

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA AGRÍCOLA

**“MAPEAMENTO DE ÁREAS DE CAFÉ NO MUNICÍPIO DE
GUAXUPÉ/MG POR MEIO DE PROCESSAMENTO DIGITAL
DE IMAGENS LANDSAT”.**

LUIS ANTONIO NERY

CAMPINAS
FEVEREIRO DE 2009

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA AGRÍCOLA

**“MAPEAMENTO DE ÁREAS DE CAFÉ NO MUNICÍPIO DE
GUAXUPÉ/MG POR MEIO DE PROCESSAMENTO DIGITAL
DE IMAGENS LANDSAT”.**

Dissertação apresentada à banca examinadora para
a obtenção do título de Mestre em Engenharia
Agrícola na área de concentração Planejamento e
Desenvolvimento Rural Sustentável.

LUIS ANTONIO NERY

Orientador: Prof. Dr. Rubens Augusto Camargo Lamparelli

CAMPINAS
FEVEREIRO DE 2009

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA E ARQUITETURA - BAE -
UNICAMP

N359m Nery, Luis Antonio
Mapeamento de áreas de café no município de
Guaxupé/MG por meio de processamento digital de
imagens Landsat / Luis Antonio Nery. --Campinas, SP:
[s.n.], 2009.

Orientador: Rubens Augusto Camargo Lamparelli.
Dissertação de Mestrado - Universidade Estadual de
Campinas, Faculdade de Engenharia Agrícola.

1. Sensoriamento Remoto. 2. Landsat (Satélites). 3.
Análise por componentes principais. 4. Café – Guaxupé
(MG). I. Lamparelli, Rubens Augusto Camargo. II.
Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de
Engenharia Agrícola. III. Título.

Título em Inglês: Coffee crop areas mapping in mountain relief through
Principals Components Analysis

Palavras-chave em Inglês: Remote sensing, MODIS, ASTER, Radiometric
Normalization, Principals components analysis

Área de concentração: Planejamento e Desenvolvimento Rural Sustentável

Titulação: Mestre em Engenharia Agrícola

Banca examinadora: Antonio Roberto Formaggio, Jansle Vieira Rocha

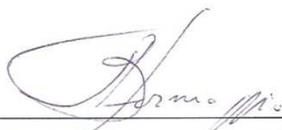
Data da defesa: 18/02/2009

Programa de Pós Graduação: Engenharia Agrícola

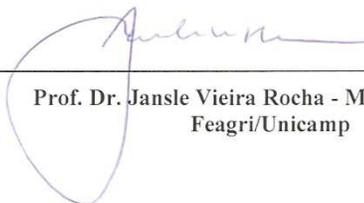
Este exemplar corresponde à redação final da **Dissertação de Mestrado** defendida por **Luis Antonio Nery**, aprovada pela Comissão Julgadora em 18 de fevereiro de 2009, na Faculdade de Engenharia Agrícola da Universidade Estadual de Campinas.



**Prof. Dr. Rubens Augusto Camargo Lamparelli – Presidente e Orientador
Feagri/Unicamp**



**Prof. Dr. Antonio Roberto Formaggio – Membro Titular
INPE**



**Prof. Dr. Jansle Vieira Rocha - Membro Titular
Feagri/Unicamp**

OFEREÇO,

Aos meus pais Sebastiana e Luis Augusto (in memorian) e à minha irmã Neusa, exemplos de luta e honestidade.

DEDICO,

*A minha esposa Lucia e aos meus filhos
Camila, Murilo e Danilo, razões da minha vida.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, a Deus que me concedeu forças e sabedoria para abraçar mais esta oportunidade que me foi concedida.

Agradeço a FEAGRI/UNICAMP, pela oportunidade de realizar o mestrado em Engenharia Agrícola.

Ao Professor Dr. Rubens Augusto Camargo Lamparelli pela orientação e ensinamentos no decorrer do mestrado, a quem aprendi a admirar pelo seu profissionalismo e dedicação.

Ao Professor Dr. Jansle Vieira Rocha da FEAGRI pela oportunidade e sugestões.

Ao Professor Dr. Jurandir Zullo Junior do CEPAGRI pelos ensinamentos sobre correção atmosférica e pela seção do programa SCORADIS.

We would like to thank Cooxupé, FAPESP, Virtual Institute FAPESP – Microsoft (eFarms Project), for the financial support for this work.

Ao pesquisador do INPE, Dr. Flávio Ponzoni, pela ajuda nas análises espectrais de alvos vegetais e pelas sugestões.

À Professora Dra. Claudia Bauzer do IC/UNICAMP pelo apoio e incentivo ao desenvolvimento desta pesquisa.

À COOXUPÉ – Cooperativa Regional dos Cafeicultores em Guaxupé, pelo apoio que viabilizou a realização desse trabalho.

A todos os produtores que auxiliaram no fornecimento de informações referentes à lavoura de café no município de Guaxupé, imprescindível para este trabalho.

Ao Engº Agr. Antônio Carlos Martins pelo apoio e incentivo para o desenvolvimento desta pesquisa.

À Dra. Vanessa Canavesi, pesquisadora do INPE, pela inestimável ajuda na análise dos dados.

Aos meus amigos dos Laboratórios de Geoprocessamento e do CEPAGRI, João, Erivelton, Júlio, Cristina, Gláucia, Ana, Gustavo, Daniela, Renata, Rose, Agmon e Fernando pela troca de conhecimento e pelas boas discussões sobre geoprocessamento e, à Edilene e ao Claudir, pelo apoio e ao Sr. José Nogarotto pelas muitas viagens para Guaxupé/MG.

A todos os funcionários da secretaria de Pós-Graduação pela dedicação e agilidade nos trâmites administrativos.

Enfim, agradeço a todos os que me ajudaram na realização desse trabalho.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	X
LISTA DE TABELAS.....	XIII
RESUMO.....	XIV
ABSTRACT.....	XVI
1.INTRODUÇÃO.....	1
1.1.Hipótese.....	3
1.2.Objetivo Geral.....	3
2. REVISÃO DA LITERATURA.....	4
2.1. Estágio atual da cultura do café (<i>Coffea arabica</i>) no Brasil	4
2.1.1. Produto gerador de divisas	4
2.1.2. Cultura do café de montanha.....	5
2.2. Botânica e fisiologia da planta de café	5
2.2.1. Crescimento vegetativo	7
2.2.1.1. Crescimento do caule.....	7
2.2.1.2. Folhas	9
2.3. Espaçamento e condução do cafeeiro	10
2.3.1. Espaçamento de plantio	10
2.3.2. Condução do cafeeiro	11
2.4. Sensoriamento remoto	12
2.4.1. Comportamento espectral das plantas	12
2.4.2. Sensoriamento remoto em relevo montanhoso.....	16
2.4.3. Sensoriamento remoto aplicado à cafeicultura no Brasil	19
2.5. Modelo Digital de Terreno	22
2.6. Processamento digital de imagens	26
2.6.1 Fator de iluminação	26
2.6.2. Efeitos da atmosfera sobre as imagens de satélite.....	27
2.6.3. Normalização radiométrica.....	29
2.6.4. Análise por Principais Componentes.....	31
2.6.5. Classificação de imagens.....	33
2.6.6. Avaliação da qualidade da classificação	35

3. MATERIAL E MÉTODOS.....	37
3.1. Material.....	37
3.1.1. Caracterização da área de estudo.....	37
3.1.2. Informações locais.....	38
3.1.3. Imagens de satélite.....	39
3.1.3.1. Imagens TM/Landsat 5 e ETM+/Landsat 7.....	39
3.1.3.2. Imagem ASTER.....	41
3.1.3.3. Imagem MODIS.....	41
3.1.3.4. Material de campo.....	42
3.1.3.5. Material complementar.....	43
3.2. Método.....	43
3.2.1. Primeira fase.....	45
3.2.1.1. Transformação dos níveis de cinza (NC) em reflectância.....	45
3.2.1.2. Correção atmosférica.....	47
3.2.1.3. Registro da imagem.....	48
3.2.1.4. Normalização radiométrica.....	50
3.2.2. Segunda fase.....	51
3.2.2.1. Coleta de informações de campo.....	51
3.2.2.2. Modelo digital de elevação.....	54
3.2.2.3. Fator de Iluminação.....	56
3.2.3. Terceira fase.....	61
3.2.3.1. Análise por Principais Componentes.....	61
3.2.3.2. Seleção das amostras de treinamento.....	65
3.2.3.3. Classificação supervisionada.....	68
3.2.3.4. Validação dos dados.....	71
4.RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	74
4.1. Análise dos resultados da correção atmosférica da imagem ETM+/Landsat 7.....	74
4.2. Análise dos resultados da normalização entre a imagem ETM+/Landsat 7 e as imagens TM/Landsat 5.....	76
4.3. Análise dos resultados obtidos pela aplicação do Fator de Iluminação (FI).....	82
4.4. Análise dos resultados da aplicação da técnica de Análise por Principais Componentes (APC).....	84
4.5. Análise dos resultados da aplicação da técnica de Classificação Supervisionada.....	86
4.6. Análise da validação dos dados.....	93
4.7. Análise dos resultados da determinação de área dos mapeamentos.....	99

5. CONCLUSÃO.....	10
1	
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	104
7. APÊNDICES.....	119

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Desenvolvimento das gemas florais do cafeeiro.....	7
Figura 2: Diagrama das fases fenológicas da cultura do café arábica.....	8
Figura 3: Curva de reflectância típica de uma folha verde.....	14
Figura 4: Geometria do sistema sensor-Sol-alvo.....	16
Figura 5: Diagrama simplificado da geometria de imageamento do ASTER.....	24
Figura 6: Localização da área de estudo.....	37
Figura 7:- (a) Imagem IKONOS-II do município de Guaxupé obtida em fev/2002, e os vetores dos talhões de café (b).....	39
Figura 8: Relação entre as fases fenológicas do café e imagens TM/Landsat adquiridas.....	40
Figura 9: Talhões verificados em campo (em amarelo).....	42
Figura 10: Fluxograma da primeira fase da pesquisa.....	44
Figura 11: Ganhos das bandas do sensor ETM+ para o mês de Junho.....	46
Figura 12: Imagem bruta ETM+/Landsat-7 (à direita) com direção Norte e ,recorte da imagem com correção atmosférica aplicada (à direita).....	48
Figura 13: Recorte da imagem ETM+/Landsat-7 registrada (composição 543).....	49
Figura 14: Imagens do TM/Landsat 5 normalizadas.....	51
Figura 15: Fluxograma da segunda fase da pesquisa.....	53
Figura 16: Distribuição espacial dos talhões digitalizados (cor laranja) e os talhões .levantados em campo (cor verde).....	54
Figura 17: Modelo digital de elevação gerado pelas imagens ASTER.....	56
Figura 18: Imagens Fator de Iluminação para as três datas das cenas do TM/Landsat-5.....	57
Figura 19: Imagem FI 15/08/01 com sobreposição dos vetores de café verificados em campo (em branco).....	58
Figura 20: Fatiamento da imagem FI (15/08/2001).....	60
Figura 21: Detalhe do Fatiamento da imagem FI (Figura 21), com destaque para as classes de iluminação e os vetores de café verificados em campo (linhas em branco).....	61
Figura 22: Imagem FI de 15/ago/01 mostrando os pixels selecionados como amostras (cruzeta branca) para aplicação da APC em área de café adulto (pixel em vermelho).....	62

Figura 23: Fluxograma da terceira fase da pesquisa.....	64
Figura 24: Distribuição espacial dos fatores resultantes da aplicação APC na imagem FI de 5/08/2001.....	65
Figura 25: Distribuição das amostras de treinamento extraídas da aplicação da APC, nas datas referentes às imagens TM/Landsat 5.....	67
Figura 26: Imagem classificada do sensor TM de 15/08/2001.....	70
Figura 27: Assinaturas espectrais referentes ao ND (azul) da imagem original, ND do FRB aparente (vermelho) e ND do FRB de superfície (verde) de uma região de mata.	75
Figura 28: Assinaturas espectrais do alvo solo. ND (azul), ND do FRB aparente (vermelho) e ND do FRB de superfície (verde).....	76
Figura 29: Assinaturas espectrais do alvo solo exposto, na imagem TM, após registro (linha azul) e após normalização radiométrica (linha vermelha).....	77
Figura 30: Assinaturas espectrais do alvo café adulto, na imagem TM, após registro (linha azul) e após normalização radiométrica (linha vermelha).....	77
Figura 31: Gráficos mostrando a linearidade entre os pixels invariantes das imagens ETM+/Landsat 7 (imagem referência) e TM/Landsat 5 de 15/08/01 (imagem alvo).	78
Figura 32: Relatório de saída do algoritmo apresentando os valores referentes à estatística resultando entre as imagens ETM+/Landsat 7 (imagem referência) e TM/Landsat 5 de 15/08/01 (imagem alvo).	79
Figura 33: Assinaturas espectrais do alvo café adulto nas imagens TM (IMAG-2, IMAG-3 e IMAG-4), após normalização radiométrica.....	81
Figura 34: Composições coloridas utilizando-se as bandas do TM/Landsat 5 nas datas 15/08/01 (à esquerda), 05/12/01 (centro) e 12/04/02 (à direita).....	81
Figura 35: Fatiamento das imagens de FI nas datas referentes às imagens TM.....	83
Figura 36: Distribuição espacial das amostras resultantes da aplicação da APC nas datas 15/08/01 (Fig.36a), 05/12/01 (Fig.36b) e 12/04/02 (Fig. 36c).	85
Figura 37: Gráficos resultantes da aplicação da APC (linha superior) e, gráficos resultantes da seleção de amostras de treinamento (linha inferior) utilizadas no processo da Técnica 1.	87
Figura 38: Mapa temático resultante da classificação utilizando a Técnica 1 (15/08/01).....	88

Figura 39: Quadro comparativo mostrando os resultados da aplicação das diversas técnicas de classificação, considerando os limites dos talhões de café utilizados como referencia nessa pesquisa.90

Figura 40: Quadro comparativo mostrando os resultados da aplicação das diversas técnicas de classificação, considerando os limites dos talhões de café utilizados como referencia nesta pesquisa.90

Figura 41: Recortes da imagem TM/Landsat 5 de 15/08/01 (linha inferior) e os correspondentes recortes do mapa temático gerado pela classificação utilizando-se a Técnica 1 (linha superior).91

Figura 42: Recortes da imagem TM/Landsat 5 de 15/08/01 (linha inferior) e os correspondentes recortes do mapa temático gerado pela classificação utilizando-se a Técnica 1 (linha superior).92

Figura 43: Disstribuição espacial dos resultados da classificação supervisionada.....92

Figura 44: Mapas resultantes da operação de matemática de bandas entre a imagem de referênciã e as imagens classificadas.....101

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Formas de poda da cultura do café.	11
Tabela 2: Relação das imagens multitemporais do sensor TM do Landsat-5.	39
Tabela 3: Resolução espacial das imagens do sensor MODIS.	47
Tabela 4: Relação entre as classes e intervalos de iluminação.	59
Tabela 5: Distribuição dos grupos amostrais selecionados após aplicação da APC.	66
Tabela 6: Distribuição de cores adotada nas amostras de classificação.	70
Tabela 7: Relação entre intervalos de fatiamento e cores adotadas.	83
Tabela 8: Valores correspondentes aos autovetores das amostras extraídas da FI1.	84
Tabela 9: Matriz de Erro (a) e Coeficiente Kappa (b) para a classificação da imagem de 15/08/01 adotando-se a Técnica 1.	94
Tabela 10: Matriz de Erro (a) e Coeficiente Kappa (b) para a classificação da imagem de 05/12/01 adotando-se a Técnica 1.	95
Tabela 11: Matriz de Erro (a) e Coeficiente Kappa (b) para a classificação da imagem de 12/04/02 adotando-se a Técnica 1.	96
Tabela 12: Matriz de Erro (a) e Coeficiente Kappa (b) para a classificação da imagem de 15/08/01 adotando-se a Técnica 2.	97
Tabela 13: Matriz de Erro (a) e Coeficiente Kappa (b) para a classificação da imagem Composição.	98

RESUMO

A importância econômica da produção brasileira de café no mercado mundial é notória e contribui com uma grande parcela na balança comercial de exportação do país. Minas Gerais se destaca como o centro da atual produção cafeeira no Brasil e tem na região sul do estado a grande concentração da lavoura de café (*Coffea arabica*), onde o seu cultivo é realizado em pequenas propriedades bastante dispersas pela região montanhosa. A necessidade de adequação da agricultura cafeeira por meio do planejamento, controle de custos e melhoria da produtividade, tem acelerado a procura por técnicas e ferramentas para a previsão da produção agrícola passando, necessariamente, pela localização e quantificação das áreas cultivadas. Neste contexto, o objetivo desta pesquisa foi avaliar o fornecimento de informações dos dados do sensor TM/Landsat 5 utilizando as técnicas de Análise por Principais Componentes (APC) e separação de classes de iluminação sobre as áreas de lavoura de café em região montanhosa. A área de estudo escolhida foi o município de Guaxupé/MG por conter uma forte lavoura cafeeira mantida sob um organizado sistema cooperativo. Foram utilizadas imagens dos satélites Landsat 7, Landsat 5 e do sensor MODIS para a aplicação das técnicas de processamento digital, para correção atmosférica e normalização radiométrica, visando a análise do cafeeiro nas datas de 15/08/2001, 05/12/2001 e 12/04/2002, que caracterizam os estágios fenológicos do cafeeiro como períodos de colheita (repouso e senescência dos ramos), floração e início do crescimento das gemas florais, respectivamente. Também foi utilizada uma máscara da área cafeeira obtida por método de interpretação visual extraído de imagens Ikonos. A utilização de um modelo digital de elevação gerado por imagens do sensor ASTER/TERRA possibilitou a aplicação da técnica de determinação do fator de iluminação, que consistiu na criação de classes de iluminação que contribuíram na identificação de áreas de lavoura e áreas de mata sombreadas pelo relevo. Dados de campo foram levantados para auxiliar na identificação da lavoura cafeeira, separadas pelas classes amostrais de café adensado e café adulto em função dos espaçamentos de ruas e linhas adotados no plantio. A Análise por Principais Componentes (APC) foi aplicada com o objetivo de reduzir a redundância dos dados obtidos das imagens orbitais de maneira a permitir a seleção de

amostras de treinamento para a utilização em classificação supervisionada. Utilizando o método da Distância de Mahalanobis como classificador, as imagens nas datas selecionadas para a pesquisa, mostraram dados importantes quando comparados os resultados das classificações com a máscara da área de café extraída das imagens Ikonos do município. Os resultados dessas classificações foram validados por meio da determinação da Exatidão Global e coeficiente Kappa que mostraram os valores de EG= 0,78 e K= 0,40 para a imagem de 15/08/2001, EG= 0,81 e K= 0,29 para a imagem de 05/12/2001 e, EG= 0,76 e K= 0,24 para a data de 12/04/2002, confirmando que o período seco (maio até outubro) é favorável para a classificação do cafeeiro que, neste período está sob processo de colheita onde, a queda de folhas e remoção de frutos ocorre, diferenciando das outras coberturas do solo como as matas. Os maiores valores atingidos na validação dos dados ocorreram na classificação da imagem gerada pela composição dos resultados das três datas, atingindo valores de EG= 0,81 e Kappa= 0,56. O valor da área, quantificada como sendo da cultura do café, encontrado pelo método de soma dos resultados das classificações em cada data, produziu um valor 73,06 % do total de área quantificada na máscara de café, utilizada como referência. Neste sentido a metodologia se mostrou bem adequada na quantificação de áreas de café em relevo montanhoso.

Palavras-chave: Sensoriamento Remoto; MODIS; ASTER; Correção Atmosférica; Normalização Radiométrica; Análise por Principais Componentes.

ABSTRACT

The economic importance of Brazilian coffee growing in the world market is notorious and makes up significant portion of the country's foreign trade exports. Minas Gerais stands out as the core of Brazilian coffee growing, with most of the planting areas (*Coffea arabica*) concentrated in the south, where it is grown in small plots widely spread throughout the hills. The need to adequate coffee agriculture by planning, cost control and productivity improvement has increased the search for techniques and tools for the prediction of agricultural production, necessarily involving the location and quantification of cultivated areas. In this context, the goal of this research has been to evaluate data from the TM/Landsat-5 remote sensor, providing information about coffee growing areas in hilly regions. The city of Guaxupé/MG/Brazil was chosen for this study due to its strong coffee growing, kept under an organized cooperate system. Images from the Landsat-7 and Landsat-5 satellites and from the MODIS sensor have been employed for the purpose of using digital processing tools for atmospheric correction and radiometric normalization, in order to analyze coffee crops in three dates: 08/15/2001, 12/05/2001 and 04/12/2002, characterizing phenological stages such as harvesting periods (rest and senescence of boughs), flowering and beginning of flower bud growing, respectively. The use of a digital elevation model generated from ASTER/TERRA sensor enabled the use of a lighting factor determination technique, consisting in the creation of lighting classes that contributed in the identification of crop areas and terrain-shadowed vegetated areas. Field data were gathered to help identifying coffee plantation separated by sample classes of dense coffee and adult coffee as a function of the spacing of the field foods and lines used in planting. PCA (Principal Component Analysis) was applied in order to reduce the redundancy of the data obtained from orbital imaging in a way that allows the selection of training samples for use in supervised classification. Using the Mahalanobis Distance as a classifier, the images in the selected dates showed highly positive result when the classification was compared to the coffee area mask extracted from Ikonos images. The results of these classifications were validated through the determination of Global Accuracy and Kappa Index, which showed values of GA= 0.78 and K= 0.40 for the 08/15/2001 image, GA= 0.81 and K= 0.29 for the 12/05/2001 image, and GA= 0.76 and K= 0.24 for 04/12/2002, confirming that the dry season (May through October) is favorable for the classification of

coffee, which is under the harvesting process in this period, during which the falling of leaves and remotion of fruit separates it from other ground cover such as vegetation. The spectral data obtained from satellite imaging through digital processing have proven themselves adequate for the location of coffee-growing areas in hilly regions when aided by a digital elevation model. The value of the area as being coffee crop, calculated by sum of the areas found from each date classification, produced 73,06% of the agreement with coffee mask considered as a reference data. Due this the methodology showed very suitable to quantify coffee areas in hilly region.

Keywords: Remote Sensing; MODIS; ASTER; Atmospheric Correction; Radiometric Normalization; Principal Component Analysis.

1.INTRODUÇÃO

O fortalecimento do setor agrícola de um país está baseado na elaboração e aplicação de metas que envolvam todas as fases da produção, desde o desenvolvimento tecnológico das espécies vegetais, das técnicas de plantio, assistência técnica, armazenamento, até a distribuição, que é baseada em estratégias de comercialização interna e de exportação da produção agrícola.

O grande aliado de uma boa produção consiste no conhecimento da relação entre o clima, o solo e a planta, por isso, a cultura de café, originária das regiões montanhosas do centro-leste africano (SANDALJ, 2003), foi adaptada às características geográficas de diferentes regiões brasileiras, estabelecendo enorme diversidade quanto às formas de plantio e conseqüentes variações na produção. Por essa razão, a cafeicultura apresenta-se como uma cultura que necessita de constante atualização das informações sobre sua localização e produção.

No Brasil, a cafeicultura gera sete milhões de empregos diretos e indiretos distribuídos nos Estados de Minas Gerais, São Paulo, Paraná, Bahia, Espírito Santo e Rondônia, formando um mercado produtor de 40 milhões de sacas, com exportação média anual de 22 milhões de sacas e, segundo a mesma fonte, o IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, aponta que, em 2003, o Estado de Minas Gerais produziu 14.782.083 sacas de café, representando 44,63% da produção nacional, sendo as regiões Sul e Centro-Oeste do Estado, responsáveis por 46,31% do total produzido no Estado.

A crescente demanda do produto nos mercados interno e externo tem acelerado a busca por melhores resultados no que se refere à qualidade dos grãos e à produtividade do cafeeiro visando atender um mercado consumidor cada vez mais exigente.

Por ser uma cultura de forte impacto econômico, quanto maior a quantidade e qualidade de informações, mais segura será a elaboração de políticas de apoio à comercialização do produto, o que tem levado produtores e órgãos governamentais a buscar ferramentas mais precisas para a elaboração de políticas de previsão de safras para o produto, de forma a reduzir incertezas como as geradas pelo desconhecimento da efetiva área plantada do parque cafeeiro.

As características topográficas da região produtora de café no Sul de Minas Gerais, especificamente o município de Guaxupé, com altitudes variando entre 900 e 1.200 metros,

representam um forte obstáculo na elaboração de mapas que contenham a quantificação das áreas ocupadas por este tipo de rubiácea. As dificuldades para a utilização de levantamento topográfico clássico para a medição de áreas refletem-se em serviços de alto custo financeiro com base, principalmente, na demanda do tempo necessário para sua correta execução, fortalecendo, neste aspecto, a utilização de ferramentas que se apresentem como técnicas possíveis de utilização na produção de mapas em escala compatível e com custo operacional menor.

A alternativa que vem obtendo resultados positivos na geração de informações para as mais diversas áreas do planejamento, inclusive o setor agrícola, é sem dúvida a utilização do sensoriamento remoto e o processamento digital de imagens, formando um conjunto de ferramentas que pode proporcionar o monitoramento e a geração de dados a respeito da cultura, contribuindo no processo, desde plantio até a colheita, interferindo diretamente na qualidade final do produto passando pelas etapas de localização e quantificação das áreas cultivadas.

Exemplo desta técnica foi o trabalho elaborado pela Cooxupé – Cooperativa Regional dos Cafeicultores em Guaxupé que, utilizando imagens geradas pelo satélite Ikonos II, com resolução espacial de 1m, elaborou mapeamento do parque cafeeiro do município de Guaxupé no ano de 2002, chegando a resultados que auxiliaram na resposta sobre a produtividade do café no município.

A experiência realizada pela Cooxupé resultou em produtos de alta qualidade tanto na quantificação de áreas quanto à delimitação perimétrica dos talhões de café, porém devido à baixa cobertura espacial de cada imagem orbital obtida pelo sensor instalado no satélite Ikonos II, em torno de 100 km², convertem-se em produtos de preço elevado quando utilizados em escala regional.

Uma das alternativas para suprir a dificuldade do alto custo dos produtos orbitais gerados pelo sensor do satélite Ikonos II, acrescentando informações quanto à resolução espectral devido ao maior número de bandas, são as imagens de média resolução geradas pelo sensor TM do satélite Landsat-5, que tem contribuído significativamente no mapeamento em larga escala na cultura de café. Dispondo de resolução espacial de 30 m, recobrimento médio, em torno de 32.400 km² por cena e com preço bastante acessível, este produto se apresenta com muitas possibilidades de extração de informações sobre a cultura cafeeira.

1.1. Hipótese

A utilização da técnica de Análise por Principais Componentes (APC) e a seleção de classes de iluminação possibilitam melhorias na identificação das lavouras de café em área montanhosa, a partir de dados orbitais de média resolução.

1.2. Objetivo Geral

Avaliar dados TM/Landsat quanto à sua capacidade de fornecer informações que auxiliem no mapeamento da lavoura cafeeira em área montanhosa tendo como referência dados obtidos de imagem de alta resolução do satélite Ikonos.

2. REVISÃO DA LITERATURA

2.1. Estágio atual da cultura do café (*Coffea arabica*) no Brasil

2.1.1. Produto gerador de divisas

Dados fornecidos pelo Governo Federal mostram que o Sistema Agroindustrial (SAG) do café em 1998 foi responsável por 5% do total de receitas de exportações brasileiras, o que significa US\$ 2,6 bilhões de divisas com exportação. Apesar deste resultado favorável, a participação do Brasil no mercado internacional do café tem sido decrescente. Na década de 60 o Brasil deteve 40% da produção mundial de café, ao passo que nos anos 90 sua participação ficou ao redor de 20% conforme dados publicados pelo IBGE.

A mesma fonte esclarece que, de acordo com a estimativa para a safra 2000/2001, feita pela Conab, o Brasil teve uma produção de 27,49 milhões de sacas de café. Como segundo maior produtor, o Vietnã obteve um volume de 12,5 milhões, de acordo com dados divulgados pela FAO – Food and Agriculture Organization of the United Nations. Já a Colômbia produziu 11,4 milhões de sacas. Outros três países, que estão entre os maiores produtores, são Indonésia, com 6,2 milhões, Guatemala, com 4,9 milhões, e Costa do Marfim, com uma produção de 4,7 milhões de sacas.

Nas últimas três safras anteriores a 2005, a produção média do parque cafeeiro brasileiro foi de 32 milhões de sacas, muito distante das necessidades previstas para 60 milhões de sacas nos próximos 10 anos, conforme citou LIMA (2005), secretário de Produção e Agroenergia do Ministério da Agricultura.

Com a demanda mundial de café crescendo a 2% ao ano; com a produção bial brasileira variando em até 50%, segundo MIARELLI (2005), o potencial de produção do parque cafeeiro mundial não é capaz de atender a uma demanda prevista de 130 milhões de sacas, acrescentando que se abre uma clara oportunidade de mercado aos produtores.

As oscilações na produção, decorrentes da susceptibilidade da cultura cafeeira a um grande número de variáveis físico-climáticas, aliado às variações de mercado devido à oferta da produção mundial, determinam variações severas na economia.

O conhecimento efetivo da localização, quantificação e qualidade do parque cafeeiro se mostra, então, de suma importância para atender as tendências do mercado.

2.1.2. Cultura do café de montanha

A lavoura de café, em escala global, é cultivada em um universo de várias situações geográficas: das encostas dos vulcões da Guatemala aos planaltos brasileiros, dos terraços das montanhas do Iêmen até as matas da Etiópia, dos vales úmidos de Camarões às cadeias montanhosas da Índia (SANDALJ, 2003).

Os fatores mais comuns que condicionam o crescimento da planta de café em todas as regiões produtoras são latitude, altitude, a temperatura, as precipitações, a insolação, a natureza do solo e o sistema de cultivo.

Nas regiões africanas, originárias do café, as montanhas passam boa parte do ano, envoltas num gélido manto de neblina. Essas regiões desenvolvem florestas chamadas de florestas de montanha ou mata de neblina, que capturam a umidade do ambiente e, juntamente com a água que recebe com a chuva, as devolve ao solo (SANDALJ, 2003).

O mesmo autor explica que a altitude predominante desses bosques varia entre 1000 e 3500 metros, enquanto que, entre 800 e 2000 metros, se desenvolvem as plantações de arábica, nome este, originado provavelmente, da migração do café, que saiu da Etiópia, país tido como origem desta rubiácea, para a Arábia, em data não estabelecida corretamente.

2.2. Botânica e fisiologia da planta de café

Constituída de 66 espécies, a taxonomia do gênero *Coffea* é separada em quatro grandes seções: *Eucoffea*, *Mascarocoffea*, *Paracoffea* e *Argocoffea*, e ainda segundo CARVALHO (1957), a seção *Eucoffea*, compreende cinco subseções: *Erithrocoffea*, *Pachycoffea*, *Nanocoffea*, *Melanocoffea* e *Mozambicoffea*, sendo as mais importantes as duas primeiras subseções por corresponderem às espécies mais cultivadas que são o *Coffea arabica* L. e *Coffea canephora*.

MALAVOLTA (2000) menciona que as variedades *typica* do *Coffea arabica* correspondem ao tipo primitivo do *arabica* atual e, a variedade *typica* do *Coffea canephora* corresponde ao café kouillou ou “Conillon”. O autor ainda cita outras variedades que acabaram originando espécies identificadas até os dias atuais como exemplo: café Nacional – *Coffea arabica* L. variedade *typica* Cramer; café Sumatra, uma variedade do café Nacional que se relaciona com a origem do café Mundo Novo (*Coffea arabica* L. variedade Bourbon).

Aspectos da citologia das espécies de *Coffea* foram cobertos por MENDES (1957) destacando o relato sobre a variedade Mundo Novo “...considerável proporção de plantas que produzem muitos frutos desprovidos de uma ou das duas sementes (chochas)”, indicando que o caminho seria o conhecimento e melhoria genética do cafeeiro.

Assim se referiu FAZUOLI (1986) aos aspectos genéticos, onde se caracterizou a espécie *C. arabica* como tetraplóide com $2n = 44$ cromossomos, multiplicando-se por autofecundação, e a espécie *C. canephora* como diplóide com $2n = 22$ cromossomos e que se multiplicam exclusivamente por fecundação cruzada.

Com relação à temperatura, o cafeeiro não tolera grandes variações. RENA & MAESTRI (1986) apontaram que o intervalo ideal está compreendido entre 18° a 21°C, e complementam que a cafeicultura se desenvolve em regiões equatoriais em altitudes estabelecidas acima de 1000 metros como na Tanzânia, no Quênia e na Colômbia.

MALAVOLTA (1986) complementa ainda que o cafeeiro desenvolve-se em períodos secos de 3 a 4 meses, com precipitação bem distribuída e superior a 1600 mm anuais, propiciando ao cafeeiro, sob densas florestas, condições permanentes de abrigo contra as altas temperaturas.

