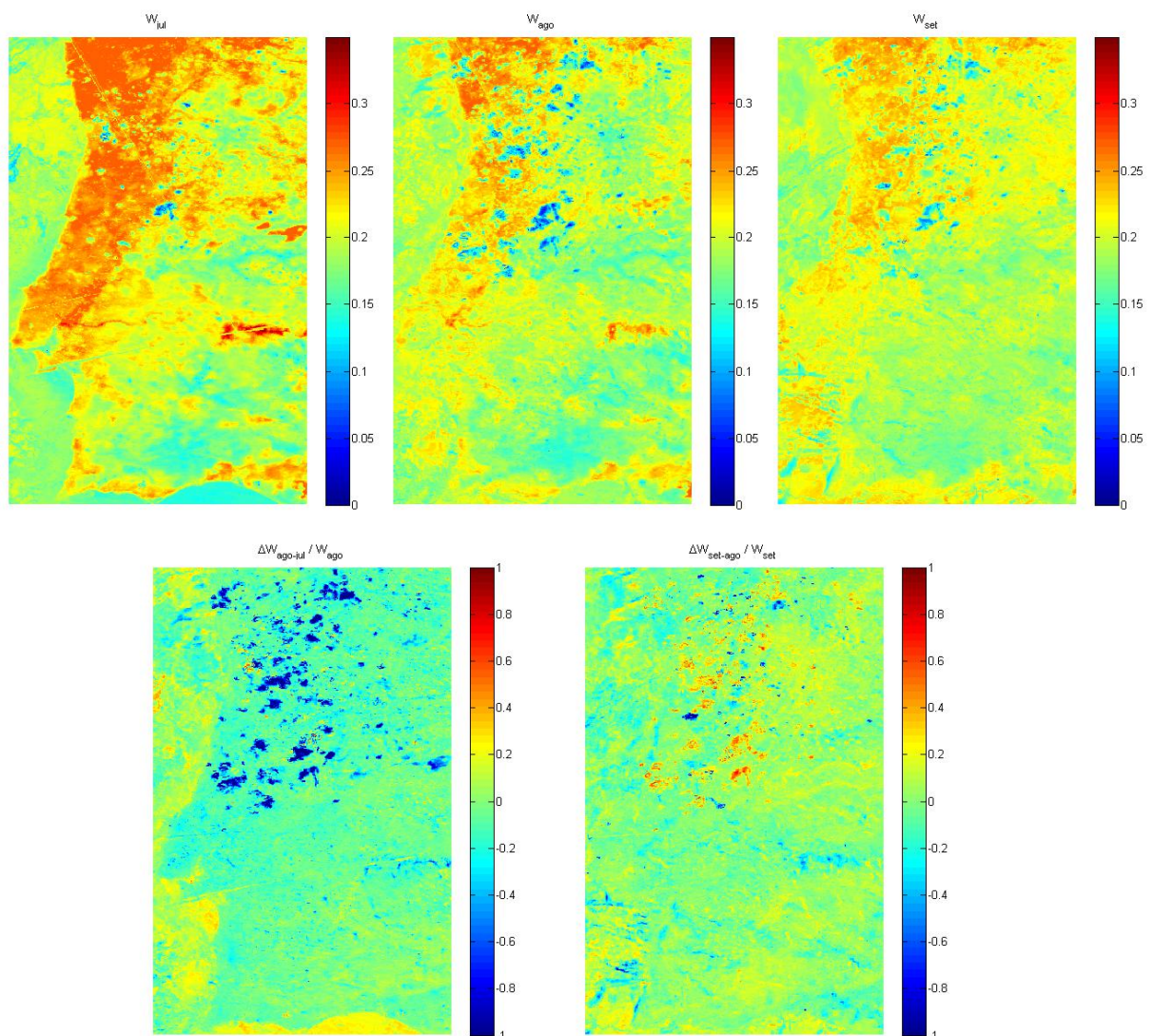


Figura 20. Compostos dos valores mínimos do Índice W nos meses de julho (painel superior esquerdo), agosto (painel superior central) e setembro (painel superior direito). Diferenças normalizadas entre os compostos de agosto e julho (painel inferior esquerdo) e entre os de setembro e agosto (painel inferior direito).

Como citado anteriormente, foram aplicados aos compostos temporais de W_t e $\Delta W_{t-(t-1)}/W_t$ os limiares fixos e os algoritmos contextuais. Esta metodologia foi aplicada a ambos os meses de agosto e setembro de 2005, resultando em dois mapas de cicatrizes que, somados, correspondem ao mapa de cicatrizes das queimadas ocorridas em agosto e setembro de 2005, apresentados na Figura 21.

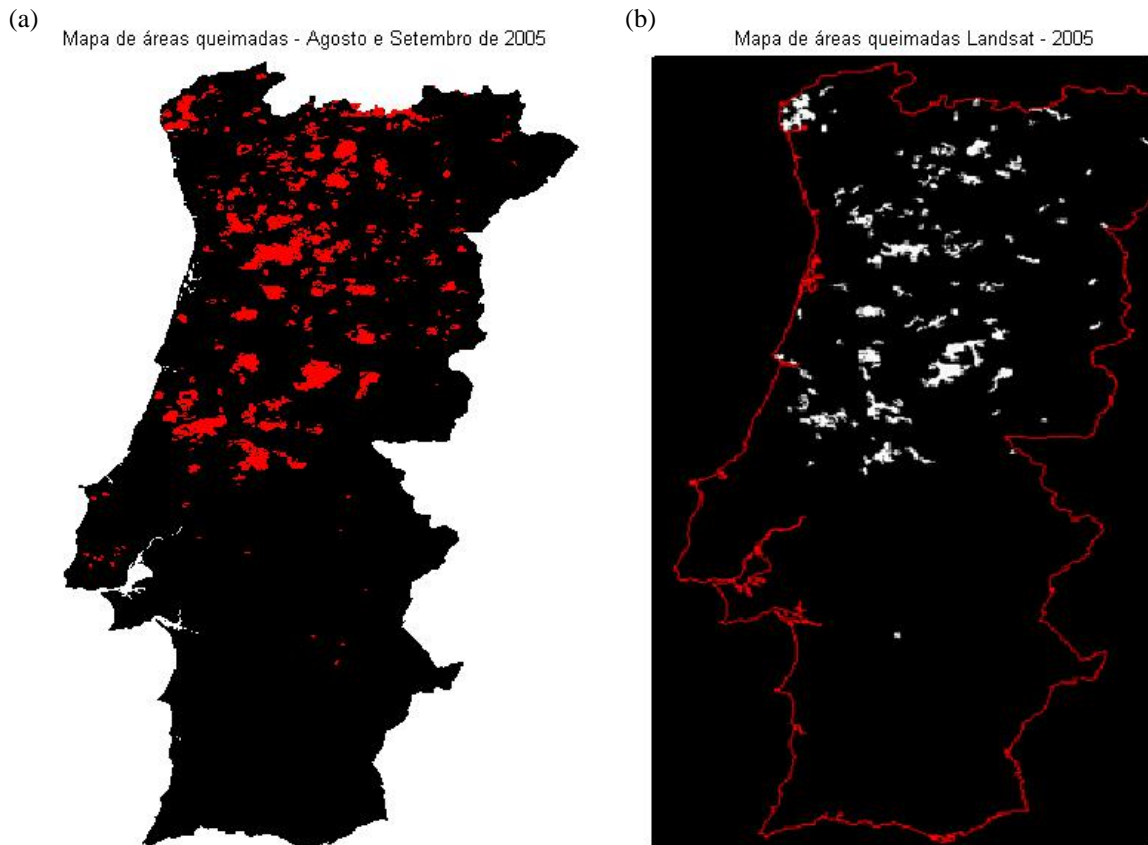


Figura 21. Mapa de áreas queimadas em Agosto e Setembro de 2005, gerado pelo algoritmo com base em imagens MODIS (a) e mapa de referência para o ano de 2005, gerado com base em imagens Landsat (b).

