

ANA LUIZA SANTOS DE OLIVEIRA

**AVALIAÇÃO DOS SENSORES EOS/MODIS E NOAA/AVHRR NA
DETECÇÃO E REGISTRO DE INCÊNDIOS E QUEIMADAS**

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciência Florestal, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

**VIÇOSA
MINAS GERAIS - BRASIL
2006**

**Ficha catalográfica preparada pela Seção de Catalogação e
Classificação da Biblioteca Central da UFV**

T

O48a
2006

Oliveira, Ana Luiza Santos de, 1978-
Avaliação dos sensores EOS/MODIS e NOAA/AVHRR
na detecção e registro de incêndios e queimadas / Ana
Luiza Santos de Oliveira. – Viçosa : UFV, 2006.
xiii, 90f. : il. ; 29cm.

Inclui anexos.

Orientador: Guido Assunção Ribeiro.
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de
Viçosa.

Referências bibliográficas: f. 71-78.

1. Incêndios florestais. 2. Calor - Sensoriamento
remoto. 3. Detectores infravermelhos. I. Universidade
Federal de Viçosa. II. Título.

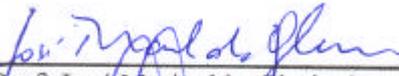
CDO adapt. CDD 634.94322

ANA LUIZA SANTOS DE OLIVEIRA

**AVALIAÇÃO DOS SENSORES EOS/MODIS E NOAA/AVHRR NA
DETECÇÃO E REGISTRO DE INCÊNDIOS E QUEIMADAS**

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciência Florestal, para obtenção do título de "*Magister Scientiae*".

Aprovada em: 24 de fevereiro de 2006.



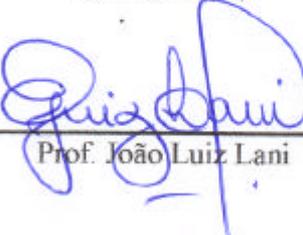
Prof. José Marinaldo Cileriani
(Conselheiro)



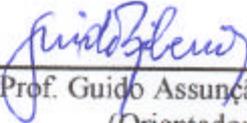
Prof. Vicente Paulo Soares
(Conselheiro)



Prof. Gumercindo Souza Lima



Prof. João Luiz Lani



Prof. Guido Assunção Ribeiro
(Orientador)

DEDICATÓRIA

**Dedico esta Tese de Mestrado ao meu orientador, professor Guido Assunção Ribeiro, que foi mais que um orientador, foi amigo, prestativo e solidário, sempre.
Muito obrigada.**

AGRADECIMENTOS

A Deus;

À minha mãe, pela confiança, apoio e amor;

A minha irmã por agüentar minhas reclamações ao telefone;

Ao meu pai, por ser meu pai;

As minhas amigas pela atenção e carinho;

Ao meu orientador, professor Guido, toda a minha gratidão. Obrigada pela paciência, dedicação, atenção, amizade e certeza de poder contar sempre em todos os momentos;

Ao meu conselheiro José Marinaldo pela paciência e apoio;

À Universidade Federal de Viçosa, pela oportunidade;

Ao Departamento de Engenharia Florestal, pelo apoio;

À FAPEMIG, pela concessão da bolsa de estudo.

BIOGRAFIA

ANA LUIZA SANTOS DE OLIVEIRA, filha de Marlene Alves dos Santos e Aprígio Francisco de Oliveira Filho, nascida em 5 de janeiro de 1978, Belo Horizonte/MG.

Ingressou no curso de Engenharia Florestal em 1999, na Universidade Federal de Viçosa, concluindo sua graduação em janeiro de 2004.

Em fevereiro de 2004, iniciou o Programa de Pós-Graduação de Mestrado em Ciências Florestais, pelo Departamento de Engenharia Florestal, da mesma Universidade, com conclusão prevista para fevereiro de 2006.

ÍNDICE

ÍNDICE DE FIGURAS.....	viii
ÍNDICE DE QUADROS.....	ix
RESUMO.....	x
ABSTRACT.....	xii
1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1. HIPÓTESE.....	2
1.2. OBJETIVOS.....	2
1.2.1. Objetivo geral.....	2
1.2.2. Objetivos específicos.....	2
2. REVISÃO DE LITERATURA.....	3
2.1. Principais terminologias relacionadas ao fogo.....	3
2.2. Planos de prevenção contra incêndios florestais.....	4
2.2.1. Importância dos registros históricos.....	4
2.2.2. Mapas.....	5
2.2.3. Características do material combustível.....	5
2.3. Sensoriamento remoto – conceitos e aplicações.....	5
2.4. Radiação eletromagnética.....	9
2.5. Espectro Eletromagnético.....	9
2.6. Os efeitos da atmosfera.....	10
2.7. Resolução.....	11
2.7.1. Resolução temporal.....	11
2.7.2. Resolução espacial.....	11
2.7.3. Resolução espectral.....	12
2.7.4. Resolução radiométrica.....	12
2.8. Pixel.....	13
2.9. Conceitos relativos à radiação eletromagnética.....	13
2.9.1. Corpo negro.....	13
2.9.2. Ângulo sólido.....	13
2.9.3. Irradiância.....	14

2.9.4. Emitância.....	14
2.9.5. Radiância.....	14
2.9.6. Temperatura de brilho.....	15
2.9.7. Temperatura de radiação.....	16
2.9.8. Emissividade.....	16
2.10. Leis da radiação.....	16
2.10.1. Lei de Planck.....	16
2.10.2. Lei de Wien.....	17
2.10.3. Lei de Stefan-Boltzann.....	18
2.11. Focos de calor.....	18
2.12. Características espectrais da vegetação.....	19
2.13. Índices de vegetação.....	21
2.13.1. Índice de vegetação por diferença normalizada (IVDN).....	22
2.14. Caracterização de sensores remotos.....	23
2.15. Sensor MODIS do satélite EOS/AQUA.....	25
2.15.1. Produto MODIS/AQUA THERMAL ANOMALIES (MYD14).....	27
2.15.2. Produto MODIS/AQUA VEGETATION INDEX (MYD13).....	27
2.15.3. Algoritmo de detecção do fogo do sensor MODIS.....	28
2.16. Sensor AVHRR do satélite NOAA.....	32
2.16.1. Detecção de focos de calor pelo sensor AVHRR/NOAA.....	35
2.17. Índices de risco de incêndios.....	36
2.17.1. Índice de risco fórmula de Monte Alegre (FMA).....	37
3. MATERIAL E MÉTODOS.....	39
3.1. Localização da área de estudo.....	39
3.2. Descrição da área de estudo.....	41
3.2.1. Vegetação.....	41
3.2.2. Solo.....	41
3.2.3. Relevo.....	41
3.2.4. Clima.....	42
3.2.5. Precipitação pluviométrica.....	43
3.3. Programas utilizados nas análises.....	43
3.4. Coleta de dados.....	45
3.4.1. Aquisição de imagens MYD 13 e MYD 14.....	45

3.4.2. Aquisição dos focos de calor detectados pelo NOAA/VHRR.....	49
3.4.3. Aquisição de dados para o índice de risco FMA	49
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	51
5. CONCLUSÃO.....	69
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	71
ANEXO 1.....	80
ANEXO 2.....	81
ANEXO 3.....	82
ANEXO 4.....	83
ANEXO 5.....	84
ANEXO 6.....	85
ANEXO 7.....	89

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1. Esquema representativo dos 4 elementos fundamentais das técnicas de sensoriamento remoto.....	7
FIGURA 2. Espectro eletromagnético.....	10
FIGURA 3. Curva espectral da vegetação, da água e do solo.....	20
FIGURA 4. Algoritmo MODIS simplificado.....	31
FIGURA 5. Localização da área de estudo.....	39
FIGURA 6. Área de estudo separada em mesorregiões.....	40
FIGURA 7. Etapas para aquisição e processamento de imagens MYD13.....	47
FIGURA 8. Etapas para aquisição e processamento de imagens MYD14.....	48
FIGURA 9. Imagem MYD14, com registros de focos de fogo do período de 14 de setembro a 29 de setembro de 2004.....	54
FIGURA 10. Total de focos de calor detectados pelo NOAA 12 e NOAA 16, em 2004.....	55
FIGURA 11. Focos de calor detectados no período crítico, pelo NOAA 12 e NOAA 16, em 2004.....	56
FIGURA 12. Focos de calor detectados no Município de Viçosa pelo NOAA 12 – noite, referentes ao período 26 de junho a 11 de julho de 2004.....	57
FIGURA 13. Total de focos de calor detectados pelo NOAA 12 e NOAA 16 no período de 14 de setembro a 29 de setembro, em 2004.....	58
FIGURA 14. Imagem MYD 13 com focos NOAA 12 e 16, no período de 29 de agosto a 13 de setembro de 2004.....	63
FIGURA 15. Imagem MYD 13 com focos NOAA 12 do período de 30 de setembro a 14 de outubro de 2004.....	64
FIGURA 16. Imagem MYD 13, com focos de calor detectados pelo NOAA 12, no período de 16 de outubro a 31 de outubro de 2005.....	65
FIGURA 17. Índice de risco de incêndios FMA em 2004, para o Município	

de Viçosa.....	66
FIGURA 18. Índice de risco de incêndio FMA em 2004, para o município de Belo Oriente.....	67

ÍNDICE DE QUADROS

QUADRO 1. Características do sensor MODIS.....	25
QUADRO 2. Características dos sensores do satélite NOAA.....	34
QUADRO 3. Grau de perigo de incêndio do índice FMA.....	37
QUADRO 4. Valores do fator “f” de acordo com a precipitação pluviométrica.....	37
QUADRO 5. Fatiamento das imagens MYD 14, de acordo com seus níveis de cinza.....	46
QUADRO 6. Fatiamento das imagens MYD13 em classes.....	46
QUADRO 7. Relação entre o número de focos de calor detectados pelo NOAA 12 e pelo NOAA 16.....	52
QUADRO 8. Número de focos de calor do NOAA 12 coincidentes com as diferentes classes do MYD 13, em 2004.....	60
QUADRO 9. Número dos focos de calor NOAA 12 coincidentes com as diferentes classes do MYD 13, para o período crítico de 2005.....	61
QUADRO 10. Número de focos de calor NOAA 16 coincidentes com as diferentes classes do MYD 13, em 2004.....	62
QUADRO 11. Número de dias em cada classe de grau de perigo de fogo para todo o ano de 2004 e para seu período crítico, no Município de Viçosa/MG.....	67
QUADRO 12. Número de dias em cada classe de grau de perigo de fogo para todo o ano de 2004 e para seu período crítico, no Município de Belo Oriente/MG.....	68

RESUMO

OLIVEIRA, Ana Luiza Santos de, M. S. Universidade Federal de Viçosa, Fevereiro de 2006. **Avaliação dos sensores EOS/MODIS e NOAA/AVHRR na detecção e registro de incêndios e queimadas.** Orientador: Guido Assunção Ribeiro. Conselheiros: José Marinaldo Gleriani e Vicente Paulo Soares.

A eficiência na detecção e monitoramento dos incêndios florestais são fundamentais para o controle do fogo, redução dos danos e dos custos nas operações de combate. Por isso fazem-se necessários métodos mais eficientes para detecção de incêndios florestais, permitindo assim uma ação mais rápida e auxiliando na tomada de decisão. O sensoriamento remoto pode ser mais um instrumento para auxiliar na prevenção e combate aos incêndios florestais. O presente trabalho foi realizado com o objetivo de avaliar a eficiência do sensor EOS/MODIS e do sensor NOAA/AVHRR na detecção e registro de incêndios e queimadas. Para isso, foram utilizadas imagens do produto MODIS/AQUA THERMAL ANOMALIES (MYD14), do satélite EOS/MODIS/AQUA, visando o levantamento das ocorrências de focos de fogo; imagens do produto MODIS/AQUA VEGETATION INDICES (MYD13), para avaliar a relação entre os incêndios registrados e a probabilidade de ocorrência de incêndios. Além disso, dados de focos de calor do sensor NOAA/AVHRR 12 e 16 foram coletados, a fim de compará-los com as informações obtidas das imagens do sensor MODIS. Essas informações também foram associadas com o índice de risco de incêndio, originados pela Fórmula de Monte Alegre (FMA), para a região de Viçosa, visando a confirmação das ocorrências e a determinação da estação normal do fogo. A área de estudo compreende partes das Mesorregiões da Zona da Mata, Metropolitana de Belo Horizonte, Campos das

Vertentes e Vale do Rio Doce, no Estado de Minas Gerais, entre as coordenadas: Latitude 1/Sul: 21°12'2,42''; Longitude 1/Oeste: 43°36'59,65''; Latitude 2/Sul: 19°15'46,34''; Longitude 2/Oeste: 41°51'10,74''. O tamanho da área era de, aproximadamente, 38.372 km². O município de Viçosa, que se encontra na mesorregião Zona da Mata, foi um dos objetos deste estudo. Os resultados mostraram que o produto MYD14 foi eficiente para o registro de ocorrências de incêndios apresentando o maior número de focos detectados nas classes “baixa”, “média” e “alta confiança de fogo” (578 para o ano de 2004) em relação aos focos de calor detectados pelos sensores NOAA/AVHRR-12 e NOAA/AVHRR-16 (153 focos para todo o ano de 2004). O produto MYD 13 não se mostrou adequado para avaliar o risco de incêndios, devido às divergências entre suas classes e os focos de calor detectados pelo AVHRR/NOAA 12 e 16. O índice de risco de incêndios FMA analisado para os municípios de Viçosa, Belo Oriente, São Domingos do Prata, Antônio Dias e Santa Bárbara mostrou-se coerente com o período de maior probabilidade de ocorrência de incêndios (julho a outubro), confirmando os dados dos sensores trabalhados, os quais mostraram maior concentração de focos no período de julho a novembro, considerado neste trabalho como período crítico.

ABSTRACT

OLIVEIRA, Ana Luiza Santos de, M. S. Universidade Federal de Viçosa, February de 2006. **Evaluation of EOS/MODIS and NOAA/AVHRR sensors in the detection and reporting of fires and burnings.** Adviser: Guido Assunção Ribeiro. Committee Members: José Marinaldo Gleriani and Vicente Paulo Soares.

The efficiency of detection and monitoring of fire forests is fundamental for fire control and reduction of costs and damages in firefighting operations. Therefore the need for efficient methods for forest fire detection, allowing a faster action and better decision-making. Remote sensing can be a suitable tool for preventing and fighting forest fires. The objective of this work was to evaluate the efficiency of the EOS/MODIS and NOAA/AVHRR sensors in the detection and reporting of fires and burnings. Images of the product MODIS/AQUA THERMAL ANOMALIES (MYD14), from the EOS/MODIS/AQUA satellite, were used to report the fire occurrences. Images of the product MODIS/AQUA VEGETATION ÍNDICES (MYD13) were used to evaluate the relationship between the fire and the probability of fire occurrence. Besides, heat focus data from NOAA/AVHRR 12 and 16 were collected in order to compare them with the obtained information from the images of the MODIS sensor. This information was compared with the forest risk calculated by the Monte Alegre (FMA) Formula to check fire occurrence and fire season. The study area involved part of 'Zona da Mata', Metropolitan Area of Belo Horizonte, 'Campo dos Vertentes' and 'Vale do Rio Doce', in the state of Minas Gerais, between the coordinates: Latitude 1/South: 21°12'2,42 "; Longitude 1/West: 43°36'59,65 "; Latitude 2/South: 19°15'46,34 "; Longitude 2/West: 41°51'10,74 ", totalizing approximately 38.372 km². The municipality of Viçosa located in the 'Zona da Mata' was one of the objects of this study. The results showed that the

product MYD14 was efficient to identify fire occurrences, providing a larger number of focuses detected in the three classes (578 for the year 2004) in relation to AVHRR/NOAA-12 and NOAA-16 (153 fires for the year 2004). The MYD 13 product was found not suitable for evaluating the fire risk due to divergences between their classes and the heat focuses detected by AVHRR/NOAA 12 and 16. The FMA index analysed for the municipality of Viçosa, Belo Oriente, São Domingos do Prata, Antônio Dias e Santa Bárbara showed consistent with the largest probability of fire occurrence (July to Octobe), confirming the data from the sensor used, which showed a larger concentration of focuses from July to November, considered as a critical period in this work.

1. INTRODUÇÃO

Os incêndios florestais, apesar de todos os esforços, têm aumentado muito no decorrer dos anos. O emprego do fogo está associado principalmente à limpeza e renovação de pastagens e abertura de áreas agrícolas.

Se não forem contidos rapidamente, os incêndios podem atingir grandes áreas, trazendo perdas tanto para os agricultores quanto para a sociedade brasileira. Além disso, é importante ter um conhecimento da localização e extensão destes incêndios ou áreas queimadas.

Existem vários métodos de detecção de fogo, como, por exemplo, sistemas de vigilância móvel (carros, motos, avião), sistemas de vigilância fixa (torres de vigilância), etc. Um método complementar a isso seria o sensoriamento remoto, que auxiliaria na detecção mais eficiente de incêndios e de focos de calor, permitindo uma ação mais rápida e auxiliando na tomada de decisão. Nos últimos anos o sensoriamento remoto tem sido muito importante para esse fim.

Outro fator de importância relevante é a caracterização das áreas queimadas, para subsidiar os planos de proteção contra os incêndios florestais e, conseqüentemente, aprimorar as tomadas de decisão. Para atingir este objetivo, as técnicas de geoprocessamento podem contribuir decisivamente, principalmente quando se trata de grandes áreas como um estado ou país.

Nesse sentido, a obtenção de imagens terrestres, por meio de sensoriamento remoto, pode permitir, em diferentes graus de precisão, a quantificação de áreas queimadas, a distribuição espacial de suas ocorrências, seus períodos mais críticos do ano, o tipo de vegetação mais atingido e as interações que estas informações podem ter com causas como proximidade de centros urbanos e rodovias, atividades agrícolas, áreas de tensão social dentre outras.

1.1. HIPÓTESE

Produtos gerados por meio de sensoriamento remoto podem ser utilizados para o levantamento das ocorrências de incêndios ou queimadas em substituição às observações de campo.

1.2. OBJETIVOS

1.2.1. Objetivo Geral

Analisar produtos obtidos por meio do sensoriamento remoto, visando o levantamento de ocorrências de incêndios e queimadas.

1.2.2. Objetivos Específicos

- Avaliar a qualidade do produto do sensor MODIS/AQUA THERMAL (MYD14), visando o levantamento das ocorrências de incêndios ou marcas das áreas queimadas.
- Avaliar a relação entre a ocorrência de incêndios, por meio da análise dos dados captados pelo produto do sensor MODIS/AQUA VEGETATION INDICES (MYD13), utilizando o NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) e a probabilidade de ocorrência de incêndios determinada pela Fórmula de Monte Alegre.
- Comparar os focos de calor detectados pelo sensor AVHRR do satélite NOAA com os produtos MODIS MYD13 e MYD14 e os índices de vegetação.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. Principais terminologias relacionadas ao fogo

Fogo – é uma reação química exotérmica, que ocorre pela combinação do material combustível (material orgânico) e o oxigênio, reação esta desencadeada por uma fonte externa de calor (RIBEIRO, 2000).

Prevenção – conjunto de medidas, ações, normas ou trabalhos para evitar os incêndios florestais ou reduzir os danos ocasionados por eles (RIBEIRO, 2000).

Combate – conjunto de ações, estratégias e medidas usadas para controlar e extinguir o fogo, de forma efetiva, rápida e segura (RIBEIRO, 2000).

Queimada – é o termo prático atribuído à queima controlada, utilizada pelo público em geral, inclusive pela imprensa, mas que não assegura as exigências da queima controlada como conceitualmente concebida (RIBEIRO, 2000).

Queima Controlada – A queima controlada é o uso do fogo, de maneira planejada, devidamente autorizada pelo órgão ambiental responsável de cada Estado, por exemplo, o IEF (Instituto Estadual de Florestas) em Minas Gerais, para eliminar a vegetação ou restos de cultura para determinados fins produtivos, mantendo o fogo sobre controle (FAEMG, 2005).

Incêndio Florestal – é a rápida oxidação dos materiais orgânicos produzidos pelas plantas, acompanhada por intensa liberação de calor. Basicamente, o mesmo processo ocorre continuamente, em longos períodos de tempo, através dos vários organismos decompositores. Portanto, tecnicamente, o fogo pode ser considerado um rápido decompositor (SOARES, 1985).

2.2. Planos de Prevenção contra incêndios florestais

Os planos de prevenção organizam o trabalho de proteção contra os incêndios florestais em uma área florestal. Além disso, contribuem para a redução dos custos com combate e reduzem os efeitos sobre todos os componentes dos ecossistemas atingidos (SOARES, 1985; CEMIG, 2003).

Para se elaborar um plano de prevenção são necessárias informações como: informações históricas sobre ocorrências passadas, mapas da área de abrangência, informações sobre os fatores que afetam a ocorrência do fogo (condições climáticas, características do material combustível e topografia), dentre outras.

2.2.1. Importância dos registros históricos

A estatística dos incêndios, acumulada durante anos, é útil, porque especifica a localização das áreas em que o perigo de fogo é maior e a localização das áreas em que a ocorrência de incêndios é mais freqüente, além de fornecer as causas dos incêndios (COUTO *et al.*, 1995). Para quantificar e avaliar os danos causados pelos incêndios, bem como planejar ações de prevenção e combate, muitos países como Estados Unidos, Espanha, Alemanha, mantêm estatísticas completas sobre as ocorrências de incêndios. No Brasil, este trabalho vem sendo feito efetivamente a partir de 1990, quando dados e informações meteorológicos, referentes aos incêndios florestais começaram a ser catalogados por meio de satélites (SILVA, 1998).

A aplicação de técnicas de sensoriamento remoto tem se mostrado fundamental, para o auxílio à geração de bancos de dados, através do uso de satélites que correspondem a uma importante fonte de informações sobre os diversos fenômenos que ocorrem na superfície terrestre. Na detecção por satélite, uma queimada é ou não

registrada, dependendo da energia termal que emite e das condições atmosféricas entre a queimada e o sensor do satélite (SELHORST & BROWN, 2003).

2.2.2. Mapas

A elaboração de um mapa de risco, através da marcação dos pontos onde ocorrem os incêndios, possibilita a visualização das áreas de maior incidência de incêndios e auxilia na elaboração dos planos de prevenção (SOARES, 1996).

O sensoriamento remoto permite a atualização de mapas, determina as áreas de maior ocorrência de fogo em períodos predefinidos e permite a localização e simulação da visualização de um observador, além do cruzamento, análise e saída de dados e informações (ARAÚJO JUNIOR & NASCIMENTO, 2003).

2.2.3. Características do material combustível

Num incêndio florestal, material combustível é todo tipo de material orgânico, representado pela vegetação viva ou morta, que se encontra em ambiente aberto, capaz de entrar em ignição e queimar (CEMIG, 2003).

O teor de umidade do material combustível interfere na propagação de um fogo, pois quanto mais úmido estiver o material, maior será a quantidade de energia requerida para vaporizar a água existente no combustível vivo. A umidade no combustível vivo varia de acordo com o estágio de desenvolvimento da planta (CEMIG, 2003).

2.3. Sensoriamento Remoto – conceitos e aplicações

O sensoriamento remoto é a tecnologia que permite obter imagens e outros tipos de dados da superfície terrestre, através da captação e do registro da energia refletida ou emitida pela superfície. O termo *sensoriamento* refere-se à obtenção dos dados, e o

termo *remoto*, que significa distante, é utilizado porque a obtenção é feita à distância, ou seja, sem contato físico entre o sensor e a superfície terrestre (FLORENZANO, 2002).

Lissesand & Kiefer (1994) acrescenta que sensoriamento remoto é a ciência e a arte de se obter informações sobre um objeto, área ou fenômeno através de análises dos dados obtidos por um equipamento (sensor) que não se encontra em contato com eles.

Novo (1992) acrescenta que as informações são obtidas utilizando-se a radiação eletromagnética gerada por fontes naturais como o Sol e a Terra, ou por fontes artificiais como, por exemplo, o Radar (Rosa, 1992). De acordo com Garcia (1982), aviões e satélites são as plataformas mais comuns para o sensoriamento remoto.