Em contrapartida a esses fatores, MALAVOLTA (2000) destacou a baixa produção do cafeeiro sob floresta devido à falta de luz regulada, onde a fotossíntese se apresenta mínima enquanto a respiração permanece normal, não sobrando energia para os gastos de florada e frutificação.

A distribuição e a quantidade de chuvas para o ambiente de cultura de café têm mostrado que a planta é bastante maleável. RENA & MAESTRI (1986) sugeriram que a precipitação ótima estivesse compreendida entre 1200 mm e 1800 mm, mas poderia produzir em regiões com precipitações anuais maiores que 2000 mm e menores que 800 mm. Algumas indicações mostraram que o cafeeiro pode suportar deficiência hídrica de até 150 mm desde que não atinja a fase de floração, e com reserva hídrica na zona radicular pode produzir com déficit hídrico de até 200 mm (INSTITUTO BRASILEIRO DO CAFÉ, 1981).

2.2.1. Crescimento vegetativo

2.2.1.1. Crescimento do caule

O crescimento do eixo principal da planta de café exibe periodicidade conforme observado por GINDEL (1962). BARROS & MAESTRI (1974), acompanhando o crescimento do cafeeiro na região de Viçosa – MG, concluíram que o caule da planta apresenta crescimento de outubro até junho e interrompe o processo de julho a setembro.

Nas regiões montanhosas do Sul de Minas Gerais, o crescimento dos ramos é intenso entre os meses de setembro a março, referente ao período chuvoso. No período de março a setembro, o crescimento é lento coincidindo com o período frio e seco. Nos meses de janeiro e fevereiro, observa-se uma queda na taxa de crescimento do cafeeiro atribuída às altas temperaturas (MALAVOLTA, 2000).

A planta de café apresenta um característico dimorfismo dos ramos. A Figura 1 mostra uma representação esquemática do desenvolvimento das gemas no cafeeiro e dos órgãos que delas tem origem, os ramos ortotrópicos, que crescem verticalmente e os ramos plagiotrópicos que crescem lateralmente numa inclinação que varia entre 45° e 90° em relação ao eixo do caule.

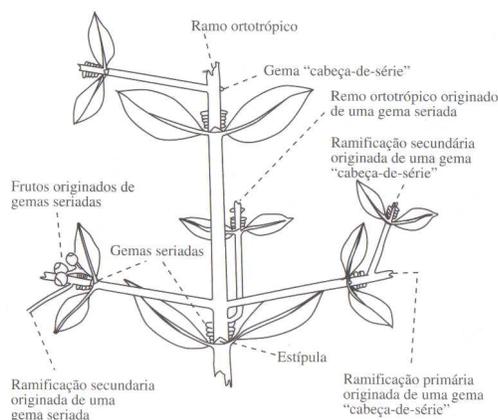


Figura 1: Desenvolvimento das gemas florais do cafeeiro.
Fonte: RENA & MAESTRI (1986).

As gemas cabeça-de-série dão origem unicamente a ramos laterais, ao passo que as gemas seriadas transformam-se em ramos verticais (ladrões) podendo desenvolver gema floral

(antese) ou ramo secundário. A frutificação começa com o vingamento ou pegamento da flor e termina com a maturação do fruto.

A Figura 2 apresenta um modelo simples e racional da seqüência das fases fenológicas do café arábica elaborado por CAMARGO & CAMARGO (2001), e é válido para as variedades Catuaí e Mundo Novo, nas condições tropicais do Brasil.

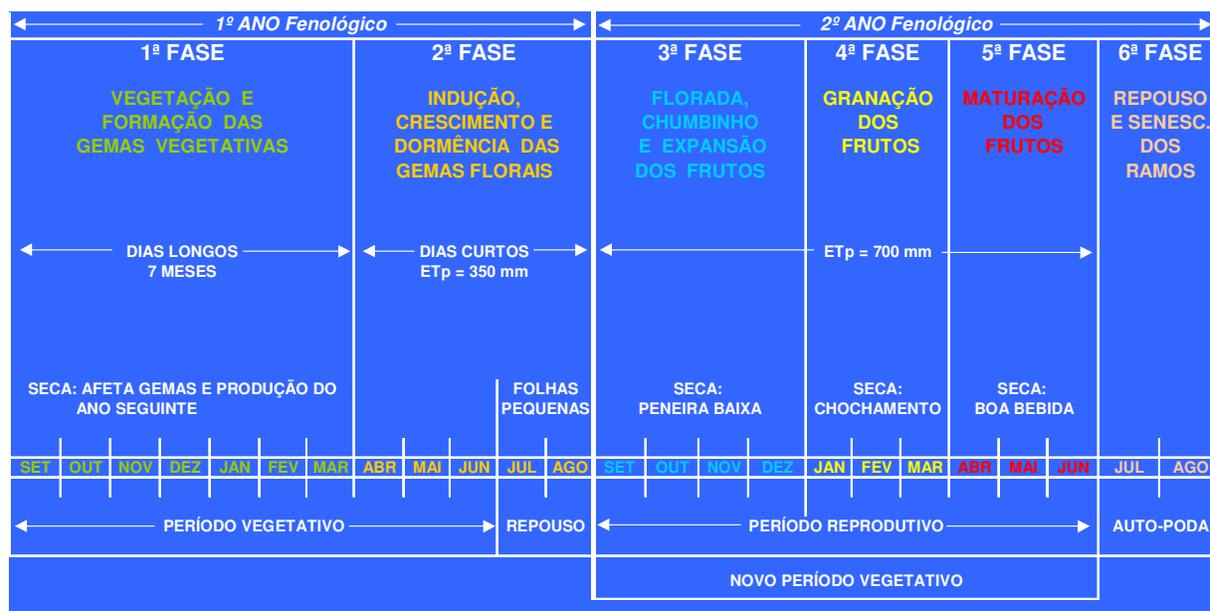


Figura 2: Diagrama das fases fenológicas da cultura do café arábica. Adaptado de CAMARGO & CAMARGO (2001).

De acordo com o diagrama acima, a planta de café apresenta seis fases fenológicas distintas, sendo duas no primeiro ano fenológico e as quatro seguintes no segundo ano. A primeira fase, caracterizada pela vegetação e formação das gemas vegetativas compreende os meses de setembro a março, onde os dias são mais longos, com fotoperíodo acima de 13 a 14 horas de luz efetiva. A segunda fase é caracterizada pela indução, diferenciação, crescimento e dormência das gemas florais, sendo esta última, após completo desenvolvimento, as gemas florais entram em dormência e ficam prontas para a antese, quando acontece o aumento substancial de seu potencial hídrico causado por chuvas ou irrigação, ocorrendo de julho a agosto. Essa fase compreende os meses de abril a agosto, com dias mais curtos, menos de 13 horas de luz efetiva, fortalecendo o crescimento das gemas florais existentes, até o mês de julho, quando entram em dormência, conforme relatado anteriormente (GOUVEIA, 1984).

A terceira fase, já no segundo ano fenológico, inicia-se com a florada, em seguida chumbinho e expansão dos frutos, que vai de setembro a dezembro, com restrição hídrica,

seguinte de chuvas, irrigação ou mesmo acentuado aumento da umidade relativa do ar (CAMARGO & FRANCO (1985); RENA & MAESTRI (1986)). A quarta fase compreende os meses de janeiro a março, quando acontece a granação dos frutos. Na quinta fase ocorre a maturação dos frutos (abril a junho) e, em seguida, a sexta fase (julho a agosto) quando ocorre o repouso e senescência dos ramos.

CAMARGO & CAMARGO (2001) observaram em condições de cafeeiros *arabica* adultos, em diferentes condições tropicais do Brasil, que as gemas florais completam a maturação e entram em dormência ficando prontas para a antese plena, quando o somatório de evapotranspiração potencial (ETp) a partir do primeiro decêndio de abril atinge cerca de 350mm ou o somatório de graus dias (GD), a partir do mesmo período, atinge cerca de 1.590 GD. CAMARGO et al. (2003) complementam que, após esta acumulação, a plena florada acontece com uma precipitação pluvial de pelo menos 10mm.

2.2.1.2. Folhas

A produção de folhas (formação de nós) está associada com o crescimento dos caules, especialmente dos ramos laterais descrevendo um processo contínuo durante o ano, mas a sua taxa varia com as condições climáticas (BROWNING, 1975). No Sul de Minas Gerais, o número de pares de folhas formadas nos ramos primários não varia sensivelmente na estação quente chuvosa de outubro a março, mas cai acentuadamente na estação fria seca.

Estudos realizados por NUNES et al. (1968) concluíram que a temperatura mostrou-se mais efetiva no crescimento da folha do cafeeiro quando comparada com a intensidade da luz. CANNELL (1971) observou que as folhas da planta de café podem alcançar valores de quase 40°C, concluindo que o crescimento das folhas é inibido durante períodos quentes.

O café é uma planta perene de crescimento alternado, que normalmente não perde suas folhas de uma só vez. Nos climas tropicais, a perda de folhas está associada com a precipitação e com a duração do dia, intensificando na época seca que torna ainda mais severos os desfolhamentos durante a frutificação e após a colheita (ALVIM, 1964; RENA & MAESTRI, 1986).

2.3. Espaçamento e condução do cafeeiro

2.3.1. Espaçamento de plantio

Tradicionalmente, os espaçamentos de linhas e ruas aplicados na cafeicultura brasileira variam de 0,5m x 4,0m até 3,5m x 4,0m com as plantas dispostas em quadros resultando numa densidade de 700 a 800 pés/ha. MIGUEL et al. (1986) relataram que a partir de 1970 foram introduzidos espaçamentos mais racionais objetivando a melhoria nos tratamentos culturais.

Os mesmos autores citam que os espaçamentos recomendados estão na faixa de 3,0m a 4,5m entre ruas e 1,5m a 2,0m entre covas, estabelecendo assim, uma população cafeeira variando entre 1500 e 2000 pés/ha.

VIANA et al. (1984) e CAMARGO et al. (1985) conduziram ensaios e compararam diferentes populações de cafeeiros por unidade de área em um intervalo variando entre 755 até 7812 pés em cinco safras. Os resultados mostraram que o adensamento de plantio aumentou a produção em todas as colheitas.

O sistema adensado é indicado para pequenas propriedades, pequenas áreas disponíveis e em regiões montanhosas, onde os produtores devem observar o alinhamento em nível como forma de controle de erosão, conforme cita MATIELLO (1999).

Resultados experimentais desenvolvidos por MIGUEL et al. (1986) indicaram como adequados, sob o ponto de vista de produtividade, os intervalos de espaçamento para plantio adensado variando entre 1,5m a 2,5m entre ruas e 0,5m a 1,0m entre plantas na linha.

RENA & MAESTRI (1986) salientam que o número de plantas por unidade de área e sua disposição no terreno “*são importantes fatores que devem ser considerados na implantação de uma lavoura, tendo em vista alcançar um IAF (Índice de Área Foliar) ótimo que representa um máximo de área foliar por área de terreno e que permita uma produtividade máxima*”.

Estudos desenvolvidos na Colômbia sobre o IAF indicaram que, para a cafeicultura o IAF = 8 é adequado para uma lavoura sadia (MALAVOLTA, 2000).

2.3.2. Condução do cafeeiro

Na condução do cafeeiro, a poda na planta é uma prática aplicada em condições especiais; como exemplo, pode-se utilizar nos casos de fechamento entre linhas, fechamento de linha, após geadas, depauperamento, idade, renovação, plantios adensados e altura do cafeeiro (MIGUEL et al. 1986).

As principais formas de poda, bem como suas características estão apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1: Formas de poda da cultura do café.

TIPO DE PODA	CARACTERÍSTICAS
Recepa baixa	<ul style="list-style-type: none">- Corte no tronco a uma altura aproximada de 0,30 a 0,40m do solo;- Indicada somente na ocorrência de danos severos em toda a extensão da planta ou na parte aérea;- A recepa deve ser efetuada em ano de alta produção e após a colheita, até o mês de setembro, no máximo.
Recepa alta	<ul style="list-style-type: none">- Diferencia-se da recepa baixa somente na altura do corte, sendo feita aproximadamente de 0,60 a 1,00m do solo;- Recomendada nos casos onde os cafeeiros ainda possuam ramos plagiotrópicos (saías).
Decote lenhoso	<ul style="list-style-type: none">- Consiste no corte do tronco a uma altura aproximada de 1,50 a 1,80m;- É recomendada quando ocorre início de fechamento e onde ainda não houve perda de “saía”.
Decote herbáceo	<ul style="list-style-type: none">- Consiste na capação do broto apical dos cafeeiros com idade de 3 a 5 anos, ou quando atingem uma altura variável de 1,70 a 2,00m;- Decote recomendado para as regiões de altitude elevada ou de baixa luminosidade, onde os cafeeiros cultivar Mundo Novo, principalmente, tendem a ficar muito altos.
Esqueletamento	<ul style="list-style-type: none">- É recomendado para lavouras bem preparadas ou projetadas para esse fim;- É recomendado para lavouras em vias de fechamento e não deve ser utilizado para plantios adensados.
Podas sistemáticas	<ul style="list-style-type: none">- Regra geral, até a 4ª safra não são necessárias podas; a partir daí é necessário adotar podas sistemáticas;- O ciclo de podas a ser adotado vai variar em função do espaçamento utilizado, do cultivar e dos tratos na lavoura, ou seja, vai depender das condições que irão influir no fechamento da lavoura.

FONTE: ADAPTADA DE MIGUEL ET AL, 1986.

2.4. Sensoriamento remoto

NOVO (1992) e CÂMARA et al. (1996) definem o sensoriamento remoto como o conjunto de processos e técnicas utilizados com o objetivo de medir e registrar as propriedades eletromagnéticas da superfície terrestre por meio da detecção do fluxo de energia radiante refletida ou emitida pelos alvos naturais, objetos ou fenômenos, por meio da utilização de sensores sem que haja contato direto entre eles.

A base da aquisição de informações de um local sensoriado, é a energia eletromagnética refletida ou emitida por esse alvo, e o Sol é a fonte de radiação dessa energia (MOREIRA, 2001).

Para o entendimento do processo de detecção, por meio de sensores, da energia radiante refletida ou emitida pelos corpos, é fundamental o conhecimento do comportamento espectral do alvo, quer seja ele uma floresta, um campo, uma pastagem ou uma cultura agrícola e a sua interação com a radiação solar (MOREIRA, 2001).

Após o processo de detecção, os dados adquiridos pelos sensores orbitais são convertidos em formato digital, onde a espacialização desses dados é constituída por elementos discretos denominados *pixel*, termo este derivado do inglês “picture element”.

O conjunto de pixels distribuídos em linhas e colunas forma a imagem, que contém medidas da distribuição da radiação solar nos comprimentos de onda desde o ultravioleta, passando pelo visível, infravermelho próximo e médio (RICHARDS & JIA, 2006). Essas medidas de distribuição da radiação solar são representadas dentro de cada pixel como um atributo numérico que indica o nível de cinza (NC) deste ponto, variando em um intervalo entre zero, que corresponde ao preto, até 255 que corresponde ao branco (CRÓSTA, 1999).

2.4.1. Comportamento espectral das plantas

Áreas cobertas por lavouras ou outros tipos de vegetação, incluindo florestas, representam uma comunidade de plantas com mútua inter-relação entre elas e com o seu ambiente. Essas características permitem a identificação de padrões diferenciados de culturas em imagens orbitais (CAMPBELL, 1987).

Experiências têm mostrado que muitas características de interesse na superfície da Terra podem ser identificadas, mapeadas e estudadas com base em suas características espectrais. Experiências também têm mostrado que algumas características de interesse não

podem ser separadas espectralmente, isso significa que, para utilizar efetivamente os dados de sensoriamento remoto, deve-se conhecer e entender as características espectrais de um alvo particular sob investigação e quais os fatores que influenciam essas características (LILLESAND & KIEFEL, 1994).

PONZONI (2001) cita que, dos elementos que constituem uma vegetação, a folha se identifica como o principal elemento no que se refere à análise espectral de uma cultura porque nela se realiza a fotossíntese, responsável pela formação dos compostos de carbono, além de outras reações vitais para a vida da planta, como a respiração e a transpiração. Toda a organização da folha (forma, posição e estrutura) está adaptada para um melhor aproveitamento dos raios solares, do ar e da água, necessários a esse processo fotoquímico.

A predominância da área foliar em relação às outras partes da planta ocorre devido à necessidade da folha captar o máximo de radiação solar para o processo de desenvolvimento da planta, daí a importância de se estudar a folha e sua estrutura quando se deseja conhecer a interação entre plantas e culturas com a radiação eletromagnética (MOREIRA, 2001).

A energia eletromagnética recebida pela superfície da Terra é decomposta em energia refletida, absorvida e transmitida, de forma que nenhuma energia recebida é perdida. Dessa maneira, pode-se entender que cada alvo na superfície terrestre interage com o fluxo radiante em função de suas características próprias, de forma a permitir a identificação das propriedades desses alvos com base em sua resposta espectral (CURRAN, 1985).

Dentre as componentes resultantes da interação da radiação solar com a planta, a parte absorvida é a de maior importância em pesquisas relacionadas à produção vegetal, entretanto, somente a quantificação da energia refletida ou emitida é registrada pelos sensores orbitais.

A qualidade e a intensidade da energia refletida ou emitida por uma planta dependem de uma série de variações como: geometria, morfologia e composição química da folha, tipo de solo, influência climática, entre outros.

Conforme relatam GATES et al. (1965), os mecanismos que influenciam a quantidade de energia eletromagnética refletida pelas folhas são os pigmentos, espaços ocupados pela água e ar e estruturas celulares com dimensões do comprimento de onda da radiação incidente.

A Figura 3 apresenta a curva de reflectância média de uma folha verde. A curva mostra baixos valores nas reflexões do azul e do vermelho do espectro visível com um pico na

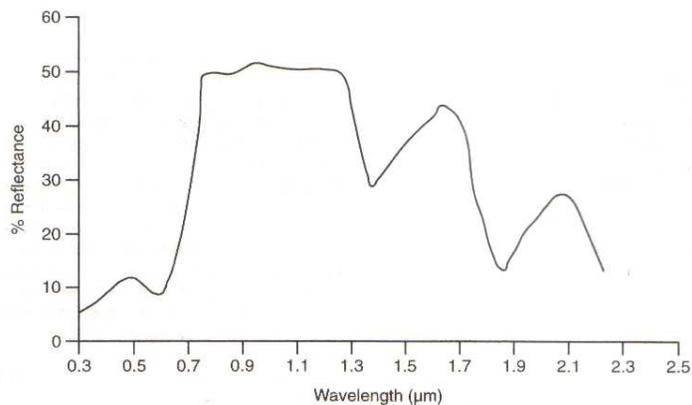


Figura 3: Curva de reflectância típica de uma folha verde
Fonte: Adaptado de MATHER (1999).

CURRAN & MILTON (1983) consideram as clorofilas *a* e *b* mais importantes em termos de pigmentação, tendo a clorofila *a* absorção no comprimento de ondas de 0,43 μm e 0,66 μm e a clorofila *b*, de 0,45 μm e 0,65 μm. Os pigmentos carotenóides, ou seja, caroteno e xantofila, ambos absorvem a luz azul até um determinado valor no comprimento de onda no verde.

Nos menores comprimentos de onda nas bandas do sensor TM/Landsat-5 (região do visível), ocorre uma homogeneização das respostas espectrais, causando uma variabilidade estreita da reflectância quando se analisa diversas variáveis biofísicas como: densidade, idade, tipo e altura da árvore, associadas à cultura do café (EPIPHANIO et al., 1994).

A reflectividade aumenta rapidamente na região próxima de 0,75μm e permanece alta na faixa que compreende o infravermelho próximo (0,75 μm – 1,35 μm) resultado da interação entre a estrutura interna da folha e a energia eletromagnética neste intervalo de onda.

Segundo estudos elaborados por GAUSMAN (1985), na região espectral do infravermelho próximo, a absorção é muito baixa (menos de 15%) e a reflectância pode chegar a até 50%, dependendo da estrutura anatômica das folhas, podendo ocorrer descontinuidades entre as membranas e o citoplasma dentro da metade superior da folha e mais intensamente, entre as células individuais e espaços ocupados com ar do mesófilo esponjoso dentro da metade inferior da folha.

banda espectral do verde (0,50 μm – 0,60 μm). Esses picos e vales são causados pela absorção da luz azul e vermelha pela clorofila e outros pigmentos. Tipicamente 70-90% da luz azul e vermelha é absorvida para fornecer energia para o processo fotossintético.

Para LILLESAND & KIEFER (1994), nos comprimentos de onda próximos de 1,35 μm e 2,50 μm , a estrutura interna da folha tem algum efeito, mas os espaços ocupados pela água na estrutura da folha estabelecem a redução da reflectância como resultado da absorção da radiação na faixa do infravermelho médio definidos pelos três maiores “mergulhos” que ocorrem próximo aos comprimentos de ondas de 1,40 μm , 1,90 μm e 2,70 μm , e por duas absorções menores que ocorrem próximos aos comprimentos de ondas de 0,96 μm e 1,10 μm .

A água na atmosfera também absorve radiação nos pontos analisados acima, entretanto, a maioria dos sensores estão limitados a três janelas atmosféricas livres de interferências estratificadas nos intervalos de 0,30 μm até 1,30 μm ; 1,50 μm até 1,80 μm e 2,22 μm até 2,60 μm , sendo de significativo interesse dentro dessas bandas, a radiação eletromagnética sensível à umidade na folha conforme HOFFER (1978) e GUYOT (1989).

GAUSMAN (1985) sugeriu que as folhas também são afetadas pelo conteúdo de água, maturação, posição nodal, condição de iluminação, a pubescência e senescência.

As maiores diferenças na reflectância das folhas, entre espécies vegetais, são dependentes da largura das folhas que afetam o conteúdo de pigmentos e sua estrutura fisiológica, entretanto, de uma maneira geral, os efeitos combinados dos pigmentos das folhas e a estrutura fisiológica são responsáveis pelo vigor da folha verde e suas propriedades características da reflectância baixa da luz azul e vermelha, média da luz verde e alta na faixa espectral do NIR – *Near Infrared* (infravermelho próximo - IVP) (LILLESAND e KIEFER, 1994).

O conhecimento sobre a interação entre a REM e os diversos parâmetros relacionados às culturas, se torna complexo à medida que aumenta o número de variáveis envolvidas. As culturas agrícolas anuais, como, por exemplo, feijão ou trigo, de desenvolvimento rápido, mantém por algum tempo as características espectrais típicas dos dosséis agrícolas. Em contrapartida, as culturas perenes tem um desenvolvimento mais lento e a influência de outros fatores como: solo, tratamentos culturais, variação do sombreamento intra e entre ruas, se mostram presentes na complexidade da caracterização da cultura (EPIPHANIO et al., 1994).

2.4.2. Sensoriamento remoto em relevo montanhoso

Grandezas físicas são utilizadas em sensoriamento remoto para definir a interação entre a emissão de ondas eletromagnéticas, a resposta dessas ondas por parte dos alvos terrestres e a captação pelo sensor dessas ondas refletidas.

A Figura 4 retrata a interação entre sensor, Sol e alvo e as variáveis que definem a geometria característica do sensoriamento remoto.

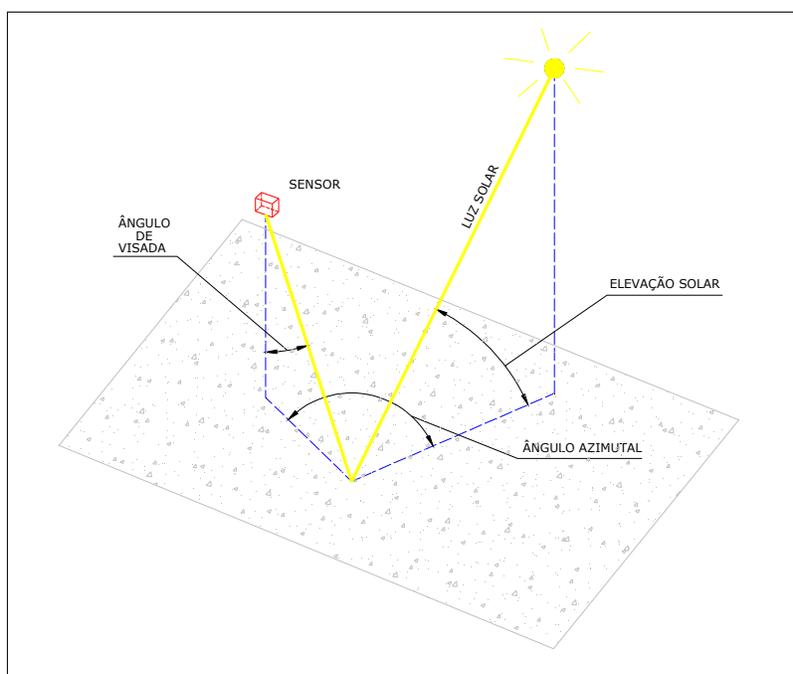


Figura 4: Geometria do sistema sensor-Sol-alvo.
Fonte: Adaptado de Lillesand & Kiefer, 1994.

Conforme retratou NOVO (1992), a grande maioria dos modelos desenvolvidos para a análise de dados de sensoriamento remoto pressupõe que o alvo tem um comportamento lambertiano onde as ondas eletromagnéticas incidentes sobre essa superfície refletem de maneira uniforme e com mesma intensidade por todo o hemisfério, representando a localização do alvo em uma superfície plana horizontal uniformemente iluminada. Este fato, entretanto, não corresponde às situações encontradas na natureza.

Para MATHER (1999), um sensor de satélite, operando na região da banda óptica, não observa e nem detecta toda a energia refletida de um alvo no solo em um hemisfério inteiro, ele grava a energia refletida que é retornada por um ângulo particular.

Lavouras localizadas em região montanhosa são submetidas a diferentes intensidades de radiação, em função de sua exposição em relação à fonte. Como a radiância é função da irradiância, a parcela voltada para a fonte certamente terá maior valor de radiância (NOVO, 1992). Essa característica torna-se relevante ao estudo do efeito topográfico, visto que o uso operacional das técnicas de sensoriamento remoto frequentemente é obstruído por problemas originados por esse tipo de efeito na resposta do sensor.

O efeito topográfico pode ser definido como a variação do feixe de luz refletida de uma superfície, com mudanças em função da declividade e do aspecto. Em imagens de regiões montanhosas este efeito manifesta-se como uma impressão visual do relevo, podendo alterar em mais de 30% a quantidade de luz refletida de um alvo qualquer na superfície para baixos valores de elevação solar (LEPRIEUR et al., 1988). Tal efeito representa a variação entre a radiância de uma superfície inclinada comparada com a radiância de uma superfície horizontal como uma função da orientação relativa entre a fonte de luz e a posição do sensor, onde os máximos efeitos topográficos são produzidos em imagens de terrenos formados por contrastes geomorfológicos e por baixo ângulo solar zenital (JUSTICE et al., 1981; FLORINSKY, 1998).

Os efeitos topográficos, característicos de regiões montanhosas, podem trazer, para o intérprete de imagens orbitais, aumento de erros na classificação de alvos ao reduzir a variação do brilho em uma cena (WOODHAM & GRAY, 1987).

Os mesmos autores citam que as superfícies orientadas (ex.: declividade e aspecto) são fatores significantes na determinação do brilho na imagem em áreas montanhosas; e os efeitos atmosféricos também são significantes em áreas com variação forte de elevação, particularmente em bandas com menor comprimento de onda.

A combinação de alta variação no relevo e baixos ângulos solares que causam a iluminação diferencial nas variadas faces de declividade é citada por FRANKLIN et al. (1986) quando da classificação de florestas para melhoramentos no inventário madeireiro como parte do projeto FOCIS – Forest Classification and Inventory System, desenvolvido pela Universidade da Califórnia e o Jet Propulsion Laboratory – Pasadena. Os autores, objetivando a redução de custos nos levantamentos do inventário madeireiro, baseados até então em fotointerpretação, utilizaram imagens do sensor MSS do satélite Landsat-2 e modelo digital de terreno com destaque para a utilização da declividade e aspecto.

Os autores identificaram que composições florestais variaram sistematicamente com o terreno respondendo regularmente com as mudanças de elevação, declividade e aspecto, o que facilitou a modelagem de alguns tipos de florestas por meio de estratificação em camadas. Os bons resultados foram obtidos após a utilização dos métodos de classificação Paralelepípedo e Maxver utilizando amostras coletadas nos extratos para a quantificação de área plantada e volume de madeira disponível, chegando a uma variação de 3,5% quando comparados os resultados obtidos, com os dados de campo coletados pelo U. S. Forest Service para a região montanhosa de Klamath ao norte da Califórnia.

Em 1980, com o objetivo de elaborar um plano de manutenção e acessibilidade aos dados de habitat de animais selvagens, áreas de exploração de gás e óleo, rios, produção de madeira, fontes culturais e arqueológicas, SHASBY & CARNEGIE (1986) desenvolveram, em um esforço coletivo, o mapeamento de ocupação do solo, considerado a maior aplicação na história do programa Landsat até aquela data, incluindo o mapeamento de 245 milhões de acres¹, cobrindo 2/3 do território do Alaska. O processo de mapeamento foi desenvolvido por meio de classificação de 15 categorias amostrais e pós-classificação com base na identificação de campo, nas máscaras fisiográficas (amostras identificadas manualmente), no modelo digital de terreno para a identificação das culturas por altitudes médias de plantio e, em imagens do sensor MSS do Landsat-5.

De acordo com KIMES & KIRCHNER (1981), THOMSON & JONES (1990), LEPREIEUR et al. (1988) e HOLBEN & JUSTICE (1980), é necessário um grande número de medidas sobre um número expressivo de tipos de vegetação quando se desenvolvem pesquisas referentes a regiões montanhosas. Nessas regiões, a quantificação do efeito topográfico tem demonstrado que diferentes tipos de vegetação respondem diferentemente para efeitos de iluminação e direção.

A simulação de um modelo geométrico de reflectância do dossel de coníferas, levando-se em conta parâmetros como: cobertura, geometria de iluminação solar e topografia, demonstrou a confusão atribuída ao efeito do sombreamento que surgiu entre várias combinações de ângulos solares, topografia e densidade do dossel (CAVAYAS & TEILLET, 1985).

¹ Acre: unidade de medida que equivale a 4.406,84 m².

Segundo SYRÉN (1991), uma estrutura vertical de diferentes espécies vegetais influencia significativamente na relação onde a reflectância do alvo decresce como função da diminuição da elevação solar. Isto indica que para, um aumento do ângulo entre a vertical do local e a luz solar devido à topografia, a resposta espectral é também dependente da estrutura vertical do dossel vegetativo², o que corrobora com o estudo desenvolvido por COVRE (1989) sobre a relação entre alguns parâmetros culturais de citrus (variedade, idade, percentagem de cobertura do terreno por árvores de citrus, tipo de solo, orientação do declive, altura das árvores, tipo e condição do substrato e uniformidade do talhão onde, utilizando dados do sensor TM/Landsat-5, quatro parâmetros se mostraram com predominante influência nas respostas espectrais dos citrus, quais sejam: percentual de cobertura do terreno por árvores de citrus, altura das árvores, substrato e tipo de solo.

2.4.3. Sensoriamento remoto aplicado à cafeicultura no Brasil

Os primeiros estudos aplicados em sensoriamento remoto envolvendo a cafeicultura no Brasil foram desenvolvidos pelo Serviço de Fotointerpretação do extinto IBC – Instituto Brasileiro do Café, como parte de uma pesquisa que envolveu estudos sobre o efeito da geada na lavoura cafeeira e o avanço da ferrugem do café.

Os estudos foram efetuados nos anos de 1969 e 1970 e consistiram em vôos teste utilizando filmes coloridos e infravermelhos “Ektachrome” que possibilitaram análises usando-se separação de bandas do espectro com base em leituras densitométricas filtradas, sendo uma das análises, direcionada para a detecção e medição dos efeitos da geada sobre o parque cafeeiro em uma área teste no Estado do Paraná. Os resultados dessa análise foram comparados com dados extraídos de fotografias pancromáticas e indicaram uma boa correlação entre as diferentes bandas do espectro (VELLOSO & MCNEILL, 1971).

Segundo os mesmos autores VELLOSO & MACNEILL (1971), outro estudo foi realizado no Estado de Minas Gerais para a avaliação dos efeitos da ferrugem do café utilizando-se o mesmo processo de análise por meio de comparações entre leituras densitométricas filtradas e fotografias aéreas que não resultaram em uma detecção efetiva das plantas afetadas por *Hemileia vastatrix* (ferrugem).

² O termo dossel vegetativo é definido por ASSUNÇÃO (1989) como sendo tudo que compõe a parte aérea de uma comunidade de plantas e que, portanto, está envolvido diretamente com a interação da energia solar. É caracterizado ainda pelos seus componentes, sua organização e sua estrutura.

Em 1971, uma ação conjunta envolvendo o IBC - Instituto Brasileiro do Café e a FAO - Food and Agricultural Organization, elaborou um programa de desenvolvimento do Sistema Automático de Inventário Cafeeiro – SAIC, que consistiu na construção de um sistema de televisão aerotransportado de alta resolução permitindo uma análise automática dos dados (VELLOSO & SOUZA, 1976).