5.2. Validação de áreas queimadas

A validação das áreas queimadas foi feita comparando-se o mapa de cicatrizes gerado pelo algoritmo (Figura 21a) e o mapa de cicatrizes gerado pelo ICNF a partir de imagens Landsat (Figura 21b). Entretanto, as cicatrizes geradas pelo ICNF têm resolução espacial de 30m, enquanto que o mapa de cicatrizes gerado pelo algoritmo tem resolução de 1 km. Desta forma, para comparar os dois mapas, tornou-se necessário rasterizar o mapa de referência, isto é, convertê-lo de shapefile, que é um formato vetorial, em raster, que é uma imagem formada por píxeis, neste caso com resolução de 1 km, a mesma das imagens MODIS. Neste processo,

para cada novo píxel de 1km do novo mapa de referência, calculou-se a proporção de píxeis ICNF (30 m). Assim, foi elaborado um novo mapa de cicatrizes de referência com 1 km em que cada píxel possui associado a si um valor que representa sua porcentagem de área queimada de acordo com o mapa da ICNF de 30 m, como mostrado na Figura 22. Tal procedimento foi baseado nos trabalhos de Boschetti et al. (2004).

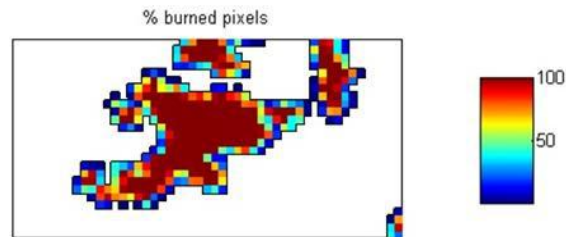


Figura 22. Proporção de área queimada nos píxeis de 1 km de acordo com o mapa ICNF de 30m.

A comparação entre ambos os mapas resultou em uma tabela de contingência (ou matriz de confusão), onde os píxeis corretamente classificados ocupam a diagonal principal, e os erroneamente classificados, a diagonal secundária. A Tabela 6 apresenta uma matriz de confusão para dados dicotômicos, como os tratados neste trabalho, em que existem apenas duas classes: “queimou” e “não queimou”.

Tabela 6. Tabela de contingência ou matriz de confusão para dados dicotômicos. Adaptado de Libonati (2013).

		Referência		
		QUEIMOU	NÃO QUEIMOU	Total Linha
Classificação	QUEIMOU	p_{11}	p_{12}	$p_{11} + p_{12}$
	NÃO QUEIMOU	p_{21}	p_{22}	$p_{21} + p_{22}$
Total Coluna		$p_{11} + p_{21}$	$p_{12} + p_{22}$	$p_{11} + p_{12} + p_{21} + p_{22}$

De acordo com a tabela de contingência, várias medidas de acurácia podem ser derivadas:

1. Acerto Global (AG): Compreende todos os píxeis corretamente identificados, ou seja, tanto os classificados como queimados como os classificados como não-queimados pelo algoritmo.

$$AG = (p_{11} + p_{22}) / (p_{11} + p_{12} + p_{21} + p_{22}) \quad (13)$$

2. Erro Global (EG): Compreende todos os píxeis erroneamente classificados.

$$EG = (p_{12} + p_{21}) / (p_{11} + p_{12} + p_{21} + p_{22}) \quad (14)$$

3. Erro de Comissão (EC): Refere-se à porcentagem dos píxeis classificados como queimados que na verdade não queimaram segundo a referência (ICNF - Landsat).

$$EC = p_{12} / (p_{11} + p_{12}) \quad (15)$$

4. Erro de Omissão (EO): Refere-se à porcentagem dos píxeis queimados do Landsat que não foram identificados como tais pelo algoritmo.

$$EO = p_{21} / (p_{11} + p_{21}) \quad (16)$$

5. Probabilidade de Detecção (POD): É uma medida de acerto que, ao contrário do AG, se importa apenas com os píxeis corretamente identificados como queimados, já que são estes são os píxeis que o algoritmo pretende identificar.

$$POD = p_{11} / (p_{11} + p_{21}) \quad (17)$$

Entretanto, a teoria acima descrita não leva em consideração que existe uma diferença de resolução entre o sensor utilizado para a classificação e o sensor utilizado para gerar os dados de referência. A Figura 23 exemplifica o problema. Dois mapas dicotômicos, cobrindo a mesma área, o primeiro derivado de um sensor de baixa resolução (painel esquerdo) e o outro derivado de um sensor de alta resolução (painel central). O mapa feito com o sensor de baixa resolução possui píxeis que cobrem áreas mistas (queimadas e não-queimadas), conforme Figura 23 painel direito. Conseqüentemente, dependendo da classe a qual este píxel será classificado, levará a erros de omissão ou comissão. Isso porque a tabela de contingência tradicional como mostrada anteriormente dá pesos iguais a cada píxel, independente da proporção de cada classe presente neste píxel (Libonati, 2013).

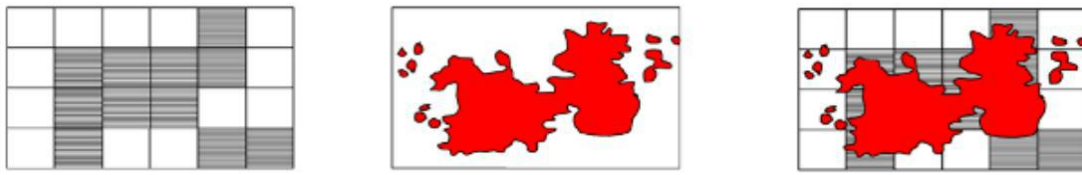


Figura 23. Dois mapas dicotômicos, cobrindo a mesma área, o primeiro derivado de um sensor de baixa resolução (painel esquerdo) e o outro derivado de um sensor de alta resolução (painel central). O mapa feito com o sensor de baixa resolução possui píxeis que cobrem áreas mistas (queimadas e não queimadas). Conseqüentemente, dependendo da classe a qual este píxel será classificado, levará a erros de omissão ou comissão (painel direito). Adaptado de Boschetti et al. (2004).