O sensoriamento remoto abrange um conjunto de técnicas para coleta, processamento e análise de dados da superfície terrestre, a partir de informações provenientes da interação da radiação eletromagnética com os alvos terrestres, contribuindo significativamente em etapas como: identificação, descrição ou caracterização de padrões espaciais, avaliação da disponibilidade, qualidade e quantidade dos recursos localizados e o acompanhamento das alterações e condições desses recursos, provocadas pelo seu uso e manejo, ou por acidentes naturais ou culturais (CARVALHO *et al.*, 1990).

A definição de sensoriamento remoto é obtida quando se utilizam os quatro elementos fundamentais das técnicas de sensoriamento remoto (Figura 1), que são sensor, fonte, alvo e radiação eletromagnética (INPE, 2001).

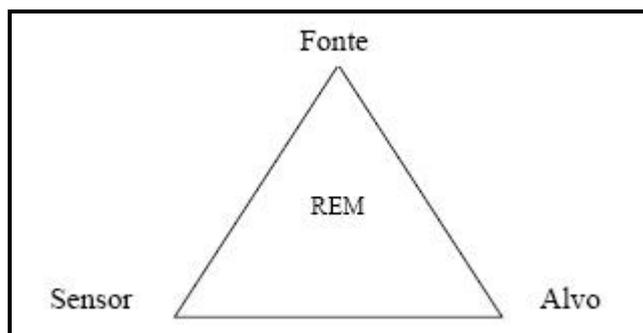


FIGURA 1: Esquema representativo dos quatro elementos fundamentais das técnicas de sensoriamento remoto. FONTE: INPE (2001)

No centro do triângulo (Figura 1) encontra-se a Radiação Eletromagnética (REM), que é o elemento de ligação entre os demais que se encontram nos vértices. São eles: a *fonte* de REM, que para o caso da aplicação das técnicas de sensoriamento remoto no estudo dos recursos naturais é o Sol (pode ser também a Terra para os sensores passivos de microondas e termais ou podem ser antenas de microondas para os sistemas radares); o *sensor*, que é o instrumento capaz de coletar e registrar a REM refletida ou emitida pelo *objeto*, que também é denominado *alvo*, e que representa o elemento do qual se pretende extrair informação. A partir da Figura 1 compreende-se que o elemento fundamental das técnicas de sensoriamento remoto é a REM, que no vácuo propaga-se à velocidade da luz (INPE, 2001).

A extensão do território brasileiro e o pouco conhecimento dos recursos naturais, aliados ao custo de se obter informações por métodos convencionais, foram os fatores decisivos para o país entrar no programa de sensoriamento remoto por satélite (ROSA, 1992).

A aplicação de técnicas de sensoriamento remoto tem se mostrado fundamental, na medida em que os bancos de dados gerados através do uso de sensores a bordo de satélites correspondem a uma importante fonte de informações sobre os diversos fenômenos que ocorrem na superfície terrestre. Atualmente, há uma grande variedade

de satélites temporais, e de técnicas para detectar os impactos causados por incêndios em países tropicais (FRANÇA *et al.*, 2005).

As imagens de sensores remotos, como fonte de dados da superfície terrestre, são cada vez mais utilizadas para a elaboração de diferentes tipos de mapas. Nesse processo de interpretação, dados contidos em uma imagem são transformados em informação e apresentados em forma de mapa. Enquanto os mapas contêm informação, as imagens obtidas de sensores remotos contêm dados brutos, que só se tornam informação após a sua interpretação (FLORENZANO, 2002).

O sensoriamento remoto é uma ferramenta poderosa para ajudar a entender a dinâmica do desflorestamento e do uso da terra, assim como seus impactos ecológicos e sociais, pois permite obter dados de áreas muito extensas em intervalos regulares de tempo, disponibilizando, assim, informações espaciais e temporais sobre as ocorrências de queimadas, além de quantificações da área e da biomassa afetadas pelo fogo, fornecendo uma importante contribuição para o estudo de incêndios no meio ambiente e seus efeitos ecológicos, climáticos e na química da atmosfera (FRANÇA *et al.*, 2005).

A identificação e a quantificação de áreas queimadas a partir de dados orbitais podem ser abordadas sob dois pontos de vista distintos. O primeiro, visa à observação das queimadas no momento em que estas estão ocorrendo, quando ainda estão ativas, utilizando a informação adquirida na região do infravermelho médio; no segundo caso, objetiva-se a observação das áreas após a ocorrência do fogo, mediante a detecção da cicatriz do fogo deixada no terreno, utilizando dados adquiridos principalmente nas regiões visível e infravermelho próximo e médio do espectro eletromagnético (RIVERA-LOMBARDI, 2003).

2.4. Radiação Eletromagnética

A radiação eletromagnética (REM) é definida como sendo a forma de energia que se move à velocidade da luz de aproximadamente $300.000 \text{ km.s}^{-1}$, seja em forma de ondas ou de partículas eletromagnéticas, e que não necessita de um meio material para se propagar. É gerada quando uma partícula eletrizada é acelerada, possuindo assim duas componentes, uma elétrica e outra magnética, que vibram perpendicularmente à direção de propagação (ROSA, 1992).

Essas radiações são caracterizadas por uma frequência, f , que se relaciona com o comprimento de onda, λ , e com a velocidade de propagação pela expressão (VIANELLO e ALVES, 2000):

$$V = \lambda \cdot f$$

Onde,

V = velocidade de propagação da onda (m.s^{-1});

λ = comprimento de onda (m);

f = frequência (Hertz).

2.5. Espectro Eletromagnético

O conjunto de comprimentos de onda que compõem a REM é conhecido como Espectro Eletromagnético, o qual é dividido didaticamente em regiões espectrais, conforme apresentado na Figura 2 (INPE, 2001).

Nota-se pela Figura 2 que existem várias formas de energia tais como: raios gama, raios x, raios uv, raios infravermelhos, etc. Em sensoriamento remoto, a região espectral mais utilizada vai de $0,40 \mu\text{m}$ a $1,0 \mu\text{m}$. Mais especificamente para aplicação

do sensoriamento remoto na área de incêndios, utilizou-se a região do infravermelho termal que vai de 3,0 a 15,0 μm .

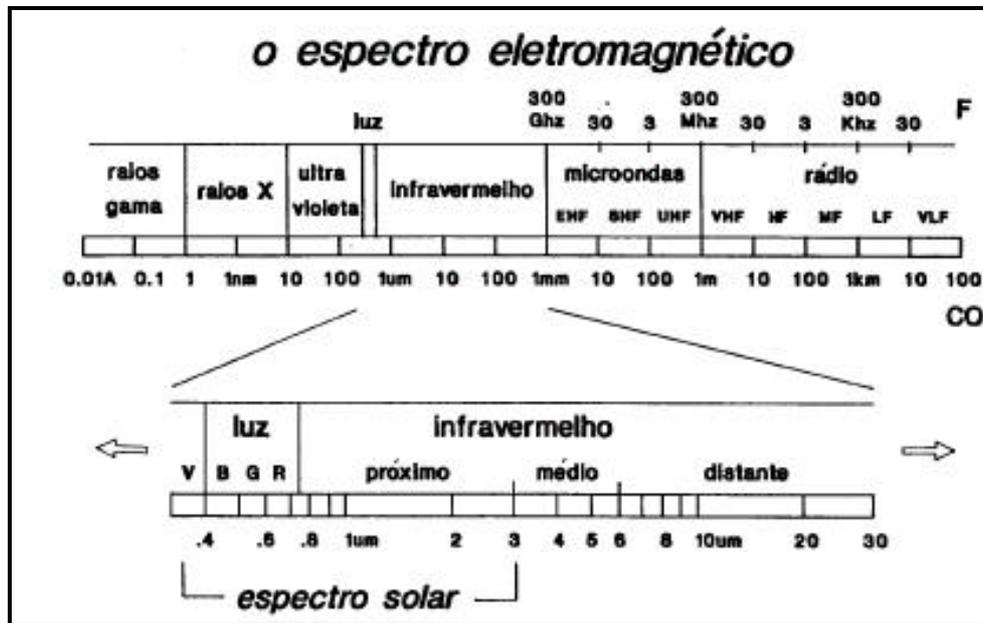


FIGURA 2: Espectro eletromagnético e suas principais regiões.
 FONTE: INPE (2001)

2.6. Os efeitos da atmosfera

Aparentemente, a atmosfera é essencialmente transparente à luz e a tendência é de se supor que esta condição seja válida para todas as radiações eletromagnéticas. No entanto, os constituintes da atmosfera (CO_2 , H_2O e O_3) absorvem seletivamente os diferentes comprimentos de onda. Os gases também absorvem a energia em intervalos específicos de comprimento de onda, chamados de bandas de absorção, enquanto aqueles intervalos que permitem a transmissão intensa de energia são chamados de bandas de transmissão ou janelas atmosféricas. Assim, as interações atmosféricas são importantes em sensoriamento remoto porque as informações refletidas ou irradiadas da superfície terrestre podem ser modificadas ao atravessarem a atmosfera, além disso, as absorções, reflexões e espalhamento podem ser úteis no estudo de perfis de temperatura e pressão, altura de nuvens e análises de gases (LILLESAND & KIEEFER, 1994).

2.7. Resolução

É o número de pixels existentes para representação de uma imagem em cada uma de suas dimensões (FLORENZANO, 2002).

Segundo Rosa (1992) os dados de sensoriamento remoto podem ser agrupados em quatro resoluções: resolução temporal, espacial, espectral e radiométrica.

2.7.1. Resolução Temporal

A resolução temporal está relacionada com a repetitividade com que o sistema sensor possui na obtenção de informações dos alvos (ROSA, 1992). É a frequência temporal com a qual uma determinada porção da superfície da Terra será amostrada por determinado sensor (ESTEIO, 2005).

2.7.2. Resolução Espacial

A resolução espacial pode ser definida como sendo a mínima distância entre dois objetos (alvos) que um sensor pode registrá-los como sendo objetos distintos. Depende da altitude da plataforma, contraste entre os objetos, dentre outros (ROSA, 1992).

Mais especificamente, a resolução espacial pode ser definida como o menor elemento ou superfície distinguível por um sensor. Dessa forma, um sensor cuja resolução espacial é de 30 metros, tem a capacidade de distinguir objetos que medem, no terreno, 30 metros ou mais. Isto equivale dizer que 30 por 30 metros (900 m²) é a menor área que um sensor específico consegue “ver” (FLORENZANO, 2002).

Em sensoriamento remoto, resolução espacial é a habilidade para distinguir entre dois objetos muito próximos numa imagem. Quando dois objetos estão mais próximos do que o limite de resolução, aparecerão como um único objeto na imagem (GARCIA, 1982).

2.7.3. Resolução Espectral

A resolução espectral representa o número, espaçamento e largura das bandas ao longo do espectro eletromagnético (ESTEIO, 2005).

A resolução espectral é um conceito inerente às imagens multiespectrais de sensoriamento remoto. É definida pelo número de bandas espectrais de um sistema sensor e pela amplitude do intervalo de comprimento de onda de cada banda. O sistema óptico (espelhos e lentes) decide em que partes do espectro o sensor será capaz de receber a radiação refletida ou emitida pela superfície terrestre e o tipo do detector é responsável pela sensibilidade e pelo intervalo espectral de cada banda. A quantização das medidas radiométricas torna-se possível quando o sensor carrega dados de referência internos e calibrados (ENVI, 2005).

2.7.4. Resolução Radiométrica

A resolução radiométrica refere-se a maior ou menor capacidade de um sistema sensor em detectar e registrar diferenças de reflectância e/ou emitância dos elementos da paisagem (rocha, solo, água, vegetação, etc.) (ROSA, 1992).

A resolução radiométrica é dada pelo número de valores digitais representando níveis de cinza, usados para expressar os dados coletados pelo sensor. Quanto maior o número de valores, maior é a resolução radiométrica. O número de níveis de cinza é comumente expresso em função do número de dígitos binários (bits) necessários para armazenar, em forma digital, o valor do nível máximo. O valor em bits é sempre uma potência de 2. Assim, 5 bits significam 2 elevado na potência 5 = 32 níveis de cinza (ENVI, 2005).

2.8. Pixel

Pixel é a abreviação de elemento de imagem (“Picture Element”) correspondendo ao grão (resolução espacial) da imagem, que no caso do sensor AVHRR, varia de 1,1 km no centro da imagem até aproximadamente 2,4 x 6,5 km nas bordas laterais. Entretanto, devido à forte energia termal emitida pelas queimadas, uma frente de fogo com 30 m por 0,5 m pode ser detectada. Desta forma, um pixel de queimada pode corresponder tanto a um pequeno foco de queimada, como a vários pequenos focos muito próximos, ou uma única queimada bem maior, com cerca de 1 km² (CPTEC/INPE, 2006). À medida que o tamanho do pixel aumenta, a imagem resultante apresenta-se menos definida, ou seja, quanto maior o tamanho do pixel, menor a resolução espacial do sensor (INPE, 2001).

2.9. Conceitos relativos à radiação eletromagnética

2.9.1. Corpo Negro

É um material que apresenta um espectro de radiação contínuo em todos os comprimentos de onda e que absorve toda a energia incidente sobre ele. Não existe na natureza um “corpo negro” perfeito, embora muitos, como o sol, se aproximem bastante da descrição (SOARES & BATISTA, 2004).

2.9.2. Ângulo Sólido

O ângulo sólido é definido como um ângulo cônico que abrange a área na superfície de uma esfera de raio r . É dado em sterradianos (sr). Sua expressão é (SCHOTT, 1997):

$$d = dA / r^2 \quad [\text{sterradianos ou sr}]$$

Onde,

$d\Omega$ = ângulo sólido;

dA = superfície de interesse;

ρ = reflectância.

2.9.3. Irradiância

Irradiância (E) é a quantidade de radiação que incide sobre uma superfície, por unidade de área. Pode ser expressa em W/m^2 (ROSA, 1992).

A irradiância em uma superfície pode ser calculada por (SCHOTT, 1997):

$$E = d\Phi / dA [Wm^{-2}]$$

Onde,

E = irradiância;

$d\Phi$ = fluxo de irradiância;

dA = superfície de interesse;

Wm^{-2} = Watt/ m^2 .

2.9.4. Emitância

A Emitância ou exitância é a quantidade de radiação que deixa determinada superfície por unidade de área, podendo ser expressa em W/m^2 ; mW/cm^2 ; cal/cm^2min .

É dependente da temperatura dos alvos (ROSA, 1992).

2.9.5. Radiância

A radiância é a quantidade de radiação que deixa determinada superfície por unidade de área em uma direção de medida. A radiância inclui tanto a radiação emitida

como a radiação refletida pelos alvos. Para alvos naturais da superfície terrestre, o que determina se o sistema sensor está registrando a emitância ou a reflectância é o comprimento de onda em que estiver operando o sensor, o que pode ser caracterizado pelas propriedades dos detetores, filtros, etc. Se este estiver operando em comprimentos de onda menores que 4,0 m, ele estará registrando predominantemente a reflectância dos alvos. Caso contrário estará registrando predominantemente a emitância dos mesmos (ROSA, 1992).

A radiância de uma superfície pode ser determinada de forma simplificada por (SCHOTT, 1997):

$$L = M \cos \theta = E_0 \rho \cos \theta$$

Onde,

L = radiância;

M = emitância;

θ = em steradianos (sr);

E_0 = irradiância acima da superfície;

θ = ângulo zenital;

ρ = reflectância.

2.9.6. Temperatura de Brilho

Temperatura de brilho (T_b) é a temperatura que um corpo negro deveria ter para emitir a mesma quantidade de radiação espectral de um corpo real (ROSA, 1992).

$$T_b = T$$

Onde,

T = temperatura do corpo real.

= Emissividade

2.9.7. Temperatura de Radiação

A temperatura de radiação (T_r) é a temperatura que um corpo negro deveria ter para possuir a mesma radiância integrada de um corpo real, a uma dada temperatura T (ROSA, 1992).

$$T_r = T^4$$

2.9.8. Emissividade

Emissividade (ϵ) é a relação entre a emitância de um corpo real (M_{cr}) e a emitância de um corpo negro (M_{cn}) a uma dada temperatura. A emissividade de um corpo real é sempre menor do que a unidade (ROSA, 1992).

$$\epsilon = M_{cr}/M_{cn}$$

Onde,

ϵ = Emissividade;

M_{cr} = Emitância de um corpo real;

M_{cn} = Emitância de um corpo negro.

2.10. Leis da Radiação

2.10.1. Lei de Planck

Essa lei explica a radiação emitida (M) por um corpo em todo o seu espectro, bem como a forma característica da curva de emissão de cada corpo (ROSA, 1992).

$$M = C_1 \lambda^{-5} (e^{C_2/\lambda T} - 1)$$

Onde,

M = radiação emitida espectralmente por cada corpo (W/m^2);

= emissividade;

C_1 = uma constante ($3,7413 \times 10^8 W \cdot (m)^4/m^2$);

C_2 = outra constante ($1,4388 \times 10^4 m \cdot K$);

= comprimento de onda a radiação (m);

T = temperatura em graus Kelvin.

Segundo essa lei a distribuição da energia emitida por um corpo negro é função de sua temperatura e do comprimento de onda no qual a radiação ocorre (SOARES & BATISTA, 2004).

2.10.2. Lei de Wien

A Lei de Wien determina o comprimento de onda de maior emissão de radiação por um corpo (λ_{Max}). O pico de radiação máxima emitida por um corpo desloca-se na direção dos menores comprimentos de onda com o aumento da temperatura do mesmo (ROSA, 1992). De acordo com essa lei existe uma relação inversa entre a temperatura de um corpo negro e o comprimento de onda de máxima emissão (SOARES & BATISTA, 2004). Expressão segundo Schott (1997):

$$\lambda_{Max} = A/T$$

Onde,

λ_{Max} = Comprimento de onda de maior emissão de radiação por um corpo;

A = constante ($2898 \mu m \cdot K$)

T = Temperatura (K)

2.10.3. Lei de Stefan-Boltzann

Esta lei determina a radiação total emitida (M) por um corpo em todo o seu espectro, independente do comprimento de onda (ROSA, 1992).

$$M = \epsilon \sigma T^4$$

Onde,

M= Radiação Total Emitida por um corpo;

= emissividade;

= Constante de Stefan-Boltzann ($5,6693 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$);

T= Temperatura.

2.11. Focos de Calor

Os focos de calor são áreas que transmitem intensidade de calor elevada, identificadas por sensores a bordo de satélites e que normalmente estão associadas a queimadas. Um foco de calor é qualquer temperatura registrada acima de 47°C. Esse foco de calor não é necessariamente um foco de fogo ou incêndio (SILVA, 1998; AMBIENTEBRASIL, 2005).

As imagens de satélites são muito utilizadas para detectar focos de incêndios. As imagens AVHRR dos satélites NOAA, por exemplo, permitem detectar e localizar, em tempo real, focos de fogo ativo em toda sua área de abrangência. Informações adicionais sobre a temperatura e a área queimada também podem ser obtidas quando utilizadas imagens dos canais das regiões do visível e infravermelho (FLORENZANO, 2002).

Para que ocorra a detecção de focos de calor a partir de uma imagem NOAA/AVHRR três etapas são necessárias: 1) Pré-processamento, que corresponde à

leitura primária dos dados brutos recebidos dos satélites, registro, navegação e correção geométrica; 2) Processamento, que compreende a calibração, a detecção de nuvens, o controle de qualidade e a correção atmosférica. Posteriormente é realizado o cálculo dos parâmetros geofísicos (temperatura de brilho, radiância e fator de radiância); e 3) Imagens transformadas em parâmetros físicos são então utilizadas como dados de entrada para a detecção de focos de calor (DEPPE *et al.*, 2004).

Os programas computadorizados de tratamento das imagens orbitais garantem a detecção dos focos de calor, sua localização geográfica bem como uma série de correções geodésicas e radiométricas. Esse sistema vem sendo aperfeiçoado ao longo dos anos (EMBRAPA, 2000).

2.12. Características Espectrais da Vegetação

Cada alvo tem um comportamento espectral que lhe é peculiar, devido suas características físicas, químicas ou biológicas. Em outras palavras, o comportamento espectral é a variação da quantidade de energia refletida e/ou emitida pelo alvo, para cada comprimento de onda do espectro eletromagnético (MOREIRA, 2003).

A vegetação tem reflectância normalmente baixa na banda visível (VIS) e alta no infravermelho próximo (IVP). No primeiro caso, é a clorofila que absorve a radiação solar para permitir a fotossíntese, enquanto que o tecido das folhas tem baixa absorção no IVP. Existem duas bandas de absorção preeminentes, centradas aproximadamente em $0,48\mu\text{m}$, devido à presença de carotenos, e $0,68\mu\text{m}$, relacionada ao processo de fotossíntese (INPE, 2005; ROSA, 1992).

O decréscimo gradual dos valores de reflectância para comprimentos de onda superiores a $1,3\mu\text{m}$ é devido à presença da água, com pico de absorção próximo a $1,4$ e $1,9\mu\text{m}$. Todas essas considerações referem-se a uma única folha verde isolada e sadia.

Percentualmente, a reflectância de uma cobertura vegetal é consideravelmente menor do que a de uma folha verde isolada, devido a diversos fatores como a influência de superfícies desfolhadas, mudanças no ângulo de iluminação e orientação das folhas. A medida da reflectância espectral da vegetação depende de uma série de fatores como as condições atmosféricas, espécie, solo (granulometria, água, nutriente), índice de área foliar (cobertura da vegetação por unidade de área), estado fenológico (variação sazonal), biomassa (densidade total de vegetação), folha (forma, posição, água, pigmentação, estrutura interna, etc.), geometria de medida, tipo de sistema sensor e cobertura da copa (ROSA, 1992).

De uma maneira geral, os valores de reflectância de uma folha isolada na região do visível são mais altos do que aqueles referentes ao dossel do qual a folha faz parte. O comportamento espectral da vegetação da água e do solo encontra-se na Figura 3 (ANDERSON, 2004).

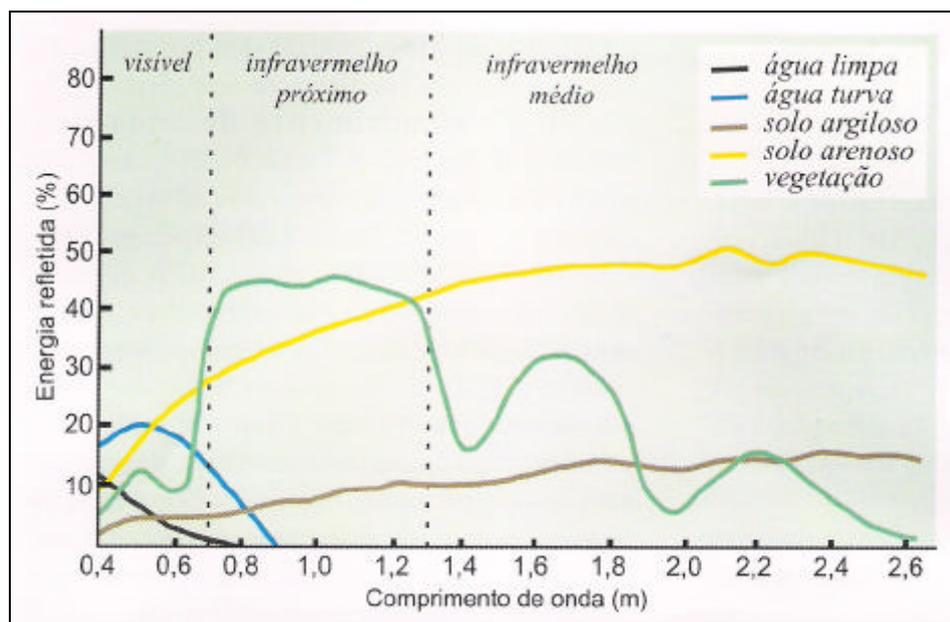


FIGURA 3: Curva espectral da vegetação, da água e do solo.
FONTE: FLORENZANO (2002).