Testes realizados no Estado do Paraná para a identificação da área cafeeira, onde foram utilizadas simultaneamente, fotografias aéreas e imagens tomadas pelo sistema SAIC, mostraram que o sistema não atendia ao nível de precisão exigido para a inventariação. Os dados foram comparados com os resultados obtidos pelo processo convencional adotado pelo IBC conforme VELLOSO & SOUZA (1976).

VELLOSO (1974) utilizou imagens geradas pelo sensor MSS do satélite Landsat-1 para a inventariação do café por meio de interpretação visual, resultando em uma alta percentagem de erro atribuídas à baixa resolução espacial (79m) além de outros fatores.

O método de classificação automática em imagens MSS do Landsat-1 foi aplicado por TARDIN et al. (1977), e novamente a baixa resolução espacial foi citada como o fator mais importante para a confusão entre classes de café normal com áreas reflorestadas. A resolução do sensor aproximou a resposta espectral do café com a resposta da vegetação natural (cerradão e capoeira).

Resultados obtidos pela FEDERACION NACIONAL DE CAFETEROS DE COLÔMBIA (1987), utilizando produtos gerados pelo satélite SPOT mostraram resultados preliminares positivos para a identificação de áreas cultivadas com café e outras culturas, indicando a forte possibilidade de classificar e quantificar áreas cultivadas com café, conforme citação de LEONARDI (1990).

A segunda geração de satélites Landsat consistiu em duas novas possibilidades de imageamento, o Landsat-4 e o Landsat-5, sendo esses dois, juntamente com seus antecessores, os maiores responsáveis pelo crescimento e aceitação do sensoriamento remoto, por ter permitido a criação da primeira base de dados multitemporais com adequada resolução espacial e espectral, segundo SABINS (1986).

Imagens do TM/Landsat foram utilizadas por TARDIN et al. (1992) para a discriminação espectral das culturas de café, citrus e cana de açúcar por meio da utilização de

técnicas de tratamento digital na região sul do Estado de Minas Gerais, mais precisamente em Furnas, região de relevo plano a suave ondulado.

LEONARDI (1990) descreve que a utilização das bandas 3, 4 e 5 apresentou resultados satisfatórios na discriminação das áreas de café com mais de 70% de cobertura de solo.

Estudos referentes à avaliação do potencial de utilização de imagens multitemporais dos satélites Landsat-5 TM e Landsat-7 ETM+, no mapeamento da cultura de café para previsão de safras foram desenvolvidos por MOREIRA et al. (2004) na região centro-sul de Minas Gerais. Os autores, analisando o comportamento espectral das lavouras de café em imagens temporais e utilizando o método de classificação onde as amostras foram selecionadas em café-formação, café-produção, mata e pastagem, concluíram que a utilização da banda 4 (0,76 μm a 0,90 μm) é fundamental para diferenciar café de mata e de pastagem.

Os autores, apresentaram ainda, no mesma pesquisa, os seguintes resultados: a-) após o processo de classificação utilizando imagens ETM+/Landsat 7 obtidas durante o período considerado seco, de maio até outubro, não encontraram confusão espectral entre as lavouras de café-produção, café-formação, mata e pastagem; b-) na imagem obtida em abril de 2001, a resposta espectral na banda 4, em relação à classe café-produção, foi muito baixa quando comparada com a mesma banda em imagens obtidas em maio/2001, agosto/2001 e novembro/2001, concluindo que, imagens obtidas nos meses secos favorecem a identificação da lavoura de café em relação a outros alvos e permitem a identificação de áreas que sofreram redução de fitomassa.

Imagens do satélite Landsat-5 TM foram também utilizadas para a identificação e o monitoramento do parque cafeeiro nas regiões do Sul de Minas Gerais, em áreas constituídas basicamente por relevo plano a suave ondulado. VIEIRA et al. (2004) concluíram que a resposta espectral do cafeeiro é bastante complexa em razão das diversas variáveis que envolvem sua caracterização.

A cultura de café se apresenta relativamente atípica quanto ao relacionamento entre variáveis biofísicas e resposta espectral, quando comparada a florestas, culturas agrícolas e mesmo a outras culturas perenes. A fenologia do café e a diversidade de tipos de tratamentos culturais em diferentes propriedades agrícolas tornam esta cultura, peculiar do ponto de vista do entendimento de sua resposta espectral (EPIPHANIO et al., 1994).

Conclusões obtidas por TARDIN et al. (1992) sobre a discriminação de café e citrus em imagens TM/Landsat 5, na região de Furnas/MG, apontam para a necessidade de subdivisão em classes das culturas perenes como café e citrus, para sua melhor caracterização espectral, devido à alta heterogeneidade. Os autores sugerem também que o aspecto temporal seja exaustivamente explorado, dada a complexidade dos diversos tipos de manejo adotados na agricultura brasileira.

Com o objetivo de gerar mapas temáticos de uso do solo com enfoque para a cultura cafeeira nas regiões de Machado e Patrocínio/MG, VIEIRA et al. (2005) utilizaram fotografias aéreas na escala 1:25.000 para auxiliar a interpretação das imagens do ETM+/Landsat-7 e TM/Landsat-5.

O produto final possibilitou a conclusão, por parte dos mesmos autores que, a região do município de Machado, de relevo montanhoso, apresentou maior proporção de conflito da resposta espectral para as classes de café formado e mata devido ao relevo acidentado e devido à cafeicultura da região do Sul de Minas ser representada por pequenos e médios produtores, resultando em talhões de dimensões muito variáveis, características estas, que dificultam o reconhecimento visual das imagens de satélite TM/Landsat 5.

Em termos de observações por sensores remotos, o café é muito heterogêneo, pois apresenta variabilidade em todos os parâmetros culturais que influenciam a resposta espectral (EPIPHANIO et al., 1994).

2.5. Modelo Digital de Terreno

Um dos produtos mais utilizados em SIG – Sistemas de Informações Geográficas é o Modelo Digital de Elevação (MDE), termo genérico utilizado para representar dados batimétricos e/ou topográficos, em todas as suas várias formas. É chamado de “modelo” porque seus dados podem ser utilizados para analisar, via computador, a superfície da Terra em três dimensões, minimizando a necessidade do trabalho intensivo de interpretação por parte do pesquisador (MAUNE, 2001).

Os mesmos autores citam que o U.S. Geological Survey (USGS) define o termo DEM como uma representação cartográfica da elevação de um local em intervalos espaçados nas direções x e y , utilizando valores z referenciados a um datum vertical.

THEOBALD (1994) refere-se ao termo DEM (Digital Elevation Model ou Modelo Digital de Elevação - MDE) para definir estritamente pontos de modelos de elevação, que podem representar pontos de altitude de uma superfície e a partir desse produto gerar derivações.

Os modelos digitais de elevação fornecem dados para a geração do MNT – Modelo Numérico de Terreno que, conforme define CÂMARA et al. (1996), é uma representação matemática computacional da distribuição de um fenômeno espacial que ocorre dentro de uma região da superfície terrestre e que pode associar-se a variáveis de natureza diversa como, temperatura, relevo, vegetação, hidrologia, mineralogia e tipos de solos dentre outros.

O processo de modelagem numérica é constituído por três etapas: a aquisição de dados, a geração de modelos de grades e a elaboração de produtos gerados a partir de análises sobre estas grades, que são geradas na forma regular e irregular utilizando os dados adquiridos, de maneira a simplificar a implementação dos algoritmos de aplicação, gerando assim, os produtos derivados como: curvas-de-nível, mapa de classes de declividade e mapa de faces de exposição.

As fontes de dados para a aquisição dos MDE's dividem-se em duas categorias: radar e óptica. No âmbito dos radares como fonte de geração de MDE's, os resultados obtidos por RUFINO et al. (1998), com imagens produzidas por radar interferométrico de abertura sintética, estabeleceram intervalo de valores de acurácia vertical entre 10 e 30 metros com resolução espacial de 25 metros.

A partir de fevereiro de 2000, a missão do SRTM – Shuttle Radar Topography Mission, produziu MDE's em escala continental com resolução espacial de 90 metros e, especificamente para o território dos USA, o MDE foi gerado com resolução espacial de 30 metros e a acurácia vertical de 10 metros (RABUS et al., 2003).

Os MDE's gerados com dados de sensoriamento remoto óptico são obtidos a partir de pares estereoscópicos de imagens orbitais ou não, sendo bastante utilizados os produtos derivados do satélite SPOT, que segundo RODRIGUEZ et al. (1988), produzem MNT's com resolução espacial de 20 metros e com acurácia vertical de aproximadamente 4 a 5 metros em relevos suaves. Em relevos montanhosos os mesmos produtos SPOT geraram resultados de aproximadamente 100 metros de acurácia vertical, conforme cita FUKUSHIMA (1988).

Em dezembro de 1999, a NASA – National Aeronautics and Space Administration, colocou a bordo do satélite Terra (EOS – Earth Observing System), o sensor ASTER – Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer, com capacidade de coleta de informações na faixa da região espectral, em 14 bandas, desde o visível até o infravermelho termal por meio de três telescópios separados, com alta resolução espacial, espectral e radiométrica, conforme cita IWASAKI & FUJISADA (2000).

Parte dos dados gerados pelo sensor ASTER é utilizada como fonte para a geração de MDE (modelo digital de elevação). Esses dados são obtidos por dois sensores que operam na banda do NIR, no intervalo entre $0,78 \mu\text{m}$ e $0,86 \mu\text{m}$, em canais denominados Banda 3 (HIRANO et al., 2003). A banda 3 é subdividida em Banda 3N, de visada nadiral e banda 3B de visada inclinada, conforme mostra a Figura 5 (FUJISADA et al., 2005).

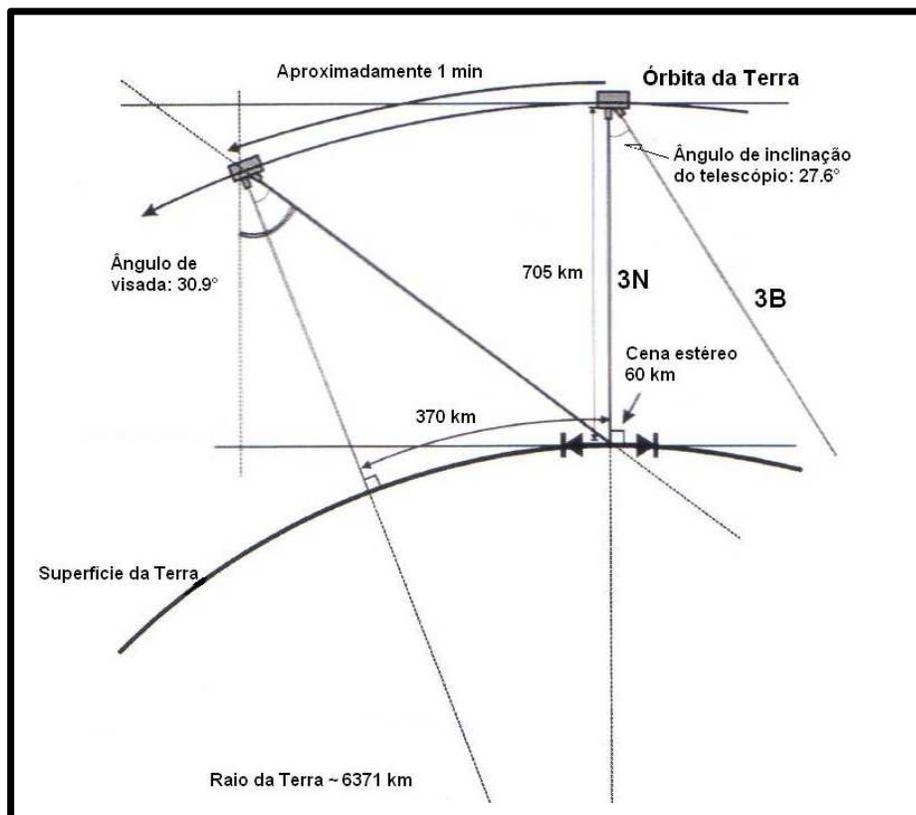


Figura 5: Diagrama simplificado da geometria de imageamento do ASTER.
Fonte: Adaptado de Hirano *et al.*, 2003.

As imagens adquiridas pelo sensor ASTER para a geração de modelo digital são de 15 metros de resolução espacial e, segundo FUJISADA et al. (2005), a acurácia vertical do

MDE é de 20 metros com 95% de confiança (2σ). A acurácia horizontal está relacionada com a acurácia posicional do satélite e é considerada melhor que 50 metros.

De acordo com HIRANO et al.(2003), dentre as características inovadoras do sensor ASTER está a possibilidade de imageamento na posição nadiral e, após 60 segundos, coletar novamente a imagem do mesmo local sob outro ângulo, de maneira a gerar as informações do par estereoscópico em um curto espaço de tempo. Esta configuração é destacada por COLVOCORESSES (1982) e FUJISADA (1994) para os quais pares estereoscópicos adquiridos em curto espaço de tempo mantêm na imagem características de uniformidade ambiental e de condições de iluminação, fundamentais para a consistência da qualidade de um modelo digital.

Testes de validação dos modelos digitais de elevação com resolução espacial final de 30 metros gerados a partir de imagens do sensor ASTER, realizados pelo ASTER SCIENCE TEAM DEM, mostraram a possibilidade de elaboração de MNT's e mapas topográficos de áreas montanhosas na escala de 1:50.000 com curvas de nível no intervalo vertical de 40 metros (HIRANO et al., 2003).

Muitos estudos têm demonstrado que o uso de um MDE como elemento auxiliar tem aumentado a acurácia na classificação de dados digitais. O MDE tem sido usado visando melhores resultados: na distribuição de componentes no solo como contribuição para a resposta espectral (STAHLER, 1981), em amostras de treinamento para a estratificação geográfica de áreas homogêneas (FRANKLIN, 1986), na normalização topográfica das imagens digitais do Landsat TM (CIVCO, 1989).

Estudos realizados por KÄÄB (2005) mostraram que a combinação de dados do SRTM-3 e do ASTER pode gerar modelos digitais de maior precisão em grandes áreas onde, informações obtidas pelo sensor ASTER podem melhorar a precisão dos dados nos canais afetados por falta de informações devidas ao sombreamento do radar.

A verificação da acurácia dos MNT's é fundamental antes da decomposição do produto em variações como declividade e exposição, porque as fontes de erros aumentam em MDT's gerados por estéreo-correlação em dosséis de florestas onde as altitudes se confundem com o topo das árvores, e os erros tendem a aumentar em áreas montanhosas onde as mudanças de declividade são bruscas, conforme relatos de SKIDMORE (1989); BOLSTAD & STOWE (1994), e a transferência de eventuais erros para a base de dados se propagarão nas

análises espaciais, como destacam SPANNER (1983); FRANKLIN et al. (1986); MASON et al. (1988); MOELLERING & KIMERLING (1990); DAVIS & DOZIER (1990); QUINN et al. (1991).

2.6. Processamento digital de imagens

2.6.1 Fator de iluminação

O MNT (Modelo Numérico de Terreno) tem sido muito utilizado para a geração de produtos derivados tais como mapas de declividade. A declividade em uma posição do relevo é definida por um plano tangente àquela posição da superfície modelada. A declividade é composta por duas componentes: o gradiente, também chamado de declividade, que é a máxima razão de variação da altitude; e a exposição ou orientação de vertentes, que é a direção de domínio dessa máxima razão de variação de altitude (GOETZ, 1984).

A extração e análise de dados orbitais levando em consideração o relevo têm trazido muitas incertezas quando aplicados em região montanhosa devido às geometrias de iluminação e de visada que são parâmetros geométricos que caracterizam o Fator de Reflectância Bidirecional (FRB). A geometria de iluminação refere ao posicionamento do Sol e a geometria de visada ao posicionamento do sensor (PONZONI E SHIMABUKURO, 2007).

A influência do relevo no Fator de Reflectância Bidirecional (FRB) proveniente dos dosséis foi objeto de estudos de COMBAL E ISAKA, (2002). O FRB de dosséis apresentou forte dependência não linear com a declividade e a orientação de vertentes mesmo em terrenos ondulados. A reflectância dos alvos terrestres se mostrou diferente entre terrenos planos e terrenos com até 10% declividade, indicando que o relevo topográfico deve ser considerado na caracterização espectral dos alvos.

CORDERO-SANCHO E SADER (2007), em pesquisa para a identificação de cultura de café na Costa Rica, melhoraram a acurácia da classificação em 3,28% após correções nos dados topográficos a partir dos dados do *Shuttle Radar Topography Mission (SRTM)*.

VALERIANO (2008) desenvolveu um algoritmo de processamento para imagem orbital de MDE acrescida das informações da geometria de visada de uma imagem do Landsat/TM e gerou um produto contendo as variações de iluminação distribuídas entre os valores de 0 (zero) e 1 (um) sendo, o valor 0 (zero) atribuído aos pixels mais escuros e, o valor

1 (um) para os pixels mais claros da imagem, denominado Fator de Iluminação, com o claro objetivo de diminuir o efeito topográfico presente na imagem coletada, em função do relevo da região.

2.6.2. Efeitos da atmosfera sobre as imagens de satélite

A atmosfera altera fortemente as características espectrais da radiação que chega a um sensor, conforme SCHOWENGERDT (1997). Constituída basicamente por uma mistura gasosa, por vapor d'água e aerossóis, essa camada "protetora" da Terra pode chegar a 1000 km de altitude, porém a maior concentração dessa massa de gases atinge os primeiros 10 km de altitude a partir da superfície terrestre.

A radiação solar, quando atravessa a atmosfera, sofre variações quantitativas e qualitativas por processos de espalhamento, absorção e reflexão, causadas pelos elementos constituintes da atmosfera (MOREIRA, 2001).

O espalhamento da radiação é um efeito físico de obstrução da luz pelas partículas existentes na atmosfera. RICHARDS (1999) faz referência ao espalhamento como o mecanismo dominante nos efeitos de distorção radiométrica nos dados de uma imagem orbital.

MATHER (1999) explica que a aplicação da correção atmosférica se torna imprescindível nos casos de avaliação da evolução do tipo e do estado das superfícies.

O mesmo autor cita que a correção atmosférica é uma técnica de processamento de imagens necessária também em casos, por exemplo, quando se calcula a razão de bandas de uma imagem multiespectral, onde o efeito do espalhamento aumenta inversamente com o comprimento de ondas, e os dois canais são influenciados diferentemente pelo espalhamento, e quando os dados de radiância, obtidos em um dado tempo, necessitam ser comparados com dados coletados em datas posteriores, sendo que, nesta situação também, os efeitos atmosféricos presentes nos valores de radiância devem ser removidos.

A técnica mais comum de mitigar o efeito atmosférico em uma imagem multiespectral, entendendo as propriedades gerais da influencia atmosférica como uma função do comprimento de ondas, é o uso do objeto escuro como um alvo de calibração (CHAVES, 1988).

Vários são os métodos desenvolvidos para a remoção dos efeitos atmosféricos em imagens de satélites. Os algoritmos utilizados geralmente empregam equações que calculam

de maneira aproximada parâmetros físicos característicos de uma atmosfera particular, dentre esses modelos o mais utilizado é o 5S/6S (TANRÉ et al., 1986). O uso operacional desses modelos está limitado pela aquisição dos dados atmosféricos, principalmente no momento do imageamento, determinando custos consideráveis de aquisição, conforme MATHER (1999).

TEILLET & FEDOSEJEVS (1995) recomendam que a utilização do valor de reflectância, conhecida ou assumida, do alvo escuro, seguida de uma modelagem atmosférica detalhada com o código 5S, é aceitável para aplicações ambientais, mas ponderam que, para outros tipos de estudos, erros significantes podem ocorrer no caso de se assumir reflectância zero para objetos escuros, mesmo se a reflectância do objeto esteja próxima de 0,01 ou 0,02.

Com o objetivo de remover os efeitos atmosféricos de imagens orbitais do satélite Landsat-5, ZULLO JR. (1994) desenvolveu um aplicativo denominado Sistema Computacional de Correção Radiométrica (SCORADIS), que está baseado no Modelo de Transferência Radiativa 5S (*Simulation du Signal Satellitaire dans le Spectre Solaire*). O SCORADIS agrega algumas características bastante úteis, como exemplo, a possibilidade de correção de imagens em etapas, além de permitir a correção de produtos de vários satélites diferentes.

A utilização de sistemas derivados dos modelos de transferência radiativa tem recebido um forte incremento quanto à aquisição dos dados atmosféricos, necessários para a correção atmosférica, a partir do lançamento dos satélites TERRA, em dezembro de 1999, e AQUA, em maio de 2002. A bordo destas plataformas, o sensor MODIS possibilita não só o monitoramento atmosférico como também da superfície e do oceano.

Os sensores MODIS estão instalados em duas plataformas orbitais, a primeira denomina-se TERRA, nome dado à primeira plataforma do programa EOS (*Earth Observing System*), inicialmente denominada EOS-AM por cruzar o Equador na parte da manhã. A plataforma tem a bordo os sensores: CERES (*Clouds and the Earth's Radiant Energy System*), MODIS (*MODerate-resolution Imaging Spectroradiometer*) e MISR (*Multi-angle Imaging SpectroRadiometer*) da NASA; ASTER (*Advanced Spaceborne Thermal emission and Reflection Radiometer*) do Japão; e MOPPIT (*Measurement of Pollution in the Troposphere*) do Canadá (RUDORFF et al., 2003).

Os mesmos autores descrevem os equipamentos da segunda plataforma do EOS denominada AQUA, inicialmente denominada de EOS-PM por cruzar o Equador à tarde. Esta

plataforma contém seis instrumentos a bordo: AIRS (*Atmospheric InfraRed Sounder*); AMSU-A (*Advanced Microwave Sounding Unit-A*); HSB (*Humidity Sounder for Brazil*); AMSR-E (*Advanced Microwave Scanning Radiometer for EOS*); o MODIS e o CERES (*Clouds and the Earth's Radiant Energy System*).

A recuperação dos principais elementos necessários para a correção atmosférica coletados pelo sensor MODIS como: espessura óptica dos aerossóis, coluna total de vapor d'água e carga total de ozônio, é realizada por meio de 26 bandas cujos comprimentos de onda são estrategicamente distribuídos para a aquisição desses dados (SALOMONSON e TOLL, 1990).

A metodologia para o cálculo da correção atmosférica contendo as informações do sensor MODIS, foi utilizada por NASCIMENTO & ZULLO JR. (2005), visando à elaboração de índices de vegetação para o sensor AVHRR/NOAA livres da influência atmosférica.

BENVENUTI (2005) utilizou dados gerados pelo sensor MODIS para a correção atmosférica em estudo sobre o comportamento espectral da cana-de-açúcar. Aplicando o SCORADIS ajustado para imagens do sensor ETM+ do Landsat-7, o autor analisou a coerência dos dados orbitais de vapor d'água comparando com valores obtidos de precipitação acumulada no decêndio anterior à aquisição da imagem, na área de estudo, e concluiu que houve coerência nos resultados, atestando a utilização desses parâmetros para a análise em culturas de cana-de-açúcar.

2.6.3. Normalização radiométrica

Os estudos desenvolvidos utilizando-se imagens multitemporais necessitam, em alguns casos, de uniformização dessas imagens, pois estas apresentam valores digitais distintos para um mesmo alvo com refletância supostamente invariante (GURTLER, 2003).

Segundo MOREIRA (2001), aplica-se a normalização radiométrica nos casos em que se pretende fazer estudos da trajetória espectral de alvos terrestres, em diferentes datas de passagem do satélite. Por exemplo, quando se pretende estudar a evolução do comportamento espectral de uma cultura agrícola, ao longo do seu ciclo de crescimento e desenvolvimento, ou quando se pretende comparar as informações espectrais de alvos imageados por diferentes sensores em momentos diferentes.

A normalização radiométrica é uma técnica na qual as imagens são retificadas com relação a uma imagem de referência e devem parecer como se tivessem sido obtidas pelo mesmo sensor e/ou nas mesmas condições atmosféricas e de iluminação da imagem utilizada como referência, ou seja, compensa as diferenças de calibração entre sensores, ou entre a atmosfera e os diferentes ângulos de iluminação entre as imagens (HALL et al., 1991; YUAN e ELVIDGE, 1996).

Retificação foi a primeira denominação atribuída para a normalização radiométrica e foi utilizada por HALL et al. (1991) baseada em duas condições: aquisição de um conjunto de dados de controle caracterizado pela baixa ou nenhuma variação em seus valores de reflectância média entre as imagens e a determinação empírica dos coeficientes para a transformação linear de todas as imagens em relação aos dados de referência.

Em geral, o conjunto de pontos adquiridos está relacionado a áreas não vegetadas com insignificante ou nenhuma mudança ao longo do tempo e, portanto, com pouca ou nenhuma diferença nos seus valores de reflectância (MOREIRA, 2001).

PONZONI e SHIMABUKURO (2007) complementam que o princípio da normalização radiométrica, considerando uma série temporal de imagens orbitais de um sensor qualquer, uma passagem é definida como referência e nas imagens de cada banda espectral, são identificados os objetos mais claros e mais escuros, mas que possuam pouca ou nenhuma variação espectral ao longo do tempo.

MERCANTE (2008) cita que a operação de seleção de alvos com características invariantes onde os alvos são constantes, é muito difícil de realizar manualmente demandando muito tempo para encontrá-los na imagem.

Uma proposta apresentada por NIELSEN et al. (1998) e NIELSEN et al. (2002) utilizando uma técnica automática de detecção de pixels invariantes em uma série de imagens adquiridas em diferentes datas, tem sido utilizada com êxito e denomina-se MAD (Multivariate Alteration Detection).

Imagens multitemporais dos satélites Landsat 5/TM, Landsat 7/ETM+ e Spot HRV normalizadas pela técnica MAD foram comparadas com resultados obtidos de forma manual para identificação de pixels *pseudo-invariantes* por CANTY et al. (2004) que relataram resultados favoráveis para a técnica MAD em relação ao tempo de identificação dos pixels invariantes.

Estudo comparativo dos métodos de normalização foi apresentado por OVER et al. (2003), onde foram analisados os resultados envolvendo o método clássico denominado Características Pseudoinvariantes (*PIF – Pseudoinvariant Features*) (SCHOTT et al., 1988), o método de Retificação Radiométrica (HALL et al. 1991) e a MAD (*Multivariate Alteration Detection*) desenvolvida por NIELSEN et al. (1998) e NIELSEN et al. (2002).

Os autores utilizaram imagem ETM+ (05/07/2001) como referência, e aplicaram os métodos de normalização em outras duas imagens, uma ETM+ (26/06/2001) e outra TM (30/07/1984). Coletaram, manualmente, 1034 pixels de teste e os utilizaram como verdade de campo, concluindo que a normalização baseada no MAD mostrou o menor desvio da diferença da média para a imagem referência quando comparado com os resultados dos outros métodos além do menor tempo consumido para a operação completa. Outra vantagem sobre os outros métodos foi a aplicação de uma regressão ortogonal no conjunto de pixels invariáveis onde os erros contidos nas imagens a normalizar e de referência puderam ser analisados no processo de cálculos.

A técnica de regressão ortogonal também foi utilizada juntamente com a técnica do MAD ao invés da regressão linear, e os resultados obtidos por CANTY et al. (2004) se mostraram satisfatórios no sentido da preservação da resolução radiométrica após a normalização.

2.6.4. Análise por Principais Componentes

A Análise por Principais Componentes (APC) ou Transformada de Karhunen-Loeve é um dos métodos estatísticos mais usados quando se pretende analisar dados multivariados. Ela permite transformar um conjunto de variáveis originais, intercorrelacionadas, num novo conjunto de variáveis não correlacionadas, ou seja, um conjunto de N imagens de entrada vai produzir, quando processadas por meio da APC, outro conjunto de N imagens de saída com nenhuma correlação entre si. A principal função da APC é determinar a extensão dessa correlação e, por meio de uma transformação matemática apropriada, removê-la (CRÓSTA, 1999).

Como as imagens utilizadas em sensoriamento remoto são altamente correlacionadas, o objetivo mais imediato da APC é verificar se existe um pequeno número das primeiras componentes principais que seja responsável por explicar uma proporção elevada da variação

total associada ao conjunto original. Essas componentes representam uma descrição alternativa dos dados conforme RICHARDS E JIA (2006).

O estágio inicial da APC compreende a rotação da nuvem de pontos por meio de combinações lineares e o ajuste do valor zero para o ponto definido como o centróide do grupo de amostras, ponto este, utilizado para passar os eixos da APC. O primeiro eixo é construído com base no mínimo quadrado da distância de cada ponto de amostra a essa linha (PALMER, 2002).

As componentes principais são então obtidas em ordem decrescente de variância onde a componente principal *PC1* retém mais informação estatística que a componente principal *PC2* e assim por diante. A última componente principal geralmente contém somente ruídos (JOLLIFFE, 2002).

O número de eixos gerados pela APC é compatível com o número de amostras ou de bandas utilizados. Cada eixo tem um autovalor associado, sendo que, a soma dos autovalores representa o número de amostras e pode ser expresso em porcentagem, de onde se verifica que o primeiro eixo representa $2/3$ da variação do grupo de dados e o segundo eixo explica a quase totalidade da variação restante, conforme PALMER (2002).

Cada amostra analisada recebe como resultado valores referentes ao autovetor, autovalor e fator, que correspondem: Autovalor representa a contribuição relativa de cada componente para explicar a variação total dos dados; Autovetor fornece o valor que representa o peso de cada variável em cada eixo e o fator (f) representa o coeficiente de correlação (RICHARD e JIA, 2006), calculado por meio da normalização da covariância.

RUMMEL (1970) esclarece que esses fatores explicam o padrão das correlações dentro de um conjunto de dados de variáveis observadas. Eles podem ser usados para avaliar a interdependência das variáveis e para o delineamento de padrões, onde cada padrão aparecerá como um fator, sendo possível o delineamento de agrupamentos com características ou comportamentos similares.

Os dois primeiros eixos resultantes da APC, na maioria das aplicações, são considerados suficientes para explicar a variância dos dados e pela facilidade de interpretação de gráficos em duas dimensões. Os eixos subsequentes explicam cada vez menos a variância dos dados.

CANAVESI (2008), com o objetivo avaliar o potencial da aplicação de dados hiperespectrais provenientes do sensor Hyperion, a bordo da plataforma EO-1, na extração de informações qualitativas e quantitativas de dosséis de plantios florestais do gênero *Eucalyptus* spp., comparou os resultados com os obtidos por sensores multiespectrais de bandas largas, como o TM/Landsat e HRV/SPOT, utilizou a técnica de Análise por Principais Componentes após a seleção de amostras obtidas pelo processo de combinação do relevo e do ângulo de incidência da radiação eletromagnética sobre os dosséis vegetais. A quantidade de amostras selecionadas foi definida em função da disponibilidade de escolha dos pontos e dos locais disponíveis para a análise.

2.6.5. Classificação de imagens

A classificação de imagens é o processo de produção de um mapa temático, dividido em categorias que são visíveis em uma imagem obtida por meio remoto. Muitos fatores podem causar confusão nas características espectrais dos alvos, incluindo topografia, sombreamento, efeitos atmosféricos, mudanças na calibração de sensores e mistura de classes dentro do campo de visada do sensor. Dentre esses fatores, alguns podem ser tratados e outros não, então eles devem ser tratados simplesmente como uma variabilidade estatística (SCHOWENGERDT, 1997).

A divisão dos padrões dos alvos que se deseja classificar é feita por programas computacionais denominados algoritmos de classificação ou simplesmente classificadores, conforme MOREIRA (2001), e podem ser divididos em três grandes grupos, supervisionada, não-supervisionada e híbrida.

Na classificação supervisionada, é necessária a seleção das amostras conhecidas como “amostras de treinamento”, que representam o comportamento médio das classes que devem ser mapeadas, devendo, portanto, ser amostras bastante homogêneas; na classificação não-supervisionada tem-se pouco controle sobre a separação das amostras, necessitando para isso, que as amostras sejam bastante heterogêneas de forma a aumentar a certeza de que classes possíveis estarão representadas, processo que depende grande esforço computacional (NOVO, 1992).

As classificações híbridas resultam da mistura dos dois métodos anteriores, utilizando o processo de classificação não-supervisionada para separar amostras de treinamento para a classificação supervisionada (RICHARDS & JIA, 2006).

A diferença entre os classificadores reside no reconhecimento das amostras, por meio dos algoritmos, que no caso do método supervisionado envolve parâmetros estatísticos como média, matriz de covariância, entre outros; na classificação não-supervisionada os algoritmos se baseiam apenas na variação dos níveis de cinza das amostras de treinamento conforme relata MOREIRA (2001).

O treinamento para uma classificação adequada implica em um processo de refinamento para superar omissões de classes espectrais importantes e inclusões de classes redundantes do ponto de vista computacional. Este refinamento das amostras de treinamento é, geralmente, um ponto importante para melhorar a exatidão de uma classificação. Contudo, uma similaridade elevada entre padrões de resposta espectral de duas categorias não pode ser superada por nenhuma técnica (LILLESAND & KIEFER, 1994).