Desta forma, as medidas de acurácia descritas acima (Eq.11, 12, 13, 14 e 15) foram calculadas de acordo com os estudos desenvolvidos por Binaghi et al. (1999). Neste caso, a concordância ou discordância entre os dados de referência (alta resolução) e os dados classificados (baixa resolução) são calculadas levando em consideração a proporção de área queimada/não-queimada dos dados de referência que se encontra em cada píxel dos dados classificados. Por exemplo, se um píxel é classificado como queimado e de acordo com os dados de referência possui 60% de sua área como queimada, então este píxel terá uma proporção de 0,6 como acerto de queimada e uma proporção de 0,4 como erro de comissão. No caso tradicional, este píxel seria totalmente classificado como acerto de queimada, sem nenhum erro de comissão. Por outro lado, se um píxel é classificado como não-queimado, porém possui 20% de área queimada de acordo com o dado de referência, então este píxel terá uma proporção de 0,8 de acerto de não-queimada e apenas 0,2 de erro de omissão. Este tipo de abordagem permite um cálculo mais justo acerca da acurácia do classificador do que a técnica tradicional, pois leva em consideração a proporção real de área queimada dentro de um píxel de acordo com os dados de referência (Libonati, 2013). Recentemente alguns autores têm conduzido abordagens similares no caso da validação de áreas queimadas com produtos de baixa resolução, nomeadamente Padilla et al. (2014), Tsela et al. (2014) e Libonati et al. (submetido).

As tabelas a seguir apresentam a matriz de confusão (Tabela 7) e as medidas de acurácia AG, EG, EC, EO e POD (Tabela 8).

Tabela 7. Tabela de Contingência construída de acordo com Binaghi et al. (1999). A classificação foi feita com dados do instrumento MODIS, enquanto os dados de referência foram baseados no Landsat.

		LANDSAT		
MODIS		QUEIMOU	NÃO QUEIMOU	Total Linha
	QUEIMOU	1596,7	3165,0	4761,7
	NÃO QUEIMOU	943,7	87765,6	88709,4
Total Coluna		2540,4	90930,6	93471,0

Tabela 8. Índices de acurácia calculados a partir da Tabela de Contingência: Acerto Global (AG), Erro Global (EG), Erro de Comissão (EC), Erro de Omissão (EO) e Probabilidade de Detecção (POD).

Índices de Acurácia	
AG	95,6%
EG	4,4%
CE	66,5%
OE	37,1%
POD	62,9%

A comparação entre os erros de omissão, de comissão e os acertos é feita na Figura 24. Píxeis da cor verde indicam áreas corretamente identificadas como queimadas; píxeis da cor vermelha indicam erros de comissão; e píxeis da cor magenta indicam erros de omissão.

De acordo com a Tabela 8, 62,9% dos píxeis queimados segundo o ICNF, com base em imagens Landsat de fim de estação, foram corretamente identificados pelo algoritmo, com base em imagens MODIS. Este resultado é bastante razoável, uma vez que o algoritmo detecta apenas queimadas ocorridas em agosto e setembro, enquanto o mapa de referência é construído em uma base anual. Ou seja, utilizando apenas imagens referentes a julho, agosto e setembro de 2005, o algoritmo foi capaz de detectar mais da metade da área queimada em todo o ano de 2005, segundo o Landsat.

Validação de áreas queimadas - Agosto e Setembro de 2005

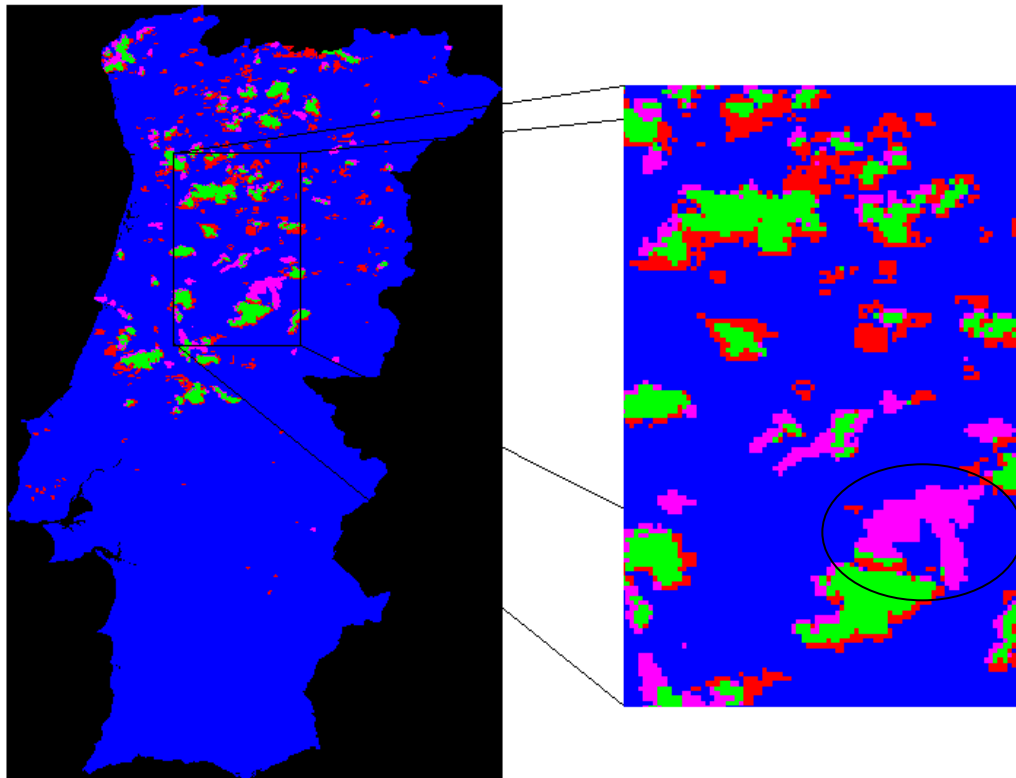


Figura 24. Validação da identificação de áreas queimadas. Píxeis da cor verde indicam áreas corretamente identificadas como queimadas; píxeis da cor vermelha indicam erros de comissão; e píxeis da cor magenta indicam erros de omissão.

Os casos de omissão representam 37,1% dos píxeis queimados do mapa de referência. Levando-se em consideração as datas dos hotspots, verifica-se que 22,5% de todas as omissões referem-se a queimadas ocorridas em meses diferentes de agosto e setembro. Portanto, cerca de 23% das omissões referem-se a queimadas fora do período de imagens utilizadas, não podendo ser detectáveis pelo algoritmo. A maior parte desses casos está associada a hotspots de julho (15,2%), incluindo a maior cicatriz não identificada pelo algoritmo, em destaque no painel direito da Figura 24. Por outro lado, quase 30% das omissões possuem hotspots em agosto e setembro e deveriam, dessa forma, terem sido detectadas (Figura 25). Quase 50% dos casos de omissão ocorrem em píxeis sem a presença de hotspots. Isso pode ocorrer por três causas:

- a) Por utilizarmos somente hotspots com mais de 50% de grau de confiança;
- b) O algoritmo de detecção de hotspots do MODIS falhou na detecção;
- c) O mapa de cicatrizes do ICNF está incorreto em alguns casos, tendo detectado cicatrizes que não correspondem a queimadas (por exemplo, desmatamento).