Fatores como a configuração do plantio, orientação das fileiras, tamanho das plantas, fatores topográficos, ângulo de iluminação e de visada, fatores atmosféricos, configuração da geometria de visada e o substrato da área que esta sendo imageada influenciam a resposta espectral dos dosséis. Como uma parte da radiação eletromagnética pode atravessar o dossel e atingir o solo, o que reveste o solo influenciará a reflectância do dossel. Em geral, dosséis mais homogêneos, com grande quantidade de folhas verdes, apresentam-se altamente reflectivos na região do infravermelho próximo e refletem pouco na região do vermelho. Para dosséis menos densos, o efeito da camada inferior do dossel e das sombras deve ser levado em conta ANDERSON (2004).

2.13. Índices de Vegetação

Os vários índices fundamentam-se em razões elaboradas a partir de valores de reflectância ou radiância apresentados pela cobertura vegetal, nas regiões espectrais do visível e do infravermelho próximo, uma vez que estas regiões são fortes indicadores da quantidade de biomassa fotossinteticamente ativa (TUCKER, 1979).

Os índices de vegetação foram criados, entre outras coisas, para tentar diminuir o trabalho de análise de dados orbitais, através da maximização de informações espectrais da vegetação no menor número de bandas de operação dos sensores. Eles foram criados no intuito de ressaltar o comportamento espectral da vegetação em relação ao solo e a outros alvos da superfície terrestre (realçar o contraste espectral entre a vegetação e o solo). Assim sendo, esses índices podem ser obtidos tanto de dados coletados por satélites como por equipamentos próximos ao alvo de interesse, como é o caso dos espectrorradiômetros (MOREIRA, 2003).

Os índices de vegetação resultam de transformações lineares da reflectância obtidas em duas ou mais bandas espectrais do espectro eletromagnético, através de soma, de razão entre bandas, da diferença, ou de qualquer outra combinação (WIEGAND *et al.*, 1991). Essa combinação visa reduzir o número de canais para um único índice numérico, além da obtenção de um índice com significado físico (FERNANDES *et al.*, 1998).

Os índices mais comumente usados são: Razão Simples (RVI) e o Índice de Vegetação Diferença Normalizada (IVDN). Matematicamente apresentam equivalência funcional, ou seja, contêm o mesmo tipo de informações sobre parâmetros biofísicos das culturas. Porém, o IVDN é mais sensível à vegetação esparsa do que o RVI (MOREIRA, 2003).

2.13.1. Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (IVDN)

Dentre os índices mais usados destaca-se o IVDN, que tem sido relacionado à biomassa, ao Índice de Área Foliar (IAF), à produtividade primária, à radiação fotossintética, ao dióxido de carbono e aos parâmetros meteorológicos e ecológicos. Seu cálculo é realizado pela aplicação da seguinte equação: $IVDN = (IVP-V) / (IVP+V)$, em que IVP e V representam as respostas espectrais (reflectância) dos objetos existentes na superfície terrestre, referentes às regiões do infravermelho próximo e vermelho, respectivamente (PONZONI *et al.*, 1998).

O IVDN pode ser empregado no monitoramento das condições de estresse da vegetação e associar isso à sua vulnerabilidade ao fogo.

Fernandes *et al.* (1998), ao analisarem a possibilidade de integrar um índice de vegetação (no caso o IVDN) com dados de umidade como indicadores de áreas potenciais ao fogo no cerrado brasileiro perceberam que o índice é um possível

indicador para áreas susceptíveis à ocorrência de incêndios. Também verificaram que áreas com baixo valor de IVDN apresentaram maior número de queimadas, para o caso do cerrado.

Com o aumento da cobertura vegetal, a reflectância na região do vermelho tende a diminuir, enquanto no infravermelho próximo tende a aumentar, devido às propriedades espectrais contrastantes de vegetação e solo (JARDIM-LIMA, 2003).

Durante a estação seca, a determinação do IVDN na região central do Brasil é afetada pela grande quantidade de aerossóis de fumaça produzida pelas queimadas. Os efeitos da fumaça tendem a ser mais fortes na faixa espectral do visível e sua influência diminui substancialmente na região do infravermelho próximo. No intervalo do infravermelho médio, especialmente entre 2000 nm e 2500 nm, a fumaça torna-se transparente à radiação solar, porque o comprimento de onda é maior que o tamanho das partículas de aerossóis (MOURA *et al.*, 2003).

Em imagens IVDN, a reflectância da cobertura vegetal na banda vermelha é baixa, aparecendo nas imagens em tons de cinza escuros, devido à absorção da clorofila existente nas folhas. Entretanto, no infravermelho próximo apresenta alta reflectância com tons de cinza claros devido à dispersão causada pela estrutura das folhas. Assim, o IVDN está relacionado com a densidade de vegetação (AGAREZ *et al.*, 2001).

2.14. Caracterização de sensores remotos

Os sensores são equipamentos capazes de coletar a energia proveniente do objeto, convertê-la em sinal passível de ser registrado e apresentá-la em forma adequada à extração de informações (NOVO, 1992).

O sensor a bordo de um satélite gera um produto de sensoriamento remoto denominado de imagem ao passo que uma câmara aerofotográfica, a bordo de uma

aeronave, gera um produto de sensoriamento remoto denominado de fotografia aérea (RUDORFF, 2005).

Os sensores remotos são equipamentos que captam e registram a energia refletida ou emitida pelos elementos da superfície terrestre. Dependente de suas características, eles podem ser instalados em plataformas terrestres, aéreas (balões, helicópteros e aviões) e orbitais (satélites artificiais). As câmaras fotográficas, as câmaras de vídeo, os radiômetros, os sistemas de varredura (scanners) e os radares são exemplos de sensores. Dependendo do tipo, o sensor capta dados de uma ou mais regiões do espectro eletromagnético. O olho humano é um sensor natural que enxerga somente a luz ou energia visível. Sensores artificiais nos permitem obter dados de regiões de energia invisível ao olho humano (FLORENZANO, 2002).

Segundo Rosa (1992), os tipos de sensores são:

- Sensores Imageadores – são os sistemas que fornecem uma imagem de um alvo. Exemplos: “*scanners*” e câmaras fotográficas.
- Sensores não-Imageadores – são os sistemas que fornecem informações sobre os alvos sem produzir imagens, estas informações podem estar contidas em gráficos, tabelas, etc. Exemplos: radiômetros, espectrorradiômetros e termômetros de radiação.
- Sensores Ativos – os sensores são ditos ativos quando têm uma fonte própria de radiação eletromagnética. Exemplos: radar e uma câmera fotográfica com flash.
- Sensores Passivos – são sensores que não possuem fonte própria de radiação. Exemplo: radiômetros, espectrorradiômetros e termômetros de radiação.
- Sensores Fotográficos – são os sistemas sensores que utilizam como fonte de registro um filme fotográfico. Exemplo: câmera fotográfica.

- Sensores Não-fotográficos – são os sistemas que não utilizam como fonte de registro um filme. Exemplos: radiômetros, sensor TM/Landsat, sensor MSS/Landsat, SPOT.

2.15. Sensor MODIS do satélite EOS/AQUA

O sensor MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*) visualiza toda a superfície da Terra a cada 1-2 dias, com uma varredura de 2.330 km, adquirindo dados em 36 bandas (canais) espectrais distintas, medindo a luz solar refletida de dia e a emissão térmica dia/noite da Terra. A resolução espacial varia de 250m (bandas 1-2, para medida da cobertura de nuvens), 500m (bandas 3-7, para medida de propriedades do solo e das nuvens) e 1000m (bandas 8-36, para avaliações de natureza bioquímica, para medições de vapor d'água, temperatura das nuvens, solo e da atmosfera, etc.) (ENVI, 2005; CEHIDRO, 2000). O MODIS pode ser usado para o monitoramento de mudanças em larga escala na biosfera e constituirá novas introspecções no funcionamento do ciclo global do carbono. Algumas características do sensor MODIS são mostradas no Quadro 1.

QUADRO 1: Características do sensor MODIS

Banda (Nº)	Longitude de onda (nm)	Radiância espectral (W/m ² -mm-sr)	Usos Principais	Tamanho do pixel em terra (m)	Pixels na Imagem	Nº de linhas da imagem
1	620 - 670	21,8	Limites de Terra, nuvens, aerossóis	250	5416	>20000
2	841 - 876	24,7				
3	459 - 479	35,3	Propriedades da Terra, nuvens, aerossóis	500	2708	>10000
4	545 - 565	29,0				
5	1230 - 1250	5,4				
6	1628 - 1652	7,3				

7	2105 - 2155	1,0				
8	405 - 420	44,9	Biogeoquímica, cor do oceano, fitoplâncton	1000	1354	>5000
9	438 - 448	41,9				
10	483 - 493	32,1				
11	526 - 536	27,9				
12	546 - 556	21,0				
13	662 - 672	9,5				
14	673 - 683	8,7				
15	743 - 753	10,2				
16	862 - 877	6,2				
17	890 - 920	10,0				
18	931 - 941	3,6				
19	915 - 965	15,0				
20	3660 - 3840	0,45 (300K)	Temperatura de superfície e nuvens			
21	3929 - 3989	2,38 (335K)				
22	3929 - 3989	0,67 (300K)				
23	4020 - 4080	0,79 (300K)				
24	4433 - 4498	0,17 (250K)	Temperatura atmosférica			
25	4482 - 4549	0,59 (275K)				
26	1360 - 1390	6,0	Vapor de água, nuvens Cirrus			
27	6535 - 6895	1,16 (240K)				
28	7175 - 7475	2,18 (250K)				
29	8400 - 8700	9,58 (300K)	Propriedades das nuvens			
30	9580 - 9880	3,69 (250K)	Ozônio			
31	10780 - 11280	9,55 (300K)	Temperatura de superfície, nuvens			
32	11770 - 12270	8,94 (300K)				
33	13185 - 13485	4,52 (260K)	Altitude máxima das nuvens			
34	13485 - 13785	3,76 (250K)				
35	13785 - 14085	3,11 (240K)				
36	14085 - 14385	2,08 (220K)				

FONTE: ENGESAT (2006).

As bandas do MODIS são particularmente sensíveis a incêndios; elas podem distinguir chamas de brasas e fornecer melhores estimativas de uma quantidade de aerossóis e gases de fogo dispersos na atmosfera (ENVI, 2005).

2.15.1. Produto MODIS/AQUA Thermal Anomalies (MYD14)

O MYD14 é um produto que fornece dados de 8 dias, com pixels detalhados de acordo com o nível de confiança de fogo, usando uma máscara de fogo que controla 8 bandas sequenciais. Os dados estão disponibilizados para dias consecutivos usando uma imagem pseudocolorida. A detecção de fogo pelo produto MYD14 A1 é realizada usando a temperatura de brilho dos canais 21 e 22 (ANDERSON, 2004).

2.15.2. Produto MODIS/AQUA Vegetation Index (MYD13)

O MYD13 apresenta-se potencialmente consistente para análises temporais das condições da vegetação global, podendo ser utilizado para monitorar a atividade fotossintética da vegetação em suporte a detecção de mudança e interpretações biofísicas e da fenologia. Algumas considerações devem ser levadas em conta para a aquisição destes dados, como o tamanho do pixel, a sua distorção no final da geração da imagem, a padronização dos dados segundo visada ao nadir e problemas com saturação do índice de vegetação, decorrente das visadas fora do nadir e com ângulos zenitais solares elevados (ANDERSON, 2004).

Os mosaicos gerados por este produto permitem a avaliação das variações temporais da atividade da vegetação. São gerados a cada 8, 16 e 30 dias, para um monitoramento preciso da sazonalidade. O produto é reamostrado para fornecer dados livres de nuvens, através da seleção de pixels com o máximo valor de IVDN. Estes dados apresentam-se também atmosféricamente corrigidos, e o produto é gerado

levando-se em conta o ajuste no nadir para evitar distorções devido à compressão de dados nos pixels localizados nas bordas das imagens. As resoluções espaciais disponíveis para este produto são de 250 m, 500 m e 1 km (ANDERSON, 2004).

2.15.3. Algoritmo de detecção de fogo do sensor MODIS

Segundo Justice *et al.* (2002), o algoritmo para detecção de fogo usa a temperatura de brilho derivada dos canais 21 e 22 (3,929 – 3,989 μm) do sensor MODIS, denominados T_4 e T_{11} , respectivamente. O canal 21 satura próximo de 500K e o canal 22 satura em 331K. Como os canais de baixa saturação possuem menos ruídos e têm um pequeno erro de quantização, T_4 é derivado deste canal sempre que possível. Entretanto, quando o canal 22 satura, ou tem dados falsos, ele é substituído pelo canal de alta saturação para derivar T_4 . O T_{11} é computado do canal 31 (10,780 – 11,280 μm), que satura em aproximadamente 400K.

A banda do infravermelho-próximo (0,86 μm) com 250 m, reamostrada para uma resolução média de 1 km, é também usada para identificar superfícies altamente reflectivas que são causas mais prováveis de falsos alarmes. Essa reflectância é denominada de ρ_2 (reflectância no canal 2) (JUSTICE *et al.*, 2002).

A estratégia de detecção do fogo, segundo Justice *et al.* (2002), é baseada na detecção absoluta do fogo, se o fogo é forte o suficiente, e na detecção relativa da emissão termal de pixels circundantes para detectar fogos fracos. Este último teste identifica pixels com valores elevados acima da emissão termal média obtida dos pixels circundantes. Este método computa a variação da temperatura da superfície e a reflexão pela luz solar. Os passos para o algoritmo são os seguintes:

- Para evitar falsa detecção, todos os pixels para o qual $T_4 < 315K$ (305K à noite) ou $T_4 - T_{11} < 10K$ (3K à noite) ou $\rho > 0,3$ (somente durante o dia) são imediatamente eliminados como possíveis focos de calor.
- Para uma detecção absoluta de fogo, o algoritmo requer que pelo menos uma das duas condições seja satisfeita:
 - 1) $T_4 > 360K$ (330K à noite)
 - 2) $T_4 > 330K$ (315 à noite) e $T_4 - T_{11} > 25K$ (10K à noite).

Se nenhum desses critérios é satisfeito, o algoritmo busca a definição relativa de fogo com base nos valores médios dos pixels originais mais 3 vezes o desvio padrão em T_4 e a diferença $T_4 - T_{11}$:

$T_4 > \text{média}(T_4) + 3 \times \text{desvio padrão}(T_4)$ e

$T_4 - T_{11} > \text{mediana}(T_4 - T_{11}) + 3 \times \text{desvio padrão}(T_4 - T_{11})$

A média, a mediana e o desvio padrão são computados para um determinado pixel “candidato” no centro de uma grade (filtro). O cálculo é executado até que um pixel sem nuvem, água ou fogo seja identificado. O número ideal de pixels a serem pesquisados corresponde a 25% do total de pixels da grade, considerando um mínimo de 6 pixels. Um pixel sobre a água é identificado por meio de uma máscara externa e a presença de nuvens é identificada como o MOD35 (máscara de nuvens). Pixels vizinhos sem fogo são identificados como aqueles pixels para os quais $T_4 < 325K$ (315K à noite) e $T_4 - T_{11} < 20K$ (10K à noite). Se houver algum desvio padrão abaixo de 2k, o valor de 2K é usado em seu lugar. A grade de pixels vizinhos vai crescendo até a um máximo de 21 x 21 pixels. Se este limite é atingido e o número de pixels vizinhos não é encontrado, de acordo com os critérios estabelecidos, o teste de detecção relativa não pode ser usado. Se o teste absoluto não indica que um fogo ativo está presente nesta situação, o algoritmo marca o resultado da detecção como desconhecido (JUSTICE *et al.*, 2002).

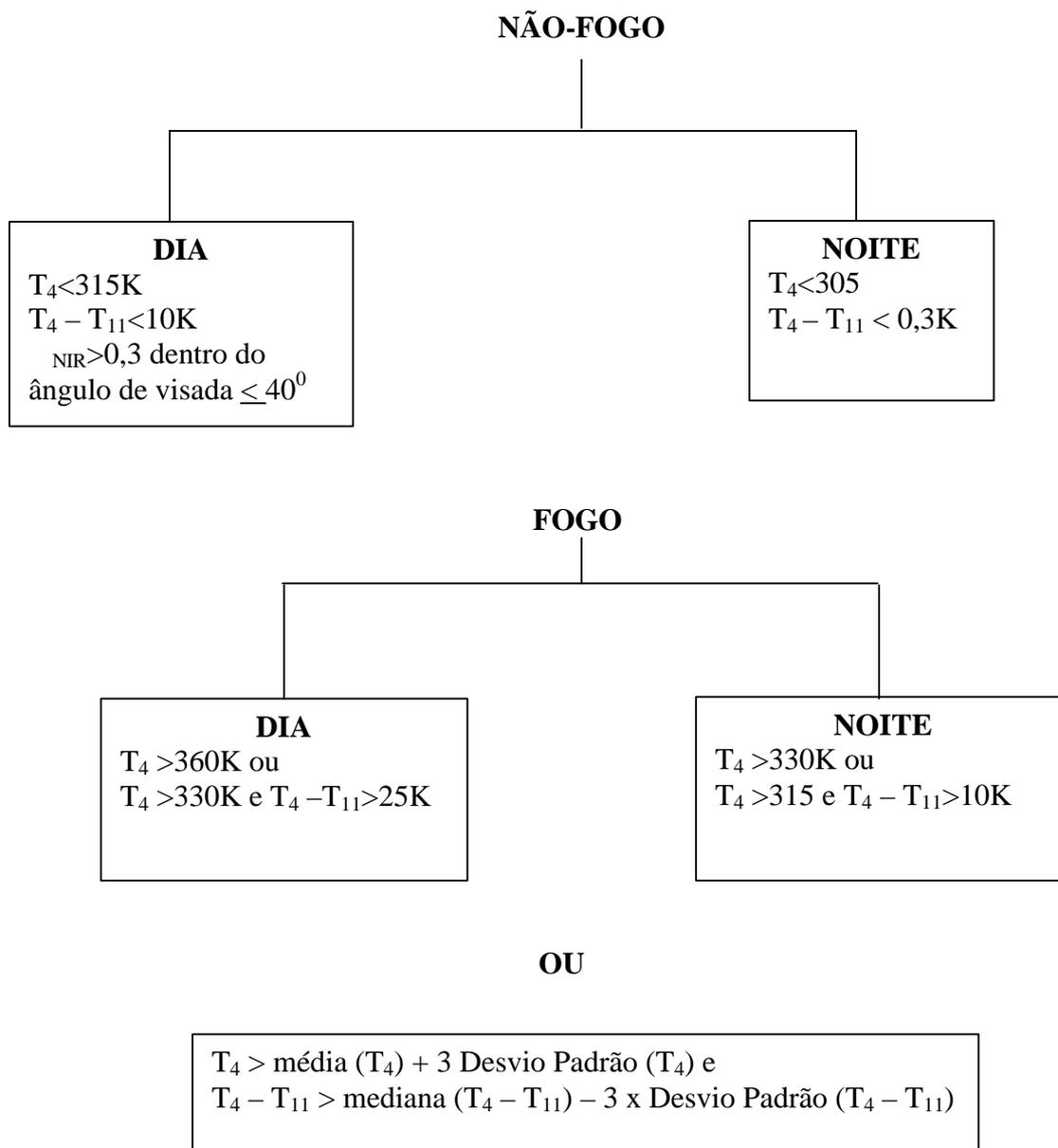
Combinando todos os testes em uma única expressão, um pixel é classificado como um pixel de fogo durante o dia se as seguintes condições forem satisfeitas (JUSTICE *et al.*, 2002):

- $T_4 > \text{média}(T_4) + 3 \times \text{desvio padrão}(T_4)$ ou $T_4 > 330\text{K}$ e
- $\{T_4 - T_{11} > \text{mediana}(T_4 - T_{11}) + 3 \times \text{desvio padrão}(T_4 - T_{11})$ ou $T_4 - T_{11} > 25\text{K}\}$
ou $T_4 > 360\text{K}$.

Para o período noturno o algoritmo torna-se:

- $\{T_4 > \text{média}(T_4) + 3 \times \text{desvio padrão}(T_4)$ ou $T_4 > 315\text{K}\}$ e
- $\{T_4 - T_{11} > \text{mediana}(T_4 - T_{11}) + 3 \times \text{desvio padrão}(T_4 - T_{11})$ ou $T_4 - T_{11} > 10\text{K}\}$
ou $T_4 > 330\text{K}$.

Finalmente, para observações diurnas quando o sol pode causar falsa detecção, um pixel de fogo é rejeitado se o MODIS 250 m, nos canais vermelho e infravermelho tiver reflectância acima de 30% e ângulo até 40° na posição de reflexão especular (JUSTICE *et al.*, 2002). Uma síntese de todos esses passos é mostrada na Figura 4.



Onde,
 T_4 = Temperatura de brilho no canal 4
 T_{11} = Temperatura de brilho no canal 11
 NIR = Reflectância no infravermelho próximo
 K = Kelvin

FIGURA 4: Algoritmo MODIS simplificado

2.16. Sensor AVHRR do Satélite NOAA

Os satélites polares com sensores multiespectrais AVHRR (*Advanced Very High Resolution Radiometer*) pertencem à empresa norte-americana NOAA (*National Oceanic and Atmospheric Administration*) e são administrados pela NESDIS (*National Environmental Satellite, Data, and Information Service*). O NOAA é um satélite do tipo heliosíncrono, ou seja, o satélite passa nas regiões com o sol numa posição aproximada a da passagem anterior, permitindo observar com determinada geometria de iluminação diferentes pontos do planeta. Cada satélite leva um período de 101,35 minutos para passar novamente pela linha do Equador e passa em uma mesma região em intervalos de aproximadamente 12 horas (LATURNER et al., 2004). Atualmente, encontram-se em funcionamento o NOAA-12, NOAA-16 e o NOAA-17, que possibilitam obter informações sobre uma mesma área seis vezes por dia (três diurnas e três noturnas). Sua principal utilização é a obtenção de informações meteorológicas através de seu sensor AVHRR, que fornece imagens no visível e no infravermelho de dia e de noite. Constitui-se de um radiômetro multiespectral acoplado a um sistema de varredura transversal à trajetória do satélite que fornece imagens em vários canais no visível e no infravermelho, permitindo avaliações precisas do gelo, da massa d'água, das condições das nuvens e temperaturas da superfície do mar. Esse sensor apresenta uma resolução espacial no nadir de aproximadamente 1,1 km. O satélite orbita a Terra a uma altitude de 844 km (LATURNER et al., 2004; MOREIRA, 2004).

O AVHRR apresenta 5 bandas espectrais, sendo uma banda no espectro solar (luz visível: 0,58 - 0,68 μm), no qual os dados são empregados no mapeamento diurno de nuvens, gelo e neve; outra banda no infravermelho próximo (0,725 - 1,10 μm), que fornece informações sobre delimitação de massa d'água, avaliação de vegetação e agricultura (combinado com a banda no canal visível). Outras três bandas no

infravermelho termal (3,55 - 3,93 μm canal 3 - mapeamento noturno de nuvens, temperatura da superfície do mar, detecção de queimadas e atividades vulcânicas; 10,3 - 11,3 μm - canal 4 - mapeamento diurno e noturno de nuvens, temperatura do mar, umidade do solo, atividades vulcânicas; 11,5 - 12,5 μm – canal 5 - temperatura do mar e umidade do solo), que são usadas para avaliar a distribuição de temperatura sobre o mar e a superfície terrestre, inclusive para detectar queimadas (temperaturas muito acima do normal) (EMBRAPA, 2000; MOREIRA, 2004). O AVHRR/NOAA possui uma resolução radiométrica de 10 bits, seu canal termal pode estimar a temperatura superficial dos alvos terrestres com maior exatidão na faixa de 3,55 e 11,5 μm (bandas 3 e 4) (RIVERA-LOMBARDI, 2003).

Este sensor possibilita realizar previsões climáticas em geral, gerar o NVDI (Normalized Vegetation Distribution Index), TSM (*Sea Surface Temperature*), LST (*Land Surface Temperature*), previsões de queimadas, etc. (EMBRAPA, 2000).