A contaminação da amostra por valores muito diferentes também é um dos fatores geradores de erros na coleta de amostras de treinamento, pois a média da amostra e a matriz de variância-covariância fica comprometida (MATHER, 1999).

Estimativas da média e matriz de variância-covariância mais insensíveis à presença de pixels muito diferentes foram propostas por CAMPBELL (1987). Estas estimativas conferem um peso maior para observações cuja origem assume-se ser do corpo principal dos dados, e menor para observações avaliadas como desvios.

Uma das estimativas é representada pela distância de Mahalanobis que é empregada para identificar os elementos atípicos em relação aos membros padrões da amostra. Os elementos muito diferentes da amostra podem ser identificados visualmente por meio da representação gráfica da distância de Mahalanobis, ou seja, os pixels relativamente dissimilares da média da classe de treinamento são atenuados considerando a forma da distribuição de probabilidade dos elementos da classe de treinamento (MATHER, 1999).

O processo de classificação de imagens em regiões montanhosas pode ser combinado com MDT's de forma a melhorar a análise visual da área de estudo. Por exemplo, as bandas do Landsat podem ser fusionadas com um MDT, mostrando características como encostas florestadas, áreas desmatadas, extensão de vales, ou espécies vegetais que contém

características muito similares ocupando diferentes locais, além de declividade ou aspecto. Esta informação topográfica pode ser útil na identificação de amostras de dados na classificação ou discriminar amostras com similaridade espectral em uma pós-classificação em imagens (LILLESAND & KIEFER, 1994).

2.6.6. Avaliação da qualidade da classificação

A precisão dos produtos cartográficos ou resultados provenientes de sua manipulação pode ser comprometida pela inserção de erros no próprio procedimento de criação, manipulação e expressão dos mapas por meio de sistemas de informações geográficas ou outros aplicativos de cartografia (KEEFER et al. 1991).

“...uma classificação não está completa até sua acurácia ser avaliada”. Este é um direcionamento para a análise da matriz de erros onde, a avaliação dos erros de omissão ou comissão (inclusão), é importante para a análise real dos resultados da classificação. Várias outras medidas descritivas são apresentadas pela matriz de erros como exemplo, a acurácia total, a acurácia do produtor e acurácia do usuário (LILLESAND & KIEFER, 1994)..

A avaliação da exatidão da classificação das coberturas terrestres derivada de dados de sensoriamento remoto tem sido reconhecida como uma ferramenta valiosa no julgamento da adequabilidade desses dados para varias aplicações, uma vez que determina o valor da informação (LILLESAND & KIEFER, 1994).

No início da década de 80 surgiram novas técnicas para testar a exatidão dos mapas, tornando-se padrão para registrar a exatidão da classificação de dados de sensoriamento remoto a determinação da matriz de erro. Em adição, o uso da determinação estatística do índice Kappa foi recomendado por muitos pesquisadores como uma medida aceitável da exatidão (STORY & CONGALTON, 1986; COHEN, 1960). Os autores também definem a matriz de erro como a forma mais comum para representar a exatidão da classificação de um mapa por meio da definição da porcentagem da área do mapa corretamente classificada em comparação com dados de referência, também denominado verdade terrestre.

Os mesmos autores complementam que a partir da matriz de erro é possível também avaliar o desempenho da classificação para cada categoria individual, que pode ser calculada usando-se duas abordagens: a exatidão do produtor e do usuário e os erros de omissão e comissão.

Os erros de omissão e inclusão são elementos que servem para avaliar quanto uma classe foi sub ou superestimada. Como primeira análise estatística, erros de omissão servem para descrever com que precisão uma determinada classe foi definida. Já a taxa de erros de inclusão indica quanto uma classe foi superestimada. Isto leva ao conceito de exatidão do ponto de vista do produtor (criador) do mapa temático e exatidão do ponto de vista do usuário (CENTENO, 2003).

A verificação dos erros de classificação, ou seja, o sucesso atingido no processo é complementado comparando o mapa temático produzido com um mapa temático resultante de uma classificação completamente aleatória. Considera-se que quanto melhor for a qualidade do mapa temático, maior será a diferença entre ele e um mapa temático produzido de maneira aleatória. Essa diferença representa a medida determinada pelo coeficiente Kappa proposto por COHEN (1960) e estabelece que, quanto maior o valor do índice, melhor será considerado o resultado da classificação.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. Material

3.1.1. Caracterização da área de estudo

A área de estudo compreende o município de Guaxupé, localizado na região Sul de Minas Gerais conforme mostra a Figura 6, com coordenadas geográficas centrais 46°40'51" W e 21°17'21" S (SAD-69 - South American Datum – 1969). O clima da região é classificado como tropical de altitude e, segundo a classificação de Köppen, a área de estudo ajusta-se ao tipo Cwa que estabelece chuvas de verão e verões rigorosos. A temperatura média anual na região oscila em torno de 19°C (SETZER, 1966).

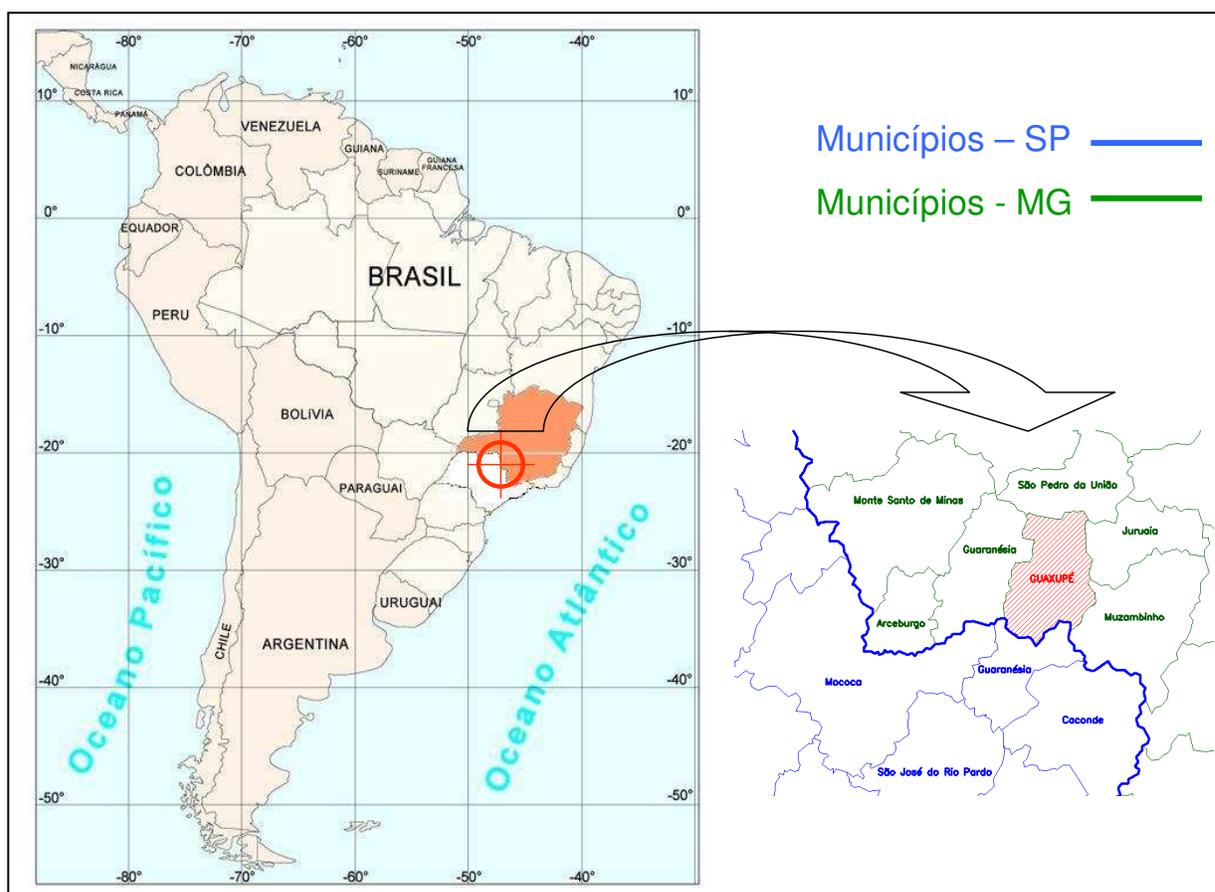


Figura 6: Localização da área de estudo.

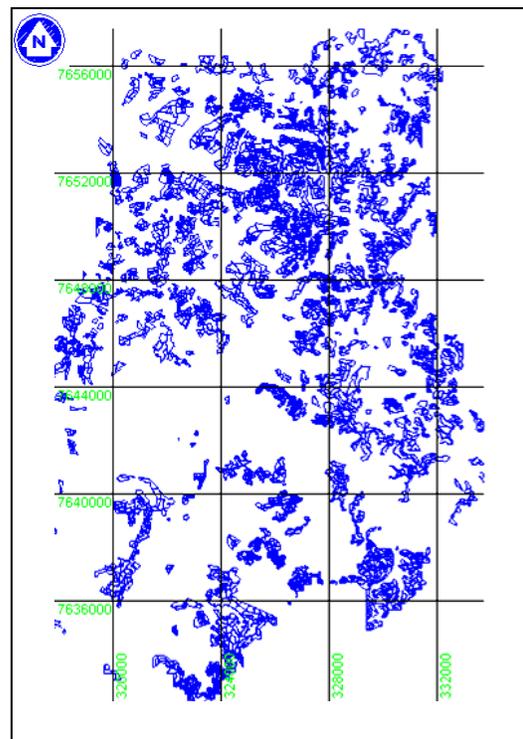
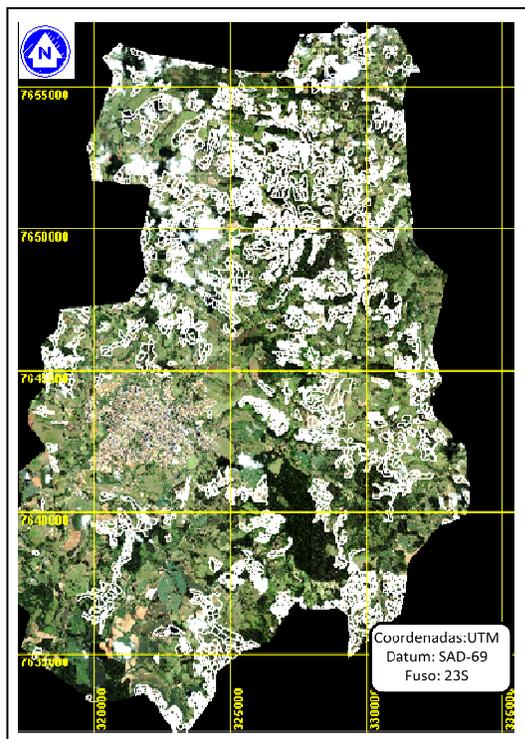
O município de Guaxupé está localizado em uma região caracterizada pelo relevo montanhoso com altitudes variando entre 800 a 1200 metros, propício para a cultura do café de qualidade, estando localizada em uma das regiões responsáveis pela produção dos cafés arábica mais finos do Brasil, distribuídos entre o Sul de Minas, Mogiana e Cerrado.

A escolha da região para o desenvolvimento deste estudo foi estabelecida devido à forte atividade agrícola, organizada por um sistema cooperativo atuante e formada por pequenos agricultores, onde a aplicação de novas tecnologias certamente resultará em ferramentas que auxiliarão na melhoria do controle gerencial agrícola e conseqüentemente na produtividade.

3.1.2. Informações locais

A COOXUPÉ – Cooperativa Regional dos Cafeicultores em Guaxupé com atuação destacada na área da cafeicultura em 35 municípios, com o objetivo de atualizar as informações sobre a cafeicultura do município, realizou um projeto-piloto para a quantificação da área cafeeira em Guaxupé utilizando imagens geradas pelo satélite Ikonos-II obtidas em fevereiro de 2002. O resultado deste projeto mostrou-se bastante esclarecedor com relação às atividades cafeeiras na região, principalmente, quanto à efetiva área plantada no município. A máscara da área cafeeira resultante deste levantamento realizado pela COOXUPÉ foi utilizada como base para o desenvolvimento desta pesquisa.

Os números apresentados pelo projeto-piloto, realizado entre fevereiro e dezembro de 2002, mostraram a existência de 6100 hectares de área ocupada pela cultura de café. As Figuras 7a e 7b apresentam a imagem Ikonos-II do município de Guaxupé e a máscara dos vetores das áreas com cultura de café, gerados por meio de identificação visual.



a-)

b-)

Figura 7:- (a) Imagem IKONOS-II do município de Guaxupé obtida em fev/2002, e os vetores dos talhões de café (b).

Fonte: Cooxupé/MG.

3.1.3. Imagens de satélite

3.1.3.1. Imagens TM/Landsat 5 e ETM+/Landsat 7

Para o acompanhamento das diversas fases do cafeeiro, foram utilizadas imagens do sensor TM (Thematic Mapper) do satélite Landsat 5 e imagem do sensor ETM+/Landsat 7, nas bandas do visível, do infravermelho próximo e do infravermelho médio. As características das imagens são mostradas na Tabela 2.

Períodos considerados importantes para identificação de características do cafeeiro por meio de resposta espectral, durante seu desenvolvimento fenológico, foram observados para a aquisição de imagens do satélite Landsat 5.

Tabela 2: Relação das imagens multitemporais do sensor TM do Landsat-5.

IMAGEM	SATÉLITE	SENSOR	ÓRBITA	PONTO	PASSAGEM
IMAG-1	LANDSAT 5	TM	219	75	15-08-2001
IMAG-2	LANDSAT 5	TM	219	75	05-12-2001
IMAG-3	LANDSAT 5	TM	219	75	12-04-2002
IMAG-4	LANDSAT 7	ETM+	219	75	07/06/2002

A distribuição temporal das imagens TM/Landsat-5 adquiridas foi adequada ao catálogo de fornecimento de imagens oferecido pelo INPE, pelas características fenológicas do cafeeiro durante o ciclo vegetativo conforme descrito por CAMARGO et al. (2003) e pelos resultados das respostas espectrais obtidas por MOREIRA et al. (2004). A Figura 8 mostra a distribuição das imagens adquiridas e as fases fenológicas do café:

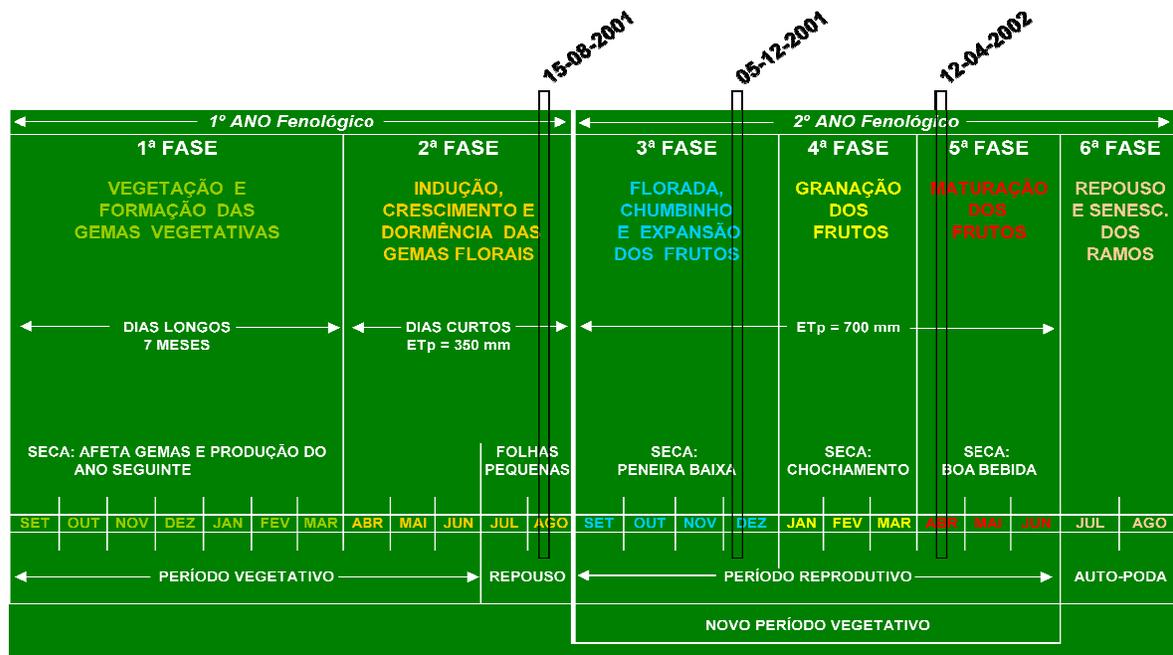


Figura 8: Relação entre as fases fenológicas do café e imagens TM/Landsat adquiridas. Adaptado de CAMARGO & CAMARGO (2003).

As imagens adquiridas foram:

IMAG-1: corresponde ao período em que a planta está em repouso devido ao processo resultante da colheita, quando o cafeeiro está com a menor área foliar do ciclo e encontra-se no período final de colheita.

IMAG-2: corresponde ao período de recuperação foliar devido ao incremento hídrico e aos tratamentos culturais.

IMAG-3: corresponde ao período de alto vigor vegetativo da planta e alta contribuição de ervas - daninhas. Período de início de aplicação de herbicidas.

IMAG-4: adquirida para estabelecer o início do processo de normalização radiométrica das imagens TM/Landsat 5 devido a problemas encontrados para a coleta de

informações dos produtos orbitais do sensor MODIS/Terra, que, no período compreendido entre 15/08/2001 até 12/04/2002, o catálogo forneceu imagens que mostravam áreas não imageadas na região do município de Guaxupé, sendo restabelecidas estas informações a partir de junho de 2002.

A escolha das imagens para a utilização nesta pesquisa foi baseada nos seguintes aspectos:

- ✓ em trabalhos anteriores desenvolvidos em áreas cafeeiras com características bastante próximas às do local objeto deste estudo;
- ✓ pela disponibilidade dessas imagens no acervo da Divisão de Geração de Imagens do Instituto de Pesquisas Espaciais – INPE;
- ✓ na proximidade das datas de aquisição das cenas TM/Landsat 5 com a data da imagem do satélite IKONOS II que foi utilizada como fonte para a elaboração da máscara de café realizada pela Cooxupé, que é de fevereiro de 2002.

3.1.3.2. Imagem ASTER

Foi utilizada imagem do sensor ASTER instalado na plataforma Terra, imageada nas bandas 3B e 3N, no intervalo de ondas 0,78 μm a 0,86 μm . O produto ASTER resultante permite a geração de um modelo digital de elevação, produto este, que foi utilizado para o processo de geração de mapa de isolinhas (curvas-de-nível) e, em conjunto com as informações de posição do imageador em relação ao Sol, gerou o produto denominado fator de iluminação que corresponde a uma imagem contendo a distribuição da iluminação refletida pelo solo e convertida para um intervalo variando de 0 (zero) até 1(um) onde o primeiro valor corresponde ao pixel de menor brilho e o segundo, o de maior brilho.

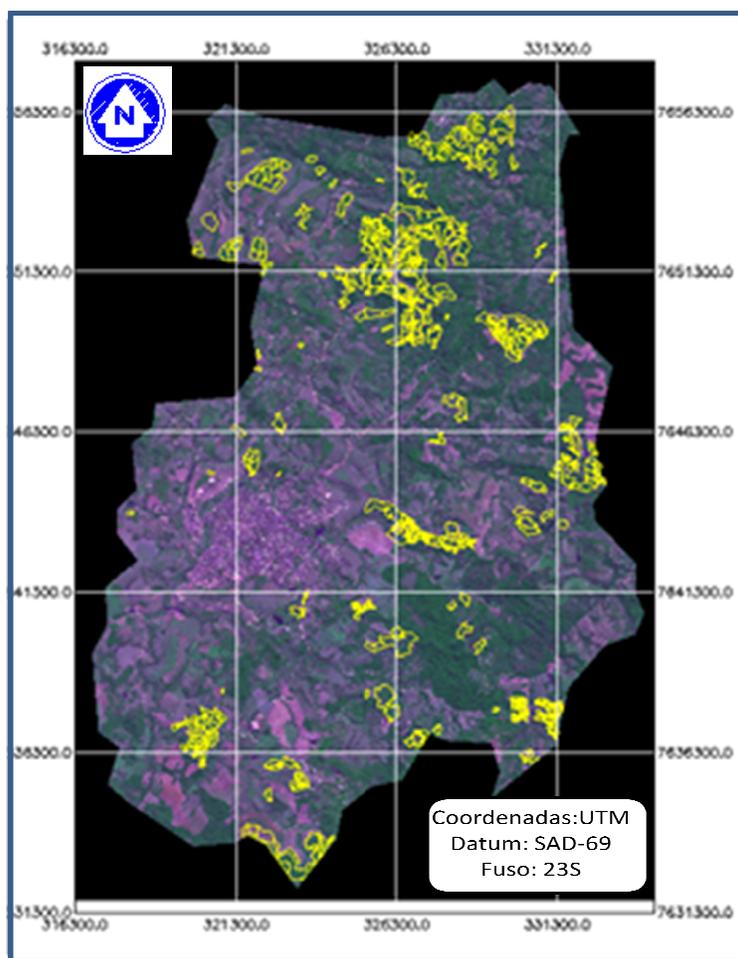
3.1.3.3. Imagem MODIS

Instalado na plataforma TERRA, o sensor MODIS forneceu as imagens que foram utilizadas para a extração de informações referentes aos valores de coluna de vapor d'água, espessura óptica de aerossóis e carga total de ozônio na data de 07/06/2002. Adquiridos diretamente dos produtos MOD 04, MOD 05 e MOD 07, os valores obtidos foram aplicados no processo de correção atmosférica da imagem gerada pelo sensor ETM+/Landsat 7.

3.1.3.4. Material de campo

Os trabalhos de campo foram realizados com os objetivos de coleta de pontos de controle para a verificação do posicionamento geográfico da máscara de café fornecida pela Cooxupé, e coleta de pontos para o registro das imagens TM/Landsat 5 e ETM+/Landsat 7, de forma a estabelecer o ajuste geográfico entre os produtos utilizados, também denominado como transformação afim, onde as coordenadas são modeladas usando-se um polinômio linear de baixa ordem, de forma que quaisquer distorções de escala, deslocamento e rotação existentes entre a imagem e os pontos de controle serão corrigidos (CRÓSTA, 1992).

O equipamento GPS utilizado para o rastreamento dos pontos de controle foi o modelo



GeoExplorer 3, fabricado pela Trimble Navigation Limited., com exatidão, fornecida pelo fabricante, melhor que 5 metros com correção diferencial. Foram verificados em campo, por meio da coleta de pontos com GPS, 511 talhões dentre os talhões vetorizados fornecidos pela Cooxupé, incluindo as informações de espaçamento entre ruas e linhas, variedade do café plantado, a idade da cultura e dados cadastrais como: nome do proprietário, da propriedade e nome de identificação do talhão. Com os dados coletados, foi elaborado um mapa

Figura 9: Talhões verificados em campo (em amarelo).

cadastral relacionado a um banco de dados contendo as informações complementares, conforme mostra a Figura 9.

3.1.3.5. Material complementar

Os softwares utilizados para o desenvolvimento desta pesquisa foram:

- ENVI 4.3 (Research Systems, Inc.);
- SPRING 4.3.3, IMPIMA 4.3.3 (INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais);
- IDRISI KILIMANJARO (Clark Labs);
- SURFER 6.2 (Golden Software, Inc.);
- AUTO CAD MAP 2000 (Autodesk, Inc.);
- GPS Pathfinder Office Software (Trimble Navigation Limited).
- SPSS – 16.0 for Windows – Release 16.0.2 (Polar Engineering and Consulting)
- SCORADIS (ZULLO JR., 1994).
- AsterDTM 2.2 (Plug-in ENVI - Research Systems, Inc.).

3.2. Método

A metodologia adotada para a presente pesquisa consistiu em obter informações referentes à cultura do café utilizando imagens orbitais coletadas em várias datas. Os passos para o desenvolvimento desta metodologia foram divididos em quatro fases. A Figura 10 apresenta o fluxograma da primeira fase.

A utilização da imagem ETM+/Landsat 7 (IMAG-4) como referência inicial deste trabalho, foi necessária devido à escolha das datas das imagens do TM/Landsat 5 que, por critério do desenvolvimento desta pesquisa, deveriam passar pelo processo de correção atmosférica em função dos dados de espessura ótica (aerossóis), conteúdo de vapor d'água (g.cm^2) e a espessura da camada de ozônio (cm.atm^1) recuperados por meio de imagens geradas pelo sensor orbital Modis (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*), porém, por problemas ocorridos no imageamento do referido sensor no período referente ao intervalo de tempo da aquisição das imagens do TM/Landsat 5, o sensor Modis não coletou dados do local e das proximidades do município de Guaxupé/MG. Devido a esse detalhe, foi feita uma pesquisa para determinar a data coincidente entre a coleta de dados pelo sensor Modis na região de interesse e a passagem de um satélite imageador Landsat, que resultou na aquisição da imagem do ETM+/Landsat 7 em 07/06/2002 (IMAG-4).

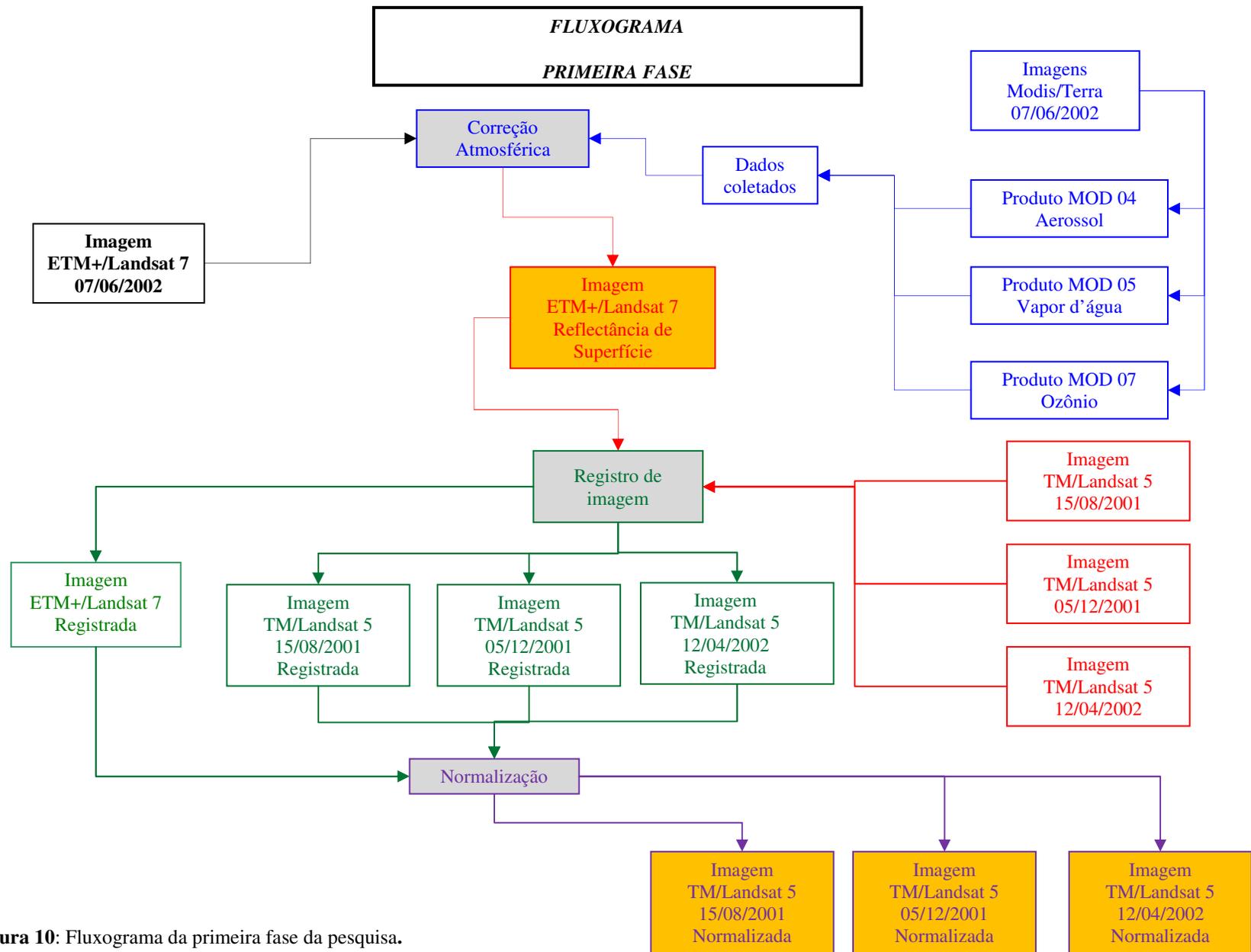


Figura 10: Fluxograma da primeira fase da pesquisa.

3.2.1. Primeira fase

3.2.1.1. Transformação dos níveis de cinza (NC) em reflectância

O trabalho posterior à aquisição das imagens de interesse consistiu na transformação dos dados de energia de um pixel, codificados em nível de cinza e proporcionais à radiância do mesmo pixel, em valores de reflectância que, conforme EIPHANIO & FORMAGGIO (1988) é o valor mais adequado para a caracterização espectral dos alvos, quando comparado à utilização do valor digital.

A conversão de níveis de cinza para valores físicos tem como objetivo permitir a caracterização espectral de objetos, de forma a permitir cálculos envolvendo informações de diferentes bandas ou de diferentes sensores, conforme citam PONZONI E SHIMABUKURO (2007).

A transformação dos valores de níveis de cinza para radiância é regulada pela equação (1):

$$L\lambda = \left(\frac{L_{\max\lambda} - L_{\min\lambda}}{Q_{cal\max}} \right) * Q_{cal} + L_{\min\lambda} \quad \text{onde:} \quad (\text{Eq. 01})$$

$L\lambda$ = Radiância Bidirecional aparente [$W/(m^2 * sr * \mu m)$];

Q_{cal} = Valor do pixel calibrado e quantificado em nível de cinza (NC);

$Q_{cal\max}$ = Valor do pixel calibrado e com quantificação máxima (NC = 255);

$Q_{cal\min}$ = Valor do pixel calibrado e com quantificação mínima (NC = 0);

L_{\max} = Radiância espectral que está escalonada para $Q_{cal\max}$ em [$W/(m^2 * sr * \mu m)$];

L_{\min} = Radiância espectral que está escalonada para $Q_{cal\min}$ em [$W/(m^2 * sr * \mu m)$];

Os valores dos pixels definidos em radiância por meio da utilização da equação (8) devem ser convertidos para valores de Reflectância Bidirecional Aparente ou reflectância no topo da atmosfera, necessariamente, quando da utilização de imagens multitemporais com diferentes ângulos zenitais solares e com diferentes irradiâncias solares. Esses efeitos são corrigidos e normalizados por meio da conversão da radiância absoluta para a Reflectância Bidirecional Aparente utilizando-se a equação (2).

$$\rho^P = \frac{\pi * L\lambda * d^2}{ESUN * \cos\theta} \quad \text{onde:} \quad (\text{Eq. 02})$$

ρP = Fator de Reflectância Bidirecional aparente;
 $L\lambda$ = Radiância Bidirecional aparente [W/(m² * sr * μm)];
 d = Distância Terra-Sol em unidades astronômicas;
 $ESUN\lambda$ = Irradiância exoatmosférica solar média;
 θ_s = Ângulo solar zenital em graus;

O aplicativo denominado SCORADIS – Sistema Computacional de Correção Radiométrica, desenvolvido por ZULLO JR. (1994), foi utilizado para a realização da transformação de níveis de cinza para valores de energia utilizando as equações (1) e (2) como passagem para a obtenção dos valores do Fator Reflectância Bidirecional (FRB) para a imagem do ETM+/Landsat 7.

A versão do SCORADIS utilizada para a determinação dos valores FRB da imagem ETM+/Landsat 7 foi adaptada para a aplicação dos valores de ganho das bandas do sensor. Os dados obtidos pelo sensor ETM+/Landsat 7 sofrem variação em função de diferentes ganhos dependendo da região do globo e da época do ano. Segundo a NASA, conforme citado por BENVENUTI (2005), o objetivo desse procedimento é o de maximizar a utilização do equipamento de 8 bits sem saturar os detectores.