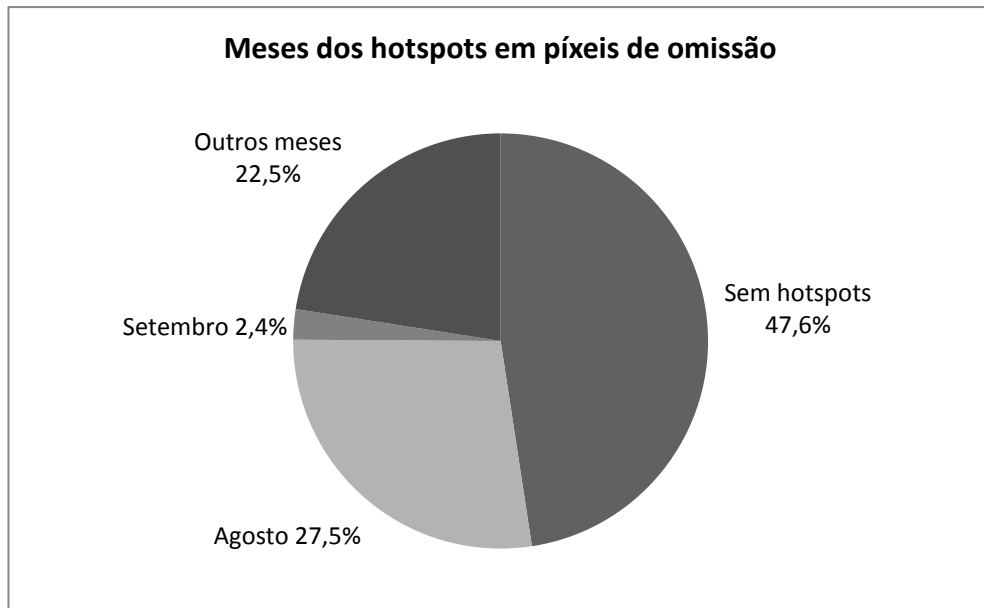


Figura 25. Gráfico da frequência relativa dos meses dos hotspots em píxeis caracterizados como casos de omissão.

Outra questão importante é a proporção de área queimada dos píxeis. Percebe-se pela Figura 26 que mais da metade (55,4%) de todos os casos de omissão referem-se a píxeis do MODIS com proporções de 1 a 50%, isto é, píxeis nos quais apenas 1 a 50% da área foi queimada segundo a referência. Estes píxeis, portanto, são mais difíceis de serem identificados como queimados, devido à resolução de 1 km dos dados. A sua não-identificação trata-se portanto de uma limitação do algoritmo, por utilizar dados de baixa resolução.

Uma outra possível fonte de erro para o algoritmo diz respeito às queimadas de sub-bosque, isto é, queimadas que afetam a vegetação de baixa estatura, abaixo do dossel florestal, porém deixam intacta a copa das árvores. Devido à baixa resolução dos dados, o algoritmo pode não ser capaz de detectar tais eventos de fogo.

Dentre os píxeis detectados como queimados pelo nosso algoritmo, 66,5% foram erroneamente identificados como queimados, ou seja, caracterizam-se como casos de omissão. Contudo, 14,8% destes casos possuem hotspots em agosto e setembro (Figura 27); isto é, se estes píxeis, que atingiram os limiares do algoritmo e portanto possuem baixos valores de W , também são píxeis em que o MODIS detectou ao menos um foco de calor, então é bastante provável que eles tenham de fato queimado. Neste caso, se tratariam de casos de omissão do mapa de referência, o qual, apesar de ter uma maior resolução espacial e ser elaborado de forma bastante precisa, também está sujeito a erros, principalmente devido à sua menor resolução temporal.

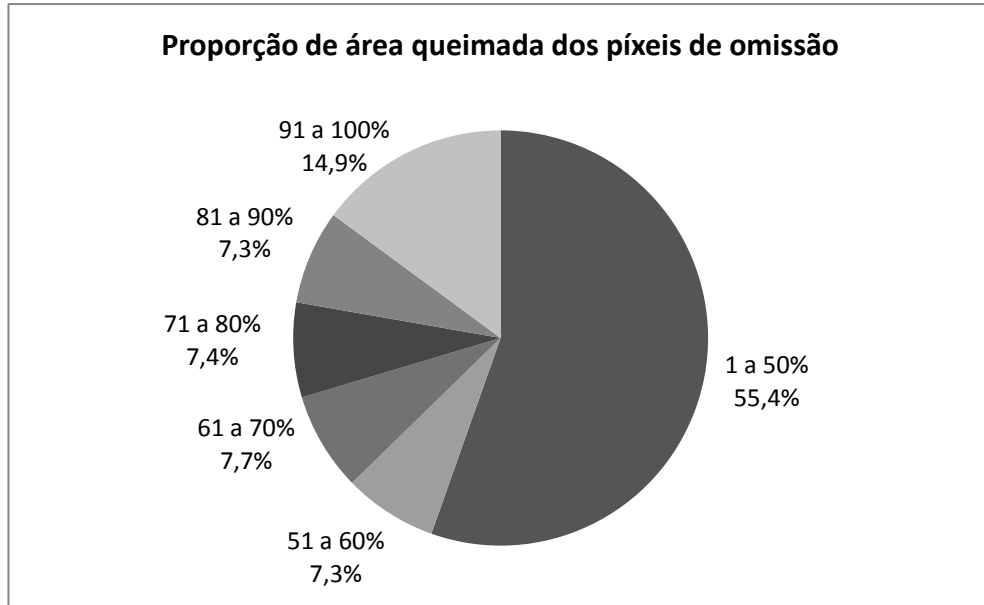


Figura 26. Gráfico da Proporção de área queimada nos píxeis caracterizados como casos de omissão. Apenas 14,9% das omissões correspondem a píxeis em que 90 a 100% da área queimou.

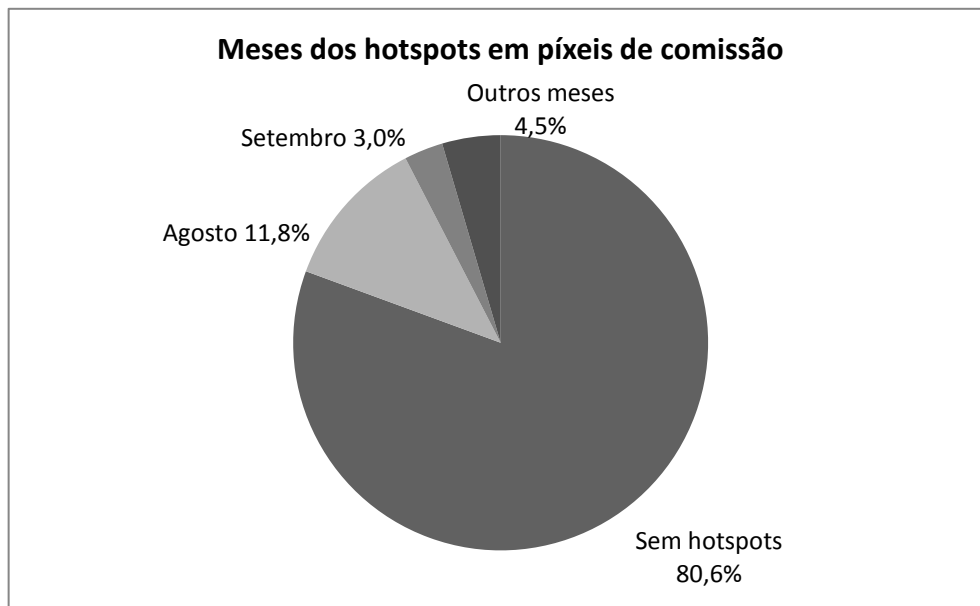


Figura 27. Gráfico da frequência relativa dos meses dos hotspots em píxeis caracterizados como casos de comissão. 20,7% das comissões possuem hotspots em agosto e setembro, o que pode ser um indicativo de acerto do algoritmo e omissão do mapa de referência.