Nem sempre um foco de calor pode ser considerado um incêndio, pois uma superfície estando muito aquecida como um solo exposto, por exemplo, pode sensibilizar um sensor, sendo considerada como um foco de calor, porém não é um incêndio. O problema de reflexão solar não afeta dados adquiridos no final da tarde ou no início da noite, quando o sol está bem baixo e os solos já apresentam uma temperatura bem inferior à observada durante o dia (EMBRAPA, 2000).

Apesar do NOAA/AVHRR ser utilizado no Brasil e em outras partes do mundo na detecção de queimadas, ele apresenta limitações para gerar estimativas confiáveis da área afetada pela queimada. Problemas relacionados às estimativas da extensão da área queimada ocorrem principalmente devido a confusão entre áreas queimadas, solo exposto, áreas cobertas por vegetação baixa, áreas urbanas e a grande área de cada pixel (1,1 km x 1,1 km) que integra áreas queimadas e não queimadas, dificultando a

determinação do percentual da área de cada pixel correspondente somente à queimada. As imagens do AVHRR são úteis para identificar focos de calor numa base rotineira e apropriada para uso operacional em tempo quase real para identificar e localizar focos de calor e também queimadas. Entretanto, não estimam com exatidão a área queimada ou a temperatura do fogo (EMBRAPA, 2000).

O tratamento e análise das imagens do sensor AVHRR do satélite NOAA, no INPE, para detecção e monitoramento de queimadas é baseado em técnicas que vêm sendo aprimoradas desde 1985. Os focos de calor são identificados a partir de *pixels*, que apresentam altas temperaturas, os quais possuem os mais baixos valores de nível de cinza nas imagens da região infravermelho termal banda 3 (3.7 μ m) do AVHRR. Esta banda mede emissão de energia radiante da superfície terrestre, onde os *pixels* saturados correspondem à temperatura nominal de pelo menos 47°C, normalmente associada a alvos em combustão (JUSTINO *et al.*, 2002). Os dois satélites utilizados pelo INPE na detecção de queimadas são NOAA-12 e NOAA-14 (EMBRAPA, 2000). O Quadro 2 mostra as características dos sensores do satélite NOAA.

QUADRO 2: Características dos Sensores do Satélite NOAA

Sensor	Bandas Espectrais	Resolução Espectral (μ m)	Resolução Espacial (km)	Resolução Temporal	Faixa Imageada (km)
AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer)	1 (Vermelho)	0,58 - 0,68	1,1	Diária (no máximo)	2400
	2 (IV. próximo)	0,72 - 1,10			
	3 (IV. médio)	3,55 - 3,93			
	4 (IV. termal)	10,30 - 11,30			
	5 (IV. termal)	11,30 - 12,50			
AVHRR/3	1 (Vermelho)	0,58 - 0,68	1,1	Diária (no máximo)	2400
	2 (IV. próximo)	0,72 - 1,10			
	3A (IV. próximo)	1,58 - 1,64			
	3B (IV. médio)	3,55 - 3,93			
	4 (IV. termal)	10,30 - 11,30			
	5 (IV. termal)	11,30 - 12,50			

FONTE: EMBRAPA (2000).

2.16.1. Detecção de focos de calor pelo sensor AVHRR/NOAA

A região em torno de 3,7 μm , da banda 3 do sensor AVHRR é especialmente complexa por conter informações tanto do espectro eletromagnético refletido quanto do emitido. Apesar disto, ela é considerada como a melhor banda deste sensor para a detecção de queimadas, devido ao fato de que o imageamento de incêndios neste intervalo torna possível a detecção das frentes de incêndio e manchas quentes através de fumaça (FRANÇA *et al.*, 2005).

No estudo de Pereira & Setzer (1993), os pixels dos canais 1 e 2 do AVHRR/NOAA, para detecção de fogo, não foram tão distinguidos como no canal 3, quando se considera a variação digital, bem como as medias e variâncias. De acordo com esses mesmos autores, o canal 3 possui escala invertida, onde o menor valor corresponde ao mais alto nível de energia recebido pelo sensor AVHRR, além disso, o canal 3 fornece um histograma bimodal, no qual há um pico do nível digital numa escala de 1 a 8, associado ao pixel de fogo.

Dozier (1981), Matson & Dozier (1981) e Matson *et al* (1984) demonstraram que o canal 3 (3,55 a 3,93 μm) do NOAA poderia ser usado para detectar incêndios florestais em regiões extensas. E propuseram que o tamanho dos incêndios e até mesmo suas temperaturas poderiam ser obtidos combinando os canais 3 e 4 (10,3 a 11,3 μm) se os pixels do sensor AVHRR não estiverem saturados.

Segundo Kennedy *et al* (1993) para um pixel localizado no nadir, onde a resolução espacial do AVHRR é de 1,1 km, contendo um único elemento com temperatura ambiente de 27° C (300 K), a radiância recebida nos canais 3 e 4 deverá ser de 0,442 $\text{w/m}^2 \mu\text{m sr}$ e de 9,68 $\text{w/m}^2 \mu\text{m sr}$, respectivamente, assumindo a emissividade de 1 e nenhuma atenuação com a atmosfera. Para um pixel contendo metade de sua área com temperatura ambiente (300 K) e metade da área com fogo (800 K) a média de

energia radiante para os canais 3 e 4 será de $670 \text{ w/m}^2 \mu\text{m sr}$ e $99,92 \text{ w/m}^2 \mu\text{m sr}$, respectivamente, ou seja, a radiância recebida pelo canal 3 aumenta no fator de 1516 e a recebida pelo canal 4 aumenta em um fator de 10. Essa diferença de resposta é a base para se detectar queimadas através do sensor AVHRR/NOAA.

2.17. Índices de Risco de Incêndios

Índices de perigo de incêndio são números que refletem antecipadamente a probabilidade de ocorrência de um incêndio florestal, com base nas condições atmosféricas do dia ou de uma sequência de dias. Os índices mais conhecidos no Brasil são: O Índice de Angstron, o Índice Logarítmico de Telicyn, o Índice de Nesterov e o Índice Fórmula de Monte Alegre. Desses, apenas o último foi desenvolvido no Brasil (SANT'ANNA, 2001).

Esses índices, quando adequadamente adaptados e difundidos numa região, têm várias finalidades, como orientação ao público, definição da estação normal do fogo, indicação do dia ou período de dias críticos (favoráveis à ocorrência de incêndios), orientação para a realização da queima controlada e auxílio na decisão para fechamento de áreas à visitação pública, como os parques, dentre outros (RIBEIRO, 2000).

A determinação das épocas de maior risco de ocorrência de incêndios é feita através de índices de previsão que se baseiam, principalmente, em dados meteorológicos coletados em estações ou postos de observação. Dentre as variáveis meteorológicas mais utilizadas destacam-se a precipitação pluviométrica e a umidade relativa do ar (SAMPAIO, 1991).

2.17.1. Índice de Risco Fórmula de Monte Alegre (FMA)

A Fórmula de Monte Alegre foi desenvolvida em 1972 e tem sido usada desde então por várias empresas e instituições florestais brasileiras para estimar o grau de perigo de incêndio e ajudar no planejamento das atividades de prevenção e combate. Ela requer apenas duas variáveis meteorológicas, umidade relativa do ar e precipitação pluviométrica, para ser calculada, e pode ser usada em praticamente todo o país, fazendo-se as devidas adaptações na escala de perigo quando e onde necessárias, ou pelo menos nas regiões onde a umidade relativa é o parâmetro mais relacionado à ocorrência dos incêndios.

O grau de perigo de incêndio do dia é indicado através de uma escala de cinco níveis, conforme mostra o Quadro 3 (SOARES, 1998):

QUADRO 3: Grau de perigo de incêndio do índice FMA

Valor de FMA	Grau de perigo
1,0	Nulo
1,1 a 3,0	Baixo
3,1 a 8,0	Médio
8,1 a 20,0	Alto
> 20,0	Muito alto

O fator de modificação no cálculo (f) é determinado com base na precipitação pluviométrica ocorrida no dia e é extraído da relação mostrada no Quadro 4.

QUADRO 4: Valores do fator “f” de acordo com a precipitação pluviométrica

Precipitação (mm)	Valor de f
2,4	1
2,5 a 4,9	0,7
5,0 a 9,9	0,4
10,0 a 12,9	0,2
>12,9	Faça $FMA_{hoje} = 0$ e recomece os cálculos quando a chuva cessar

A Fórmula de Monte Alegre é um índice acumulativo que requer valores diários de umidade relativa do ar e quantidade de precipitação, ambas registradas nas últimas 24 horas.

A FMA foi desenvolvida através de dados meteorológicos e de ocorrência de incêndios da Fazenda Monte Alegre, município de Telêmaco Borba, PR, durante 7 anos (1965 a 1971). Sua equação básica é a seguinte (SOARES, 1998):

$$FMA_{hoje} = FMA_{ontem} * f + (100/UR)_{hoje}$$

Onde:

FMA_{hoje} = índice a ser calculado para o dia atual.

FMA_{ontem} = índice calculado no dia imediatamente anterior.

f = fator de correção do valor acumulado, determinado de acordo com a precipitação ocorrida nas últimas 24 horas.

UR_{hoje} = umidade relativa do dia atual.

A fórmula de Monte Alegre, desenvolvida a partir de dados da região central do estado do Paraná, tem sido adotada em varias regiões do Brasil e da América Latina e utiliza duas variáveis: uma de forma direta, a umidade relativa do ar, medida às 13:00 horas, e outra de forma indireta, a precipitação diária (NUNES *et al.*, 2005).

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. Localização da Área de Estudo

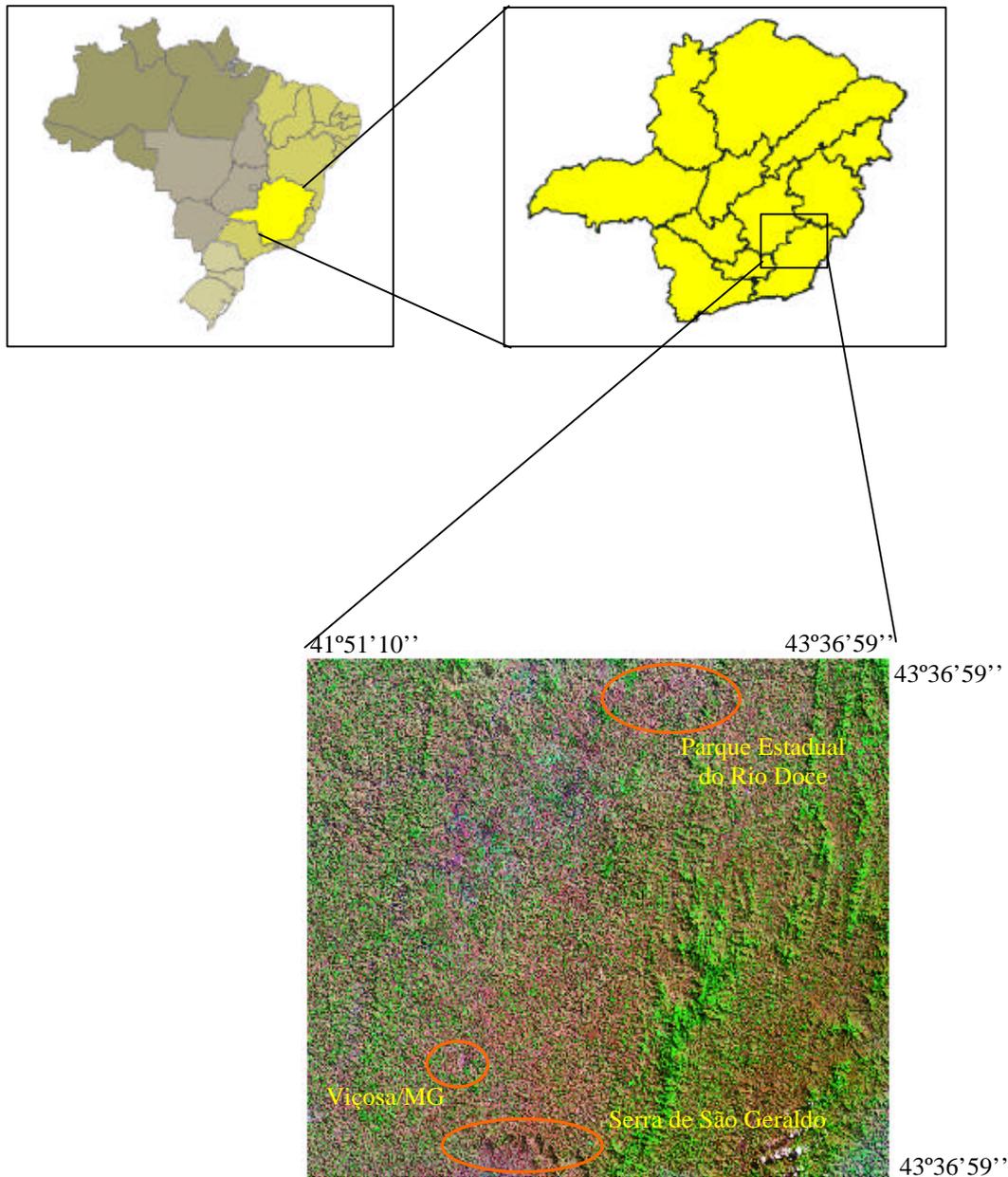


FIGURA 5: Localização da Área de Estudo.

A área de estudo (Figura 5) se encontra nas Mesorregiões da Zona da Mata, Metropolitana de Belo Horizonte, Campo das Vertentes e Vale do Rio Doce, no Estado

de Minas Gerais, entre as coordenadas: Latitude 1/Sul: 21°12'2,42''; Longitude 1/Oeste: 43°36'59,65''; Latitude 2/Sul: 19°15'46,34''; Longitude 2/Oeste: 41°51'10,74''. O seu tamanho total de aproximadamente 38.372 km². Na mesorregião Zona da Mata se encontra o município de Viçosa, o qual será um dos objetos deste estudo.

A Figura 6 mostra a área de estudo separada nas mesorregiões citadas anteriormente. O nome dos municípios referentes a cada número da Figura 6 é apresentado no Anexo 6.

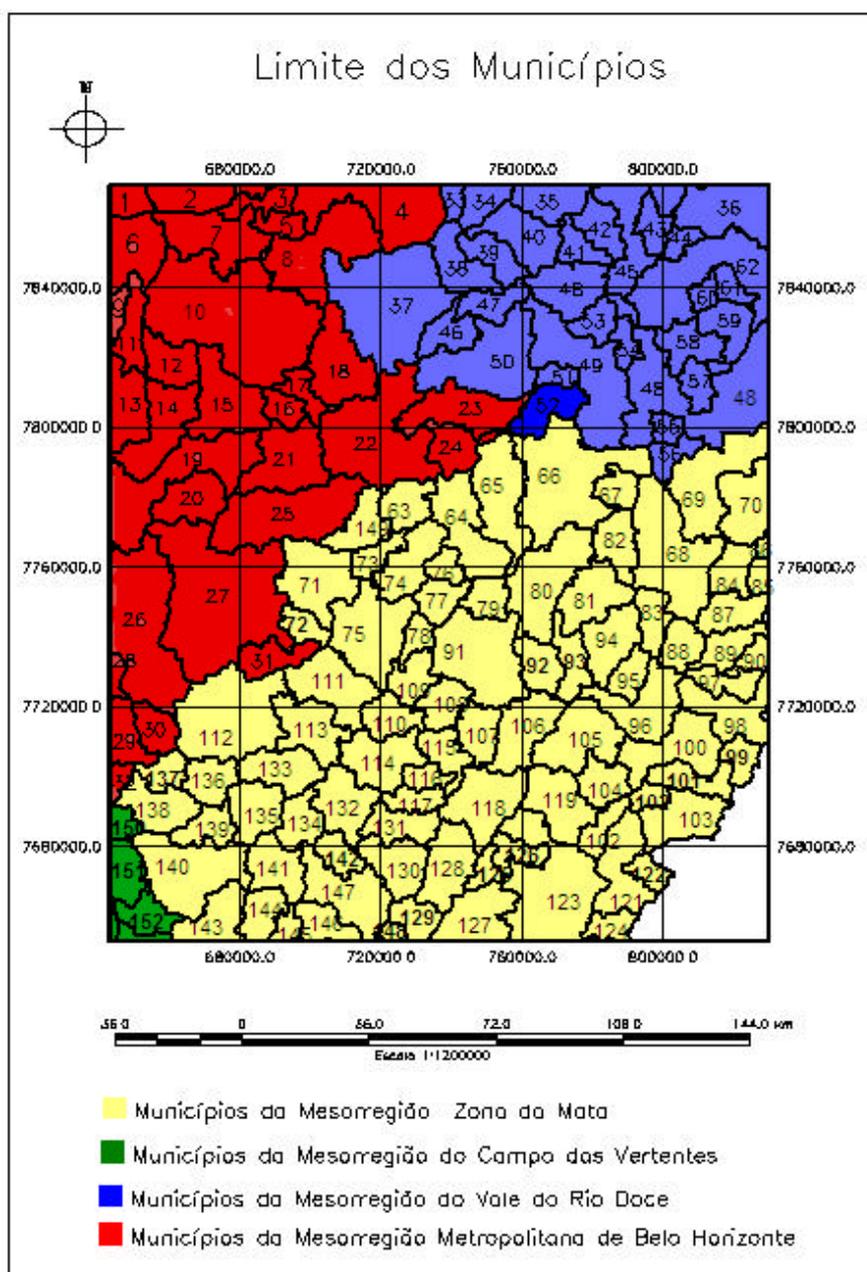


FIGURA 6: Área de estudo separada em mesorregiões

3.2. Descrição da Área de Estudo

3.2.1. Vegetação

As formações vegetais existentes nas mesorregiões da Zona da Mata, Campos das Vertentes, Vale do Rio Doce e Metropolitana de Belo Horizonte são, em sua grande maioria, Floresta Estacional Semidecidual Montana e Submontana, nos estágios primário e secundário, sujeitas a um ritmo estacional, com 20 a 50% de árvores caducifólias na época desfavorável (estação seca) (VELOSO *et al.*, 1991).

3.2.2. Solo

Os solos da Zona da Mata apresentam a predominância de duas classes: latossolos, no topo e nas encostas das elevações e argissolos vermelho-amarelo, nos terraços (RESENDE, 1971). Os latossolos vermelho-amarelos são álicos ou distróficos, mas podem ser eutróficos, em extensões consideráveis, nas regiões mais secas (RESENDE *et al.*, 1997).

Na mesorregião Metropolitana de Belo Horizonte predominam os solos incipientes ou pouco desenvolvidos e exposições rochosas. Esses solos enquadram-se nos grupamentos de cambissolos e solos litólicos, álicos e distróficos, cascalhentos ou não com textura variando de arenosa a argilosa. Os latossolos são de pequena expressão na região, sendo encontrados apenas em situações geomorfológicas próprias, de topografia mais suavizada (CETEC, 1993).

Os solos da mesorregião Vale do Rio Doce são em sua maioria, argilosos e álicos, com acidez média a elevada, havendo predomínio de solos saturados com alumínio e hidrogênio no complexo sortivo (CETEC, 1978).

3.2.3. Relevo

A Zona da Mata de Minas Gerais encontra-se no domínio dos mares de morros florestados, onde as florestas semidecíduas ocorrem em sua grande maioria (VELOSO

et al., 1991). Embora essa área esteja toda sobre o largo prolongamento (aproximadamente 250 x 120 km) da Serra da Mantiqueira no sentido noroeste, ela não possui altitudes constantes acima de 1000m como ocorre no sul de Minas Gerais e nem tem seu nome associado ao dessa serra. As altitudes variam desde 200 m a 400 m e 800 m a 900 m na sua periferia. Em áreas de relevo fortemente ondulado, o povoamento se processou ao longo dos vales, deixando os altos e partes das encostas cobertas de matas. Já nas áreas de campos naturais o padrão da vegetação é justamente o inverso: os campos ficam nos altos e as florestas ocupam os vales, formando matas ciliares e capões nas nascentes (VALVERDE, 1958).

A mesorregião do Vale do Rio Doce apresenta relevo com duas formas: colinas e planícies (GILHUIS, 1986).

3.2.4. Clima

O tipo de clima predominante na Zona da Mata é o Cwa (mesotérmico – em que a temperatura do mês mais frio é inferior a 18° C, com chuvas no verão e inverno seco, a temperatura média do mês mais quente é de 22° C), sendo também identificado o tipo Cwb (tropical de altitude, com verões frescos e chuvosos) de acordo com a classificação de Köppen, tropical de altitude, com verões chuvosos e invernos frios e secos (BARUQUI, 1982; MEIRA-NETO, 2002; VALVERDE, 1958). Um dos fatores geográficos que vão exercer influência sobre o clima da Zona da Mata, é o relevo (GOLFARI, 1975). Esse clima também é comum, segundo a classificação de Köppen, para as mesorregiões Metropolitana de Belo Horizonte e Campos das Vertentes.

Na região do Vale do Rio Doce predomina o clima Aw (clima tropical úmido – megatérmico – das savanas, em que a temperatura média do mais frio é superior a 18° C e as chuvas estão concentradas no verão, sendo a precipitação do mês mais seco inferior a 60 mm) (BARUQUI, 1982).

3.2.5. Precipitação Pluviométrica

Na mesorregião da Zona da Mata, ocorre baixa precipitação pluviométrica no inverno, observando-se queda de temperatura durante a noite e parte da manhã; no verão, os dias são quentes e as noites mais frias. As chuvas são típicas nos meses de outubro a março, com grande incidência no mês de dezembro, chegando a exceder 300 mm. O inverno tem geralmente 2 a 4 meses secos, com um déficit hídrico pequeno entre 10 a 30 mm anuais. A evapotranspiração potencial anual varia entre 800 a 850 mm (GOLFARI, 1975).

Na mesorregião Vale do Rio Doce, o regime pluviométrico consiste de uma estação chuvosa e uma estação seca, bem definidas, ou seja, a precipitação pluviométrica é concentrada em um período do ano e alcança até 235 mm no mês de dezembro, reduzindo para 9 mm em agosto (CETEC, 1978; GILHUIS, 1986).

A mesorregião Metropolitana de Belo Horizonte é invadida durante o ano por sistemas extratropicais, que provocam chuvas no período da primavera, verão e outono. Essa região pode ser considerada uma região chuvosa, sendo os meses de junho, julho e agosto os meses mais secos e novembro, dezembro e janeiro os mais chuvosos (PINHEIRO, 1997).

3.3. Programas utilizados nas análises

- **Software SPRING** (versão 4.1.1) (Sistema de Processamento de Informações Georreferenciadas) - é um Sistema de Informações Geográficas (SIG) com funções de processamento de imagens, análise espacial, modelagem numérica de terreno e consulta a bancos de dados espaciais. A linguagem LEGAL deste programa foi usada para elaborar algoritmos para execução de várias funções dentro do programa SPRING (ANEXOS 1 a 4).

- **Software *Modis Reprojection Tools (MRT)*** - 2002: Importa dados MODIS em formato HDF. Suporta produtos “terra” na projeção *integerized*, sinusoidal em níveis-2G, nível-3 e nível-Suporta *multi-dimensional Science Data Sets (SDSs)* Tipos de dados suportados: 8, 16, 32-bit *integers*; 32-bit *floating point*. Os dados de saída são idênticos aos dados de entrada. O MRT também faz conversões de Datum: NAD 27, NAD 83, WGS 66, WGS 72, WGS 84. Os formatos dos arquivos de entrada são: HDF-EOS e dados binários. Os arquivos de saída são: HDF-EOS, Geo-TIFF e binários com *header*;
- **ConvGeotiff** (versão 1.0) – 2003 (INPE). O programa ConvGeotiff foi desenvolvido no INPE com a finalidade de converter os dados MODIS disponíveis em 16 bits para 8 bits, de forma que possam ser processados pelo software SPRING 4.1.1. Este programa restaura o valor de reflectância de cada pixel através da equação: $\text{Pixel} = \text{pixel} / 10.000$ (4.1) e converte a reflectância para números digitais (ND), utilizando o intervalo -0,01 a 1,0.
- **Programa Incêndios Florestais** – é um sistema computacional para cálculo de índices de risco de incêndio florestal, desenvolvido pelo Cientec, com o apoio da companhia Energética de Minas Gerais (CEMIG), em convênio com a Sociedade de Investigações Florestais (SIF), através do Projeto CEMIG-ANEEL P&D-043.