As informações necessárias para o abastecimento de dados no SCORADIS referentes aos valores de ganho foram adquiridas conforme demonstra a Figura 11 que, para o mês de Junho, nas regiões de baixo ângulo solar, os sensores trabalham com alto ganho nas bandas 1, 2, 3, 4, 5 e 7, e baixo ganho na banda pancromática, sendo que, não foi utilizada a banda 6 nesta pesquisa:

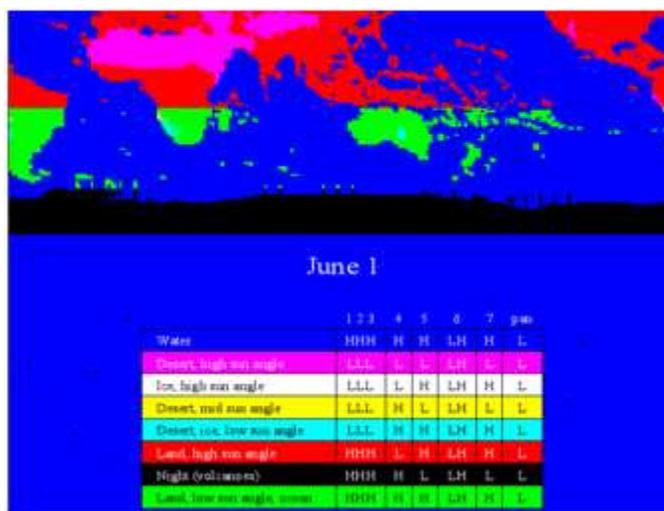


Figura 11: Ganhos das bandas do sensor ETM+ para o mês de Junho
 Fonte: Landsat 7 Science Handbook (NASA, 2005)

3.2.1.2. Correção atmosférica

Desta maneira, a obtenção FRB referiu-se a correção atmosférica onde foram inseridas as informações no SCORADIS referentes aos valores de espessura óptica de aerossóis, de coluna total de vapor d'água e de carga total de ozônio referentes à data de aquisição da imagem do ETM+/Landsat 7, que foram obtidas das imagens do sensor MODIS, respectivamente dos produtos MOD 04, MOD 05 e MOD 07, conforme NASCIMENTO & ZULLO JR. (2005).

Os arquivos MODIS que contém os parâmetros necessários para o procedimento de correção atmosférica no SCORADIS denominam-se:

- ✓ MOD04_L2: *MODIS Aerosol Product*, referente aos valores de aerossol: tipo, profundidade óptica, distribuição de tamanhos de partículas, concentração (massa), e propriedades ópticas;
- ✓ MOD05_L2: *Total Precipitable Water*, contém os valores para vapor d'água e água precipitável;
- ✓ MOD07_L2: *Atmospheric Profiles*, perfilagem atmosférica: perfil vertical de temperatura e umidade; estabilidade atmosférica e coluna de ozônio.

As imagens MODIS foram recortadas utilizando-se como referência, um polígono do contorno do município, fornecido pelo IBGE. Os valores finais dos produtos MODIS inseridos no sistema SCORADIS, foram obtidos por meio de uma média aritmética dos valores dos índices contidos na máscara de 280 km² referente ao recobrimento do município de Guaxupé. A média aritmética foi utilizada devido às diferentes resoluções espaciais das informações oriundas do sensor MODIS conforme Tabela 3:

Tabela 3: Resolução espacial das imagens do sensor MODIS.

Produtos MODIS Atmosfera	Resolução espacial (km)
MOD04	0,5
MOD05	0,5
MOD07	0,5

Fonte: Adaptado de: [HTTP://modis.gsfc.nasa.gov/about](http://modis.gsfc.nasa.gov/about)

A imagem do sensor ETM+/Landsat 7 com valores de FRB foi o resultado final obtido pelo processamento dos dados no software SCORADIS. PONZONI E SHIMABUKURO (2007) descrevem que, quando se realiza a correção atmosférica com modelos de transferência radiativa, assume-se que os FRB (Fator de Reflectância Bidirecional) resultantes referem-se a estimadores de reflectância bidirecional dos objetos presentes na superfície terrestre, sendo possível então, a caracterização espectral dos mesmos. A Figura 12 mostra a imagem ETM+/L7 na condição de aquisição e o recorte já aplicado o Fator de Reflectância Bidirecional:

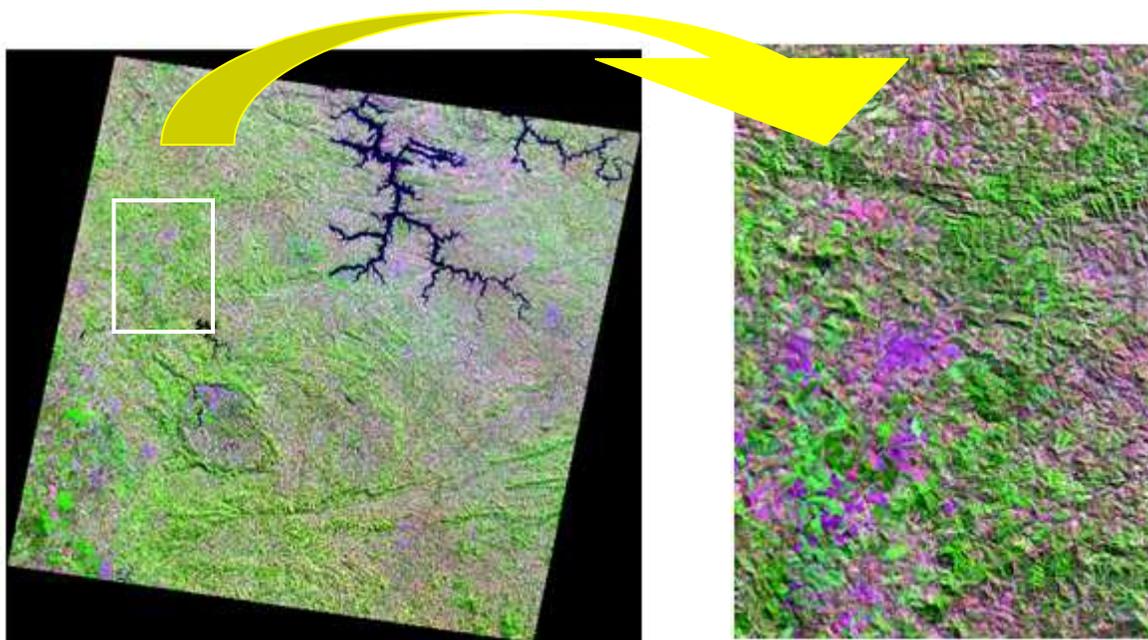


Figura 12: Imagem bruta ETM+/Landsat-7 (à esquerda) com direção Norte e ,recorte da imagem com correção atmosférica aplicada (à direita).

3.2.1.3. Registro da imagem

O processo de conversão das informações contidas na imagem ETM+ em valores físicos foi concluído após a caracterização das respostas espectrais estimadas sobre os alvos testados podendo, desta forma, obter medidas quantitativas sobre as propriedades dos alvos que compõem a cena (MOREIRA, 2001).

Tendo em vista que a análise quantitativa da área cafeeira na região de Guaxupé/MG deve passar pela análise temporal das imagens TM de maneira a se estabelecer quais as melhores características contidas em um momento específico, a necessidade de se ajustar,

primeiramente, essas imagens em um único padrão cartográfico georreferenciado, se fez necessário.

Para realizar o registro de uma imagem, pode-se utilizar coordenadas obtidas por GPS rastreando pontos no solo identificáveis na imagem. O processo de registro é feito utilizando sistemas de equações polinomiais de primeiro, segundo e terceiro grau em função do nível de processamento dos dados digitais antes da comercialização (MOREIRA, 2001).

Pontos de controle foram tomados em toda a área limite da imagem que, após a correção atmosférica, foi recortada em uma região menor, de forma a eliminar parte das informações muito distantes do município de Guaxupé/MG. A distribuição dos pontos de controle foi estabelecida procurando manter uniformidade na cobertura da área imageada

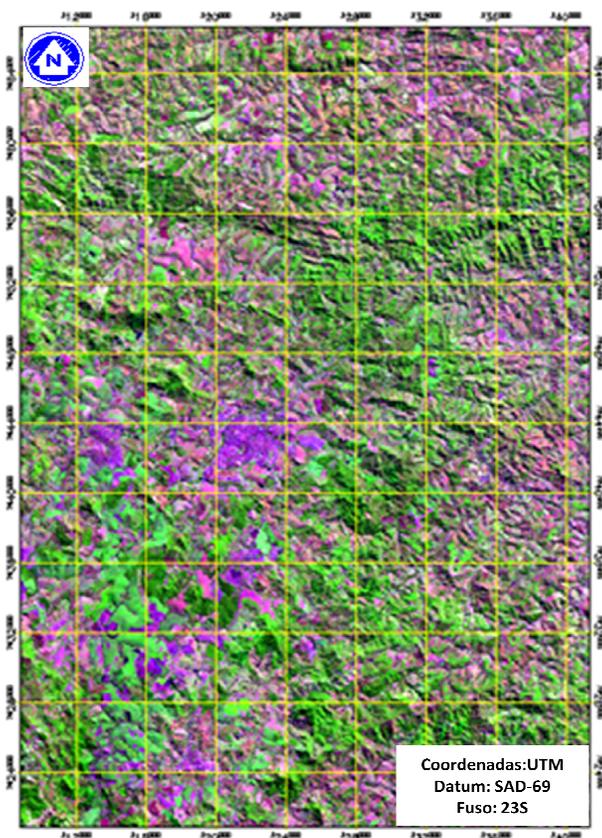


Figura 13: Recorte da imagem ETM+/Landsat-7 registrada (composição 543).

conforme orienta RICHARDS E JIA (2006). A Figura 13 mostra o recorte da imagem ETM+/Landsat-7 registrada.

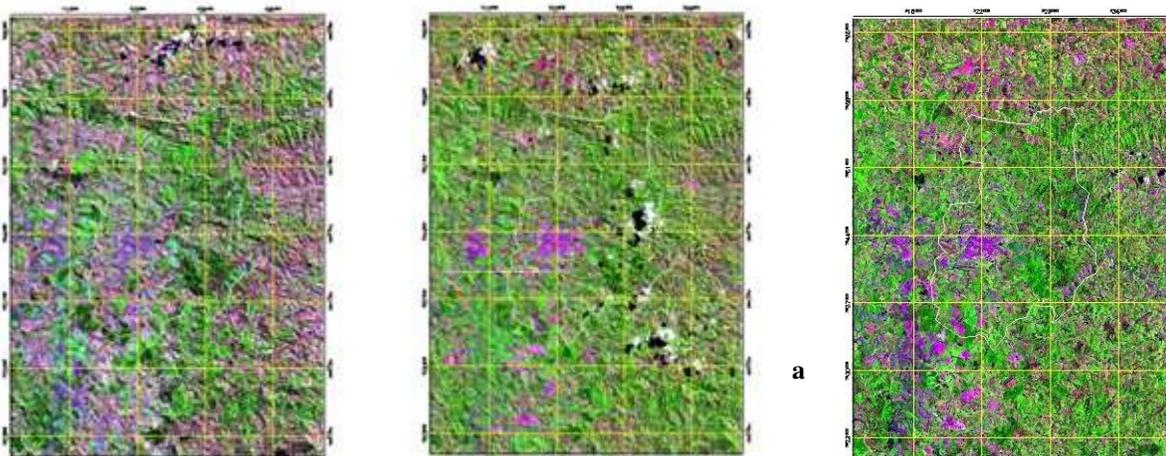
O processo de registro de imagem foi aplicado inicialmente, na imagem ETM+ e posteriormente, nas três imagens TM utilizando-se os mesmos pontos de controle, tendo como resultados no erro médio quadrático, valores inferiores a 0,5, ou seja, erros menores que 0,5 pixel.

3.2.1.4. Normalização radiométrica

Para que as imagens tivessem padrões espectrais comparáveis, foi aplicada a técnica MAD (*Multivariate Alteration Detection*) proposta por CANTY et al. (2004) como passo seguinte aos processos de correção atmosférica que resultou em cenas com informações de FRB e registro ou georreferenciamento, utilizado para o ajuste dos parâmetros cartográficos das imagens.

No processo de normalização, a imagem ETM+ foi utilizada como imagem de referência e as imagens geradas pelo sensor TM foram utilizadas como alvo. O algoritmo é rodado para cada imagem a ser normalizada e apresenta os relatórios contendo o número de pixels invariantes da imagem de referência (ETM+ de 06/06/2001), e das imagens normalizadas (TM de 15/08/2001, 05/12/2001 e 12/04/2002 apresentada na Figura 14a, 14b e 14c, respectivamente), apresenta também, os gráficos com a relação de linearidade entre os pixels invariantes, o modelo e os parâmetros da regressão ortogonal utilizada, apresentados no Apêndice I.

Uma estatística de comparação é realizada durante o processo de normalização utilizando a média e a variância de alguns milhares de pixels amostrados. Essa comparação é realizada entre a imagem referência, imagem alvo e a imagem resultado, ou seja, a imagem normalizada. Os valores da média e da variância das bandas da imagem que foi normalizada tendem a se aproximar dos valores da média e da variância da imagem de referência, não descaracterizando a evolução espectral no tempo, dos alvos originais da imagem normalizada, conforme cita em seus experimentos com imagens multitemporais MERCANTE (2007) e estes parâmetros foram utilizados para avaliação do processo de normalização.



14a: TM – 15/08/2001.

14b: TM – 05/12/2001.

14c: TM – 12/04/2002.

Figura 14: Imagens do TM/Landsat 5 normalizadas.

3.2.2. Segunda fase

3.2.2.1. Coleta de informações de campo

A segunda fase da pesquisa envolveu a análise dos dados fornecidos pela COOXUPÉ – Cooperativa Regional dos Cafeicultores em Guaxupé compostos por vetores digitalizados sobre uma imagem do satélite Ikonos com resolução espacial de 1 metro. A verificação consistiu na observação da existência de variações quanto ao registro da imagem Ikonos, processo que envolveu a utilização dos pontos de controle rastreados com GPS e utilizados para o registro das imagens Landsat. Devido à diferença significativa de resolução espacial entre as cenas Ikonos e as imagens do TM/Landsat 5 (1 e 30 metros, respectivamente) as distorções nas imagens Ikonos não foram significativas. A Figura 15 apresenta o fluxograma da segunda fase da pesquisa.

Dentre os 4.047 talhões (6.100 hectares) digitalizados pela equipe de geoprocessamento da COOXUPÉ, 97 talhões contendo lavouras de café plantadas de forma adensada, perfazendo 127,36 hectares e 1.291 talhões distribuídos em 1.445,52 hectares de café adulto, foram objeto de levantamento topográfico cadastral realizado por meio de rastreamento com GPS diferencial.

A Figura 16 mostra a distribuição espacial dos talhões digitalizados (na cor laranja) das áreas ocupadas com plantio de café, e os talhões levantados em campo (na cor verde), no município de Guaxupé/MG.

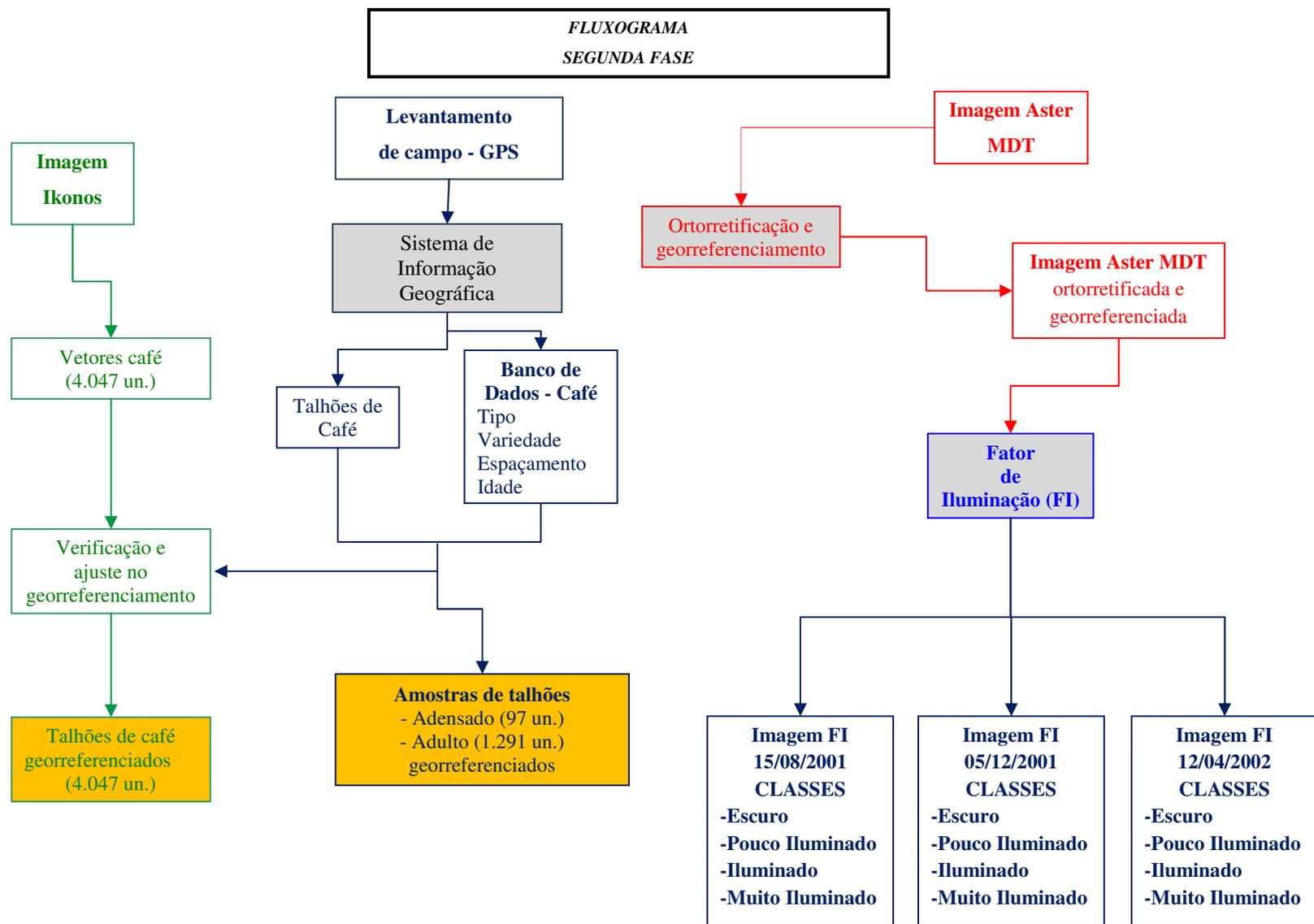


Figura 15: Fluxograma da segunda fase da pesquisa.

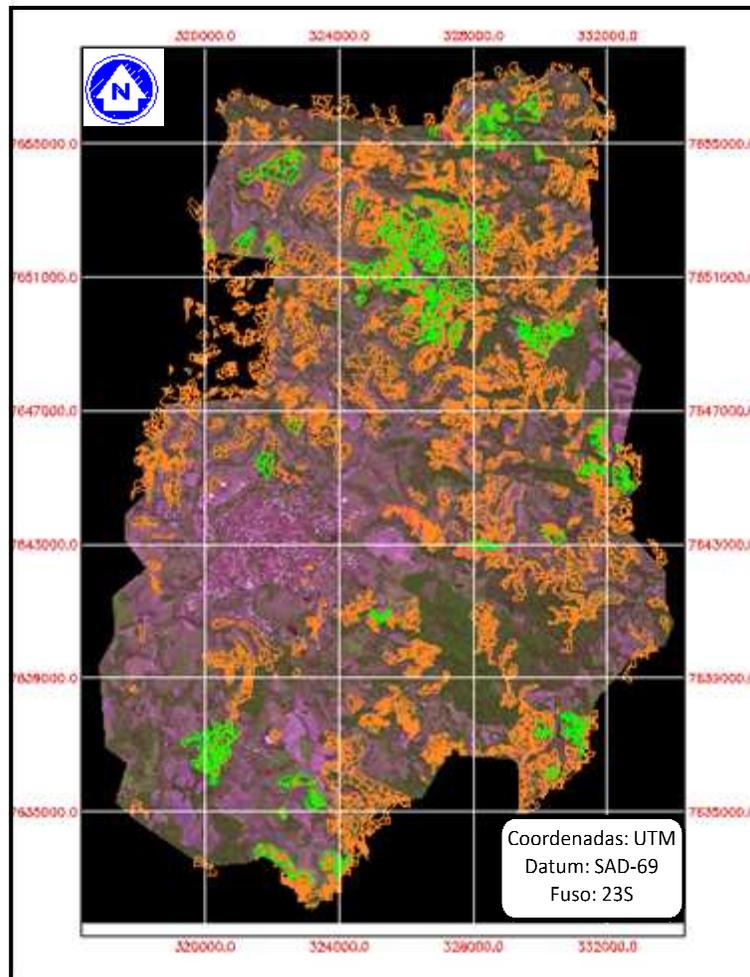


Figura 16: Distribuição espacial dos talhões digitalizados (cor laranja) e os talhões .levantados em campo (cor verde).

3.2.2.2. Modelo digital de elevação

A utilização de um modelo digital de elevação se fez necessária pela necessidade de identificar as muitas variações de relevo que caracteriza a região objeto de estudo. O produto orbital adquirido para essa finalidade foi coletado pelo sensor ASTER (*Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer*) resultante de um trabalho conjunto entre a NASA e o Japan's Ministry of Economy, Trade and Industry (METI) do Japão e o Earth Remote Sensing Data Analysis Center (ERSDAC)(<http://ASTERweb.jpl.nasa.gov/>).

O ASTER cobre uma região espectral larga, com 14 bandas, desde o visível até o infravermelho termal, com resolução espacial de 15 metros do visível até o infravermelho próximo. Contém uma banda adicional chamada 3B, onde a letra B significa “backwards” que

trabalha na mesma resolução espacial da banda 3 chamada 3N, onde a letra N significa “nadir”, mas as cenas adquiridas são em um ângulo inverso de aproximadamente 28 graus, produzindo um par estereoscópico para cada imagem ASTER.

O princípio básico que está por trás da extração do DTM é o efeito da paralaxe, ou seja, um alvo observado a partir de dois ângulos diferentes gera informações suficientes para se obter um modelo tridimensional do objeto (FUJISADA, 1998).

Imagens ASTER são adquiridas no nível 1A ou 1B, no caso da presente pesquisa, o produto adquirido foi 1A, composto de seis imagens: Três bandas VNIR (bandas 1, 2 e 3N, com 15 metros de resolução espacial, separadas em arquivos individuais), a banda 3B, seis bandas SWIR juntas e cinco bandas TIR juntas.

O processamento da imagem ASTER foi feito utilizando o software AsterDTM 2.2, um *plug-in* do software ENVI que, após a identificação da imagem, coleta e processa os dados geométricos e radiométricos de calibração armazenados no arquivo da imagem. Após esse processo é possível inserir os dados referentes aos pontos de controle para o processo de registro ou georreferenciamento da imagem. A ativação do processo de elaboração do MDT é automática a partir do lançamento dos pontos de controle.

Na finalização do processo de extração do MDT, o software apresenta uma imagem correspondente à matriz de correlação, ou seja, o grau de confiabilidade do MDT de acordo com a região geográfica.

A acurácia do MDT gerado pelo software AsterDTM 2.2 é determinada pela medida estatística RMSE (*Root Mean Square Error*) nos eixos X e Y, planimétricos e Z, altimétrico. O valor cartográfico do modelo gerado pelas imagens ASTER pode ser medido pela determinação da escala equivalente em um mapa. Isto pode ser feito comparando os valores do RMSE dos eixos X, Y e Z com os valores padrão de acurácia para mapas conforme citam WELCH e MARKO (1981). LANG e WELCH (1999), analisando os parâmetros estabelecidos por WELCH e MARKO (1981) e comparando com os testes realizados com os produtos MDT gerados pelo sensor ASTER, estabeleceram como muito segura a utilização do produto ASTER nas escalas 1:100.000 e 1:250.000 e de suficiente qualidade, os mapas na escala 1:50.000 que é a escala de referência dos mapas desta pesquisa. A Figura 17 mostra o produto final obtido por meio do processamento digital das imagens ASTER.

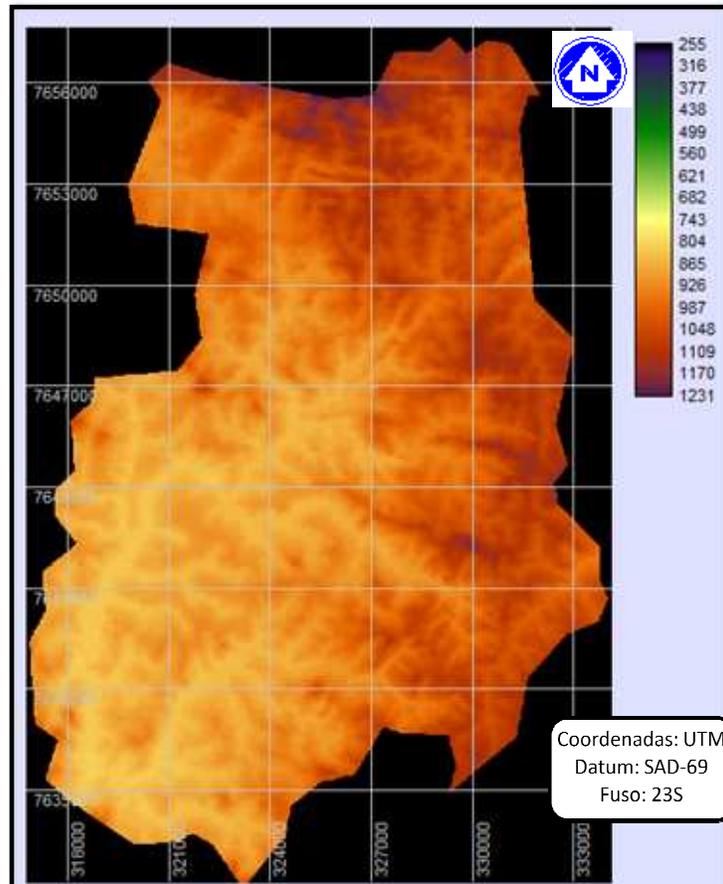


Figura 17: Modelo digital de elevação gerado pelas imagens ASTER.

3.2.2.3. Fator de Iluminação

A utilização de modelos digitais de elevação para a análise da cultura de café em região montanhosa utilizados por VIEIRA et al. (2004) na região de Patrocínio/MG e ALVES et al. (2004) na Zona da Mata/MG, tem se tornado mais freqüente em função do desenvolvimento de novos produtos orbitais aliados a produtos convencionais utilizados para estudos multitemporais como as imagens TM/Landsat 5.

Os produtos derivados de modelos digitais de elevação muito utilizados são a declividade e as classes de exposição ou aspecto que receberam refinamentos matemáticos como descrito por HOLBEN e JUSTICE (1980). A introdução dos valores do ângulo zenital solar e do ângulo azimutal solar, processados com um modelo digital de elevação tem mostrado resultados satisfatórios no processamento de classificação supervisionada em regiões montanhosas conforme descreve CORDERO-SANCHO E SADER (2007) em trabalhos realizados em áreas cafeeiras da Costa Rica.

VALERIANO (2008) complementou um algoritmo desenvolvido por VALERIANO (2005) que utiliza os dados de ângulo azimutal solar e ângulo de elevação solar obtidos no momento de aquisição da imagem, que nesta pesquisa referem-se às datas de captura das imagens TM/Landsat 5 (nas datas 15/08/2001, 05/12/2001 e 12/04/2002) acrescido do modelo digital de elevação, para gerar uma imagem com valores de pixel variando de zero (0) para locais sem iluminação, até um (1) para locais com máxima iluminação, denominada Fator de Iluminação (FI).

Com base nos procedimentos de cálculo desenvolvidos por VALERIANO (2008), implementados no software Idrisi, utilizou-se essa rotina de cálculos para a elaboração das três (3) imagens FI referentes às datas de aquisição do TM/Landsat 5 e, posteriormente, utilizadas com o objetivo de melhor caracterizar as áreas cafeeiras do município de Guaxupé/MG, conforme mostradas na Figura 18:

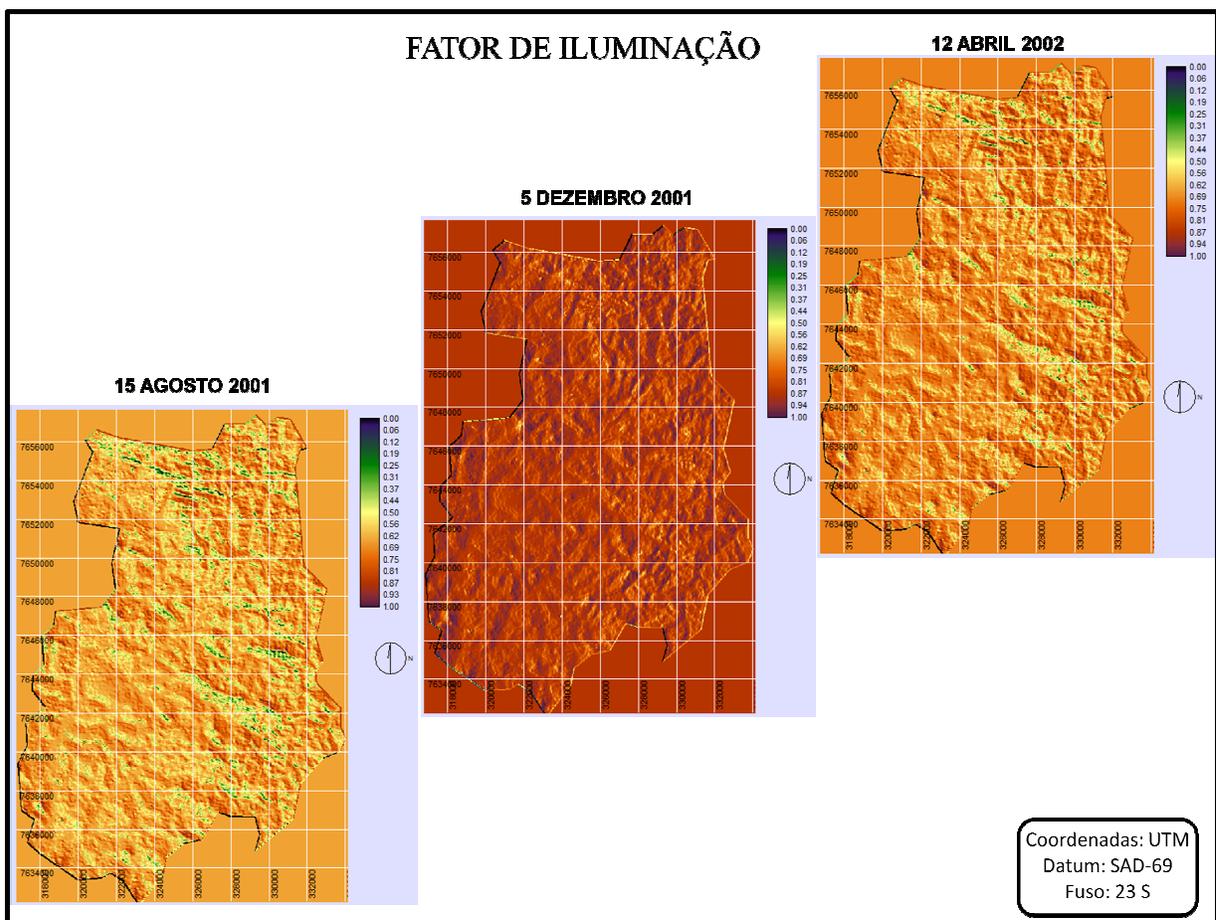


Figura 18: Imagens Fator de Iluminação para as três datas das cenas do TM/Landsat-5.

A variação de iluminação no relevo montanhoso de Guaxupé/MG foi distribuída em quatro classes arbitrariamente definidas conforme processo semelhante aplicado por

CANAVESI (2008), dentro do intervalo de variação total da imagem FI (0 até 1). Cada imagem FI gerada recebeu a sobreposição da máscara dos vetores (polígonos) de café amostrados durante a operação de campo, com isto foi possível a verificação da distribuição espacial das áreas ocupadas com os vetores de café levantados em campo e seus respectivos fatores de iluminação. A Figura 19 mostra a sobreposição dos vetores de café na imagem FI, ainda no intervalo completo (0 até 1) de 15 de agosto de 2001.