Entretanto, é importante mencionar que a maioria dos casos de erros de comissões do algoritmo encontra-se nas bordas das cicatrizes de queimadas. Portanto, esses erros de comissões do algoritmo não são necessariamente falsos alarmes, mas sim uma forma de sobrestimativa do tamanho das cicatrizes. Temos que ter em conta que erros de omissões e comissões podem ocorrer também devido a falhas de georreferenciamento. Como utilizamos compostos temporais, basta que uma imagem esteja mal georreferenciada para que o

composto esteja também. Este fato pode explicar os erros de omissão e comissão nas bordas das cicatrizes.

5.3. Datação

O resultado da datação é apresentado na Figura 28, em dias. O dia 1 refere-se a 1 de agosto e o dia 61, a 30 de setembro de 2005. No painel esquerdo são apresentadas as datas identificadas pelo algoritmo. No painel direito, são representados os dias de ocorrência dos hotspots nos mesmos píxeis, quando disponíveis. Os tons mais escuros de azul referem-se a píxeis não-queimados (valor zero) e píxeis fora de Portugal (valores negativos)

A atribuição de datas só foi feita para píxeis corretamente identificados como queimados pelo algoritmo (seção 5.2), ou seja, omissões e comissões foram ignorados.

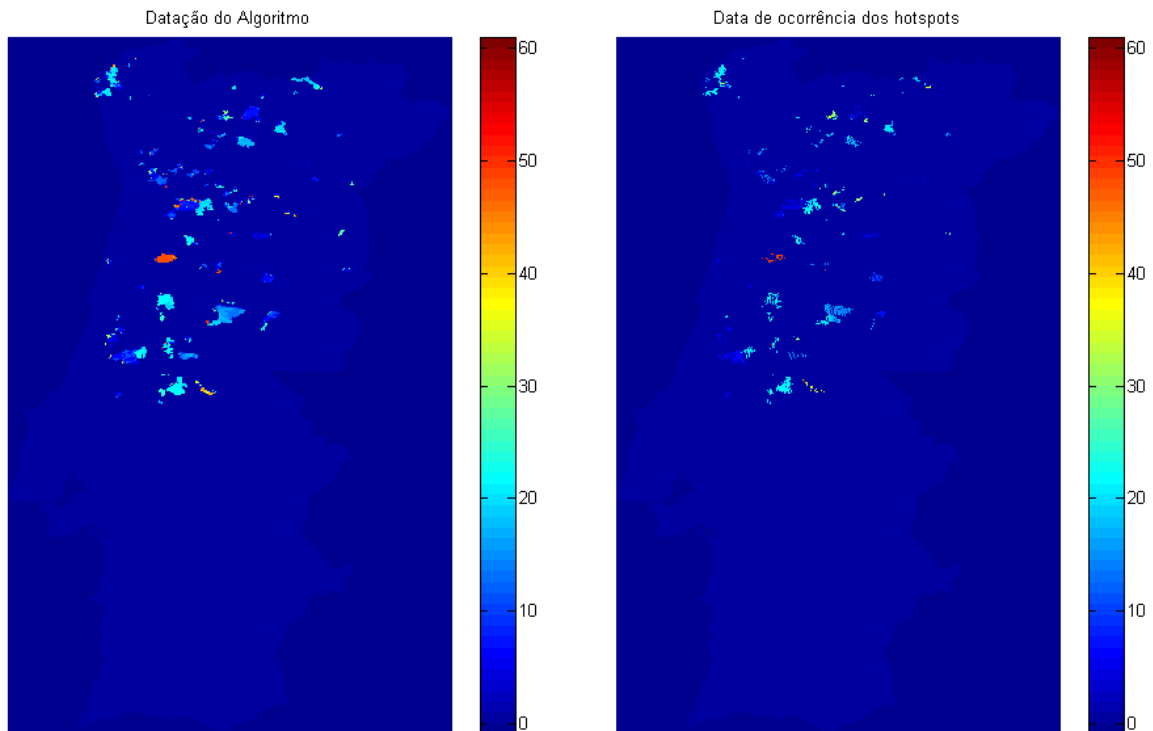


Figura 28. Dias de ocorrência das queimadas corretamente identificadas pelo algoritmo, em dias. O dia 1 refere-se a 1 de agosto e o dia 61, a 30 de setembro de 2005. Os tons mais escuros de azul referem-se a píxeis não-queimados (valor zero) e píxeis fora de Portugal (valores negativos) (painel esquerdo). No painel direito, são representados os dias de ocorrência dos hotspots nos mesmos píxeis, quando disponíveis.

5.4. Validação da datação

A validação da datação foi feita comparando-se as datas atribuídas pelo algoritmo (entre 01 de agosto e 30 de setembro) e as datas dos hotspots ocorridos em agosto e setembro de 2005 nos mesmos píxeis, quando disponíveis.

Tais dados de hotspots são passíveis de erros, contudo, como neste trabalho optou-se por se utilizar apenas hotspots com confiança maior que 50%, supõe-se que eles sejam de fato focos de calor relacionados a incêndios.

Dentre os píxeis que possuíam hotspots (e, portanto, píxeis em que a validação pode ser feita), 63,5% foram corretamente datados pelo algoritmo, isto é, a diferença entre a datação e as datas de ocorrência dos hotspots é igual ou inferior a dois dias, para mais ou para menos (Figura 29). Se considerarmos como acertos de datação diferenças de cinco dias ou menos, a porcentagem de píxeis corretamente datados sobe para 75,0%. Nota-se, também, que 14,6% das datações foram subestimadas (diferença menor que 5 dias) e 10,4%, superestimadas (diferença maior que 5 dias).