3.4. Coleta de Dados

3.4.1. Aquisição de imagens MYD13 e MYD14

Para a realização deste trabalho foram utilizadas imagens do ano de 2004 e 2005, dos produtos MYD13 e MYD14 do sensor MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*) a bordo do satélite EOS/Aqua (*Earth Observing System*). O produto MYD14 possui uma resolução temporal de 8 dias e resolução espacial de 1 km. Já o produto MYD13 possui resolução temporal de 16 dias e resolução espacial de 250m. Esses produtos fornecem imagens no formato HDF e foram obtidos através do site <http://edcimswww.cr.usgs.gov/pub/imswelcome/>.

As cenas analisadas correspondem à área compreendida entre as coordenadas: Longitude 1/Oeste: 43°36'59,65''; Latitude 1/Sul: 21°12'2,42''; Longitude 2/Oeste: 41°51'10,74''; Latitude 2/Sul: 19°15'46,34', no Estado de Minas Gerais.

Foram feitos mosaicos com os *Tiles*: h13/v10, v11 e h14/v10, v11 da grade de recobrimento do sensor MODIS através do software MRT (*Modis Reprojection Tools*) utilizando a opção *Mosaic Tool*. O formato HDF (Hierarchical Data Format) das imagens foi convertido para Geo-TIFF, por este mesmo programa.

O Datum utilizado para o projeto foi o WGS84, com a projeção em UTM e a Zona 23.

Para que as imagens MYD14 ficassem com a mesma resolução temporal das imagens MYD13 (16 dias) foi feito um mosaico com dois períodos de 8 dias para que se tornassem um período de 16 dias. Esse processo foi necessário porque imagens MYD14 com resolução temporal de 16 dias não estavam disponíveis.

As imagens MYD14, ao serem adquiridas, vêm classificadas de acordo com as categorias mostradas no Quadro 5, com base em seus níveis de cinza. As três últimas categorias, que são relacionadas com os diferentes níveis de confiança de fogo serão

empregadas nas comparações com os focos de calor registrados pelos satélites NOAA-12 (noite) e NOAA-16 (tarde) e com os graus de risco de incêndios, apontados pela fórmula de Monte Alegre.

Quadro 5: Fatiamento da imagem MYD 14, de acordo com seus níveis de cinza

Nível de Cinza	Classe ou categoria
0	Não processado (ruído)
2	Não processado (outra razão)
3	Água
4	Nuvem
5	Sem fogo
6	Desconhecido
7	Baixa confiança fogo
8	Média confiança fogo
9	Alta confiança fogo

Um mosaico de imagem TM/LANDSAT (2B, 4G, 7R) ortoretificada (NASA, 2006), com resolução espacial de 28,5m, foi utilizado para como referência para localização dos pontos nas imagens MYD14, que possuem resolução espacial de 1 km.

Para as imagens MYD13, além de mosaicos, também foi feita uma conversão de 16 bits para 8 bits através do software ConvGeotiff (ARAI *et al*, 2005). As imagens MYD13 foram “fatiadas” através da linguagem LEGAL (Linguagem Espacial para Geoprocessamento Algébrico) do software SPRING para uma melhor diferenciação de suas classes, como mostrado no Quadro 6.

As imagens com extensão GeoTIFF foram importadas para o software Spring 4.1.1 e inseridas em um banco de dados para serem transformadas em imagens temáticas e dados numéricos.

Quadro 6: Fatiamento das Imagens MYD 13 em classes

Variação de IVDN	Classes ou categorias
[127, 153]	Muito Baixo IVDN
[154, 180]	Baixo IVDN
[181, 207]	Médio IVDN
[208, 234]	Alto IVDN
[235, 255]	Muito Alto IVDN

Para avaliar a relação entre as informações do MYD13 e os focos de calor detectados pelos satélites NOAA, foi feita a sobreposição de imagens e computadas as classes que coincidiam com os focos de calor.

Os passos executados para a aquisição e processamento das imagens MODIS (MYD13 e MYD14) utilizadas no trabalho são apresentados na Figura 7 e 8.

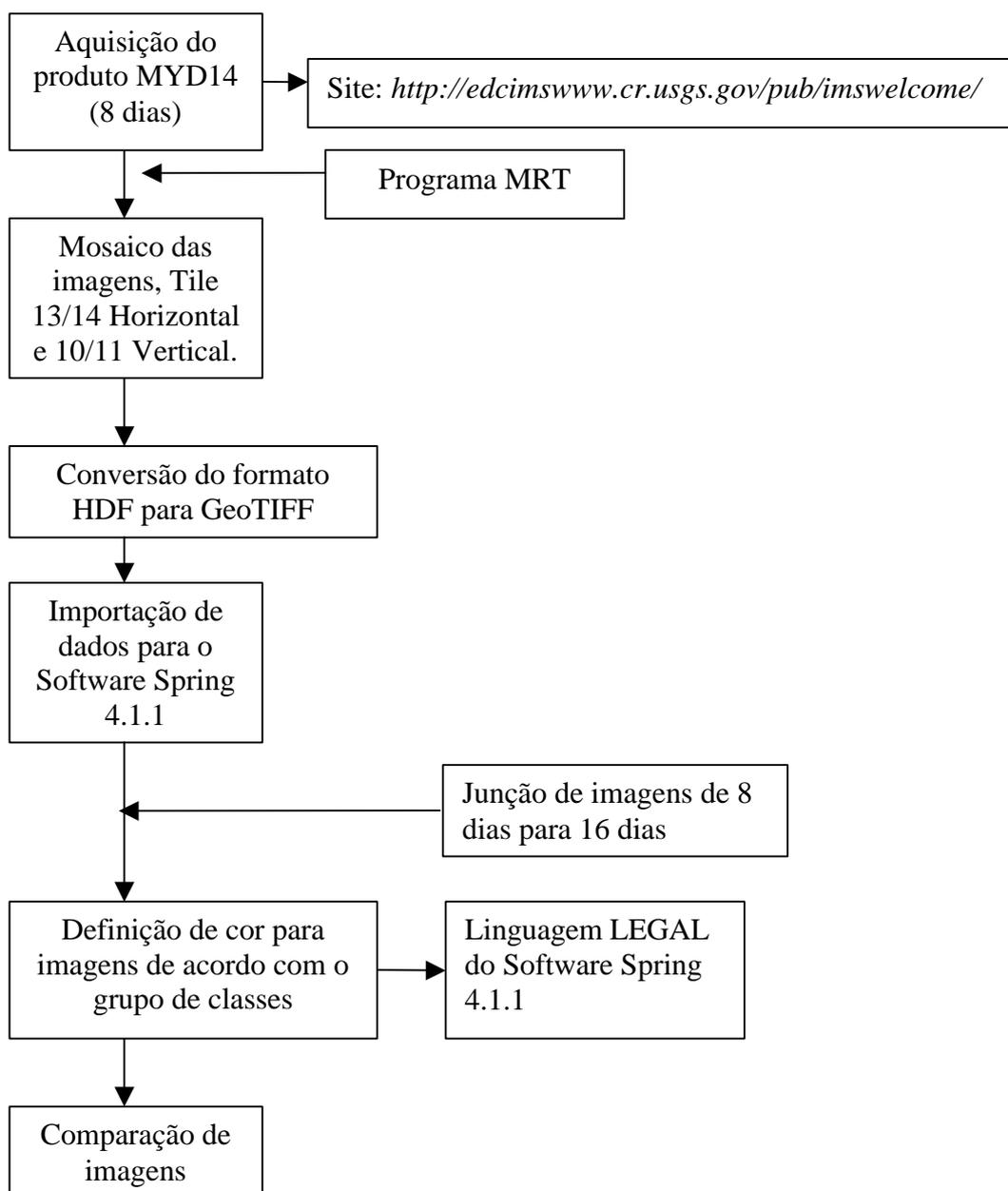


FIGURA 7: Etapas para aquisição e processamento das imagens MYD 14.

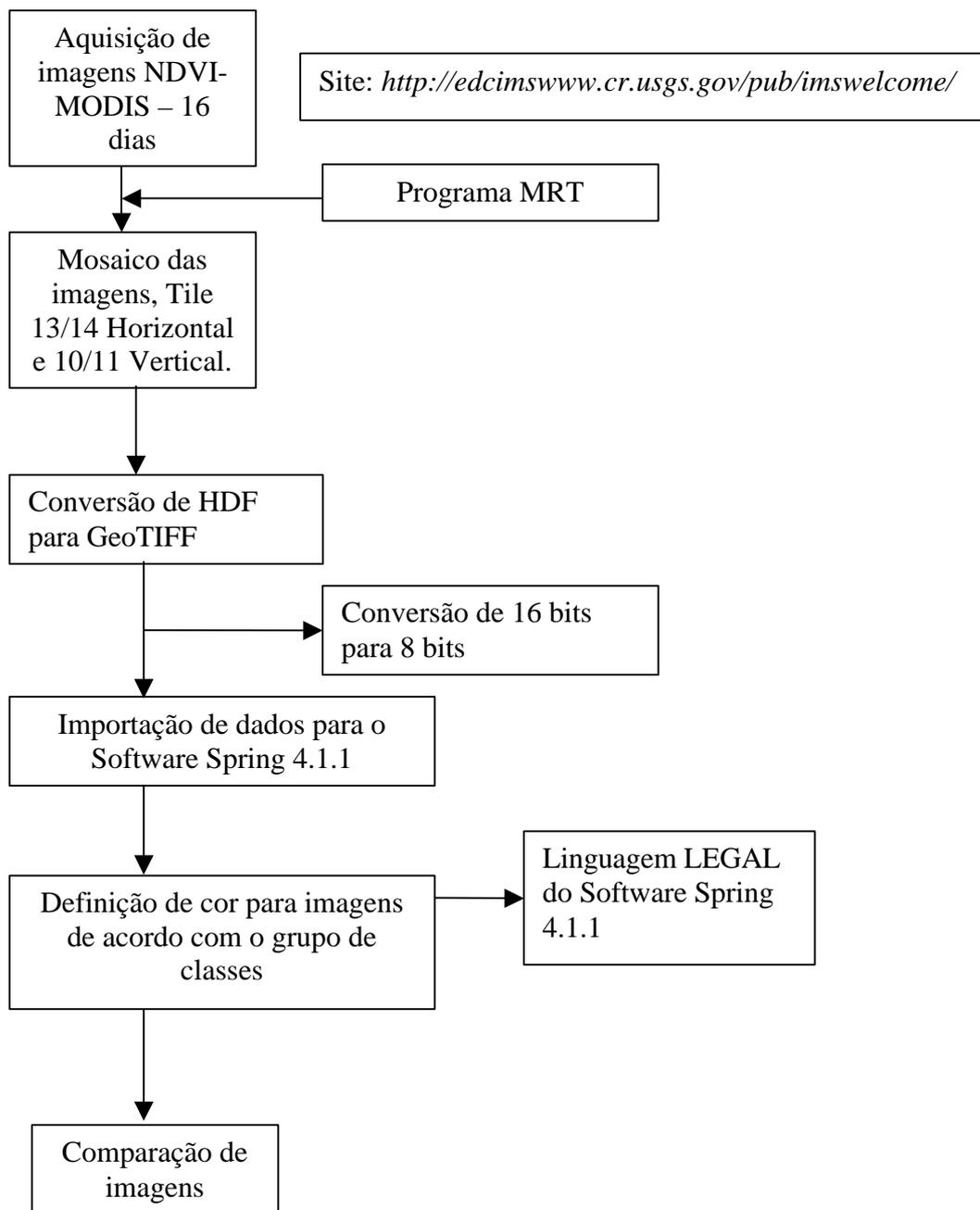


FIGURA 8: Etapas para aquisição e processamento das imagens MYD 13.

3.4.2. Aquisição dos focos de calor detectados pelo NOAA/AVHRR

Para adquirir os dados NOAA/AVHRR, foram utilizados os satélites: NOAA-12, que passa no horário de 21:00h e 22:45h GMT, sendo 18:00h e 19:00h no horário de Brasília, e o satélite NOAA-16 que passa no período de 16:00h e 17:00h, no horário de Brasília. Foram utilizados dados de todo o ano de 2004 e do período crítico de 2005 (julho a novembro). O Datum utilizado foi o WGS84; o meridiano central foi de 45°00'00'' e a unidade das coordenadas planas foi metro.

Os focos de calor detectados representam queimadas ativas ou em fase de extinção. O número de focos obtidos por estas passagens representa o melhor estimador das queimadas ocorridas no dia. Após a aquisição dos dados em formato ASCII (*American Standard Code for Information Interchange*) estes passaram por outros processos como alteração da extensão e da forma de representação (vírgulas por ponto e vírgula) antes de sua adição ao banco de dados do Spring. Ao serem adicionados ao banco, os dados numéricos são transformados em dados temáticos, que no caso são pontos para melhor visualização dos focos.

Dados de focos de calor dos satélites NOAA-12 e NOAA-16, obtidos através do site: <http://www.dpi.inpe.br/proarco/dqueimadas/focos2proj.html>, foram coletados com o objetivo de compará-los com as imagens do sensor MODIS.

3.4.3. Aquisição de dados para o índice de risco Fórmula de Monte Alegre (FMA)

Os dados necessários para composição da fórmula de Monte Alegre foram: data, temperatura, umidade relativa e precipitação pluviométrica diária do ano de 2004, obtidos junto a Estação Meteorológica Principal, do Quinto Distrito de Meteorologia do Instituto Nacional de Meteorologia-INMET/MG, localizado no Campus da

Universidade Federal de Viçosa. Esses dados têm validade para uma área circular de 40 km de raio. Usou-se o programa Incêndios Florestais para calcular o índice de risco de incêndio.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A relação entre o número de focos de calor captados pelos sensores AVHRR/NOAA-12 e AVHRR/NOAA-16 e focos de fogo detectados pelo sensor EOS/MODIS, nas três classes de confiança, pode ser visualizada no Quadro 7. A análise desses dados mostra que o período entre agosto e outubro é considerado o mais crítico durante o ano, pois é nele que, geralmente, ocorre o maior número de queimadas no Brasil. Em situações mais críticas, este período pode se iniciar em julho e terminar em novembro.

Considerando os sensores AVHRR/NOAA 12 e AVHRR/NOAA 16 e as classes “média e alta confiança de fogo” do MODIS (MYD14), foi definido, para efeito deste trabalho que o período crítico abrange o período de julho a novembro.

O maior número de focos de fogo detectados pelo sensor MODIS e pelos satélites NOAA-12 e NOAA-16 ocorre nesse período (julho a novembro).

Na classe “alta confiança de fogo” do MODIS, das 210 ocorrências detectadas durante o ano de 2004, 199 ocorreram no período crítico, correspondendo a 94,76% do total dessa classe. Considerando os registros de todas as classes (578), a porcentagem dessa classe, no período crítico é de 34,43% .

Na classe “média confiança de fogo”, do sensor MODIS (MYD 14), das 361 ocorrências, 321 ocorreram no período crítico, correspondendo a 88,92% do total de focos dessa classe. A porcentagem dessa classe, com relação a todos os registros (total de 578), é de 55,54%, no período crítico. Com relação à classe “baixa confiança de fogo”, onde foram registrados um total de 7 ocorrências, as quais foram observadas no período crítico, esse percentual foi de 1,21%.

Dessa forma, verifica-se que 91,18% das ocorrências de fogo nas três classes ocorreram no período crítico acima discriminado. Entretanto, observa-se uma inversão nesses valores em relação ao desejado, ou seja, esperava-se que o maior número de

focos ocorresse na classe “alta confiança de fogo” e não na classe de “média confiança de fogo”, conforme os critérios (ANEXO 5) estabelecidos por Nunes (2005).

QUADRO 7: Relação entre o número de focos de fogo do MYD 14 do sensor MODIS e o número de focos de calor detectados pelo NOAA/AVHRR 12 e 16

Data da Passagem dos Satélites (2004)	Confiança de Fogo (MYD14)			Satélites NOAA	
	Alta	Média	Baixa	12-Noite	16-Tarde
01Jan16Jan	0	0	0	0	0
17Jan01Fev	0	3	0	0	0
02Fev17Fev	0	8	0	0	0
18Fev05Mar	0	4	0	0	0
06Mar21Mar	0	0	0	3	3
22Mar06Abr	0	1	0	2	2
07Abr22Abr	0	4	0	0	0
23Abr08Mai	3	5	0	4	0
09Mai22Mai	0	5	0	0	0
25Mai09Jun	2	2	0	0	0
10Jun25Jun	2	3	0	4	1
26Jun11Jul	0	23	0	2	2
12Jul27Jul	2	9	0	2	1
28Jul12Ago	1	8	0	3	7
13Ago28Ago	9	29	0	0	2
29Ago13Set	21	61	0	25	7
14Set29Set	75	105	4	1	19
30Set14Out	43	39	0	7	0
16Out31Out	12	37	3	12	3
01Nov16Nov	18	5	0	15	8
17Nov02Dez	18	5	0	13	4
03Dez18Dez	4	1	0	0	0
19Dez31Dez	0	4	0	1	0
Total	210	361	7	94	59

Com relação aos focos registrados pelo NOAA-12 (Quadro 7), também ocorre uma maior concentração de focos no período crítico. Foram registrados 94 focos de calor, sendo que 80 ocorreram no período crítico, correspondendo a 85,11% do total. O NOAA-16 detectou um total de 59 focos, sendo 53 (89,83% do total) no período crítico. A diferença de horários de passagem desses satélites pode ser a causa da divergência na quantidade de focos registrados entre eles. Um fogo registrado pelo NOAA-16, com

horário de passagem entre 16:00 e 17:00 horas pode ser registrado ou não pelo NOAA-12, com passagem entre 18:00 e 19:00 horas, dependendo se o fogo continua ativo ou se existe ainda restos de materiais incandescentes em forma de brasas.

A Figura 9 mostra uma imagem do sensor MODIS (MYD 14), a qual apresenta as diferentes classes de confiança de fogo, em diferentes cores, após o processamento no Spring. Os pontos de interesse nessa imagem são os vermelhos, referentes à classe “alta confiança de fogo”, os amarelos, referentes a “média confiança de fogo” e os verdes, referentes a “baixa confiança de fogo”. Os focos de fogo foram detectados no período de 14 de setembro a 29 de setembro no ano de 2004, ou seja, dentro do período crítico. Os focos estão distribuídos aleatoriamente por toda a área de estudo, com exceção de uma pequena concentração na área em destaque, que compreende municípios como: São Pedro dos Ferros, São José do Goiabal, Dionísio, Córrego Novo e Marliéria (ANEXO 6). Essa figura foi colocada como exemplo para ilustrar o período de maior concentração de focos de acordo com o Quadro 7.

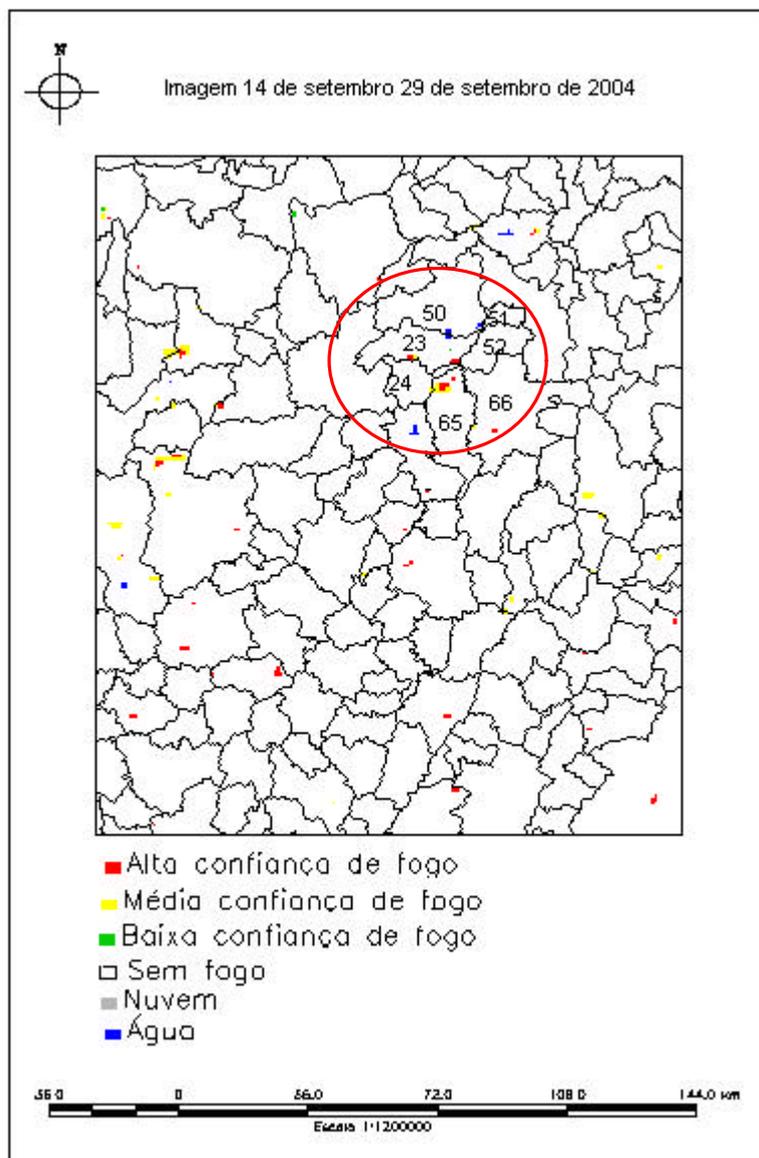


FIGURA 9: Imagem MYD 14 com registros de focos de fogo do período de 14 de setembro a 29 de setembro, 2004.

O total de focos de calor registrados pelos satélites NOAA-12 (ponto vermelho) e NOAA-16 (ponto azul) no ano de 2004 é mostrado na Figura 10. Estes focos encontram-se distribuídos aleatoriamente por toda a área, com exceção da área em destaque que, assim como na Figura 9, apresenta uma concentração de focos. Não houve coincidência de pontos entre os satélites NOAA-12 e NOAA-16, nesta imagem, mostrando que as informações se complementaram, ou seja, o NOAA-12, com

passagem entre as 18:00 e 19:00 horas, registrou novos focos de calor que possivelmente iniciaram-se após a passagem do NOAA-16 (16:00 -17:00 horas).

Selhorst & Brown (2003) compararam dados dos satélites GOES-8 e NOAA-12, a fim de saber o quanto de queimadas são identificadas pelos satélites no Estado do Acre e verificaram que o satélite NOAA-12 mostrava muitas inconsistências com observações de campo. Contudo, existem erros de omissão na detecção de queimadas tanto pelo NOAA-12 quanto pelo GOES-8. Isso, segundo esses mesmos autores é devido a efeitos de nuvens e fumaça que podem mascarar as queimadas. Também concluíram que a detecção de queimadas por aqueles satélites é provavelmente na ordem de metade a um décimo das queimadas verificadas no campo.