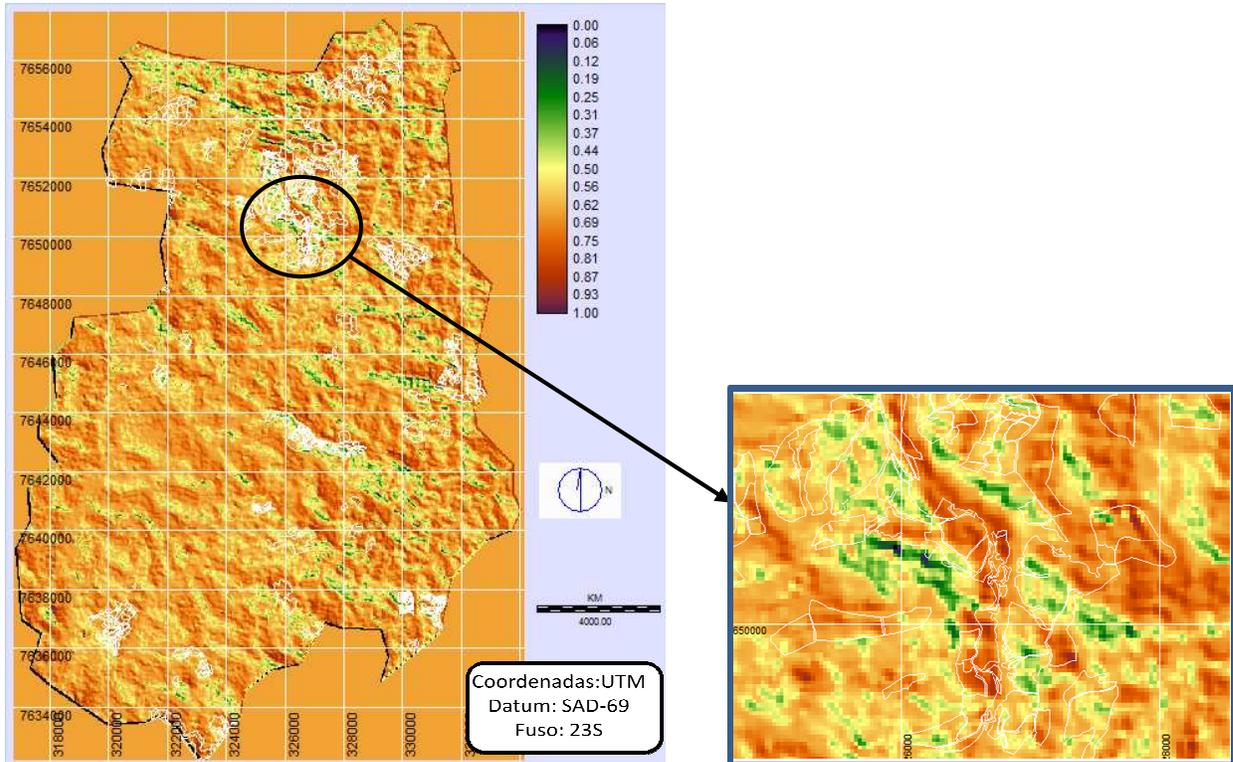


Figura 19: Imagem FI 15/08/01 com sobreposição dos vetores de café verificados em campo (em branco).

No quadro de destaque da Figura 19, é possível identificar os locais iluminados nos diversos intervalos de FI.

Sobre as imagens contendo o intervalo máximo de valores de FI (0 até 1), foi aplicado o processo de fatiamento (slice) com o objetivo de separar o respectivo intervalo que contivesse cada uma das quatro classes de iluminação adotadas: Escuro, Pouco Iluminado, Iluminado e Muito Iluminado.

Utilizando-se uma tabela do software Excel contendo os valores da relação pixel/valor de FI e, comparando-se com a imagem dos vetores de café (linhas em branco na Figura 19), estabeleceu-se então, grupos de valores-limite para os intervalos de iluminação

conforme as classes estabelecidas. Para cada grupo de valores coletados foi gerada uma imagem de fatiamento (slice), no software ENVI 4.0, contendo esses intervalos que eram simultaneamente comparados com os vetores de café cadastrados em campo. Para cada data referente às imagens TM/Landsat 5 (IMAG-1, IMAG-2 E IMAG-3), foi gerada uma imagem do FI correspondente, que recebeu o mesmo critério de análise quanto à verificação da existência de vetores de café em todas as classes adotadas de FI.

Após as operações de teste de intervalo, o conjunto de valores de iluminação que melhor se ajustou ao conjunto de polígonos de café nos tipos de plantio adensado e adulto, levantados em campo, para as três datas analisadas é apresentado na Tabela 4.

Tabela 4: Relação entre as classes e intervalos de iluminação.

DISTRIBUIÇÃO DAS CLASSES DE ILUMINAÇÃO		
CLASSES	INTERVALO DE ILUMINAÇÃO	COR ADOTADA
Escuro	0,000 até 0,4453	VERMELHO
Pouco iluminado	0,4454 até 0,6023	VERDE
Iluminado	0,6024 até 0,7785	AZUL
Muito iluminado	0,7786 até 1,0000	AMARELO

A Figura 20 apresenta o fatiamento adotado da imagem FI de 15/08/2001 com a sobreposição dos vetores de café coletados em campo (linhas em branco). A Figura 22 mostra uma ampliação da Figura 21 com destaque para as classes de iluminação e os vetores de café

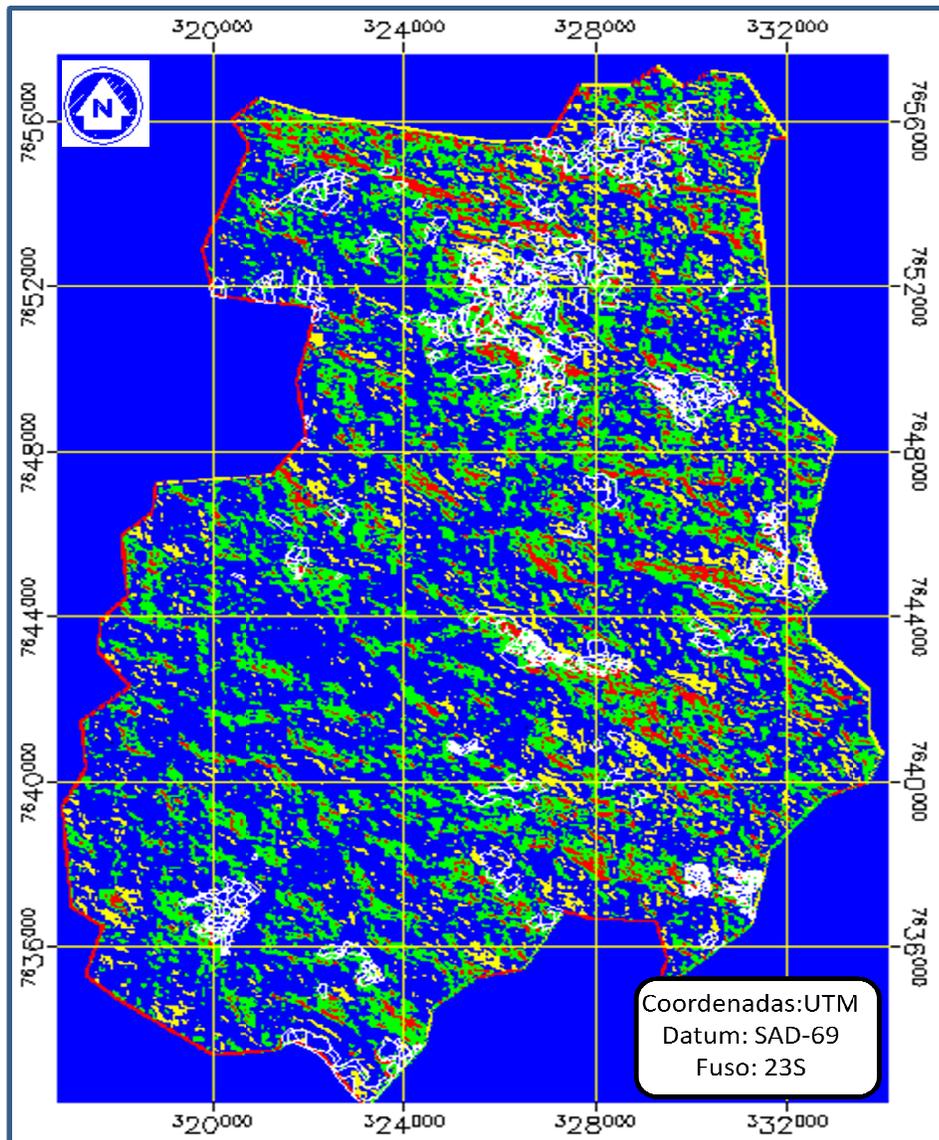


Figura 20: Fatiamento da imagem FI (15/08/2001).

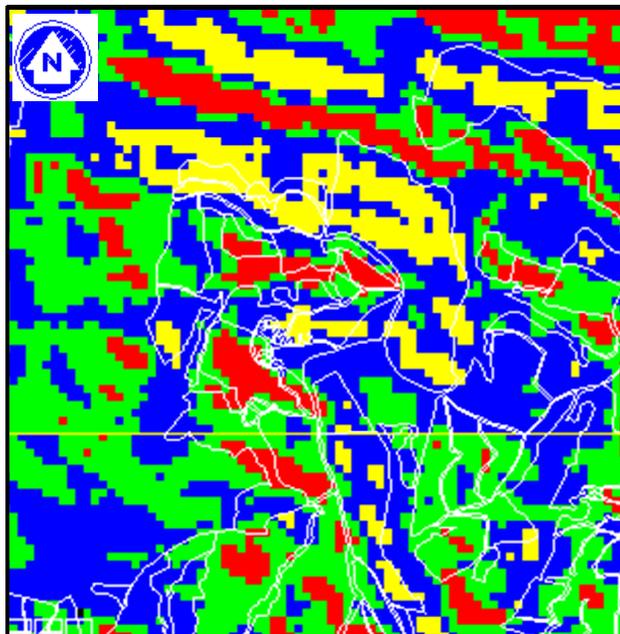


Figura 21: Detalhe do Fatiamento da imagem FI (Figura 21), com destaque para as classes de iluminação e os vetores de café verificados em campo (linhas em branco).

3.2.3. Terceira fase

3.2.3.1. Análise por Principais Componentes

Para melhor entendimento dos processos envolvidos nesta fase, um fluxograma das atividades está apresentado na Figura 23.

Com o objetivo de utilizar ao máximo as informações disponíveis por meio da aplicação da técnica de APC, após a preparação das imagens de Fator de Iluminação nos intervalos selecionados e com a sobreposição dos polígonos de café cadastrados em campo, iniciou-se o processo de seleção de amostras de café adulto e café adensado nas condições de iluminação proposta na Tabela 4.

Neste ponto cabe esclarecer que os tipos de plantio de café escolhidos dentre as amostras cadastradas em campo, foram resultado de análise dos atributos coletados (espaçamento de plantio, idade, variedade, nome do talhão e nome da propriedade) correspondentes às áreas levantadas e inseridas em um banco de dados no software SPRING – Sistema de Processamento de Imagens Georreferenciadas, conforme citado no item 3.1.3.4. Foram considerados plantios adensados os espaçamentos de rua variando entre 1,5m até 2,5m

e entre linhas 0,5m até 1,0m, adotando o critério de produtividade exposto por MIGUEL et al. (1986). Os espaçamentos superiores aos adotados para plantio adensado foram definidos como espaçamentos para a classe de café adulto dentre os talhões levantados em campo.

Em cada imagem de FI foram selecionadas 212 amostras possíveis de identificação, sendo que, para as imagens TM/Landsat 5 de 15/08/2001 e 12/04/2002, os conjuntos de amostras referentes aos tipos de plantio de café se ajustaram ao número de classes de iluminação. Para a imagem de 05/12/2001, as classes obtidas foram somente as do tipo Iluminado e Muito Iluminado que, devido ao ângulo de elevação solar na data de aquisição da imagem, não foi possível a identificação das áreas nas classes: Escuro e Pouco Iluminado, tanto para café adensado como para café adulto.

A Figura 22 mostra a localização das amostras coletadas na imagem FI de 15 de agosto de 2001 em talhões de café adulto sob a classe de iluminação: Escuro (pixel vermelho).

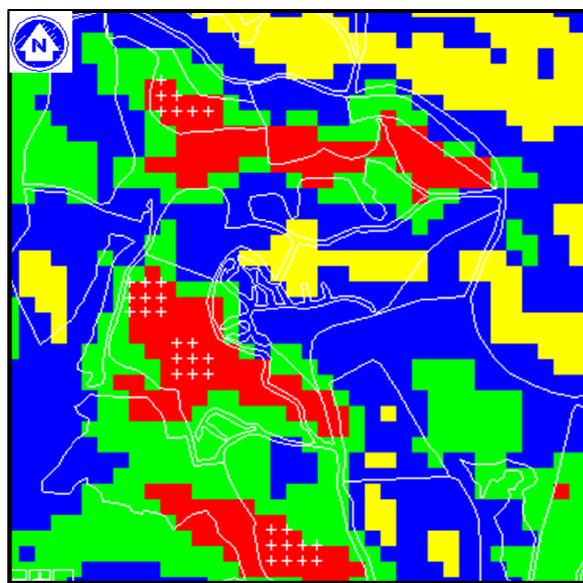


Figura 22: Imagem FI de 15/ago/01 mostrando os pixels selecionados como amostras (cruzeta branca) para aplicação da APC em área de café adulto (pixel em vermelho).

As amostras coletadas em cada imagem FI, para os tipos de plantio adensado e adulto, em cada classe de iluminação (Escuro, Pouco Iluminado, Iluminado e Muito iluminado), foram organizadas de forma a conter as informações necessárias, a partir dos valores de FRB de superfície das amostras, para o processamento utilizando o software SPSS (Statistical Package for the Social Sciences) versão 16.0.2. O exemplo de planilha contendo as informações em Excel está apresentado no Apêndice II.

As informações necessárias foram organizadas contendo o identificador da amostra (ID), a coluna em que se localiza a amostra na imagem (X), a linha na imagem (Y), as coordenadas UTM da amostra (Map X e Map Y), a latitude e longitude (Lat, Lon) e os valores referentes ao FRB de superfície do local da amostra nas seis bandas do TM/Landsat 5 analisadas.

Após a aplicação da técnica de APC, processada no software SPSS, foram gerados os valores referentes aos autovetores, autovalores e os fatores $f1$ e $f2$ relativos a cada banda do sensor TM, Esses valores foram armazenados em tabelas conforme apresentados no Apêndice III e utilizadas para a seleção das amostras de treinamento.

As informações resultantes após a aplicação da APC referem-se aos dois eixos iniciais (PC1 e PC2) denominados $f1$ e $f2$ (fatores resultantes), definido, conforme explica RICHARDS E JIA (2006) que, na maioria dos estudos, os dois eixos iniciais são considerados suficientes para explicar a variância dos dados e facilitar a interpretação de um gráfico em duas dimensões.

A planilha de resultados emitida após a aplicação da técnica da APC apresenta as seguintes informações, identificação da classe da variável (CLASSES), exemplo, ADEN_ES, referente tipo de plantio de café adensado, sob classe de iluminação tipo: Escuro; identificador da amostra (ID), coluna de localização da amostra na imagem (Map X), linha de localização da amostra na imagem (Map Y), latitude e longitude da amostra (Lat e Lon) e os fatores $f1$ e $f2$ referentes aos eixos PC1 e PC2 resultantes da aplicação da técnica da APC.

Com os dados obtidos, referentes aos eixos PC1 e PC2, de todos os tipos de plantio (adensado e adulto) e de todas as classes de iluminação, para cada imagem FI, utilizou-se o software Excel para a construção de um gráfico com todas as informações pertinentes às amostras, ou seja, a distribuição espacial dos fatores ($f1$ e $f2$) resultantes do processamento. A Figura 25 apresenta o gráfico de todas as amostras (café adensado e adulto) referentes à imagem FI de 15/08/2001. Os gráficos das amostras resultantes da aplicação da técnica de APC nas imagens de FI para as datas de 05/12/2001 e 12/04/2002 estão apresentados no Apêndice IV.

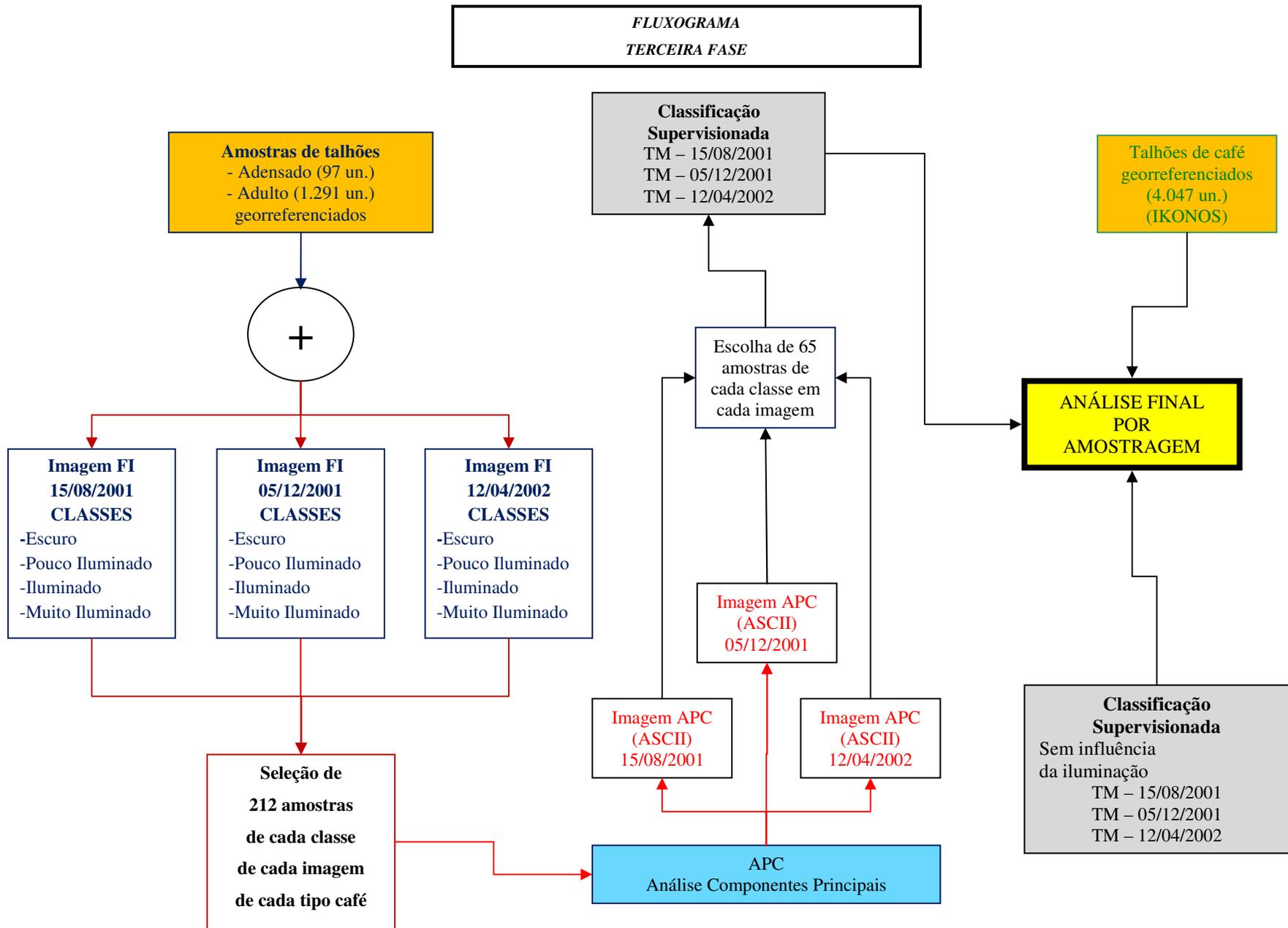


Figura 23: Fluxograma da terceira fase da pesquisa.

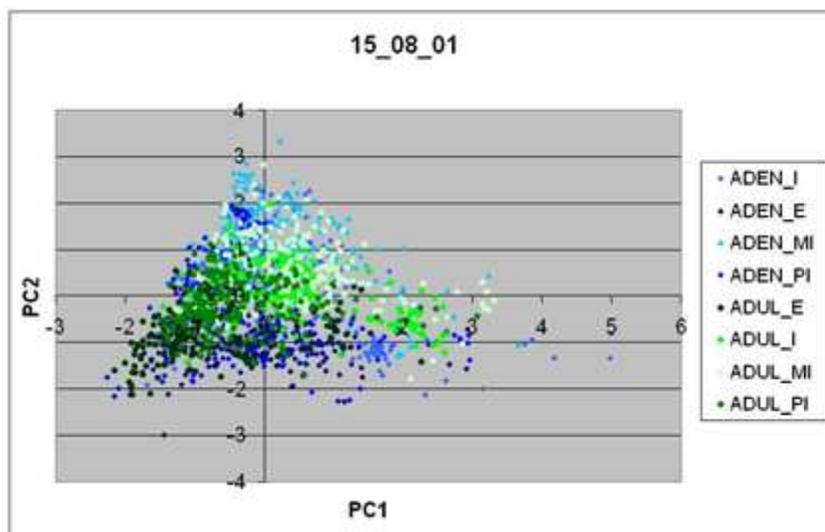


Figura 24: Distribuição espacial dos fatores resultantes da aplicação APC^{3(*)} na imagem FI de 5/08/2001.

3.2.3.2. Seleção das amostras de treinamento

Aplicado o processo de Análise por Principais Componentes nos grupos de amostras coletados em cada uma das três imagens de FI sobrepostas pelos polígonos de café, a etapa seguinte consistiu em selecionar em cada um desses grupos, amostras referentes a cada tipo de iluminação que ocupassem locais isolados no conjunto geral de amostras.

Para melhor interpretação, as imagens de FI foram identificadas com as seguintes notações: FI1 para o produto gerado com as informações de azimute e elevação solares da data 15/08/2001; FI2 para a data 05/12/2001 e FI3 para a data 12/04/2002.

No gráfico geral, resultante da imagem FI1, após a aplicação da APC (Figura 24), estão contidas as amostras referentes a oito grupos, porém, as amostras efetivamente selecionadas, formaram três grupos de dados de cada tipo de cultura de café devido à sobreposição de pontos no interior da “nuvem” de pontos contidos no gráfico.

(*) As abreviações adotadas na legenda da Figura25 representam: ADEN_I= Café adensado iluminado; ADEN_E= Café adensado escuro; ADEN_MI= Café adensado muito iluminado; ADEN_PI= Café adensado pouco iluminado; ADUL_E= Café adulto escuro; ADUL_I= Café adulto iluminado; ADUL_MI= Café adulto muito iluminado e ADUL_PI= Café adulto pouco iluminado.

O processo de seleção das amostras para utilização posterior na classificação, foi realizado por meio de escolha de pontos em uma tabela montada no Excel e, paralelamente, analisando a localização deste mesmo ponto no gráfico da distribuição espacial caracterizado pelo eixo x que representa os fatores ($f1$) referentes à componente principal 1 (PC1) e o eixo y os fatores ($f2$) da componente principal 2 (PC2).

Como citado acima, os grupos amostrais utilizados para a seleção de amostras, foram em número menor que os grupos extraídos das imagens de FI devido à exclusão das classes de Café Adensado Pouco Iluminado (ADEN_PI) e Café Adulto Pouco Iluminado (ADUL_PI) onde, as amostras se confundiram com as classes de Café Adensado Iluminado (ADEN_IL) e Café Adulto Iluminado (ADUL_IL) respectivamente. A Tabela 5 mostra os grupos amostrais isolados em cada data.

Tabela 5: Distribuição dos grupos amostrais selecionados após aplicação da APC.

TIPO DE CAFÉ + ILUMINAÇÃO	DATA DO FATOR DE ILUMINAÇÃO		
	FI 15/08/2001	FI 05/12/2001	FI 12/04/2002
CAFÉ ADENSADO ESCURO	X		X
CAFÉ ADENSADO POUCO ILUMINADO			
CAFÉ ADENSADO ILUMINADO	X	X	X
CAFÉ ADENSADO MUITO ILUMINADO	X	X	X
CAFÉ ADULTO ESCURO	X		X
CAFÉ ADULTO POUCO ILUMINADO			
CAFÉ ADULTO ILUMINADO	X	X	X
CAFÉ ADULTO MUITO ILUMINADO	X	X	X

As amostras extraídas dos grupos de pontos, resultantes da aplicação da APC, perfizeram um total de 65 amostras por grupo, quantidade esta, definida em função da localização dessas amostras em relação às outras, ou seja, amostras destacadas dentro do grupo a que pertencem e destacadas das outras amostras pertencentes aos outros grupos, conforme CANAVESI (2008). Os gráficos resultantes permitiram a visualização da distribuição das “nuvens” de pontos que receberam cores diferentes para facilitar a identificação. As Figuras 25a, 25b e 25c mostram os gráficos resultantes das 65 amostras de cada tipo de plantio/fator de iluminação que foram selecionadas e utilizadas como amostras de treinamento na classificação supervisionada.

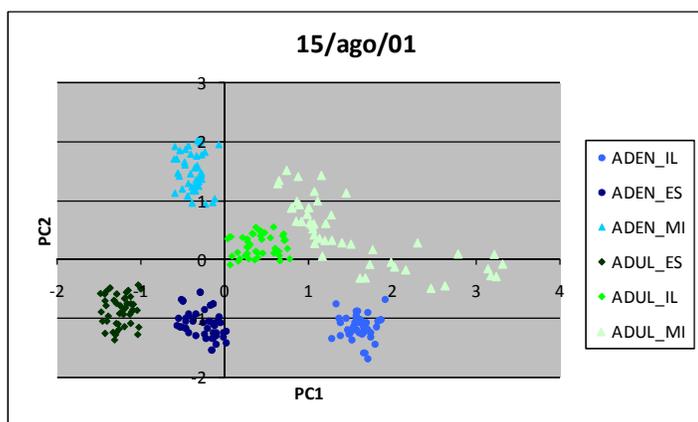


Figura 25a: Amostras de treinamento FI 15/08/2001.

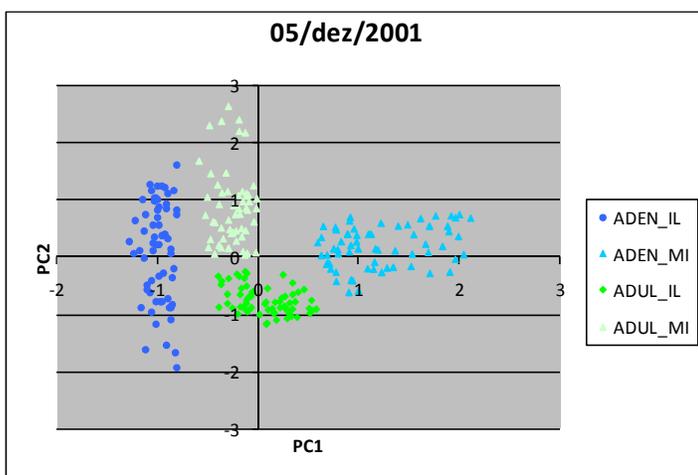


Figura 25b: Amostras de treinamento FI 05/12/2001.

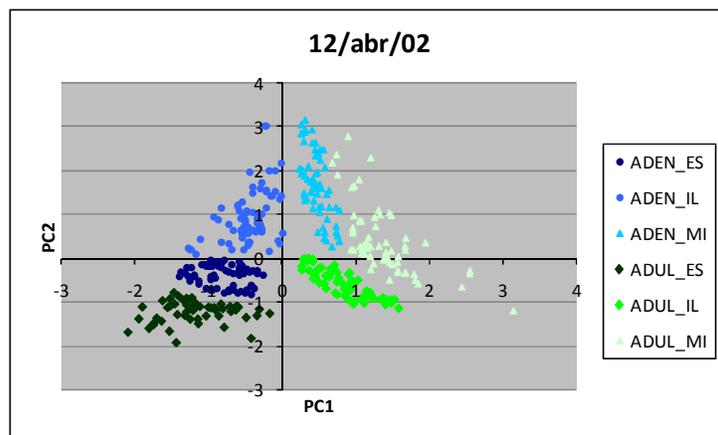


Figura 25c: Amostras de treinamento FI 12/04/2002.

Figura 25: Distribuição das amostras de treinamento extraídas da aplicação da APC, nas datas referentes às imagens TM/Landsat 5.

Os gráficos referentes às Figuras 25a e 25c apresentam as seis classes possíveis de iluminação e a Figura 25b apresenta o gráfico contendo as quatro classes possíveis conforme apresentado na Tabela 5.

3.2.3.3. Classificação supervisionada

O conhecimento da cobertura vegetal da área a ser classificada, no caso desta pesquisa, está baseado no levantamento de campo das informações sobre a cultura do café e na máscara de vetores de café fornecida pelo laboratório da Cooxupé, que foram os subsídios necessários para a aplicação e análise da técnica de classificação supervisionada.

CRÓSTA (1992) define que uma área de treinamento é estabelecida pelo usuário diretamente sobre a imagem. Várias áreas de treinamento podem ser definidas para uma mesma classe, para assegurar que os pixels a ela pertencentes sejam realmente representativos dessa classe. As 65 amostras de cada tipo de plantio de café coletadas em cada classe de iluminação, formaram as áreas de treinamento conforme citado no item 3.2.2.3.

O classificador adotado foi a Distância de Mahalanobis que possui como vantagem sobre outros classificadores, ser rápido e manter um grau de direção sensível, utilizando a matriz de covariância Σ , ou seja, o classificador é sensível às mudanças inter-variáveis das amostras de treinamento. Os desvios padrões são as medidas determinadas em relação à média das amostras de treinamento que resultam em valores estatísticos que determinam a proximidade entre as amostras desconhecidas às amostras de treinamento (RICHARDS E JIA, 2006).

A distância de Mahalanobis é descrita como:

$$D(x, m_i)^2 = (x - m_i)^t \Sigma^{-1} (x - m_i) \quad \text{onde:} \quad \text{Eq.(03)}$$

D^2 = distância de Mahalanobis;

t = matriz transposta;

Σ = matriz de covariância;

m_i = vetor média da classe;

x = região que está sendo analisada (vetor de dados).

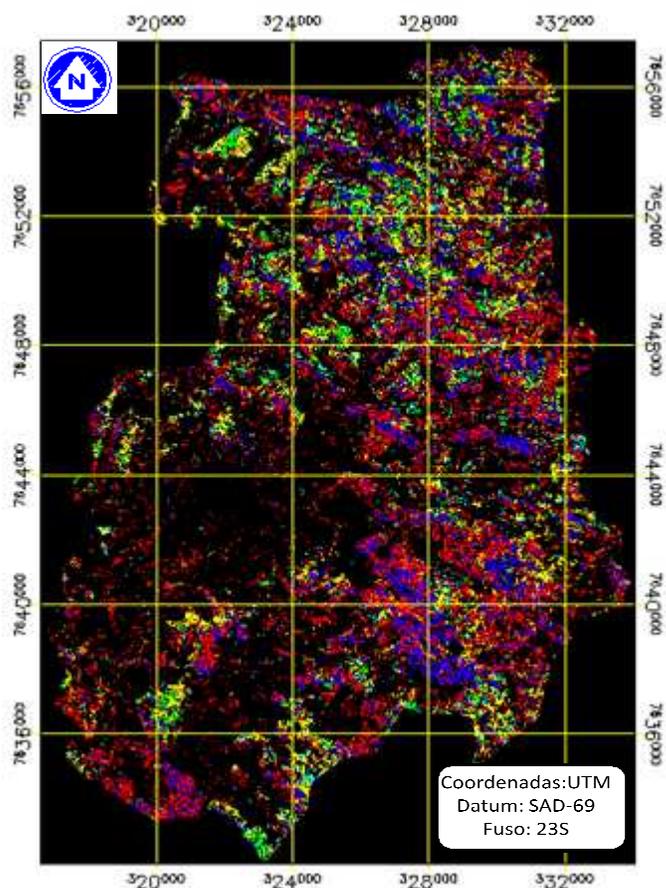
A técnica de classificação supervisionada adotada nesta pesquisa, utilizando a Distância de Mahalanobis como classificador e as amostras selecionadas (grupos de 65 amostras) foi aplicada, inicialmente, sobre as imagens do sensor TM/Landsat 5 (IMAG-1, IMAG-2 E IMAG-3), resultando em mapas temáticos denominado Técnica 1. Posteriormente, foi aplicada a técnica de classificação supervisionada na imagem IMAG-1 utilizando amostras coletadas diretamente na imagem, não considerando as amostras obtidas na aplicação da APC, com o objetivo de criar condições de comparação entre a técnica proposta nesta pesquisa e a técnica de classificação utilizando os procedimentos convencionais. Este processo foi denominado como Técnica 2.

As possibilidades criadas pela aplicação da técnica de classificação supervisionada por meio da seleção de amostras envolvendo os valores resultantes das técnicas de fator de iluminação e APC aplicados (Técnica 1), foram complementadas com a realização de uma composição temática gerada pelos mapas temáticos resultantes das classificações utilizando as imagens IMAG-1, IMAG-2 e IMAG-3. Esta composição temática resultante foi denominada Técnica 3.

Os conjuntos de amostras de café adensado e café adulto selecionados entre os valores correspondentes aos fatores $f1$ e $f2$ (grupos compostos de 65 amostras cada) obtidos na aplicação da técnica de APC, e a imagem correspondente à data de coleta das amostras, foram inseridos no software ENVI 4.3 para a aplicação da técnica de classificação supervisionada. Foi necessário o ajuste da variável correspondente ao erro de máxima distância (estabelecida com o valor 2) que é determinada como limitador no ENVI 4.0 onde, o software não classifica amostras com distância superior ao valor adotado, em pixels.

A imagem resultante da classificação supervisionada considerando-se os fatores de iluminação referente à cena de 15/08/2001 (Técnica 1) é apresentada na Figura 26. As cores adotadas para a identificação das amostras foram distribuídas conforme a Tabela 6. As imagens classificadas correspondentes às outras datas são apresentadas no Apêndice V.