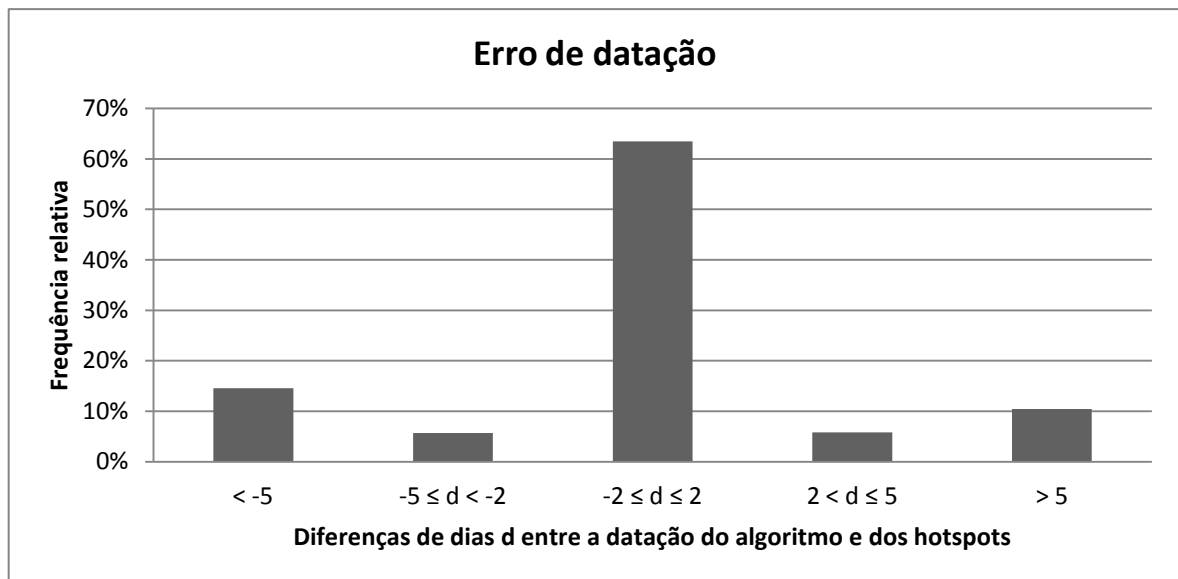


Figura 29. Gráfico da frequência relativa do erro de datação, representado pela diferença de dias d entre a datação do algoritmo e as datas de ocorrência de hotspots.

6. CONCLUSÕES

Um novo método automático de identificação e datação de áreas queimadas foi aplicado em Portugal, baseado nas cicatrizes deixadas pelo fogo. Foram utilizadas imagens do sensor MODIS a bordo dos satélites Aqua e Terra entre julho e setembro de 2005, o segundo pior ano em termos de área queimada em Portugal.

Recorrendo à informação dos canais MIR e NIR, foi calculado o Índice de Queimadas (V,W), em que a coordenada V é uma boa classificadora do tipo de superfície a que o píxel se refere, e W, uma boa quantificadora do conteúdo de água.

Foram gerados compostos mensais com os valores mínimos de W na área de interesse, assim como as diferenças entre um mês e outro. Nestes compostos, nos píxeis nas proximidades de hotspots ocorridos em agosto e setembro, foram aplicados limiares fixos e contextuais aos valores de W, sendo então gerado um mapa com os píxeis que atenderam aos critérios e foram identificados como queimados.

A comparação entre o mapa de áreas queimadas gerado pelo algoritmo (referente a agosto e setembro) e o gerado pelo ICNF com base em imagens do Landsat de fim de estação (referente a todo o ano de 2005) resultou em concordância, representada por um Acerto Global de 95,6%. A POD foi de 62,9%, ou seja, o método automático baseado em imagens de baixa resolução de julho, agosto e setembro identificou corretamente quase dois terços das cicatrizes de queimadas ocorridas em todo o ano de 2005.

Casos de omissão e comissão foram observados principalmente nas bordas de cicatrizes corretamente identificadas, onde a proporção de área queimada não é tão grande e o sinal no Índice W, não tão pronunciado. Erros de comissão também foram observados em cicatrizes isoladas, em geral pequenas e associadas a hotspots. É possível, portanto, que tais píxeis correspondam na verdade a erros de omissão do mapa de referência, uma vez que atingiram os limiares do algoritmo e portanto possuem baixos valores de W, além de serem píxeis em que o MODIS detectou ao menos um foco de calor (sendo assim bastante provável que eles tenham de fato queimado). Isso seria possível devido ao fato do mapa de referência ser baseado em imagens de fim de estação, quando o sinal radiométrico de algumas cicatrizes pequenas pode já ter sido perdido; além disso, o satélite Landsat possui uma menor resolução temporal, o que naturalmente leva a um número menor de imagens disponíveis para dado local.

Foram observados também erros de omissão em cicatrizes isoladas, em geral de grande extensão. Através da análise da data dos hotspots nestas áreas, quando disponíveis, conclui-se que tais cicatrizes não-identificadas correspondem a outros meses que não agosto e

setembro. Em especial a maior cicatriz não identificada, próximo ao centro do país, que se refere a queimadas ocorridas em julho.

Dessa forma, fica evidente que o algoritmo obteria resultados ainda melhores se utilizasse imagens do MODIS de outros meses do ano de 2005, em especial de junho. Isso porque para detectar as queimadas ocorridas em um dado mês, são necessárias imagens deste mês e do anterior, de forma a serem calculados os valores de W e a sua diferença entre os meses. Com imagens de junho, as cicatrizes de julho também seriam detectadas, e como a maior parte das queimadas ocorre no verão, a concordância com o mapa anual do ICNF seria quase total.

A datação dos fogos foi feita com base na análise da série temporal dos valores do Índice W , uma vez que é esperada uma variação brusca no dia da queima do píxel. Assim, o dia com maior separabilidade temporal S é considerado o dia da ocorrência da queimada.

As datas de ocorrência, entre 1 de agosto (dia 1) e 30 de setembro (dia 61), foram calculadas somente para os píxeis corretamente identificados como queimados pelo algoritmo (já que não faz sentido datar uma cicatriz considerada como um erro de comissão/omissão do algoritmo).

A validação da datação foi possível apenas em píxeis onde foram detectados hotspots em agosto e setembro, uma vez que os hotspots constituem-se como a única fonte de dados com a informação temporal associada. Dentre os píxeis que possuíam hotspots, 63,5% foram corretamente datados pelo algoritmo, isto é, a diferença entre a datação e as datas de ocorrência dos hotspots é igual ou inferior a dois dias, para mais ou para menos. Se considerarmos como acertos de datação diferenças de cinco dias ou menos, a porcentagem de píxeis corretamente datados sobe para 75,0%. Nota-se, também, que 14,6% das datações foram subestimadas (diferença menor que 5 dias) e 10,4%, superestimadas (diferença maior que 5 dias).

Desta forma, neste trabalho, a datação de áreas queimadas foi feita com sucesso por um algoritmo automático, utilizando apenas as imagens do MODIS (e o Índice W calculado). Este resultado é bastante relevante, considerando-se que as cicatrizes do mapa de referência não possuem qualquer informação temporal associada.

Como trabalhos futuros pretende-se alargar o conjunto de dados para uma maior quantidade de meses com o objetivo de reduzir o número de omissões. Para reduzir as comissões, pretende-se estudar novos limiares a serem aplicados no índice W .

Os resultados apresentados parecem promissores no que respeita a identificação e datação de áreas queimadas de forma operacional, o que poderá auxiliar estudos da química da atmosfera e dos regimes de fogos na vegetação.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Barbosa, P. M.; Grégoire, J. M.; Pereira, J. M. C. An algorithm for extracting burned areas from time series of AVHRR GAC data applied at a continental scale. **Remote Sensing of Environment**, v. 69, n. 3, p. 253-263, 1999.