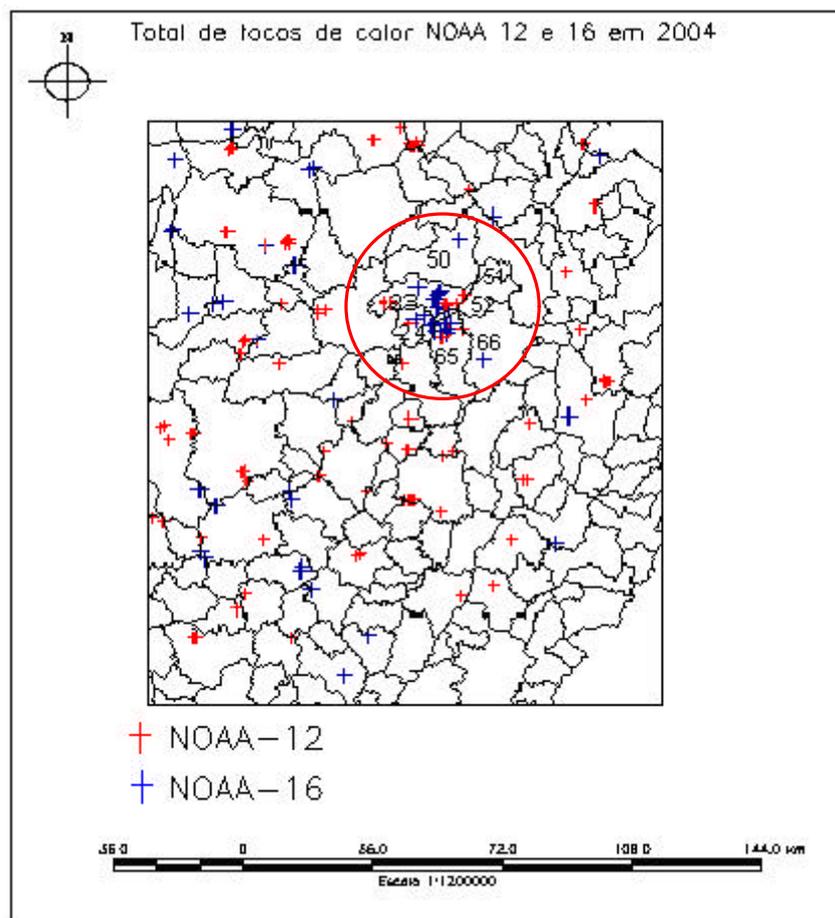


FIGURA 10: Total de focos de calor registrados pelo NOAA-12 e NOAA-16, em 2004.

A Figura 11 apresenta o total de ocorrências de fogo registradas pelos dois satélites NOAA (12 e 16) no período crítico do ano de 2004. Os focos detectados pelo NOAA-12 estão representados com um ponto vermelho e os detectados pelo NOAA-16 estão representados por um ponto azul. Comparando-se a Figura 10 com a Figura 11 é possível verificar que o maior número de focos ocorreu no período crítico do ano de 2004, o que pode ser constatado pela área em destaque dessas duas figuras.

Observa-se também que na área em destaque, o satélite NOAA-16 apresenta um maior número de focos detectados do que o NOAA-12. Entretanto, considerando toda imagem, o NOAA-12 registrou 80 focos no período crítico contra 53 registros do NOAA-16.

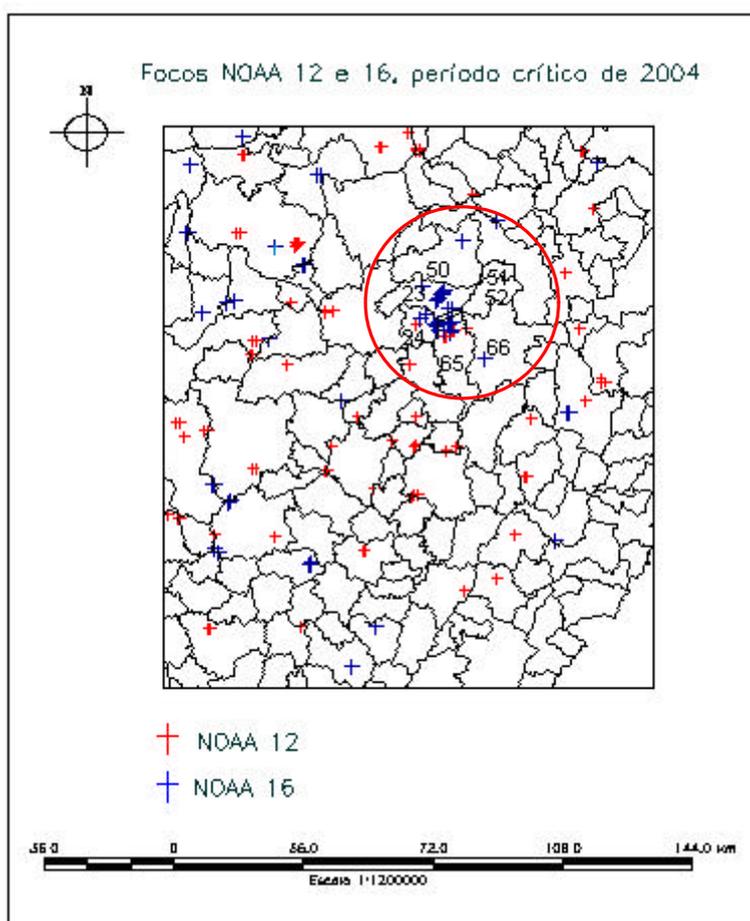


FIGURA 11: Focos de calor, detectados no período crítico, pelo NOAA-12 e NOAA-16, em 2004.

A Figura 12 mostra que somente dois focos de calor foram detectados no Município de Viçosa durante todo o ano de 2004. Esses focos ocorreram no período de 26 de junho a 11 de julho, ou seja, dentro do período crítico do ano e foram detectados apenas pelo Satélite NOAA-12. O sensor MODIS e o satélite NOAA-16 não registraram essas ocorrências. Isso pode ser devido ao horário de passagem desses satélites, o qual possivelmente ocorreu anterior ou posterior ao registro do foco, no caso do NOAA-16, ou ao fato de que a anomalia termal dessa área onde houve o fogo não atendeu aos critérios estabelecidos nos algoritmos de elaboração da imagem MODIS.

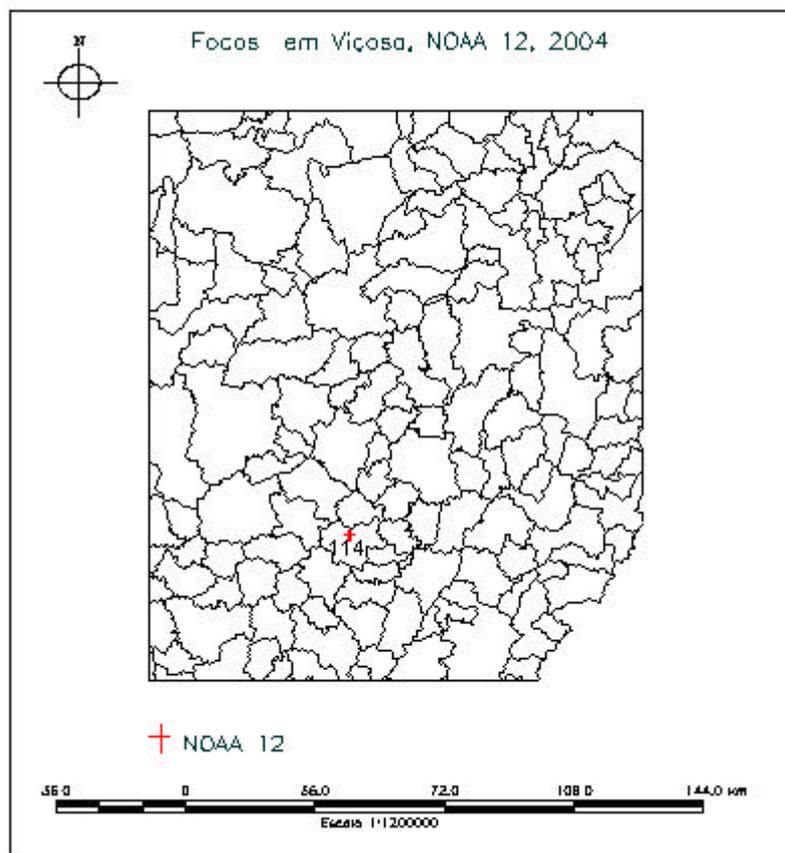


FIGURA 12: Focos de calor detectados no Município de Viçosa, pelo NOAA-12/noite, referentes ao período de 26 de junho a 11 de julho de 2004.

A Figura 13 mostra o total de focos de calor detectados pelos satélites NOAA-12 e NOAA-16 no período de 14 de setembro a 29 de setembro, no ano de 2004. Observa-se um maior número de focos registrados pelo satélite NOAA-16 (ponto azul). Apenas 1

foco foi detectado pelo NOAA-12 (ponto vermelho). Comparando a Figura 13 (dados do NOAA) com a Figura 9 (dados do MYD14) e relacionando-as com o Quadro 7, verifica-se que as imagens MYD14 detectaram maior número de focos. De acordo com o Quadro 7, foram registrados 184 focos pelo MYD14 e apenas 20 focos pelos satélites NOAA-12 e 16 no período de 14 de setembro a 29 de setembro. Fica evidente a importância da complementação de informações, usando-se mais de um produto. O satélite NOAA, conforme já mencionado, detecta apenas fogos ativos enquanto o MODIS registra também resquícios de fogo ou queima lenta sem chamas (“smoldering”). Além do mais, o satélite EOS/AQUA tem passagem sobre a área de estudo por volta das 14:00 horas, que é a hora mais crítica do dia, ou seja, com menor umidade relativa.

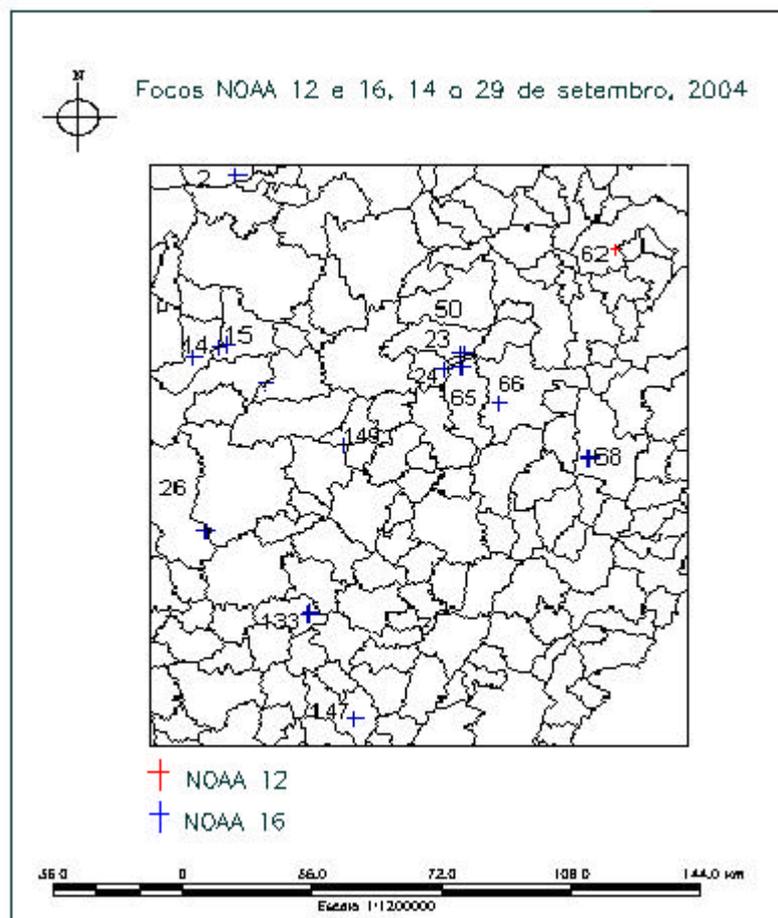


FIGURA 13: Total de focos de calor detectados pelo NOAA-12 e NOAA-16, no período de 14 de setembro a 29 de setembro, em 2004.

Piromal *et al.* (2005) avaliaram o desempenho do produto MOD14, que é um produto do satélite MODIS/TERRA, na detecção de queimadas no norte do Estado do Mato Grosso e concluíram que o algoritmo de detecção de focos de calor utilizado pelo produto MOD14 era adequado para identificar queimadas com área próxima ao tamanho nominal dos pixels das imagens MODIS (100 hectares). Queimadas com áreas inferiores ao tamanho nominal do pixel não são normalmente detectadas pelo algoritmo. Perceberam ainda que o produto MOD14 classificava erroneamente áreas não queimadas como sendo focos de calor, ocorrendo assim um erro de superestimação. Essas áreas tinham comportamento semelhante a solos expostos. Concluíram que esses erros poderiam ser devidos à resolução espacial do sensor e suas características de saturação.

A correlação do MYD13 com o número de focos de calor registrados pelo satélite NOAA-12 (noite), durante o ano de 2004 é mostrada no Quadro 8. A maior porcentagem de focos registrados por este satélite ocorreu no período de 29 de agosto a 13 de setembro. Esses focos corresponderam a 26,60% do total (94 focos). As classes de IVDN com uma quantidade mais significativa de focos foram “alto IVDN” com 39 ocorrências, ou seja, 41,49% do total e “médio IVDN” com 36 focos (38,30% do total).

QUADRO 8: Número de focos de calor do NOAA-12 coincidentes com as diferentes classes do MODIS-IVDN (MYD13), em 2004

CLASSES DE IVDN							
Data da passagem do Satélite NOAA-12 (2004)	Muito Baixo	Baixo	Médio	Alto	Muito Alto	TOTAL	%
01Jan16Jan	-	-	-	-	-	0	0
17Jan01Fev	-	-	-	1	-	1	1,06
02Fev17Fev	-	-	-	-	-	0	0
18Fev05Mar	-	-	-	2	1	3	3,19
06Mar21Mar	-	-	-	1	1	2	2,13
22Mar06Abr	-	-	-	-	-	0	0
07Abr22Abr	-	-	-	-	-	0	0
23Abr08Mai	-	-	-	3	1	4	4,25
09Mai22Mai	-	-	-	-	-	0	0
25Mai09Jun	-	-	-	-	-	0	0
10Jun25Jun	-	-	-	4	-	4	4,25
26Jun11Jul	-	-	1	1	-	2	2,13
12Jul27Jul	-	-	1	1	-	2	2,13
28Jul12Ago	-	-	2	1	-	3	3,19
13Ago28Ago	-	-	-	-	-	0	0
29Ago13Set	2	-	11	11	1	25	26,60
14Set29Set	-	-	1	-	-	1	1,06
30Set14Out	-	-	7	1	-	8	8,51
16Out31Out	-	-	9	3	-	12	12,77
01Nov16Nov	6	5	-	4	-	15	15,96
17Nov02Dez	1	-	4	6	1	12	12,77
03Dez18Dez	-	-	-	-	-	0	0
Total	9	5	36	39	5	94	100

No período crítico (que neste estudo vai de julho a novembro) de 2004 (Quadro 8), foram registrados 80 focos de calor pelo NOAA-12, dentre os quais 2 coincidiram com a classe de IVDN (MYD13) muito alto, 28 com a classe alto, 36 com a classe médio, 5 com a classe baixo e 9 com a classe muito baixo. Para verificação da consistência dessa metodologia de detecção de focos de calor e do MYD13, buscou-se as imagens do ano de 2005 (Quadro 9), considerando apenas o período crítico (julho a novembro de 2005). Entretanto, os dados tiveram a mesma tendência, ou seja, dentre as 81 observações houve maior concentração nas classes médio e alto de IVDN em 2005,

correspondendo a 54,32 % e 34,57 % respectivamente, contra 32,35 % e 47,06 % para o ano de 2004.

QUADRO 9: Número de focos de calor do NOAA-12 coincidentes com as diferentes classes do MODIS-IVDN (MYD13), para o período crítico de 2005 (julho a novembro)

CLASSES DE IVDN (MYD 13)							
Data da Passagem do Satélite NOAA-12 (2005)	Muito Baixo	Baixo	Médio	Alto	Muito Alto	TOTAL	%
26Jun11Jul	-	-	-	-	-	-	*
12Jul27Jul	-	-	-	-	-	-	*
28Jul12Ago	-	1	8	3	-	12	14,81
13Ago28Ago	-	-	5	-	-	5	6,17
29Ago13Set	-	-	-	4	-	4	4,94
14Set29Set	1	2	6	1	-	10	12,35
30Set14Out	-	-	12	7	1	20	24,70
16Out31Out	-	2	12	11	-	25	30,86
01Nov16Nov	-	-	1	2	-	3	3,70
17Nov02Dez	-	-	-	-	2	2	2,47
Total	1	5	44	28	3	81	100

* Sem focos para consulta.

A análise dos dados do Quadro 10 mostra que a maior porcentagem de focos de calor ocorreu no período de 14 de setembro a 29 de setembro do ano de 2004, ao se utilizar o satélite NOAA-16. Os Quadros 8, 9 e 10 mostram divergências na relação entre as classes de IVDN (MYD13) e os focos de calor encontrados pelos satélites NOAA, pois as ocorrências estão concentradas nas classes de “médio” e “alto” IVDN, que significa um baixo risco de incêndio. Esses focos deveriam estar concentrados nas classes “baixo” e “muito baixo” IVDN, por ser nessas classes que a vegetação está com baixo vigor. Esses resultados encontrados nos três Quadros mostram a possibilidade de erros nas imagens MYD13, talvez na fase de processamento, antes de se chegar ao usuário final.

QUADRO 10: Número de focos de calor do NOAA-16 coincidentes com as diferentes classes do MODIS-IVDN (MYD13), em 2004

CLASSES DE IVDN							
Data da Passagem do Satélite NOAA-16 (2004)	Muito Baixo	Baixo	Médio	Alto	Muito Alto	TOTAL	%
01Jan16Jan	-	-	-	-	-	0	0
17Jan01Fev	-	-	-	-	-	0	0
02Fev17Fev	-	-	-	-	-	0	0
18Fev05Mar	-	-	-	-	-	0	0
06Mar21Mar	-	-	-	3	-	3	5
22Mar06Abr	-	-	-	2	-	2	3,33
07Abr22Abr	-	-	-	-	-	0	0
23Abr08Mai	-	-	-	-	-	0	0
09Mai22Mai	-	-	-	-	-	0	0
25Mai09Jun	-	-	-	-	-	0	0
10Jun25Jun	-	-	-	1	-	1	1,67
26Jun11Jul	-	-	1	1	-	2	3,33
12Jul27Jul	1	-	-	-	-	1	1,67
28Jul12Ago	-	-	3	4	-	7	11,67
13Ago28Ago	-	-	1	1	-	2	3,33
29Ago13Set	-	-	7	-	-	7	11,67
14Set29Set	4	-	10	6	-	20	33,33
30Set14Out	-	-	-	-	-	0	0
16Out31Out	-	-	1	2	-	3	5
01Nov16Nov	1	-	4	2	1	8	13,33
17Nov02Dez	-	-	2	1	1	4	6,67
03Dez18Dez	-	-	-	-	-	-	0
Total	5	0	29	23	2	60	100

A imagem MYD13 do período de 29 de agosto a 13 de setembro de 2004, onde foram detectados 25 focos de calor pelo NOAA-12 e pelo NOAA-16 (Quadro 8), é mostrada na Figura 14. Os focos detectados pelo NOAA-12 estão representados por um ponto azul escuro e os do NOAA-16 estão representados por um ponto azul claro. Não existe uma concentração de focos em uma região específica. Dentre os focos registrados, 22 ocorreram em regiões de “médio” e “alto” IVDN (MYD13), contrariando a lógica dos índices de vegetação, os quais estão relacionados com o vigor da vegetação, conforme discutido anteriormente.

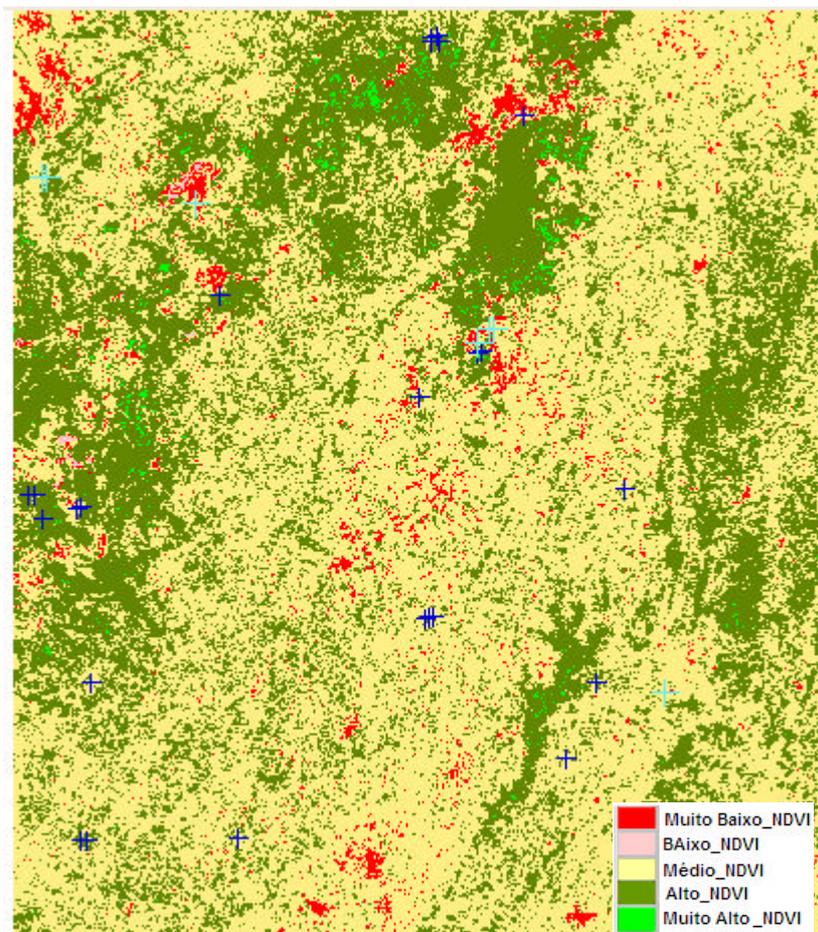


FIGURA 14: Imagem MYD13, com focos detectados pelo NOAA-12 (ponto azul escuro) e NOAA-16 (ponto azul claro), no período de 29 de agosto a 13 de setembro de 2004.

A Figura 15 mostra o exemplo de uma imagem MYD13 com focos NOAA-12, no período de 30 de setembro a 14 de outubro, no ano de 2005. Como mostrado na Quadro 9, existe uma discordância entre a classe de IVDN e os focos de calor encontrados pelo satélite, o que também foi registrado para o ano de 2004.

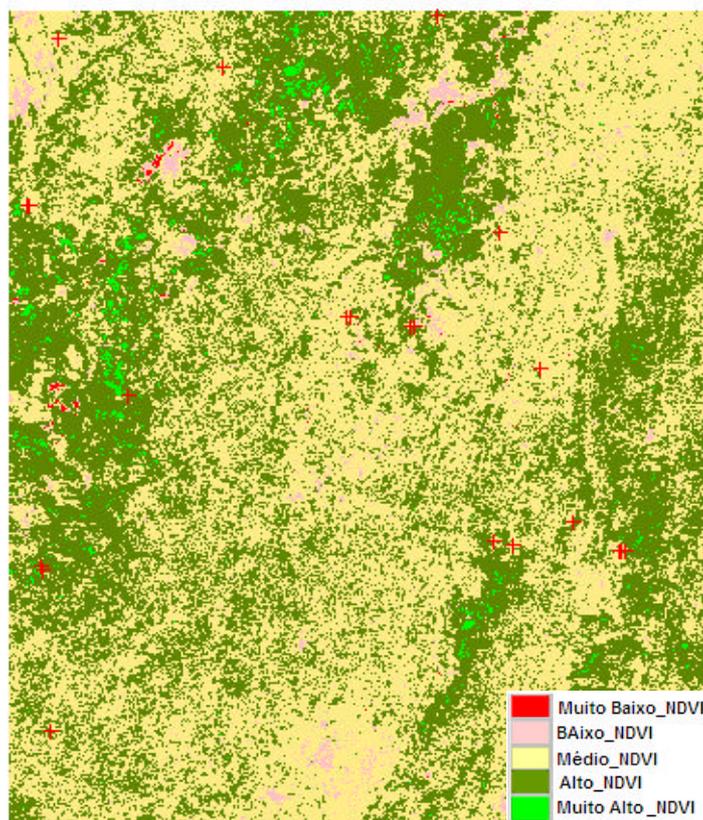


FIGURA 15: Imagem MYD13, com focos de calor detectados pelo NOAA-12 (ponto vermelho), no período de 30 de setembro a 14 de outubro de 2005.

A Figura 16 segue na mesma linha de raciocínio, sendo a maioria dos registros de focos de calor ocorrendo em regiões onde o NDVI possui valor mais alto.