O segundo processo de classificação de imagens denominado Técnica 2, foi realizado



com o objetivo de se estabelecer parâmetros de comparação onde, as imagens do sensor TM foram classificadas por meio do processo convencional. As amostras de treinamento foram selecionadas não levando em consideração os fatores de iluminação, somente utilizando o conhecimento da área pelo intérprete para a seleção das mesmas. Foram selecionadas amostras de café referentes ao plantio adensado e plantio adulto na quantidade correspondente à coleção de amostras considerando a influência da iluminação (65 amostras).

Figura 26: Imagem classificada do sensor TM de 15/08/2001.

Tabela 6: Distribuição de cores adotada nas amostras de classificação.

Cores adotadas na classificação	Fator de iluminação
	Adensado Escuro
	Adensado Iluminado
	Adensado Muito Iluminado
	Adulto Escuro
	Adulto Iluminado
	Adulto Muito Iluminado

A técnica adotada para o segundo processo (Técnica 2) foi a classificação supervisionada, estabelecendo também como classificador, a distância de Mahalanobis, de maneira a se manter o mesmo padrão de classificação das imagens do sensor TM/Landsat 5 considerando os fatores de iluminação.

As amostras utilizadas na Técnica 2, foram coletadas de maneira a abranger, o máximo possível, a variação de espaçamentos e idades do cafeeiro do município sem levar em consideração as informações obtidas durante o levantamento de campo, de forma a caracterizar a situação de coleta de dados baseada somente no conhecimento da região, buscando reproduzir os procedimentos de uma operação de classificação supervisionada usual.

O processo de classificação foi aplicado sobre a imagem de 15/08/2001 devido aos resultados obtidos quando da validação dos dados que mostraram melhor resposta espectral do cafeeiro nesta data, confirmando as pesquisas realizadas por RUDORFF et al. (2003) onde os autores constataram que a melhor identificação da cultura de café ocorreu nas imagens obtidas durante os meses secos na região (maio até outubro).

O terceiro processo de classificação denominado Técnica 3, foi realizado com o objetivo de atingir melhores resultados do que aqueles obtidos pelos dois processos anteriores, caracterizados por Técnica 1 e Técnica 2. A forma adotada consistiu na geração de um mapa temático realizado com a inserção dos pixels classificados nas imagens IMAG-1, IMAG-2 e IMAG-3 quando da aplicação da Técnica 1. O objetivo foi gerar um novo mapa com as informações contidas nas máscaras de classificação das três datas utilizando para essa operação a ferramenta denominada matemática de bandas do software ENVI 4.0.

Em todos os mapas temáticos resultantes da aplicação da técnica de classificação supervisionada denominados Técnica 1, Técnica 2 e Técnica 3, receberam pontos amostrais gerados pela aplicação da ferramenta denominada amostragem randômica aleatória utilizando o software ENVI 4.0, sendo que, os pontos amostrais foram os mesmos adotados para todos os mapas nos três processos classificatórios, visando estabelecer um único padrão para a verificação da qualidade das classificações realizadas.

3.2.3.4. Validação dos dados

A avaliação da qualidade das informações resultantes da classificação, foi realizada por meio da matriz de confusão ou matriz de erro que é uma forma de representar as contradições entre a verdade de campo e o resultado do processo de classificação. Nesta matriz são confrontadas duas situações onde: as linhas correspondem à classe correta e as colunas à classe estimada no processo de classificação. Cada célula armazena o valor de pixels que deveriam ser classificados como a classe especificada na linha e que foram classificados segundo a classe estabelecida na coluna (CENTENO, 2003).

Os valores somente na diagonal principal de uma matriz de confusão representam a condição ideal de uma classificação, ou seja, o somatório dos valores da diagonal corresponderia ao valor total das amostras o que, na maioria dos casos não ocorre e a quantidade de pixels incorretos é o total de pixels que aparecem fora da diagonal principal.

A Exatidão Global, representada pela operação com os dados referentes à diagonal principal da Matriz de Confusão, e o coeficiente Kappa (COHEN, 1960) vem sendo muito utilizados como medida de exatidão de uma classificação temática e podem ser calculados pelas Equações 04 e 05, respectivamente:

$$EG = \left(\frac{A}{N} \right) * 100$$

Eq.(04)

onde:

EG: Exatidão Global;

A: Acerto geral (pontos amostrais na diagonal principal);

N: número de pontos amostrais.

$$K = \frac{N \sum_{i=1}^r x_{ii} - \sum_{i=1}^r (x_{i+} * x_{+i})}{N^2 - \sum_{i=1}^r (x_{i+} * x_{+i})}$$

Eq.(05)

onde:

K: coeficiente Kappa de concordância;

N: número de observações (pontos amostrais);

r: número de linhas da matriz de confusão

X_{ii}: observações na linha i e coluna i;

X_{i+}: total marginal da linha i;

X_{+i}: total da marginal da coluna i.

O fundamento utilizado para a verificação da qualidade das classificações foi atribuído aos valores de Exatidão Global e coeficiente Kappa resultantes da coleta de informações dos pontos amostrais e distribuídos em uma matriz de erro. Os pontos amostrais foram identificados na máscara de classificação com as seguintes denominações:

a-) **Café** - para os pontos amostrais que se posicionaram sobre pixels classificados como café e localizados dentro do perímetro dos polígonos da máscara de café obtidos por meio de coleta visual sobre imagens Ikonos;

b-) **Café não classificado** – para os pontos amostrais que se posicionaram fora dos pixels classificados como café e localizados dentro do perímetro dos polígonos da máscara de café obtidos por meio de coleta visual sobre imagens Ikonos;

c-) **Não café** – para os pontos amostrais que se posicionaram fora dos pixels classificados como café e localizados fora do perímetro dos polígonos da máscara de café obtidos por meio da coleta visual sobre imagens Ikonos;

d-) **Mata** – para os pontos amostrais que se posicionaram sobre os pixels classificados como café e localizados fora do perímetro dos polígonos da máscara de café obtidos por meio de coleta visual sobre imagens Ikonos.

O processo de montagem da matriz compreendeu o ajuste entre a denominação das amostras no momento da identificação, com a denominação utilizada para as classes classificadas na matriz com o objetivo único de definir classes correspondentes a café e não café na matriz de erro.

Na padronização para a avaliação dos resultados, as classes foram ajustadas para **Café**, que recebeu os pixels referentes a café classificado lançado na diagonal principal e os pixels de **Café não Classificado** como os valores fora da diagonal principal, porém localizados na coluna Café na matriz. A classe Não café recebeu a quantidade de pixels classificados como **Não Café** posicionados na diagonal principal e, os pixels classificados como **Mata** foram posicionados na coluna correspondente a **Não Café**, mas localizados fora da diagonal.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Considerando a diversidade de espécies de café utilizados no plantio e os mais diversos espaçamentos utilizados na implantação do cafeeiro, a busca de informações por meio de imagens orbitais, das áreas ocupadas por esta rubiácea, tem sido uma constante apesar de toda a complexidade envolvida no plantio e cultivo do cafeeiro de montanha.

Os procedimentos adotados, fundamentados em técnicas já aplicadas e relatadas nesta pesquisa, resultaram nas seguintes observações:

4.1. Análise dos resultados da correção atmosférica da imagem ETM+/Landsat 7

A imagem estabelecida como base para o desenvolvimento desta pesquisa, foi adquirida pelo sensor ETM+/Landsat 7 que, após a aplicação da correção atmosférica utilizando os dados MODIS (NASCIMENTO & ZULLO JR., 2005), e resultando em valores FRB de superfície conforme ZULLO JR. (1994), foi avaliada conforme a literatura existente que estabelece algumas observações que podem ser constatadas no gráfico da assinatura espectral obtida na imagem de interesse.

O comportamento espectral do alvo mata, apresenta algumas características em função do nível de correção aplicado na imagem de satélite. Para o caso da imagem base (linha azul no gráfico da Figura 27), normalmente, os dados referentes ao ND (Número Digital) originais não servem como referencia para a caracterização espectral de objetos, porém, para a visualização do comportamento do alvo por meio de um gráfico contendo as assinaturas espectrais, foi realizada a conversão dos FRBs, aparente e de superfície, em ND.

Analisando os NDs dos FRBs, aparente e de superfície, resultantes (linhas em vermelho e verde, respectivamente) pode-se constatar que as diferenças apresentadas são atribuídas à aplicação do software SCORADIS que confirmam os valores de FRB aparente são sempre superiores que os FRB de superfície na região do visível devido ao espalhamento atmosférico. O contrario ocorre nas regiões do infravermelho próximo e médio, onde os valores de FRB de superfície são superiores aos valores de FRB aparente devido ao domínio da absorção da radiação eletromagnética por conta da atmosfera (PONZONI, 2007).

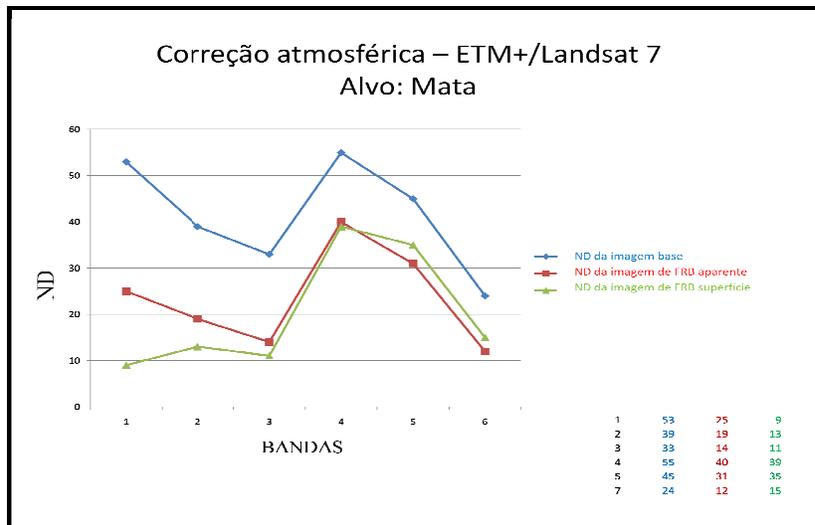


Figura 27: Assinaturas espectrais referentes ao ND (azul) da imagem original, ND do FRB aparente (vermelho) e ND do FRB de superfície (verde) de uma região de mata.

Análise semelhante foi realizada com o alvo referente a solo exposto, extraído da imagem ETM+/Landsat 7 na mesma região de interesse. A remoção do efeito atmosférico novamente ficou evidente onde, a influência do espalhamento causado pela obstrução da energia incidente e/ou refletida pelas partículas na atmosfera, é caracterizada pelo aumento dos valores do ND do alvo representado na Figura 28 pela linha na cor azul.

Os valores obtidos denotam que as características que influenciam no comportamento da assinatura espectral apresentada, podem estar ligadas ao conteúdo de matéria orgânica, que são reconhecidamente fatores de forte influência sobre FRB do solo. À medida que o teor de matéria orgânica aumenta, FRB do solo decresce no intervalo de comprimento de onda de 400 a 2500 nm (HOFER e JOHANNSEN, 1969).

Dentre outros fatores que interferem na resposta espectral do alvo solo, a influência causada pela presença de água é um elemento importante. No caso da lavoura cafeeira, o período referente à aquisição da imagem do sensor ETM+/Landsat 7 (IMAG-1), 7 de junho/2002, representa para a região, um período marcado normalmente pela falta de chuvas. Fator que afeta em muito as características espectrais do alvo.

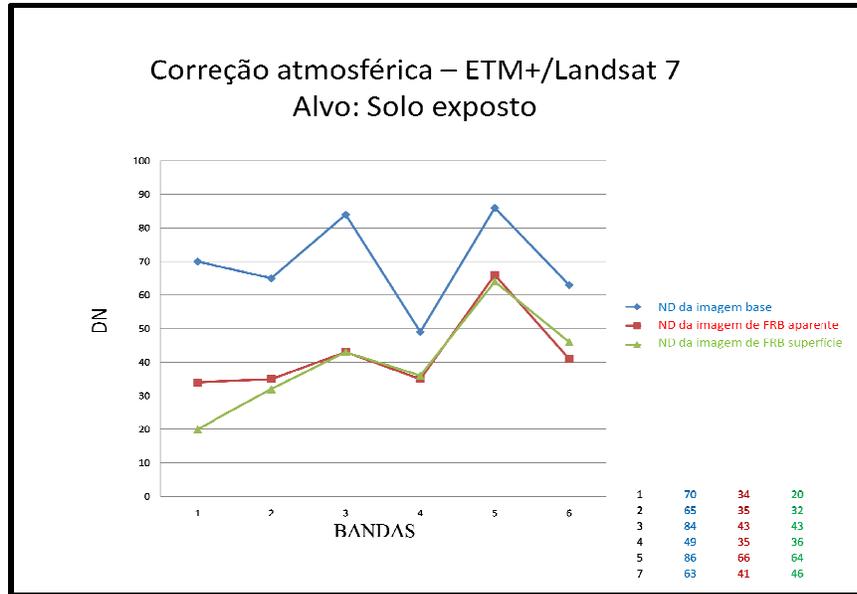


Figura 28: Assinaturas espectrais do alvo solo. ND (azul), ND do FRB aparente (vermelho) e ND do FRB de superfície (verde).

4.2. Análise dos resultados da normalização entre a imagem ETM+/Landsat 7 e as imagens TM/Landsat 5.

A aplicação da técnica automática de detecção de pixels invariantes utilizando a ferramenta proposta por NIELSEN et al. (1998) e NIELSEN et al. (2002), denominada MAD (Multivariate Alteration Detection), foi realizada com o objetivo de conservar as características das imagens do TM/Landsat 5 (IMAG-2, IMAG-3 e IMAG-4) utilizando como referência a imagem do sensor ETM+/Landsat 7 (IMAG-1).

A coerência apresentada nos resultados obtidos após a aplicação da técnica de normalização consistiu na análise das imagens do sensor TM/Landsat 5 que, após a aplicação do processo de registro de imagem, utilizando-se as mesmas coordenadas UTM aplicadas no registro da imagem ETM+/Landsat 7 (IMAG-1), extraiu-se os valores de ND referentes aos alvos solo e café adulto, e comparou-se com os valores dos mesmos alvos obtidos das imagens normalizadas. Nas Figuras 29 e 30, observa-se, a coerência nas assinaturas espectrais que apresentam uma redução nos valores de FRB de superfície, transformados em ND, devido à remoção do efeito do espalhamento.

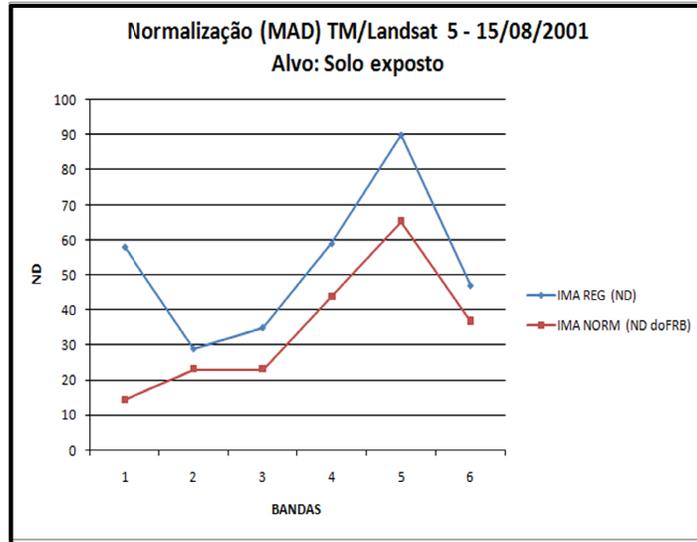


Figura 29: Assinaturas espectrais do alvo solo exposto, na imagem TM, após registro (linha azul) e após normalização radiométrica (linha vermelha).

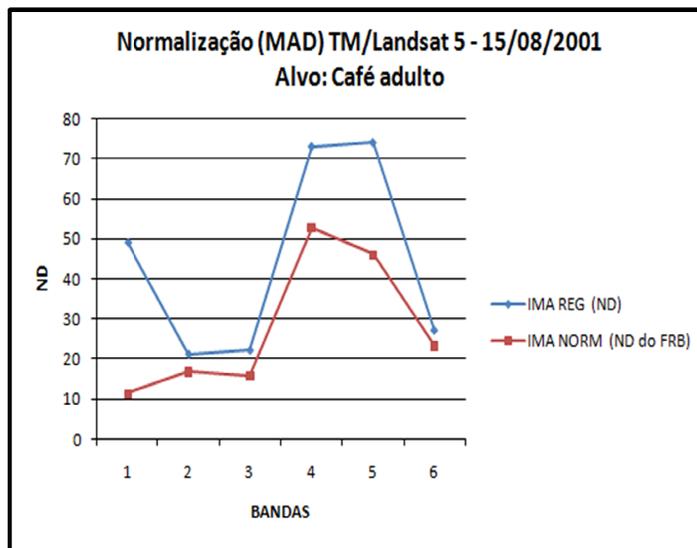


Figura 30: Assinaturas espectrais do alvo café adulto, na imagem TM, após registro (linha azul) e após normalização radiométrica (linha vermelha).

A eficiência da aplicação da técnica de normalização radiométrica (MAD) é avaliada por meio da análise dos dados estatísticos resultantes, ou seja, a documentação de saída do algoritmo é gerada cada vez que uma operação de normalização é realizada entre duas imagens. Nesta documentação constam, o número de pixels invariantes utilizados no processo e os gráficos, mostrando a relação de linearidade entre os pixels invariantes da imagem de referência (IMAG-1) e a imagem de outra data, chamada imagem alvo. Uma comparação estatística é realizada utilizando a média e a variância de alguns milhares de pixels

amostrados, comparação esta, realizada entre as imagens, referência, alvo e imagem resultante ou normalizada.

A regressão ortogonal define o processo de normalização dos pixels invariantes coletados de forma automática pelo algoritmo.

Os resultados encontrados apresentam uma tendência de aproximação entre a média e a variância de cada banda da imagem do TM/Landsat 5 normalizada e os valores da média e da variância da imagem de referência, levando em consideração as alterações espectrais ocorridas na imagem normalizada. Na Figura 31 pode-se observar os valores constantes da normalização no que se refere à linearidade dos pixels invariantes no processo entre as imagens IMAG-4 (ETM+/Landsat 7 de 07/06/01) e IMAG-1 (TM/Landsat 5 de 15/08/01), na Figura 32, podem ser observados os valores resultantes da estatística de normalização, incluindo os valores referentes à regressão ortogonal:

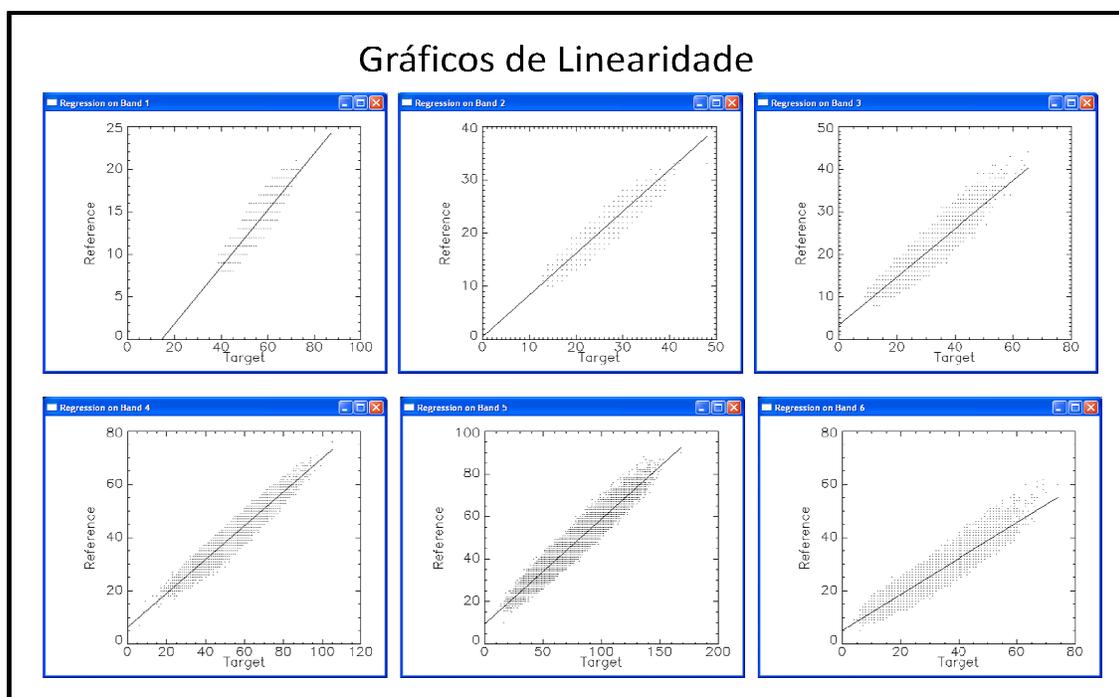


Figura 31: Gráficos mostrando a linearidade entre os pixels invariantes das imagens ETM+/Landsat 7 (imagem referência) e TM/Landsat 5 de 15/08/01 (imagem alvo).

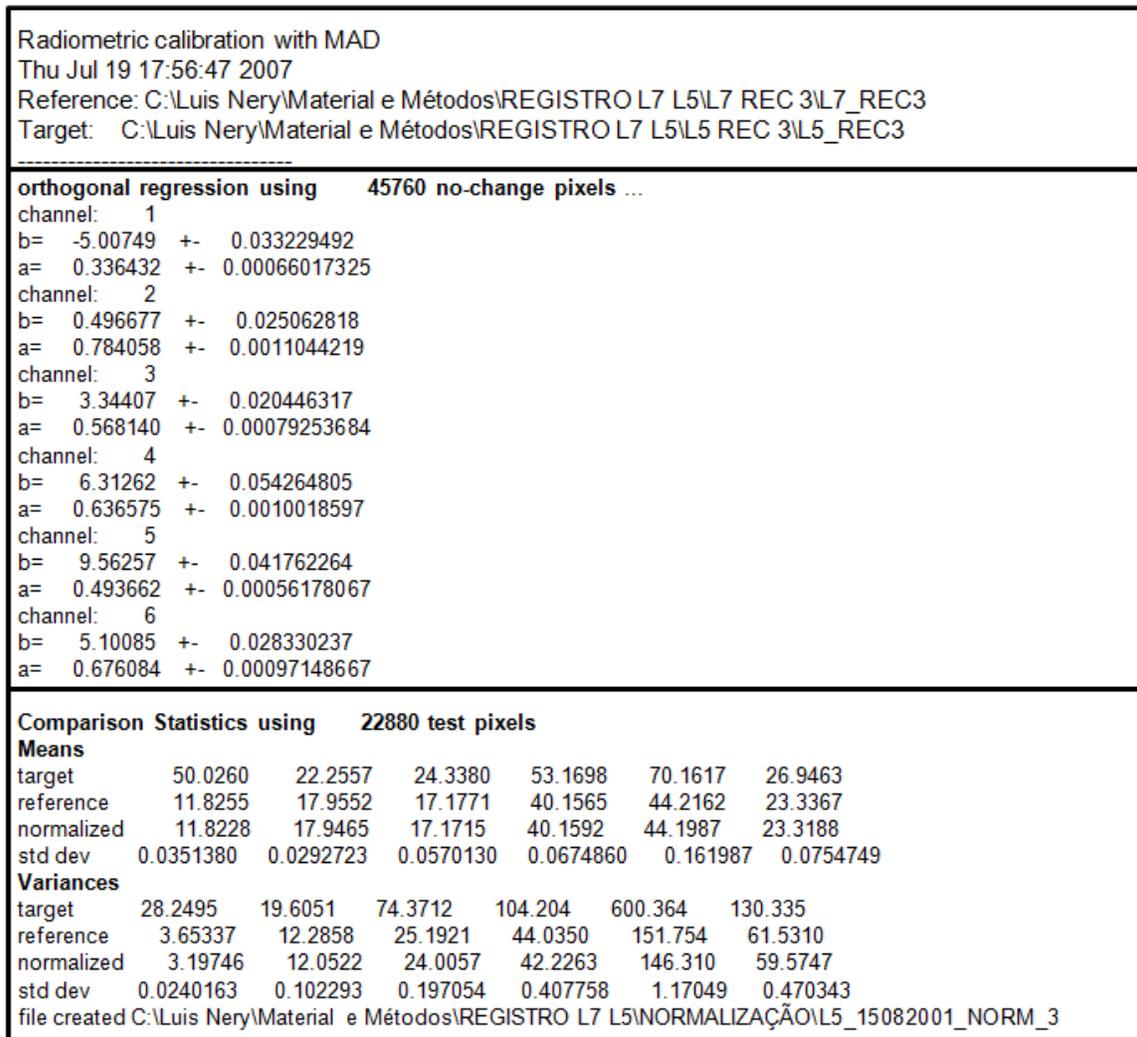


Figura 32: Relatório de saída do algoritmo apresentando os valores referentes à estatística resultando entre as imagens ETM+/Landsat 7 (imagem referência) e TM/Landsat 5 de 15/08/01 (imagem alvo).

A linearidade entre os pixels invariantes das imagens referência e alvo, apresentada na Figura 31, se apresenta coerente se comparada com os valores obtidos na literatura especializada.

Os dados estatísticos apresentados na Figura 32 também correspondem com os valores obtidos e considerados suficientes, no que se referem aos desvios padrões obtidos dos valores da média e variância, conforme MERCANTE (2007).

Os relatórios valores estatísticos resultantes da aplicação da técnica MAD referentes às imagens: IMAG-2 (05/12/01) e IMAG-3 (15/04/02), são apresentados no Apêndice 1.

Levando-se em consideração todas as variáveis atuantes na análise de um dossel vegetativo, a cultura de café tem uma arquitetura de vegetação bastante complexa, com densidades e orientações bastante variáveis em função, principalmente, da rugosidade do terreno, adicionadas aos efeitos de estresse na vegetação, efeito do solo, além dos efeitos causados em uma imagem orbital pela variação da geometria de visada.

Tendo em vista a identificação e quantificação do cafeeiro, algumas características espectrais referentes ao vigor vegetativo do cafeeiro nas imagens TM, após a aplicação da técnica MAD, são mostradas na Figura 33 e discutidas abaixo:

- No perfil espectral referente à 15/08/01, a baixa umidade caracterizada pela redução das chuvas no período, mostra um forte acréscimo do valor do FRB no intervalo do comprimento de ondas de 760 *nm* até 900 *nm* (banda 4), que pode ter sido influenciado pela baixa quantidade de folhas motivado pelo efeito da colheita realizada na região do alvo na data de aquisição da imagem. O decréscimo ocorrido no valor do FRB nos intervalos de comprimento de ondas de 1550 *nm* até 1750 *nm* (banda 5) e 2080 *nm* até 2350 *nm* (banda 7) pode ter sido motivado pela presença de cobertura vegetal no solo apresentando recuperação da biomassa mais rápido que a do cafeeiro.

- Em 05/12/01, um decréscimo natural no valor do FRB de superfície no intervalo do comprimento de ondas de 760 *nm* até 900 *nm* (banda 4), ocorreu devido à recuperação do vigor vegetativo do dossel cafeeiro representado pela absorção da energia radiante pela água no conteúdo da planta, devido ao início das chuvas na região;

- Em 12/04/02, o valor de FRB de superfície no intervalo do comprimento de ondas de 760 *nm* até 900 *nm* (banda 4) apresenta a estabilização da biomassa devido à recuperação do cafeeiro baseado na regularização na ocorrência de chuvas na região e dos tratamentos culturais já estabilizados no período.

Com base nas respostas espectrais do cafeeiro nas datas analisadas, e comparando-se com a literatura especializada, considerou-se que as informações obtidas nas imagens normalizadas podem ser utilizadas como referência segura para a continuidade da pesquisa.

As características de textura e cor nas imagens TM/Landsat 5 normalizadas, podem ser observadas quando comparadas em função das datas de aquisição. A Figura 34 permite visualizar que as regiões de mata (assinaladas com um quadrado) se apresentam nas cores menos intensas no período seco conforme a IMAG-2 (15/08/01) tornando-se mais acentuadas

nas variações da cor verde para a IMAG-3 (05/12/01), período de início das chuvas e, tornando-se mais intensas na IMAG-4 (12/04/02) quando o ciclo das chuvas está se completando.

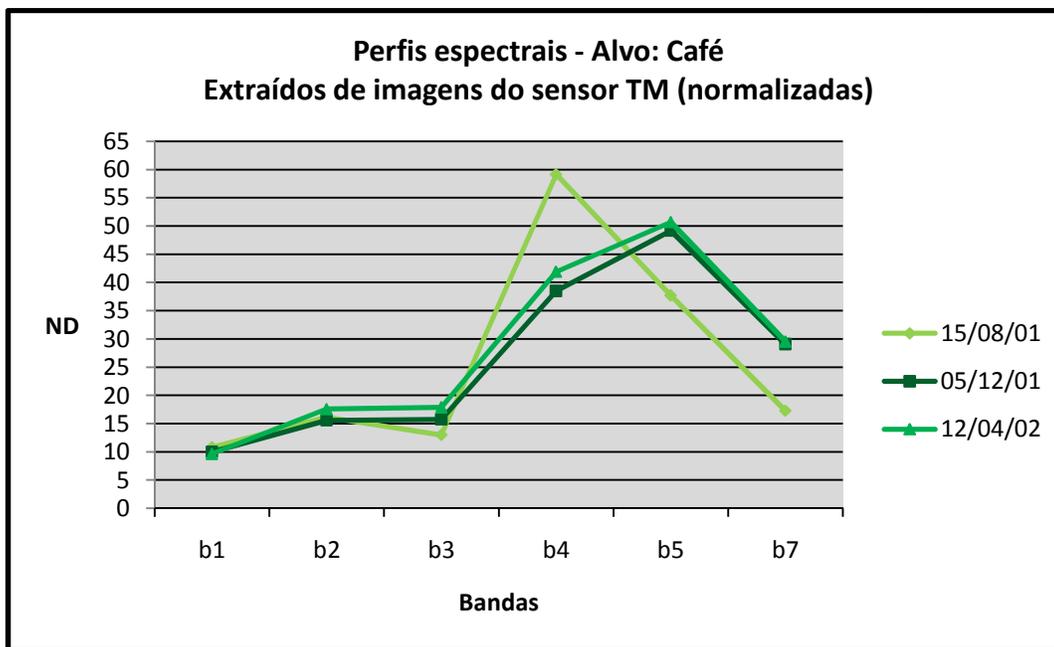


Figura 33: Assinaturas espectrais do alvo café adulto nas imagens TM (IMAG-2, IMAG-3 e IMAG-4), após normalização radiométrica.

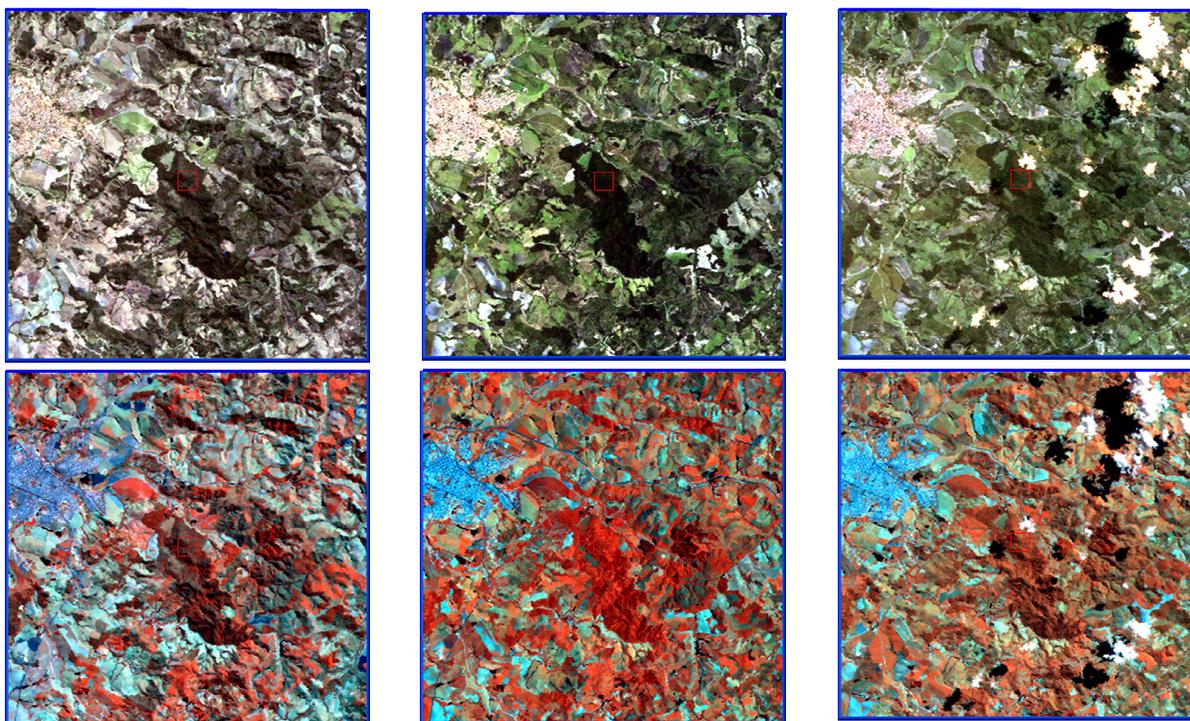


Figura 34: Composições coloridas utilizando-se as bandas do TM/Landsat 5 nas datas 15/08/01 (à esquerda), 05/12/01 (centro) e 12/04/02 (à direita).