Barros, A. M. G.; Pereira, J. M. C.; Lund, U. J. Identifying geographical patterns of wildfire orientation: A watershed-based analysis. **Forest Ecology and Management**, v. 264, p. 98-107, 2012.

Benito, P. M.; Torralbo, A. F. **Landsat and MODIS Images for Burned Areas Mapping in Galicia, Spain**. 2012. 93 p. Dissertação (Mestrado em Geoinformática) - School of Architecture and the Built Environment, KTH Royal Institute Of Technology, Estocolmo, 2012.

Binaghi, E.; Brivio, P. A.; Ghezzi, P.; Rampini, A.. A fuzzy set-based accuracy assessment of soft classification. **Pattern recognition letters**, v. 20, n. 9, p. 935-948, 1999.

Bird, R. E. A simple, solar spectral model for direct-normal and diffuse horizontal irradiance. **Solar energy**, v. 32, n. 4, p. 461-471, 1984.

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, n. 3, p. 280-292, 2004.

Boyd, D. S.; Petitcolin, F. Remote sensing of the terrestrial environment using middle infrared radiation (3.0–5.0 μ m). **International Journal of Remote Sensing**, v. 25, n. 17, p. 3343-3368, 2004.

Boyd, D. S.; Duane, W. J. Exploring spatial and temporal variation in middle infrared reflectance (at 3.75 μ m) measured from the tropical forests of west Africa. **International Journal of Remote Sensing**, v. 22, n. 10, p. 1861-1878, 2001.

Direcção Geral dos Recursos Florestais (DGRF). **Incêndios Florestais – Relatório de 2005**. Lisboa, 2006. 27p. Disponível em: <<http://www.icnf.pt/portal/florestas/dfci/Resource/doc/rel/if-rel2005.pdf>>. Acesso em: 26 jan. 2014.

Earth Observing System Data and Information System (EOSDIS). **Near Real-Time Data - FAQ**. Disponível em: <<https://earthdata.nasa.gov/data/near-real-time-data/faq/firms>>. Acesso em: 05 mar. 2014.

Franca, H.; Setzer, A. W. AVHRR temporal analysis of a savanna site in Brazil. **International Journal of Remote Sensing**, v. 19, n. 16, p. 3127-3140, 1998.

Fraser, R. S.; Kaufman, Y. J. The relative importance of aerosol scattering and absorption in remote sensing. **Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on**, n. 5, p. 625-633, 1985.

García, M; Chuvieco, E. Assessment of the potential of SAC-C/MMRS imagery for mapping burned areas in Spain. **Remote Sensing of Environment**, v. 92, n.s 3, p. 414-423, 2004.

Gates, D. M.; Keegan, H. J.; Schleter, J. C; Weidner, V. R. Spectral properties of plants. **Applied optics**, v. 4, n. 1, p. 11-20, 1965.

Giglio, L.; Loboda, T.; Roy, D. P.; Quayle, B.; Justice, C. O. An active-fire based burned area mapping algorithm for the MODIS sensor. **Remote Sensing of Environment**, v. 113, n. 2, p. 408-420, 2009.

Gilabert, M. A.; Piqueras, J. G.; Garcia-Haro, J.; Meliá, J. Designing a generalized soil-adjusted vegetation index (GESAVI). In: **Remote Sensing**. International Society for Optics and Photonics, 1998. p. 396-404.

Global Fire Monitoring Centre. Forest Fires in Portugal in 2005 – An Overview. **International Forest Fire News**, n. 26. p.37-45, 2006. Disponível em: < http://www.fire.uni-freiburg.de/iffn/iffn_34/03-IFFN-34-Portugal-Country-Report-2.pdf>. Acesso em: 26 jan. 2014.

Holben, B. N. Characteristics of maximum-value composite images from temporal AVHRR data. **International Journal of Remote Sensing**, v. 7, n. 11, p. 1417-1434, 1986.

Huete, A. R. A soil-adjusted vegetation index (SAVI). **Remote sensing of environment**, v. 25, n. 3, p. 295-309, 1988.

Hunt Jr, E. R.; Rock, B. N. Detection of changes in leaf water content using near-and middle-infrared reflectances. **Remote Sensing of Environment**, v. 30, n. 1, p. 43-54, 1989.

Instituto Português do Mar e da Atmosfera (IPMA). **Clima de Portugal Continental**.

Disponível em:

<<http://www.ipma.pt/pt/educativa/tempo.clima/index.jsp?page=clima.pt.xml>>. Acesso em: 01 mar.2014.

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). **Portal do Monitoramento de Queimadas e Incêndios**. [São José dos Campos], 2012. Disponível em: <<http://www.inpe.br/queimadas/faq.php>>. Acesso em: 20 mar. 2014.

Kaufman, Y. J.; Remer, L. A. Detection of forests using mid-IR reflectance: an application for aerosol studies. **Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on**, v. 32, n. 3, p. 672-683, 1994.

Kerber, A. G.; Schutt, J. B. Utility of AVHRR channels 3 and 4 in land-cover mapping. **Photogrammetric engineering and remote sensing**, v. 52, n. 12, p. 1877-1883, 1986.

Key, C. H.; Benson, N. C. Landscape assessment. **FIREMON: Fire effects monitoring and inventory system**. Gen. Tech. Rep. RMRS-GTR-164-CD, Fort Collins, CO: US Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station, 2006.

Libonati, R.; Morelli, F.; Setzer, A.; DaCamara, C.; Pereira, J. M. C. Assinatura espectral de áreas queimadas em produtos MODIS. **Anais do XIV Congresso Brasileiro de Meteorologia**. Florianópolis, 2006.

Libonati, R.; DaCamara, C. C.; Pereira, J. M.; Setzer, A.; Morelli, F. A new optimal index for burnt area discrimination in satellite imagery. In: **2007 EUMETSAT Meteorological Satellite Conference and the 15th Satellite Meteorology and Oceanography Conference of the American Meteorological Society**. 2007.

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**, v. 114, n. 4, p. 831-843, 2010.

Libonati, R. **Using middle-infrared reflectance for burned area detection**. 2010. 182 p. Tese (Doutorado em Ciências Geofísicas e da Geoinformação - Meteorologia) – Faculdade de Ciências, Universidade de Lisboa, Lisboa, 2010.

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**, v. 115, n. 6, p. 1464-1477, 2011.

Libonati, R.; DaCamara, C. C.; Pereira, J. M. C.; Peres, L. F. Retrieving middle-infrared reflectance using physical and empirical approaches: implications for burned area monitoring. **Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on**, v. 50, n. 1, p. 281-294, 2012a.

Libonati, R.; Setzer, A.; Morelli, F.; DaCamara, C.; Calado, T. Algoritmo automático de detecção de áreas queimadas utilizando dados MODIS: resultados preliminares. **Anais do XVII Congresso Brasileiro de Meteorologia**. Gramado, 2012b.

Libonati, R.; Setzer, A.; Morelli, F.; DaCamara, C. Algoritmo automático de detecção de áreas queimadas em imagens MODIS – aplicação na região de Jalapão, TO. **Anais do XVI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**. Foz do Iguaçu, 2013.