As Figuras 15 e 16, referentes ao ano de 2005, não mostraram ocorrências de incêndios no município de Viçosa. Entretanto, foi feita uma checagem de campo e verificou-se que pelo menos quatro ocorrências de grande proporção ocorreram nessa região em 2005. Uma das justificativas para a não detecção desses incêndios pelos satélites NOAA 12 e 16, pode estar no horário de passagem (que varia de 16:00 às 19:00 horas).

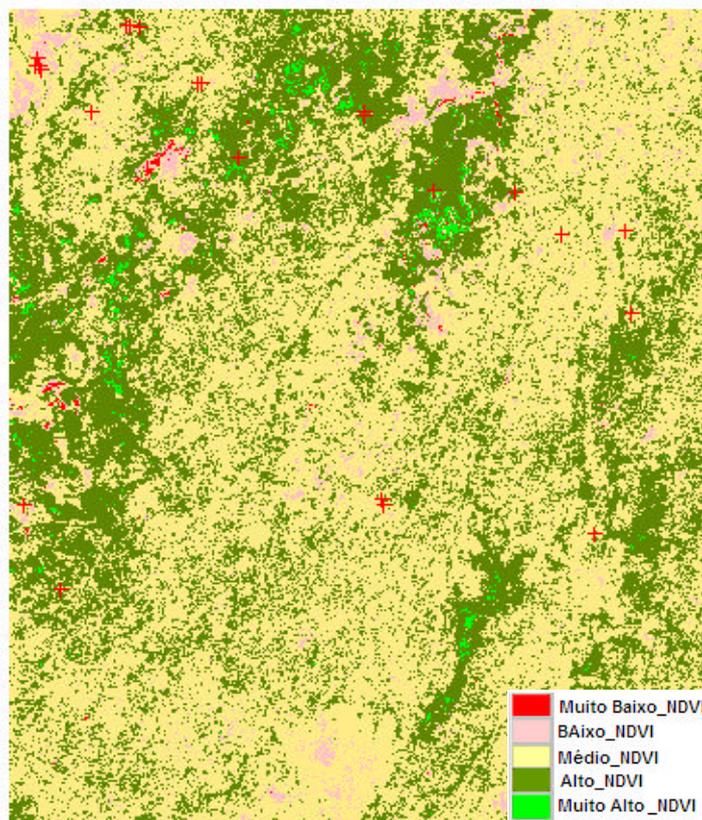


FIGURA 16: Imagem MYD13, com focos de calor detectados pelo NOAA-12, no período de 16 de outubro a 31 de outubro de 2005.

As Figuras 17 e 18 apresentam o risco de incêndio para o ano de 2004, para o Município de Viçosa, na mesorregião Zona da Mata e para o Município de Belo Oriente, na mesorregião do Vale do Rio Doce, respectivamente. Os dados meteorológicos de Viçosa foram coletados na Estação Meteorológica da Universidade Federal de Viçosa e os dados meteorológicos do Município de Belo Oriente foram coletados na Estação Meteorológica T. Fábrica da empresa CENIBRA (Celulose Nipo-Brasileira/AS), em Belo Oriente, Minas Gerais. Os índices de risco de incêndio foram obtidos por meio da Fórmula de Monte Alegre, utilizando-se o programa “Incêndios Florestais”. Os dados de ambos os gráficos mostram que a maior probabilidade de ocorrência de incêndios está no período de julho a outubro. Este período praticamente coincide com o período crítico do estudo, excetuando-se o mês de novembro.

Comparando-se as Figuras 17 e 18 não se verifica uma diferença muito significativa, sugerindo que a vulnerabilidade de fogo mostrada pela fórmula de Monte Alegre pode ter o mesmo comportamento em diferentes mesorregiões.

É importante lembrar que os dados observados por meio do produto MYD14, MYD13 e NOAA-12 e NOAA-16 são constatações da resposta espectral da superfície terrestre e que os índices de perigo de incêndio são estimativas de probabilidade, baseadas em observações meteorológicas. Na prática, os índices de risco de incêndio apresentam uma defasagem em cerca de um a dois meses. Apesar de o índice acusar redução no perigo de incêndio imediatamente após o período crítico, por causa das primeiras chuvas, o risco de incêndio ainda perdura por algum tempo pelo fato de que nem o solo, nem o material combustível adquiriram umidade suficiente para dificultar a combustão.

Outros gráficos de mais três estações meteorológicas se encontram no Anexo 7 e apresentam o mesmo comportamento dos gráficos mostrados nas Figuras 17 e 18.

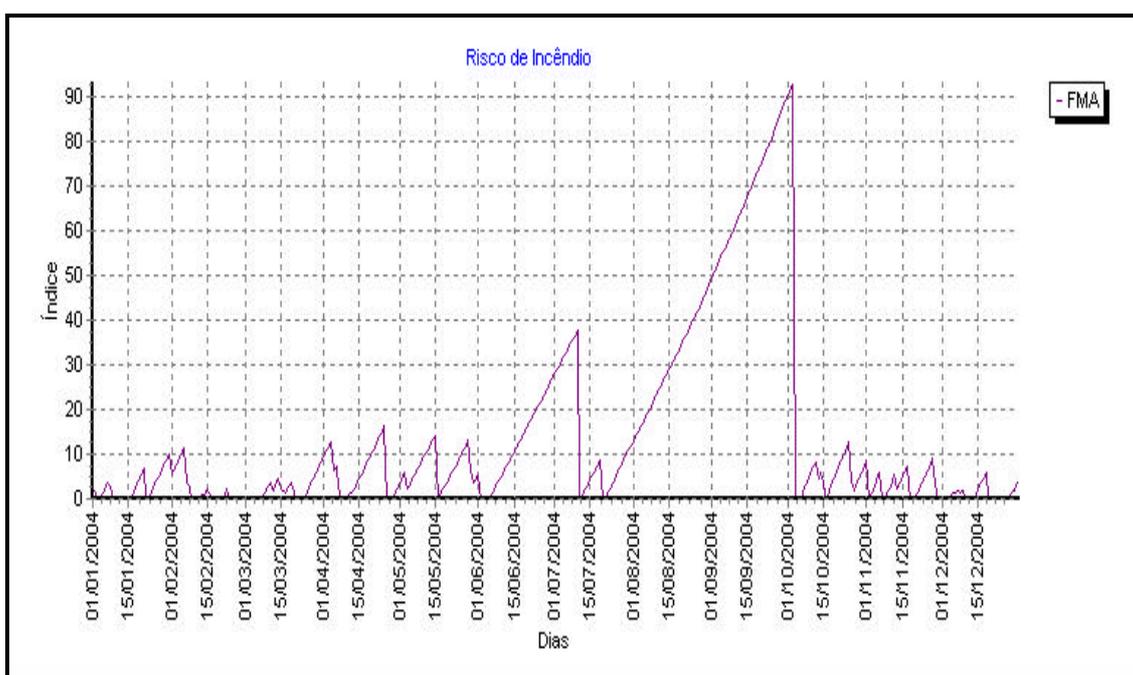


FIGURA 17: Índice de risco de incêndio FMA em 2004, para o município de Viçosa.

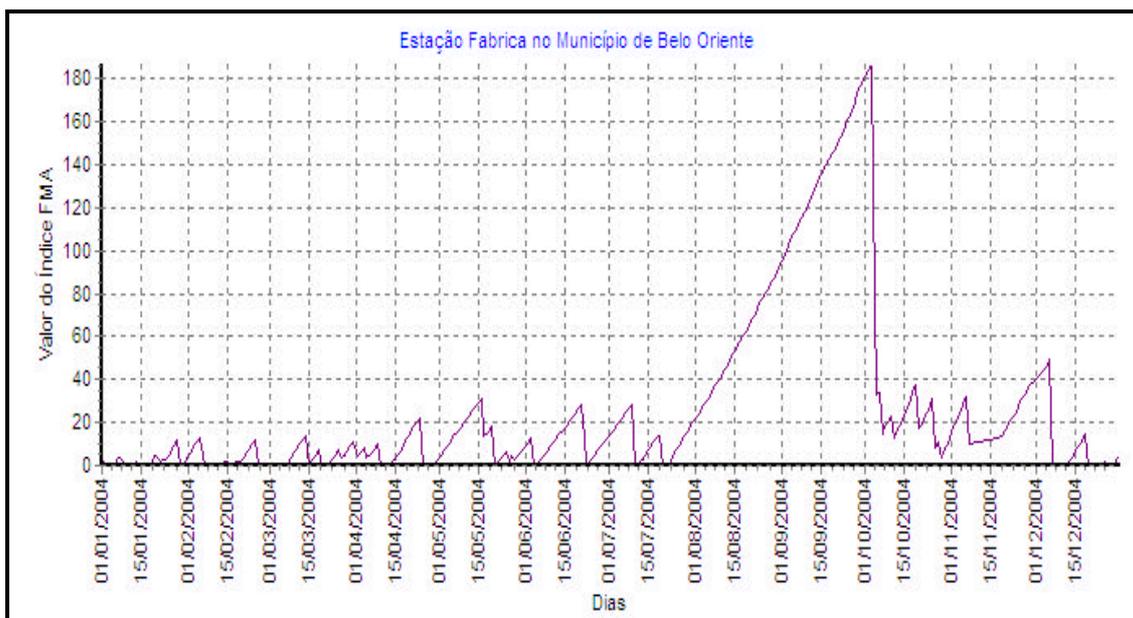


FIGURA 18: Índice de risco de incêndio FMA em 2004, para o município de Belo Oriente.

O Quadro 11 mostra o número de dias em que a Fórmula de Monte Alegre registrou probabilidade de ocorrência de incêndios em seus diferentes graus de probabilidade de risco. Dentre os 366 dias do ano de 2004, 61,20 % se encontram na classe de “médio” a “muito alto” e estão distribuídos ao longo dos meses de julho a outubro. Em estudos sobre ocorrência de incêndios tem sido utilizada essa divisão, ou seja, não-ocorrência de incêndio abaixo da classe “médio” e ocorrência de incêndio acima dessa classe. Considerando somente o período crítico, 81,05 % dos dias pertenciam à classe de “médio” a “muito alto”, ou seja, esse foi o percentual em que os 153 dias desse período tiveram probabilidade de ocorrência de fogo.

QUADRO 11: Número de dias em cada classe de grau de perigo de fogo para todo o ano de 2004 e para o período crítico, no município de Viçosa/MG

Período de Janeiro a Dezembro de 2004						
Nulo	Pequeno	Médio	Alto	Muito Alto	Total	Porcentagem %
82	60	91	59	74	224 *	61,20 *
Período Crítico - de Julho a Novembro de 2004						
Nulo	Pequeno	Médio	Alto	Muito Alto	Total	Porcentagem %
15	14	38	19	67	124 *	81,05 *

* A partir da classe “médio”.

O Quadro 12 também apresenta os resultados do índice FMA, porém para o município de Belo Oriente. Nesse caso foram computados apenas 357 dias do ano de 2004. Isso pode ter sido devido a problemas de importação de dados ou na própria coleta de dados. Dos 357 dias do ano, 71,71% estão na classe de “médio” a “muito alto” e estão distribuídos ao longo dos meses de julho a outubro. Comparando-se a porcentagem de risco de fogo durante todo o ano de 2004 do Quadro 12 com o a do Quadro 11, não existe uma diferença muito significativa de valores. No período crítico, 86,12 % dos dias pertenciam à classe de “médio” a “muito alto”, ou seja, esse percentual é referente aos 149 dias em que houve probabilidade de ocorrência de fogo.

QUADRO 12: Número de dias em cada classe de grau de perigo de fogo para todo o ano de 2004 e para o período crítico, no município de Belo Oriente/MG

Período de Janeiro a Dezembro de 2004						
Nulo	Pequeno	Médio	Alto	Muito Alto	Total	Porcentagem %
72	27	57	82	117	256*	72,11*
Período Crítico - de Julho a Novembro de 2004						
Nulo	Pequeno	Médio	Alto	Muito Alto	Total	Porcentagem %
20	4	10	35	104	149*	86,12*

* A partir da classe “médio”.

Deppe *et al.* (2004), compararam o índice de risco de incêndio FMA com focos de calor detectados pelo AVHRR/NOAA no Estado do Paraná, e verificaram que existia uma forte relação entre eles, apesar de ser uma sensibilidade somente das variáveis meteorológicas a locais e eventos de possíveis incêndios, segundo esses mesmos autores seria necessária a inserção de outras variáveis como topografia, material combustível, temperatura, etc. para aumentar a confiabilidade do índice.

5. CONCLUSÃO

- Para este estudo o produto MODIS/AQUA VEGETATION INDICES (imagens MODIS-IVDN) não se mostrou adequado para avaliar o risco de incêndios, devido à divergência entre suas classes e os focos de calor registrados pelos satélites NOAA-12 e 16. Para o uso operacional desse produto existe uma dificuldade, pois as imagens não estão disponíveis em tempo real. O tempo para aquisição dessas imagens é dependente da rede de transmissão de dados via internet existente, por causa da grande quantidade de memória exigida para cada imagem.
- O produto MODIS/AQUA THERMAL ANOMALIES (imagens MODIS) foi bastante eficiente para o levantamento de ocorrências de incêndios apresentando maior número de focos detectados nas três classes (578 para o ano de 2004) em relação ao NOAA-12 e NOAA-16.
- Verificando o número de focos de fogo detectados pelo MYD14 do sensor MODIS (total de 578) e o número de focos de calor detectados pelos sensores AVHRR/NOAA (total de 164) percebe-se a importância de se utilizar mais de um satélite na cobertura da superfície terrestre, especialmente para o registro de focos de calor, uma vez que o fogo tem caráter efêmero.
- O período crítico (julho a novembro) do ano, determinado no presente estudo concentrou a maioria dos focos, tanto os registrados pelos sensores AVHRR/NOAA, quanto os registrados pelo sensor MODIS/AQUA, mostrando

coerência dos produtos utilizados. Isso indica que é nesse período que devem ser concentrados os esforços para a prevenção de incêndios florestais, informações estas que são compatíveis com os índices de perigo de incêndio, originados da Fórmula de Monte Alegre.

- O sensoriamento remoto é uma ferramenta valiosa para o levantamento de ocorrências de incêndios e queimadas, em complemento aos outros métodos já existentes de detecção de fogo, porém ainda é preciso melhorar a qualidade e o processamento das imagens.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGAREZ, F. V.; VICENS, R. S.; CRUZ, C. M.; NOGUEIRA, C. R.; GARAY, I. **Utilização de índice de vegetação na classificação integrada de fragmentos florestais em Mata Atlântica de tabuleiros no município de Sooretama, ES. Anais...** Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto X, 21-26 abril, 2001. Foz do Iguaçu/PR. INPE, p. 1499-1507, sessão pôster. Disponível em: <
< <http://iris.inpe.br:1908/col/dpi.inpe.br/lise/2001/09.24.08.58/doc/1499.1507.123.pdf>>
Acesso em: 03/12/2005.

AMBIENTEBRASIL. **Queimadas.** Disponível em: <
<http://www.ambientebrasil.com.br/queimada.htm>> Acesso em 13/04/2005.

ANDERSON, L. O. **Classificação e monitoramento da cobertura vegetal do estado do Mato Grosso utilizando dados multitemporais do sensor MODIS.** São José dos Campos: INPE, 2004. 247p. – (INPE-12290-TDI/986). Disponível em: <
www.obt.inpe.br/pgsere/anderson-L-O-A2004/publicacao.pdf>. Acesso em:
03/12/2005.

ARAI, E.; FREITAS, R. M.; ANDERSON, L. O.; SHIMABUKURO, Y. E. Análise radiométrica de imagens MOD09 em 16 bits e 8 bits. **Anais...** XII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Goiânia, Brasil, abril. 2005, INPE, p. 3983 - 3990.

ARAÚJO JUNIOR, G. J. D. de; NASCIMENTO, E. R. P. do. Utilização de técnicas de sensoriamento remoto e geoprocessamento na simulação de campos de visada de pontos propostos para observação de incêndios florestais no parque nacional da Chapada dos Veadeiros. **Anais...** XI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Belo Horizonte, Brasil, 5-6 abril, 2003, INPE, p. 415 - 421.

BARUQUI, F. M. Inter-relações solo-pastagens nas regiões Mata e Rio Doce do Estado de Minas Gerais. Viçosa, MG: UFV, 1982. 119p. **Dissertação de Mestrado** – Universidade Federal de Viçosa. 1982.

BATISTA, A. C. Detecção de incêndios florestais por satélites. **Revista Floresta,** Curitiba/PR: Fundação de Pesquisas Florestais do Paraná (FUPEF), v.34, n.2, maio/ago., p. 237-241, 2004.

CARVALHO, V. C.; SHIMABUKURO, Y. E.; SANTOS, J. R.; FILHO, P.H. Subsídios do sensoriamento remoto para manejo florestal: estado atual da arte e perspectivas. Congresso Florestal Brasileiro, VI., 1990, Campos do Jordão. **Anais...** São Paulo:

Sociedade Brasileira de Silvicultura, 1990.
CEHIDRO. Monitoramento das mudanças globais, contribuições e impactos climáticos regionais no meio ambiente do estado de são paulo. Governo do Estado de São Paulo. Programa SIHESP – FAPESP, 2000. Disponível em: <http://www.programma.com.br/material/sihesp_eos_modis.pdf>. Acesso em 01/04/2005.

CEMIG – Companhia Energética de Minas Gerais. Manual de prevenção e controle de incêndios florestais. Belo Horizonte: CEMIG, 112 p. ilustr., 2003.

CPTEC/INPE. **Queimadas-vegetation fires – Descrição do mapa.** Disponível em: <http://www.cptec.inpe.br/produts/queimadas/info_mapa.html> Acesso em: 25/01/2006.

CETEC – Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais. **Levantamento pedológico do Parque florestal do Rio Doce.** Belo Horizonte/MG: Superintendência de Recursos Naturais, setor de Recursos de Solos. 68p, 1978.

CETEC – Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais. **Desenvolvimento de metodologias para recuperação do revestimento florístico natural em áreas de proteção das captações de água da copasa na região metropolitana de Belo Horizonte.** Belo Horizonte/MG: SAT/CETEC. 83p, il, 1993.

COUTO, E. A.; CANDIDO, J. F. **Incêndios florestais.** UFV: Imprensa Universitária. Viçosa/MG, 101 p., 1995.

DEPPE, F.; PAULA, E. V. de; MENEGHETTE, C. R.; VOSGERAU, J. Comparação de índice de risco de incêndio florestal com focos de calor no estado do Paraná. **Revista Floresta.** Curitiba/PR: Fundação de Pesquisas Florestais do Paraná (FUPEF), v. 34, n. 2, p.119-126, maio/ago., 2004.

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

EMBRAPA MONITORAMENTO POR SATÉLITE. **Monitoramento orbital, prevenção e controle das queimadas** – identificação de áreas críticas e prioritárias, 2000. Disponível em: < <http://www.queimadas.cnpm.embrapa.br/qmd2000.html> > Acesso em 03/05/2005.

ENGESAT. **Ficha técnica resumida – modis, o instrumento.** Disponível em: < <http://www.engesat.com.br/satelite/modis.htm>>. Acesso em 10/03/2006.

ENVI. **Conceitos básicos de sensoriamento remoto- parte 2- capítulo A.** Disponível em: <<http://www.envi.com.br/guia/a/02.html>>. Acesso em 11/09/2005.

ESTEIO ENGENHARIA E AEROLEVANTAMENTOS S/A. **Glossário-R.** Disponível em: <<http://www.esteio.com.br/glossario/gloss-R.htm>> Acesso em: 10/11/2005.

FAEMG. **Queima controlada.** Disponível em: <http://www.faemg.org.br/ambiente_cartfogo.asp > Acesso em 03/05/2005.

FERNANDES, A. E.; GLERIANI, J. M.; ASSIS, E. F. Integração do IVDN gerado a partir do AVHRR/NOAA e dados de umidade como indicadores de áreas potenciais ao fogo no cerrado brasileiro. **Anais...** Seminário Sul-Americano sobre controle de Incêndios Florestais 1, Reunião Técnica Conjunta SIF/FUPEF/IPEF sobre Controle de incêndios florestais 5. Jun/Jul. 1998. Belo Horizonte/MG. p.288-302. 345p.

FLORENZANO, T. G. **Imagens de satélite para estudos ambientais.** São Paulo: Oficina de Textos, 97p. 2002.

FRANÇA, D. de A.& FERREIRA, N. J. Considerações sobre o uso de satélites na detecção e avaliação de queimadas. **Anais...** XII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Goiânia, Brasil, abril. 2005, INPE, p. 3017 - 3023.

GARCIA, G. J. **Sensoriamento remoto: princípios e interpretação de imagens.** São Paulo: Nobel. 357p. 1982.

GILHUIS, J. P. Vegetation survey of the parque florestal estadual do Rio Doce, Minas Gerais, Brasil. **Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal)** Viçosa/MG: Universidade Federal de Viçosa, Instituto Estadual de Florestas (IEF), Agricultural University of Wageningen. 112p. 1986.

GOLFARI, L. **Zoneamento ecológico do estado de Minas Gerais para reflorestamento.** Belo Horizonte/MG: Centro de Pesquisa Florestal da Região do Cerrado. Série Técnica n. 3, 65p., 1975.

INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. **Determinação do índice de vegetação por diferença normalizada (ivdn) a partir de imagens noaa-17/avhrr.** Disponível em: <http://satelite.cptec.inpe.br/htmldocs/ndvi/notas_ndvi_17.htm> Acesso em: 23/02/2005.

INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. **Introdução ao sensoriamento remoto – apostila de sensoriamento remoto**. 2001. Disponível em: < <http://www.fca.unesp.br/intranet/arquivos/apostila%20Sensor-Rem-INPE.pdf> >. Acesso em: 02/11/2005.

JARDIM-LIMA, D. & NELSON, B. W. Uso de índices de vegetação no monitoramento da cobertura verde no perímetro urbano da cidade de Manaus. **Anais... XI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, Belo Horizonte, Brasil, 5-6 abril, INPE, p. 1827 – 1833, 2003.

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

JUSTINO, F. B.; SOUZA, S. S. de; SETZER, A. Relação entre “focos de calor” e condições meteorológicas no Brasil. CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 12.Foz de Iguçu-PR. **Anais... CPTEC/INPE**. 2002. p. 2086-2093.

KENNEDY, P. J.; BELWARD, A. S.; GREFOIRE, J. M.; An improved approach to fire monitoring in west Africa using AVHRR data. **International Journal of Remote Sensing**. London: Taylor & Francis, v 15, n. 11, p. 2235-2255, 1993.

LATURNER, N.& SCHERER, H. W. **As queimadas e os incêndios florestais em Mato Grosso**. Disponível em: < <http://www.dge.uem.br/geonotas/vol8-2/nelson.shtml> > Acesso em 26-09-2004.

LILLESAND, T. M.; KIEFER, R. W. **Remote sensing and image interpretation**. Third Edition. United Estates: Hohn wiley & Sons, Inc. 750 p. 1994.

MATSON, M.; DOZIER, J. Identification of subresolution high temperatures sources using thermal IR sensor. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v 47, p 1311-1318. 1981.

MATSON, M.; SCHNEDER, S. R.; ALDRIDGE, B.; SATCHWELL, B. Fire detection using the NOAA-series satellites. **NOAA-NESS**, Washington. DC (NOAA-TR-NESDIS-7),1984.

MEIRA-NETO, J. AA; MARTINS, F. R. Composição florística de uma floresta estacional semidecidual montana no município de Viçosa-MG. **Revista Árvore**. Viçosa-MG, v. 26, n. 4, p.437-446, 2002.

MOREIRA, M. A. **Fundamentos do sensoriamento remoto e metodologias de aplicação**. 2. ed. Viçosa: UFV. 307p. 2003.

MOREIRA, M. A. **Satélites. Conceito, classificação e objetivos**. Disponível em: <http://www.dsr.inpe.br/dsr/mauricio/satelites.htm> > Acesso em 17/11/2004.

MOURA, M. L.; GALVÃO, L. S. Efeitos da fumaça sobre a determinação do ndvi. **Anais... XI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, 2003. Disponível em: <[/agavvlin.itid.inpe.br:1905/col/Itid. Inpe.br/sbsr/2003/0327.111.57/doc/14251.PDF](http://agavvlin.itid.inpe.br:1905/col/Itid.Inpe.br/sbsr/2003/0327.111.57/doc/14251.PDF)> Acesso em: 06/04/2005.

NASA. **Product description sheet – Orthorectified landsat thematic mapper mosaics**. Disponível em: <http://zulu.ssc.nasa.gov/mrsid/docs/GeoCover_circa_1990_Product_Description.pdf >. Acesso em 10/03/2006.

NOVO, E. M. L. de M. **Sensoriamento remoto: princípios e aplicações**. São Paulo: Editora Edgard Blücher Ltda. 2ª edição. 308p. 1992.

NUNES, J. R. S. FMA⁺ - um novo índice de perigo de incêndios florestais para o estado do Paraná – Brasil. **Tese de Doutorado** – Universidade Federal do Paraná. 150p, 2005.

NUNES, J. R. S.; SOARES, R. V.; BATISTA, A. C. Estimativa da umidade relativa das 13:00 h, com base nos dados das 9:00 h e das 15:00 h, para o estado do Paraná. **Floresta**, Curitiba-PR: FUPEF, v.35, n.2, maio-ago, p. 247-258, 2005.

OLIVEIRA-FILHO, A T. Comparison of the woody flora and soils of six areas of montane semideciduous forests in southern Minas Gerais, Brazil. **Edinburgh Journal of Botany**, v.5, p.141-194, 1994.

PEREIRA, M. C.; SETZER, A. W. Spectral characteristics of deforestation fires in NOAA/AVHRR images. **International Journal of Remote Sensing**. London: Taylor & Francis, v 14, n 3, February, p 583-597, 1993.

PIROMAL, R. A. S.; RIVERA-LOMBARDI, R. J.; SHIMABUKURO, Y. E.; FORMAGGIO, A. R.; KRUG, T. Avaliação do desempenho do algoritmo do produto MOD14 na detecção de queimadas no norte do Estado do Mato Grosso. **Anais... XII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, Goiânia, Brasil, abril. 2005, INPE, p. 3317 - 3324.

PONZONI, F. J.; SHIMABUKURO, Y. E. Relação entre índices de vegetação (ndvi e savi) e parâmetros biométricos de plantios de *eucalyptus urophylla* e *eucalyptus camaldulensis* em cachoeira do manteiga-mg. **Revista Árvore**, Viçosa-MG: SIF, v.22, n.3, p. 357-366, 1998.

RESENDE, S. B. Estudo de crono-topossequência em Viçosa, Minas Gerais. **Dissertação (Mestrado em Fitotecnia)**, Viçosa/MG: Universidade Federal de Viçosa, 71p, 1971.

RESENDE, M.; CORRÊA, F. G.; CURI, N.; RESENDE, S. B. de. **Pedologia: base para distinção de ambientes**. 2ª ed. Viçosa/MG: Jard Produções, 1997. 367p.

RIBEIRO, S. T. M. Florística e estrutura fitossociológica de um trecho de floresta de galeria do Parque Estadual Serra do Rola-Moça na região metropolitana de Belo Horizonte, Minas Gerais. **Dissertação (Mestrado em Botânica)**. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, 91p, 1999.

RIBEIRO, G. A.; BONFIM, V. R. Incêndios florestais x queima controlada. **Revista Ação Ambiental**. Viçosa/MG: Folha de Viçosa Ltda., n. 12, p. 8-10, jun./jul., 2000.

RIVERA-LOMBARDI, R. J. R. Estudo de recorrência de queimadas e permanência de cicatrizes de fogo em áreas selecionadas do cerrado brasileiro, utilizando imagens tm/landsat. 2003-05-23. 172 p. (INPE-12663-TDI/1006). **Dissertação de Mestrado** (Mestrado em Sensoriamento Remoto) – INPE: São José dos Campos. 2003. Disponível na biblioteca digital URLib: <<http://MTC-m13.sid.inpe.br:80/rep-/sid.inpe.br/jeferson/2003/07.01.10.34>>. Acesso em: 02/11/2005.

ROSA, R. **Introdução ao sensoriamento remoto**.Uberlândia: Editora EDUFU. 2ª edição. 109 p. 1992.

RUDORFF, B. F. T. **Produtos de sensoriamento remoto**. Disponível em: <www.herbario.com.br/fotomicrografia.07/prodsenso_remoto.htm> Acesso em 06/04/2005.

SAMPAIO, O.B. Estudo comparativo de índices para previsão de incêndios florestais na região de Coronel Pacheco, Minas Gerais. Viçosa, MG: UFV, 1991. 88p. **Dissertação de Mestrado** – Universidade Federal de Viçosa. 1991.
SANT'ANNA, C. M. **Prevenção e combate a incêndios florestais**. Lavras/MG: UFLA/FAEPE, 2001. 88 p. ilustr.

SCHOTT J. R. **Remote Sensing-the image chain approach**. Oxford: New York. 1997.

SELHORST, D.; BROWN, I. F. Queimadas na Amazônia sul-ocidental, estado do Acre-Brasil: comparação entre produtos de satélites (goes-8 e noaa-12) e observações de campo. **Anais... XI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, Belo Horizonte, Brasil, 5-6 abril, INPE, 2003, p. 517-524.

SILVA, R. G. da. **Manual de prevenção e combate aos incêndios florestais**, 1998.

Disponível em: <

<http://www2.ibama.gov.br/unidades/guiadechefe/guia/anexo10/texto.htm> >. Acesso em 08/05/2005

SOARES, R.V. **Incêndios florestais: controle e uso do fogo**. Curitiba-PR: Fundação de Pesquisas Florestais do Paraná, 213p. 1985.

SOARES, R. V. Planos de proteção contra incêndios florestais. **Anais... IV Reunião Técnica Conjunta SIF/FUPEF/IPEF sobre Controle de incêndios florestais, e II Curso de atualização em controle de incêndios florestais**. Curitiba/PR: Fundação de Pesquisas do Paraná, 1996, p.140-150, 163p.

SOARES, R.V. Desempenho da "fórmula de monte alegre" índice brasileiro de perigo de incêndios florestais. **Cerne**, Lavras/MG, v.4, n.1, p. 087-099, 1998.

SOARES, R. V.; BATISTA, A. C. **Meteorologia e climatologia florestal**. Curitiba: UFPR, 195p. il. 2004.

TUCKER, C. J. Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. **Remoting sensing of environment**, Madison, v.8, p.127-150. 1979.

VALVERDE, O. Estudo regional da Zona da Mata de Minas Gerais. **Revista Brasileira de Geografia**, v. 20, n. 1, p. 1-82. 1958.

VELOSO, H. P.; RANGEL FILHO, A. L. R.; LIMA, J. C. A. Classificação da vegetação brasileira, adaptada a um sistema universal. **IBGE**, Rio de Janeiro/RJ. 124p. 1991.

VIANELLO, R. L. & ALVES, A. R. **Meteorologia básica e aplicações**. Viçosa: MG, v.20, 449p. il. 2000.

WIEGAND, C. L.; RICHARDSON, A.J.; ESCOBAR, D. E.; GERBERMANN.
Vegetation indices in crop assessment. **Remote Sensing of Environment**, Nova
York/NY, v.35, p.105-119, 1991.

ANEXOS

ANEXO 1

FATIAMENTO DE IMAGENS MYD 14

```
{  
  
//Declarações  
Imagem img ("MODIS");  
Numerico imgnum ("modis_numerico");  
Tematico tem ("Mapa_Calor");  
Tabela tab (Fatiamento);  
//Instanciações  
img = Recupere (Nome = "12Dez3Dez10_337_confident_fire");  
// Novos  
imgnum = Novo ( Nome="12Dez3Dez10_337_confident_fire", ResX=1000,  
ResY=1000, Min=0, Max= 9 ) ;  
tem = Novo (Nome = "12Dez3Dez10_337_confident_fire", ResX=1000, ResY=1000);  
//  
imgnum = Numerico (img);  
tab = Novo (CategoriaFim = "Mapa_Calor",  
  
        [0, 0] : "Nao_Processado(ruido)",  
        [2, 2] : "Nao_processado(outra_razao)",  
        [3, 3] : "Agua" ,  
        [4, 4] : "Nuvem",  
        [5, 5] : "Sem_fogo",  
        [6, 6] : "Desconhecido",  
        [7, 7] : "Baixa_confiança_fogo" ,  
        [8, 8] : "Media_confiança_fogo",  
        [9, 9] : "Alta_confiança_fogo" );  
  
//Operações  
tem = Fatie (imgnum,tab);  
  
}
```

ANEXO 2

FUSÃO DE IMAGENS (DOIS PERÍODOS DE 8 DIAS PARA UM PERÍODO DE 16 DIAS)

```
{  
  
//Declarações  
Imagem img1, img2, img16dias ("MODIS");  
Numerico imgnum1, imgnum2, imgnum16dias ("modis_numerico");  
Tematico tem1, tem2, tem16dias ("Mapa_Calor");  
Tabela tab (Fatiamento);  
//Instanciações  
img1 = Recuperar (Nome = "11Nov17Nov24_321_confident_fire");  
img2 = Recuperar (Nome = "11Nov25Dez02_329_confident_fire");  
// Novos  
imgnum1 = Novo (Nome= "11Nov17Nov24_321_confident_fire", ResX=1000,  
ResY=1000, Min=0, Max= 9 ) ;  
imgnum2 = Novo (Nome="11Nov25Dez02_329_confident_fire", ResX=1000,  
ResY=1000, Min=0, Max= 9 ) ;  
imgnum16dias = Novo ( Nome="fusao17Nov02Dez", ResX=1000, ResY=1000,  
Min=0, Max= 9 ) ;  
tem1 = Novo (Nome = "11Nov17Nov24_321_confident_fire", ResX=1000,  
ResY=1000);  
tem2 = Novo (Nome = "11Nov25Dez02_329_confident_fire", ResX=1000,  
ResY=1000);  
tem16dias = Novo (Nome = "fusao17Nov02Dez", ResX=1000, ResY=1000);  
img16dias = Novo (Nome = "fusao17Nov02Dez", ResX=1000, ResY=1000, Nbits=8);  
img16dias = img1;  
img16dias = img1 > 6 ? img1 : img2 ;  
//  
imgnum1 = Numerico (img1);  
imgnum2 = Numerico (img2);  
imgnum16dias = Numerico (img16dias);  
tab = Novo (CategoriaFim = "Mapa_Calor",  
[0, 0] : "Nao_Processado(ruido)",  
[2, 2] : "Nao_processado(outra_razao)",  
[3, 3] : "Agua" ,  
[4, 4] : "Nuvem",  
[5, 5] : "Sem_fogo",  
[6, 6] : "Desconhecido",  
[7, 7] : "Baixa_confiança_fogo" ,  
[8, 8] : "Media_confiança_fogo",  
[9, 9] : "Alta_confiança_fogo" );  
//Operações  
tem1 = Fatie (imgnum1,tab);  
tem2 = Fatie (imgnum2,tab);  
tem16dias = Fatie (imgnum16dias,tab);  
}
```

ANEXO 3

PROGRAMA PARA CONTAR QUEIMADAS

```
{  
  
//Declarações  
//Imagem img ("MODIS");  
Objeto obj ("objeto1");  
Cadastral map ("AREADEESTUDO");  
Tematico tem ("Mapa_Calor");  
//Instanciações  
tem = Recupere (Nome = "plano de informação");  
map = Recupere (Nome = "quadro_total");  
// Novos  
obj."alta_prob_fogo" = ConteZonal (tem=="nomedaclasse", obj OnMap map);  
obj."med_prob_fogo" = ConteZonal (tem=="nomedaclasse", obj OnMap map);  
obj."baix_prob_fogo" = ConteZonal (tem=="nomedaclasse", obj OnMap map);  
  
}
```

ANEXO 4

FATIAMENTO DE IMAGENS MYD 13

```
{  
  
//Declarações  
  
Imagem img ("MODIS_NDVI");  
Tematico tem ("NDVI_fatiamento");  
Tabela tab (Fatiamento);  
  
//Instanciações  
  
img = Recuperar (Nome = "01jan16jan_16dias_teste");  
tem = Novo (Nome = "01jan16jan_16dias_teste", ResX=250, ResY=250);  
tab = Novo (CategoriaFim = "NDVI_fatiamento",  
           [127, 153] : "Muito_Baixo_NDVI",  
           [154, 180] : "Baixo_NDVI",  
           [181, 207] : "Medio_NDVI",  
           [208, 234] : "Alto_NDVI",  
           [235, 255] : "Muito_Alto_NDVI");  
  
//Operações  
  
tem = Fatia (Numerico (img), tab) ;  
  
}
```

ANEXO 5

Critérios estabelecidos por Nunes (2005) para as classes de perigo de fogo:

- Distribuição do número de dias previstos por classe de perigo - Estabeleceu-se que o número de dias previstos em cada classe de perigo de fogo deveria ter relação inversa com a classe de perigo, ou seja, quanto maior a classe de perigo, menor o número de dias previstos para ela.
- Número de incêndios ocorridos por classe de perigo - Em relação ao número de incêndios ocorridos, procurou-se estabelecer uma relação direta de tal maneira que quanto maior a classe de perigo de fogo, maiores os valores observados para essas variáveis.

ANEXO 6

Municípios incluídos nas Mesorregiões da área de Estudo

a) Mesorregião Metropolitana de Belo Horizonte:

1. Santana do Riacho
2. Morro do Pilar
3. São Sebastião do Rio Preto
4. Ferros
5. Passabem
6. Jaboticatubas
7. Itambé do Mato Dentro
8. Santa Maria de Itabira
9. Taquaraçu de Minas
10. Itabira
11. Nova União
12. Bom Jesus do Amparo
13. Caeté
14. Barão de Cocais
15. São Gonçalo do Rio Abaixo
16. João Molevade
17. Bela Vista de Minas
18. Nova Era
19. Santa Bárbara
20. Catas Altas
21. Rio Piracicaba
22. São Domingos do Prata
23. Dionísio
24. São José do Goiabal
25. Alvinópolis
26. Ouro Preto
27. Mariana
28. Ouro Branco
29. Itaverava
30. Catas Altas da Noruega
31. Diogo de Vasconcelos
32. Santana dos Montes

b) Mesorregião do Vale do Rio Doce:

33. Joanésia
34. Mesquita
35. Belo Oriente
36. Tarumirim
37. Antônio Dias
38. Coronel Fabriciano

39. Ipatinga
40. Santana do Paraíso
41. Ipaba
42. Bugre
43. São João do Oriente
44. Dom Cavalcanti
45. Iapu
46. Jaguaruçu
47. Timóteo
48. Caratinga
49. Bom Jesus do Galho
50. Marliéria
51. Pingo d'água
52. Córrego Novo
53. Vargem alegre
54. Entre Folhas
55. Santa Rita de Minas
56. Santa Bárbara do Leste
57. Piedade de Caratinga
58. Ubaporanga
59. Imbé de Minas
60. São Domingos das Dores
61. São Sebastião do Anta
62. Inhapim

c) Mesorregião da Zona da Mata:

63. Sem-Peixe
64. Rio Casca
65. São Pedro dos Ferros
66. Raul Soares
67. Vermelho Novo
68. Manhuaçu
69. Simonésia
70. Santana do Manhuaçu
71. Barra Longa
72. Acaiaca
73. Rio Doce
74. Santa Cruz do Escalvado
75. Ponte Nova
76. Piedade de Ponte Nova
77. Urucânia
78. Oratórios
79. Santo Antônio do Gama
80. Abre Campo
81. Matipó
82. Caputira
83. São João do Manhuaçu

84. Reduto
85. Martins Soares
86. Durandé
87. Manhumirim
88. Luisburgo
89. Alto Jequitibá
90. Caparaó
91. Jequeri
92. Sericita
93. Pedra Bonita
94. Santa Margarida
95. Orizânia
96. Divino
97. Alto Caparaó
98. Espera Feliz
99. Caiana
100. Carangola
101. Faria Lemos
102. Pedra Dourada
103. Tombos
104. São Francisco da Glória
105. Fervedouro
106. Araçuaia
107. Canaã
108. Pedra do Anta
109. Amparo da Serra
110. Teixeira
111. Guaraciaba
112. Piranga
113. Porto Firme
114. Viçosa
115. São Miguel do Anta
116. Cajuri
117. Coimbra
118. Ervália
119. Miradouro
120. Vieiras
121. Eugenópolis
122. Antônio Prado de Minas
123. Muriaé
124. Patrocínio de Muriaé
125. São Sebastião da Vargem Alegre
126. Rosário da Limeira
127. Miraí
128. Guiricema
129. Guidoal
130. Visconde do Rio Branco
131. São Geraldo
132. Paula Cândido
133. Presidente Bernardes

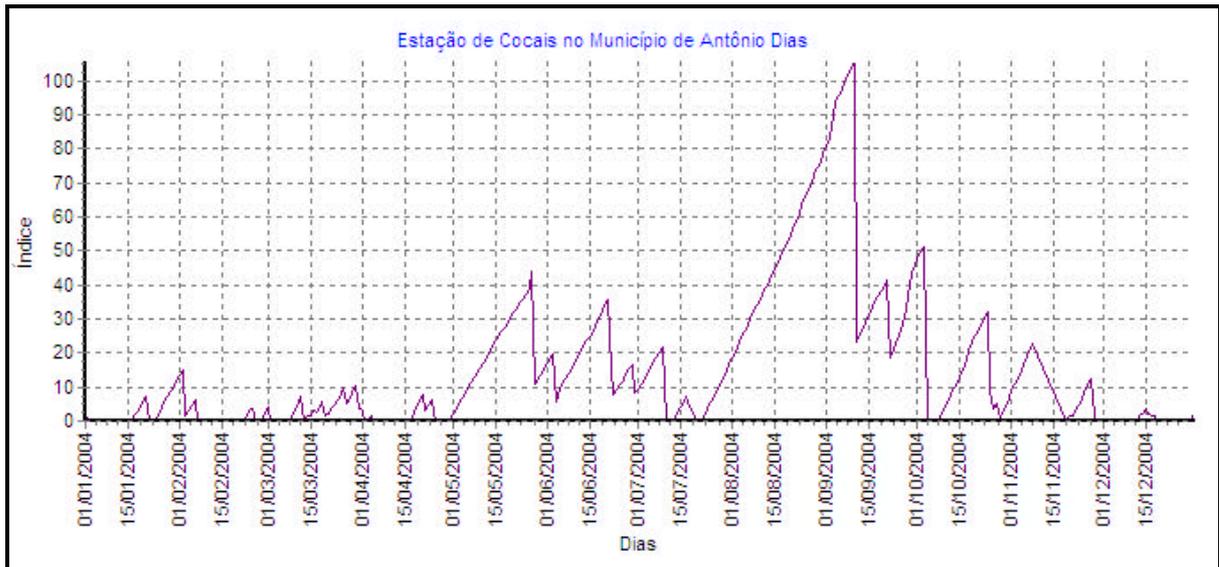
134. Senador Firmino
135. Brás Pires
136. Senhora de Oliveira
137. Lamim
138. Rio Espera
139. Cipotânea
140. Alto Rio Doce
141. Dores do Turvo
142. Divinésia
143. Mercês
144. Silveirânia
145. Rio Pomba
146. Tocantins
147. Ubá
148. Rodeiro
149. Dom Silvério

d) Mesorregião Campo das Vertentes:

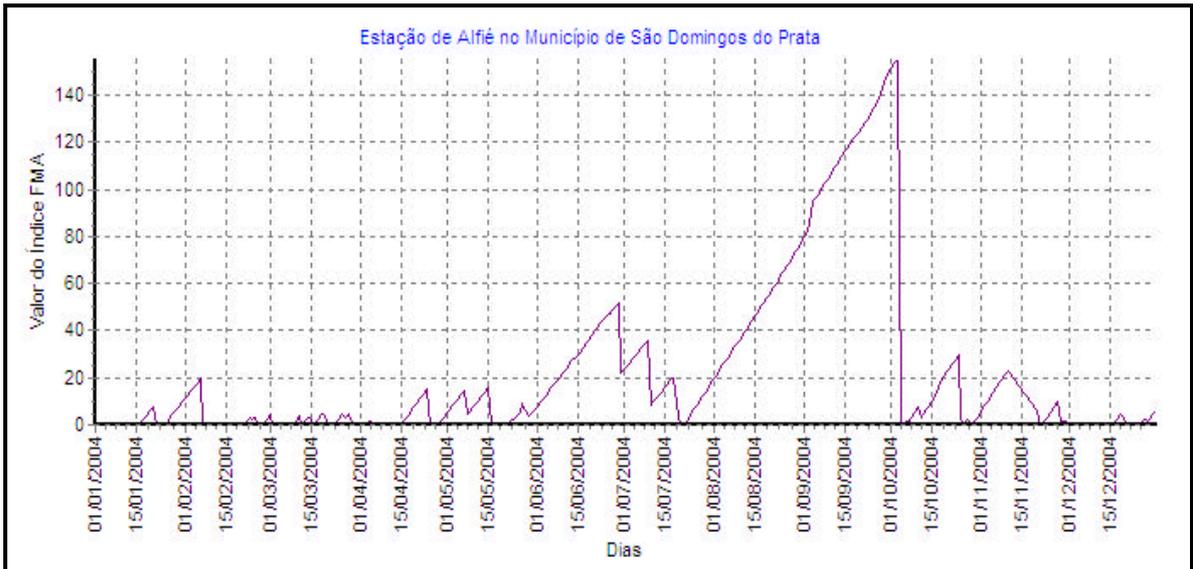
150. Capela Nova
151. Senhora dos Remédios
152. Desterro do Melo

ANEXO 7

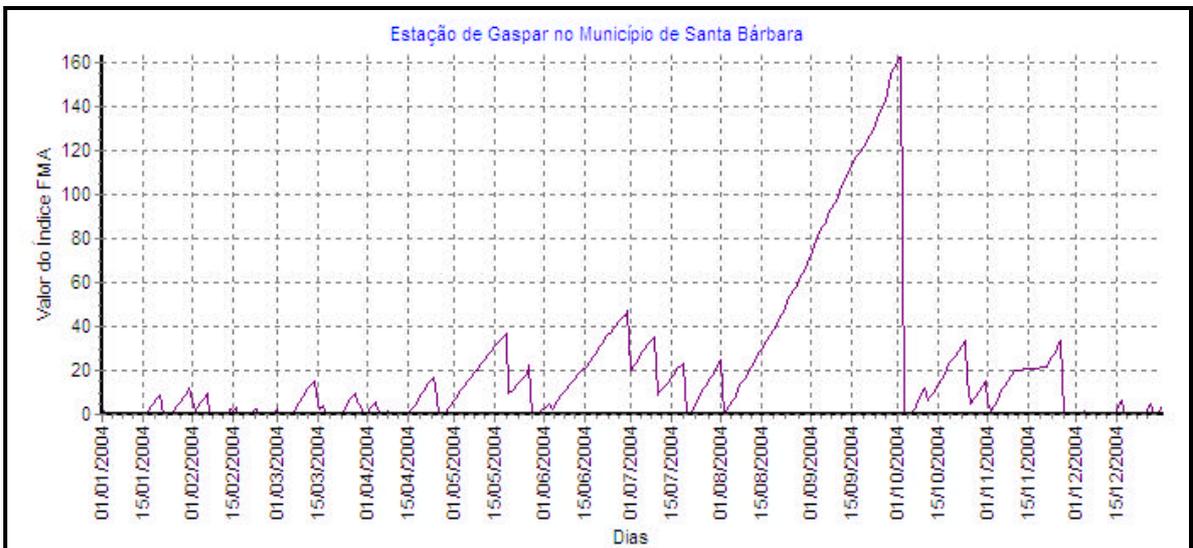
Gráficos do índice de risco de incêndio FMA em 2004, para os municípios de Antônio Dias, São Domingos do Prata e Santa Bárbara. Os dados meteorológicos desses municípios foram coletados pelas seguintes estações, respectivamente, Estação de Cocais, Alfíe e Gaspar.



Índice de risco de incêndio FMA em 2004, para o município de Antônio Dias.



Índice de risco de incêndio FMA em 2004, para o município de São Domingos do Prata.



Índice de risco de incêndio FMA em 2004, para o município de Santa Bárbara.