Libonati, R. S. Desenvolvimento de mapas de estimativa de área queimada utilizando dados de satélite. Cachoeira Paulista: INPE, 2013. 94p. (Relatório científico FAPESP).

Libonati, R.; Setzer, A.; DaCamara, C.; Morelli, F. Detection and monitoring of Brazilian burned areas using 4µm MODIS data. (Submetido à revista Remote Sensing of Environment).

Martín, M. P.; Chuvieco, E. Cartografía de grandes incendios forestales en la Península Ibérica a partir de imágenes NOAA-AVHRR. **Departamento de Geografía. Alcalá de Henares, Universidad de Alcalá**, 1998.

Martín, M. P.; Gómez, I.; Chuvieco, E. Performance of a burned-area index (BAIM) for mapping Mediterranean burned scars from MODIS data. In: **Proceedings of the 5th International Workshop on Remote Sensing and GIS Applications to forest fire management: fire effects assessment**. Paris, Universidad de Zaragoza, GOFD GOLD, EARSeL, 2005. p. 193-198.

Meier, A.; Toon, G. C.; Rinsland, C.P.; Goldman, A. Spectroscopic atlas of atmospheric microwindows in the middle infrared. Swedish Institute of Space Physics, Kiruna, preprint 123, 1997.

Meneses, P. R.; Almeida, T. **Introdução ao Processamento de Imagens de Sensoriamento Remoto**. Brasília: [s.n.], 2012. 266p. Disponível em: <<http://www.cnpq.br/documents/10157/56b578c4-0fd5-4b9f-b82a-e9693e4f69d8>>. Acesso em: 23 mar. 2014.

Mieville, A.; Granier, C.; Lioussé, C.; Guillaume, B.; Mouillot, F.; Lamarque, J. F.; Grégoire, J. M.; Pétron, G. Emissions of gases and particles from biomass burning during the 20th century using satellite data and an historical reconstruction. **Atmospheric Environment**, v.44, n.11, p.1469-1477, 2010.

National Aeronautics and Space Administration (NASA). **About Modis**. Disponível em: <<http://modis.gsfc.nasa.gov/about/>>. Acesso em: 24 fev. 2014.

National Aeronautics and Space Administration (NASA). **Aqua Project Science**. Disponível em: < <http://aqua.nasa.gov/index.php>>. Acesso em: 24 fev. 2014.

National Aeronautics and Space Administration (NASA). **Missions - Terra**. Disponível em: < <http://science.nasa.gov/missions/terra/>>. Acesso em: 24 fev. 2014.

Oliveira, S. L. J.; Pereira, J. M. C.; Carreiras, J. M. B. Fire frequency analysis in Portugal (1975–2005), using Landsat-based burnt area maps. **International Journal of Wildland Fire**, v. 21, n. 1, p. 48-60, 2012.

Padilla, M.; Stehman, S. V.; Litago, J.; Chuvieco, E. Assessing the Temporal Stability of the Accuracy of a Time Series of Burned Area Products. **Remote Sensing**, v. 6, n. 3, p. 2050-2068, 2014.

Pereira, J. M. C. A comparative evaluation of NOAA/AVHRR vegetation indexes for burned surface detection and mapping. **Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on**, v. 37, n. 1, p. 217-226, 1999.

Pereira, J. M. C. Sensoriamento remoto de áreas queimadas. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 13. 2007, Florianópolis. Transparências. On-line. São José dos Campos: INPE, 2007. Disponível em:<<http://urlib.net/dpi.inpe.br/marte@80/2007/08.23.12.03>>. Acesso em: 26 jan. 2014.

Pereira, J. M. C.; Sá, A. C. L.; Sousa, A. M. O.; Silva, J. M. N.; Santos, T. N.; Carreiras, J. M. B. Spectral characterisation and discrimination of burnt areas. In: **Remote sensing of large wildfires**. Springer Berlin Heidelberg, 1999. p. 123-138.

Pereira, M. G.; Trigo, R. M.; DaCamara, C. C.; Pereira, J.; Leite, S. M. Synoptic patterns associated with large summer forest fires in Portugal. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 129, n. 1, p. 11-25, 2005.

Pereira, M. G.; Malamud, B. D.; Trigo, R. M.; Alves, P. I. The history and characteristics of the 1980-2005 Portuguese rural fire database. **Natural Hazards and Earth System Sciences**, v. 11, n. 12, 2011.

Pereira, M. G.; Calado, T. J.; DaCamara, C. C.; Calheiros, T. Effects of regional climate change on rural fires in Portugal. **Climate Research**, v. 57, n. 3, p. 187-200, 2013.

Pinty, B.; Verstraete, M. M. GEMI: a non-linear index to monitor global vegetation from satellites. *Vegetatio*, v. 101, n. 1, p. 15-20, 1992

Quintano, C.; Manso, A. F.; Stein, A.; Bijker, W. Estimation of area burned by forest fires in Mediterranean countries: A remote sensing data mining perspective. **Forest Ecology and Management**, v. 262, n. 8, p. 1597-1607, 2011.

Rouse Jr, J. W.; Haas, R. H.; Schell, J. A.; Deering, D. W. Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. **NASA special publication**, v. 351, p. 309, 1974.

Roy, D. P.; Giglio, L.; Kendall, J. D.; Justice, C. O. Multi-temporal active-fire based burn scar detection algorithm. **International Journal of Remote Sensing**, v. 20, n. 5, p. 1031-1038, 1999.

Roy, P. S. Forest fire and degradation assessment using satellite remote sensing and geographic information system. **Satellite Remote sensing and GIS applications in agricultural meteorology**, p. 361, 2003.

Scholes, R. J. Greenhouse gas emissions from vegetation fires in southern Africa. **Environmental Monitoring and Assessment**, v. 38, n. 2-3, p. 169-179, 1995.

Slaton, M. R.; Hunt, E. R.; Smith, W. K. Estimating near-infrared leaf reflectance from leaf structural characteristics. **American Journal of Botany**, v. 88, n. 2, p. 278-284, 2001.

Tsela, P.; Wessels, K.; Botai, J.; Archibald, S.; Swanepoel, D.; Steenkamp, K.; Frost, P. Validation of the Two Standard MODIS Satellite Burned-Area Products and an Empirically-Derived Merged Product in South Africa. **Remote Sensing**, v. 6, n. 2, p. 1275-1293, 2014.

van der Werf, G. R.; Randerson, J. T.; Giglio, L.; Collatz, G. J.; Mu, M.; Kasibhatla, P. S.; Morton, D. C.; DeFries, R. S.; Jin, Y.; van Leeuwen, T. T. Global fire emissions and the contribution of deforestation, savanna, forest, agricultural, and peat fires (1997–2009). **Atmospheric Chemistry and Physics**, v. 10, n. 23, p. 11707-11735, 2010.

Verstraete, M. M.; Pinty, B. Designing optimal spectral indexes for remote sensing applications. **Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on**, v. 34, n. 5, p. 1254-1265, 1996.

Viegas, D. X. Forest Fires in Portugal in 2005 – An Overview. **International Forest Fire News**, v. 34, p. 22-30, 2006.

Wotton, B. M. A lightning fire prediction system. **Frontline Express 60**. 2012.