Na primeira linha de recortes de imagem na Figura 34 a composição se apresenta nas cores naturais nas bandas: 1 (azul), 2 (verde) e 3 (vermelho). Na segunda linha, a composição foi ajustada no processo de falsa cor utilizando-se as bandas 4 (vermelho), 3 (verde) e 2 (azul).

4.3. Análise dos resultados obtidos pela aplicação do Fator de Iluminação (FI)

Redução nas operações matemáticas e na geração de mapas e dados representou uma das vantagens da aplicação do processo denominado Fator de Iluminação (FI). A possibilidade de utilização de um algoritmo adaptado ao software Idrisi resultou em redução de tempo e esforço computacional quando comparado com os processos de geração de mapas temáticos de declividade e aspecto ou exposição (necessitam ser analisados individualmente) devido à aplicação direta da técnica de fatiamento (slice) que possibilita o ajustamento das faixas de iluminação em função das características do local ou dos alvos a serem analisados.

No caso específico desta pesquisa, o cruzamento entre o mapa de FI e os vetores de café cadastrados em campo, possibilitou a escolha mais adequada do fatiamento a ser aplicado onde, os setores resultantes do fatiamento, foram analisados e comparados com os vetores de café, de forma a possibilitar a geração de amostras em todas as classes de iluminação.

Como as amostras contidas em áreas de café foram identificadas nas três imagens de FI, resultantes do procedimento de cálculos que envolveram os valores de elevação e azimute solar de cada imagem do sensor TM e o modelo digital de elevação extraído do sensor ASTER, a aplicação do fatiamento das classes de iluminação tornou-se um processo rápido devido à possibilidade de visualização das amostras diretamente no mapa de fatiamento, processo este, que foi facilitado com a adoção de cores para cada classe de fatiamento.

A análise conjunta das três imagens de FI facilitou, em muito, a identificação e escolha das 212 amostras utilizadas na aplicação da técnica de APC.

As três imagens de FI resultantes, e a legenda de cores adotada para a identificação das áreas referentes a cada classe de iluminação estão apresentadas na Figura 35 e Tabela 7, respectivamente.

Nas imagens referentes às datas de 15/08/01 e 12/04/02, todos os intervalos de fatiamento foram utilizados para a localização das amostras, na imagem referente à 05/12/01, somente os fatiamentos relativos aos padrões Iluminado e Muito Iluminado foram utilizados conforme mostra a distribuição de cores (azul e amarelo) predominantes na data. Esta redução

de fatiamento foi ocasionada pela iluminação intensa na cena, em função da data de aquisição (ângulo de elevação solar) onde, os valores adotados para as fatias referentes à Escuro e Pouco Iluminado, não foram atingidos pela iluminação na data de 05/12/01. Mesmo com a restrição de iluminação, foram selecionadas 212 amostras para cada fatia possível, em cada imagem.

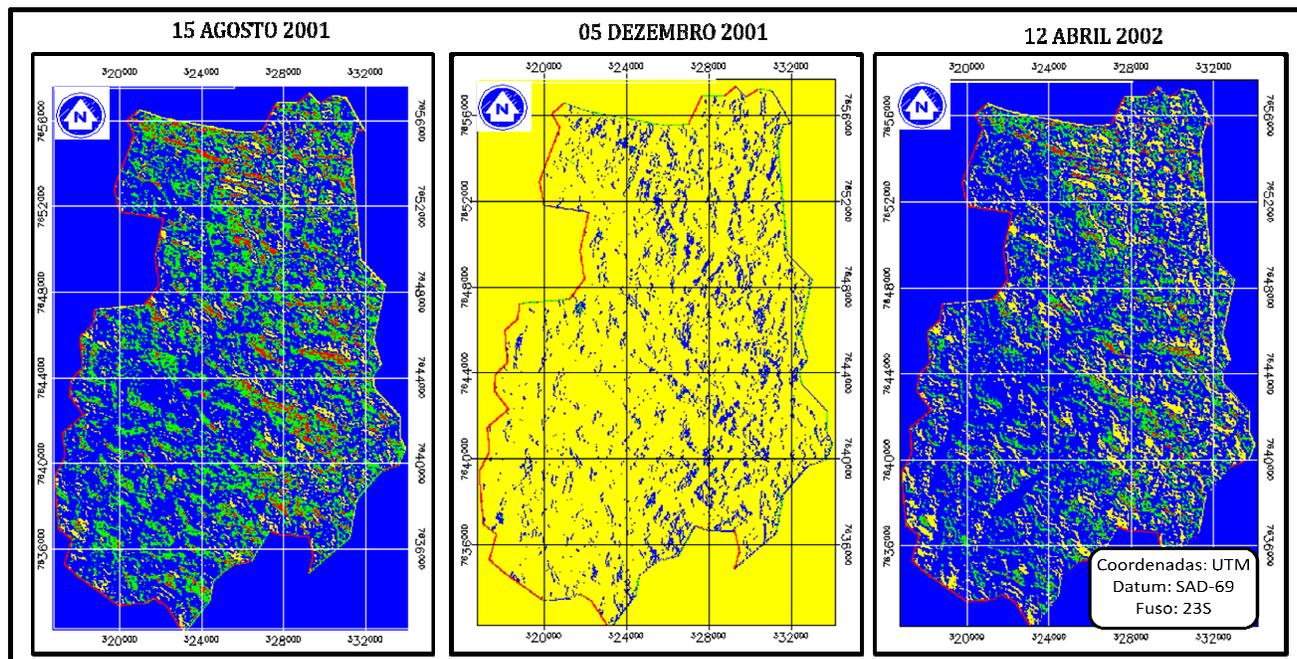


Figura 35: Fatiamento das imagens de FI nas datas referentes às imagens TM.

Tabela 7: Relação entre intervalos de fatiamento e cores adotadas.

INTERVALOS DE FATIAMENTO			
ESCURO	0.0000	0.4453	
POUCO ILUMINADO	0.4454	0.6023	
ILUMINADO	0.6024	0.7785	
MUITO ILUMINADO	0.7786	1.0000	

4.4. Análise dos resultados da aplicação da técnica de Análise por Principais Componentes (APC)

As componentes principais foram calculadas utilizando-se as 212 amostras selecionadas das imagens de FI, com o objetivo de se conhecer os valores dos fatores resultantes ($f1$ e $f2$). O primeiro passo após a aplicação da APC referiu-se à análise dos valores correspondentes aos autovetores, que servem como fatores de ponderação e definem a contribuição de cada banda original para uma principal componente (PC). Esta análise inicial confirmou a utilização das bandas PC1 e PC2 como as que contêm o maior número de informações sobre as bandas originais do sensor TM. A Tabela 8 apresenta os valores atribuídos aos autovetores resultantes da aplicação da APC sobre as amostras extraídas da FI1:

Tabela 8: Valores correspondentes aos autovetores das amostras extraídas da FI1.

VARIÂNCIA TOTAL (15/08/01)			
Componentes	Autovalores iniciais		
	Total	% de variação	% cumulativo
1	4,608	76,806	76,806
2	1,053	17,552	94,358
3	0,179	2,978	97,337
4	0,100	1,670	99,007
5	0,360	0,607	99,614
6	0,023	0,386	100,000

Os resultados referentes à aplicação da técnica de APC mostraram algumas características relevantes quanto à distribuição das amostras nas “nuvens” resultantes do processo. A forte correlação existente entre os dados contidos nas bandas multiespectrais é eliminada pela aplicação da técnica de APC onde, a redundância das informações é removida, porém, constatou-se que as “nuvens” de pontos resultantes APC apresentaram forte tendência à concentração no entorno do centróide a partir da data de 15/08/01 (Figuras 36a, 36b e 36c), aumentando a densidade em 05/12/01 e 12/04/02. Essa concentração crescente das “nuvens”

de pontos dificultou o processo de seleção das amostras destinadas ao treinamento da operação de classificação supervisionada, resultando na coleta máxima de 65 amostras extraídas da “nuvem” referente aos dados de 12/04/02, conforme procedimentos apresentados por CANAVESI (2008)..

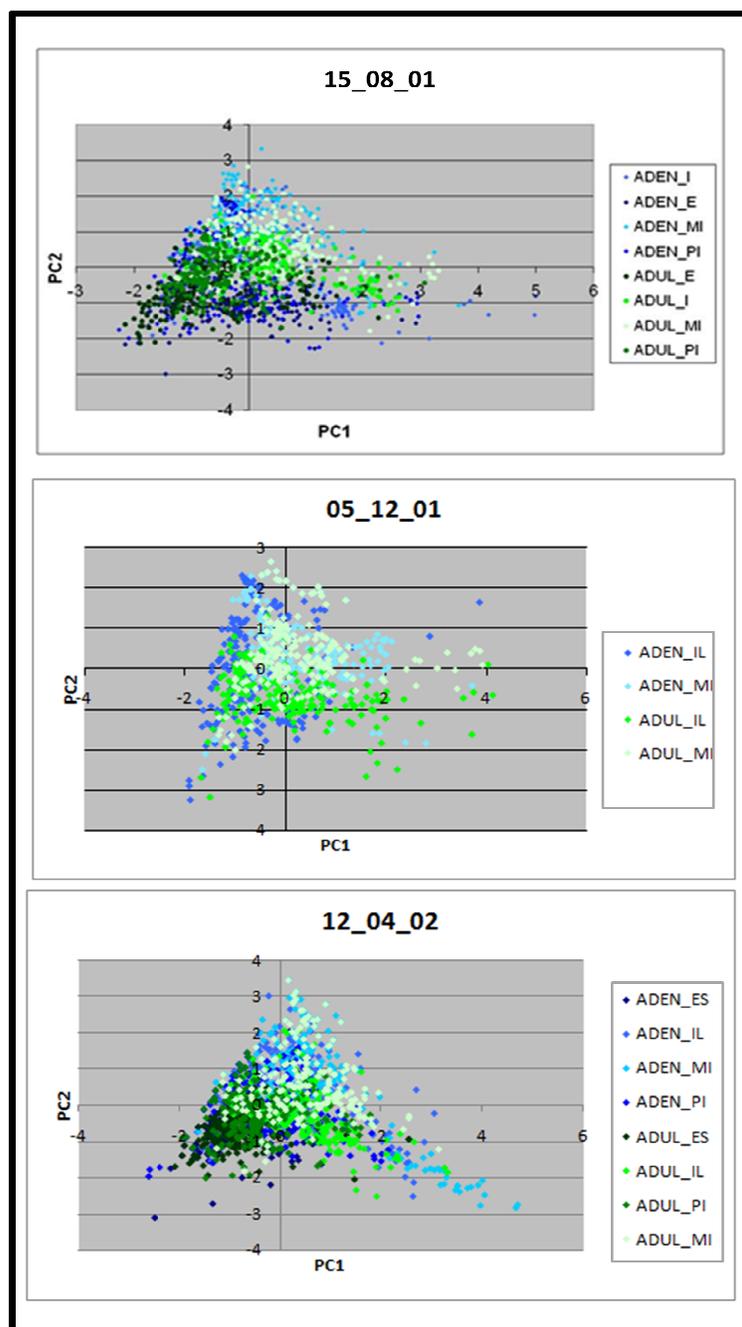


Figura 36: Distribuição espacial das amostras resultantes da aplicação da APC nas datas 15/08/01 (Fig.36a), 05/12/01 (Fig.36b) e 12/04/02 (Fig. 36c).

4.5. Análise dos resultados da aplicação da técnica de Classificação Supervisionada.

O processo de classificação supervisionada utilizado nesta pesquisa resultou em mapas temáticos denominados: **Técnica 1**, referente às classificações aplicadas nas imagens IMAG-2, IMAG-3 e IMAG-4, utilizando as amostras de treinamento extraídas da técnica APC; **Técnica 2**, utilizando amostras colhidas de forma convencional, ou seja, baseado na experiência do observador, e **Técnica 3**, resultante da composição temática formada pelas classificações individuais realizadas na aplicação da Técnica 1. Os mapas resultantes foram avaliados por meio da aplicação da matriz de confusão, exatidão global e índice Kappa, porém, antes da análise dos resultados, cabem, neste contexto, considerações sobre alguns detalhes observados após o processo de classificação, nos mapas finais.

Mapa baseado na Técnica 1 (15/08/01):

As áreas de café ADEN_MI, ADUL_MI e ADUL_IL, após análise visual, foram classificadas de forma bastante precisa quanto à localização, em relação aos vetores dos talhões medidos em campo caracterizando assim, a possibilidade de utilização do método proposto, para a localização do cafeeiro iluminado e muito iluminado. Exemplos desses resultados encontram-se na Figura 37, onde se pode observar, os limites bem definidos ocupados pelos pixels amostrados como café em relação aos vetores levantados em campo.

Na maioria dos polígonos, detectou-se a ausência da classe ADEN_IL (café adensado iluminado), tendo como provável causa, a quantidade de polígonos levantados em campo (97), comparado com os polígonos cadastrados da classe café adulto (1291), comprovando a baixa quantidade de área plantada com esta característica de espaçamento. Porém, o ponto interessante desta classe de iluminação, foi o destaque do grupo destas amostras em relação à “nuvem” de pontos obtidos na aplicação da APC nas datas, 15/08/01 e 05/12/01, o que pode ser observado na Figura 37:

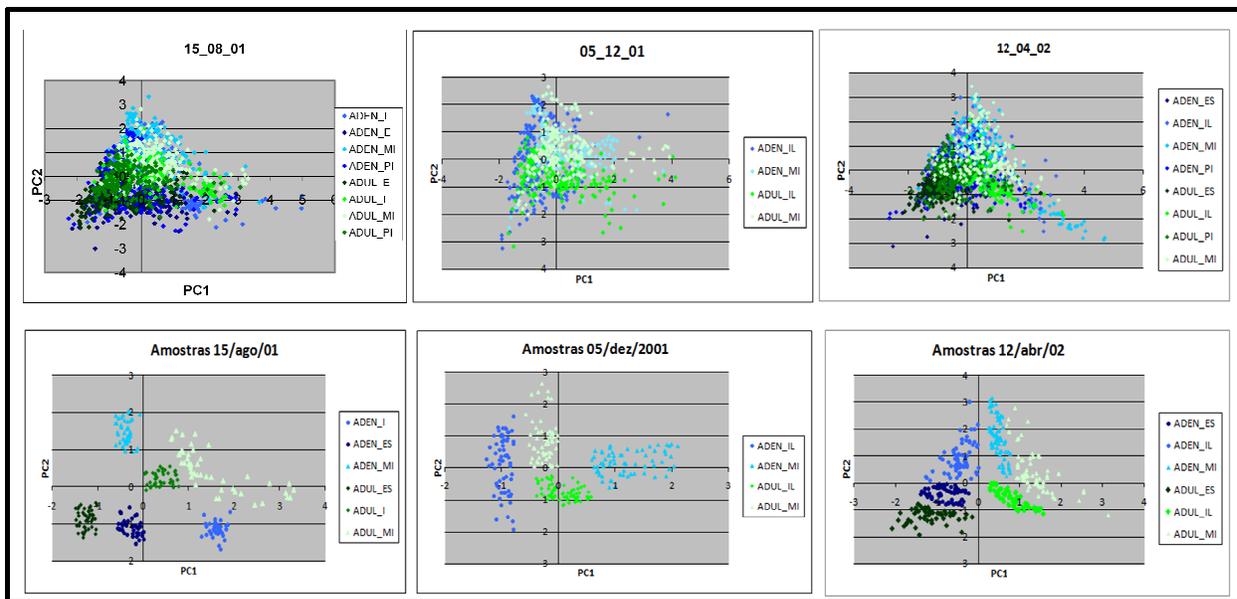


Figura 37: Gráficos resultantes da aplicação da APC (linha superior) e, gráficos resultantes da seleção de amostras de treinamento (linha inferior) utilizadas no processo da Técnica 1.

Na Figura 38 é apresentado o mapa temático resultante da classificação supervisionada utilizando-se a Técnica 1 na imagem de 15/08/01.

- **Mapa temático baseado na Técnica 1 (05/12/01):**

A redução das classes de iluminação ocorrida na imagem do sensor TM/Landsat 5 de 05/12/01, devido ao grande ângulo de elevação solar na data de aquisição da cena, estabeleceu um novo cenário para a classificação supervisionada sobre a imagem nesta data.

As variações de iluminação ocorridas na aplicação da Técnica 1 (15/08/01) onde, a classe ADEN_MI e ADUL_IL predominaram, na classificação da Técnica 1 (05/12/01), a classe ADUL_MI substituiu as classes citadas, aparecendo, notadamente, em conjunto com a classe ADEN_IL porém, com uma quantidade de pixels menor na classificação, sendo que, em alguns setores, não houve identificação do café em áreas classificadas na data 15/08/01. O grande ângulo de elevação solar na imagem de 05/12/01 generalizou a iluminação nos locais que foram classificados de forma mais detalhada na imagem de 15/08/01. Na Figuras 39 e 40, nas colunas 1 e 2 (da esquerda para a direita), é possível visualizar as alterações citadas quando comparados os resultados das diversas técnicas de classificação aplicadas.

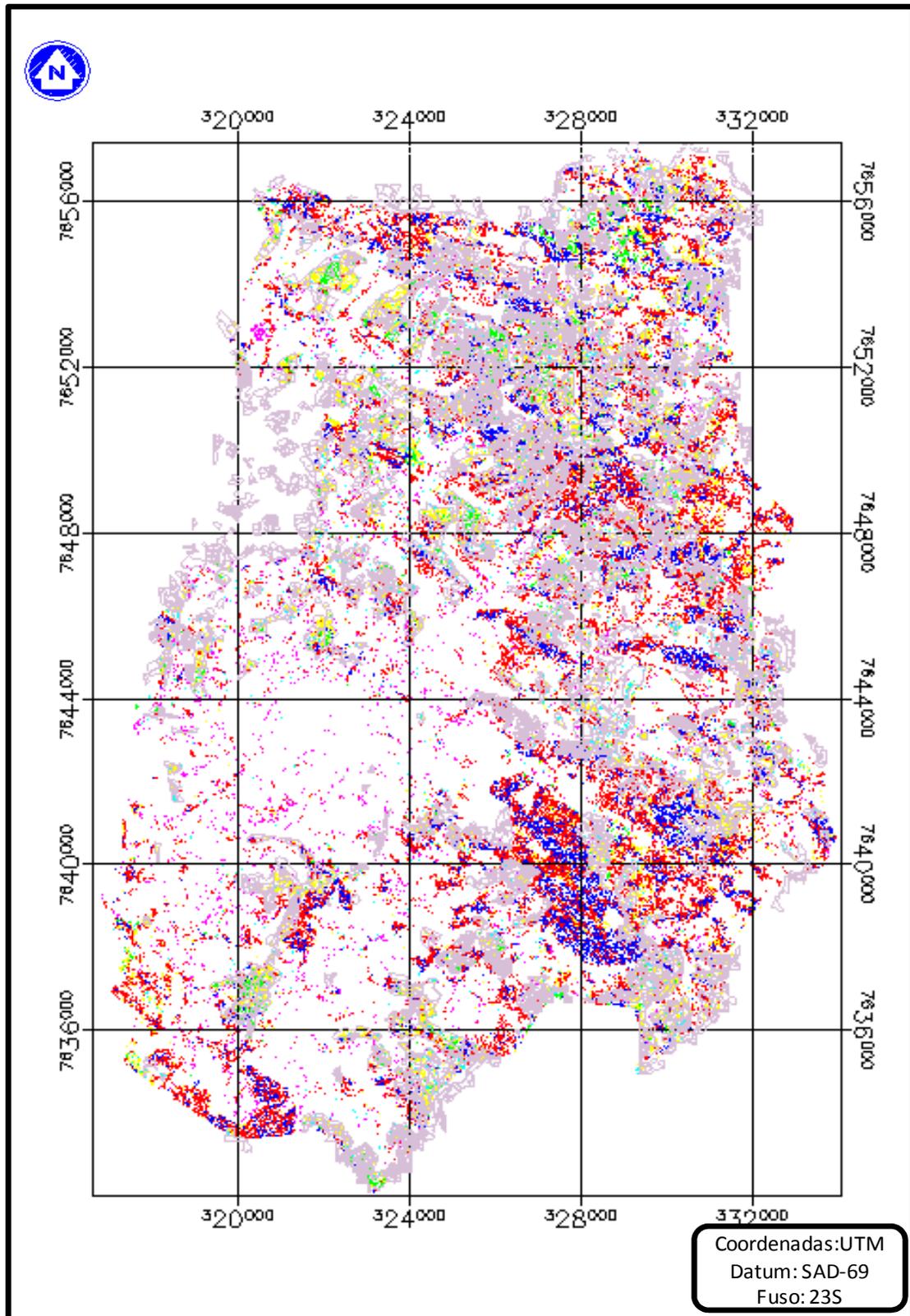


Figura 38: Mapa temático resultante da classificação utilizando a Técnica 1 (15/08/01).

Mapa temático baseado na Técnica 1 (12/04/02):

Em função da leve redução do ângulo de elevação solar, quando comparado com a imagem de 05/12/01, as classes de iluminação utilizadas como amostras para a classificação (seis classes) na imagem de 12/04/02, resultaram em uma imagem com características muito próximas da imagem gerada pela classificação da cena de 15/08/01. Como pode ser observado, comparando-se as colunas 1 e 3 das Figuras 39 e 40, nota-se claramente a redução do número de pixels da classe ADUL_IL e a não classificação de alguns talhões de café, possivelmente pela localização dessas áreas em relação ao relevo, quando comparados com as áreas identificadas na imagem referente à 15/08/01.

- **Mapa temático baseado na Técnica 2 (15/08/01):**

O mapa temático resultante da classificação da imagem de 15/08/01, baseado na Técnica 2), mostrou uma forte redução no número de pixels classificados na classe café, como pode ser visto na coluna 4 das Figuras 39 e 40. A escolha das amostras utilizando a metodologia usual (escolha das amostras de treinamento conforme a experiência de campo do observador) resultou na não classificação dos pixels considerados escuros (ADEN_ES, ADUL_ES) que foram identificados na aplicação das Técnicas 1 utilizando-se as imagens de 15/08/01 e de 12/04/02.

- **Mapa temático baseado na Técnica 3:**

Resultante da operação de composição, o mapa temático baseado na Técnica 3, apresentou o melhor resultado no que diz respeito à localização e “mapeamento” das áreas cafeiras, como pode ser observado na coluna 5 das Figuras 39 e 40.

A composição formada pelos mapas resultantes da aplicação da Técnica 1, agrupou os pixels identificados como café em condições de diferentes ângulos de elevação solar, aumentando o preenchimento dos pixels no interior dos limites dos talhões de café utilizados como referência de localização da cultura cafeeira plantada no município de Guaxupé. A mesma composição trouxe também, a concentração dos pixels localizados em áreas classificadas como não café, mas que terminaram por trazer informações bastante importantes sob o ponto de vista de iluminação, ou seja, algumas características de iluminação utilizadas como identificadores de áreas de café, localizaram áreas de mata densa e mata ciliar, tendo o mapa resultante da aplicação da Técnica 3, trazido à mostra, o destaque da concentração dessas informações, conforme explicado a seguir.

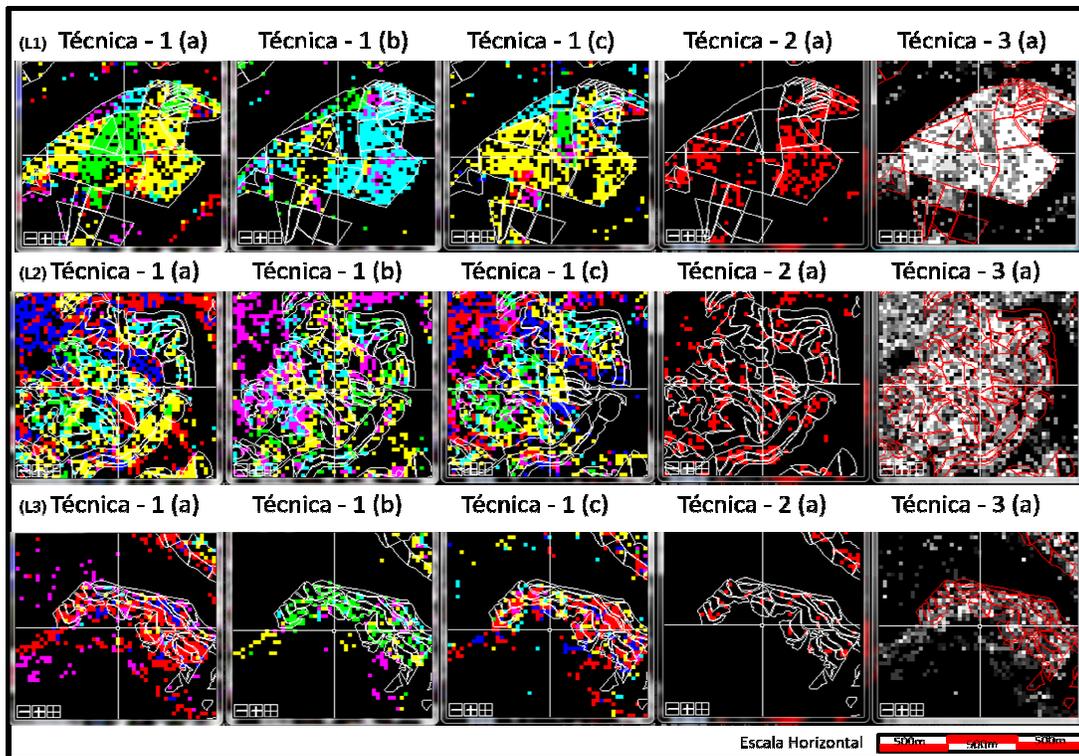


Figura 39: Quadro comparativo mostrando os resultados da aplicação das diversas técnicas de classificação, considerando os limites dos talhões de café utilizados como referência nessa pesquisa.

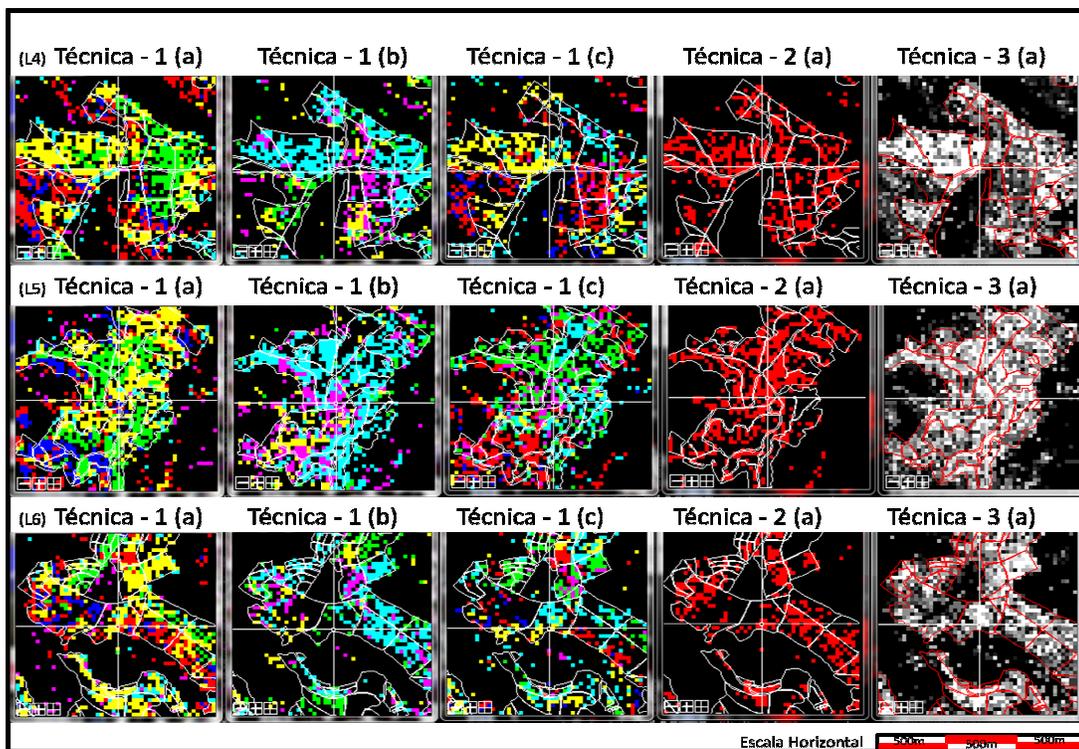


Figura 40: Quadro comparativo mostrando os resultados da aplicação das diversas técnicas de classificação, considerando os limites dos talhões de café utilizados como referência nesta pesquisa.

Durante a escolha dos intervalos de fatiamento nas imagens do FI, todas as classes de iluminação foram definidas, levando-se em consideração, os talhões de café cadastrados em campo, porém, durante a escolha das amostras geradas pela aplicação da APC, as amostras referentes às classes pouco iluminada (ADUL_PI e ADEN_PI) e escura (ADUL_ES e ADEN_ES), se confundiram no interior da “nuvem” de pontos, tornando difícil o isolamento das amostras ADUL_PI e ADEN_PI, atribuindo então, prioridade para a coleta das amostras da classe escura (ADUL_ES e ADEN_ES). O objetivo de se optar pela seleção de amostras da classe escura (ADUL_ES e ADEN_ES), limite inferior do fatiamento, foi o de buscar informações relevantes na zona escura, que tem sido descrita na literatura especializada, como a área de maior concentração de confusão espectral, principalmente, em relevo montanhoso.

Os mapas temáticos resultantes da aplicação da classificação supervisionada (Técnica 1 nas imagens de 15/08/01 e 12/04/02) apresentaram para as áreas de café na classe escura (ADUL_ES e ADEN_ES), áreas correspondentes à mata densa e mata ciliar (próxima dos cursos d’água), confirmando a confusão espectral, neste caso, entre a cultura de café sob baixa iluminação solar e as áreas de mata, conforme apresentado nas Figuras 41 e 42:

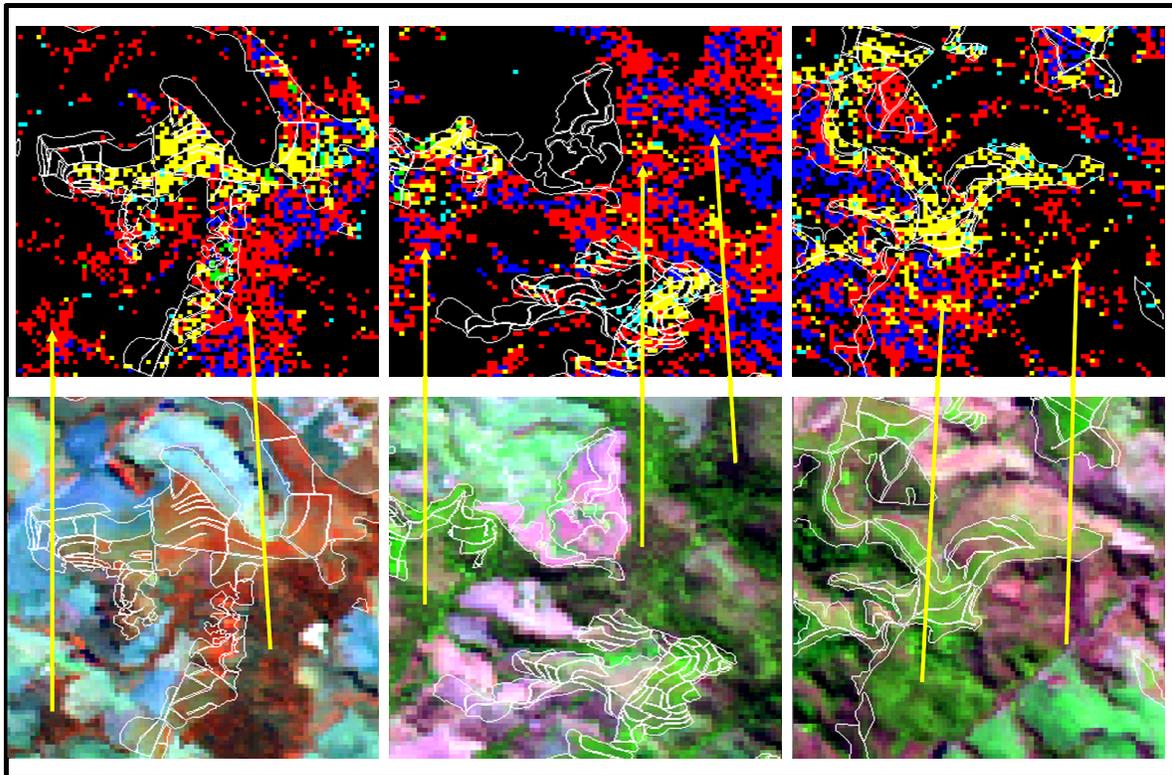


Figura 41: Recortes da imagem TM/Landsat 5 de 15/08/01 (linha inferior) e os correspondentes recortes do mapa temático gerado pela classificação utilizando-se a Técnica 1 (linha superior).

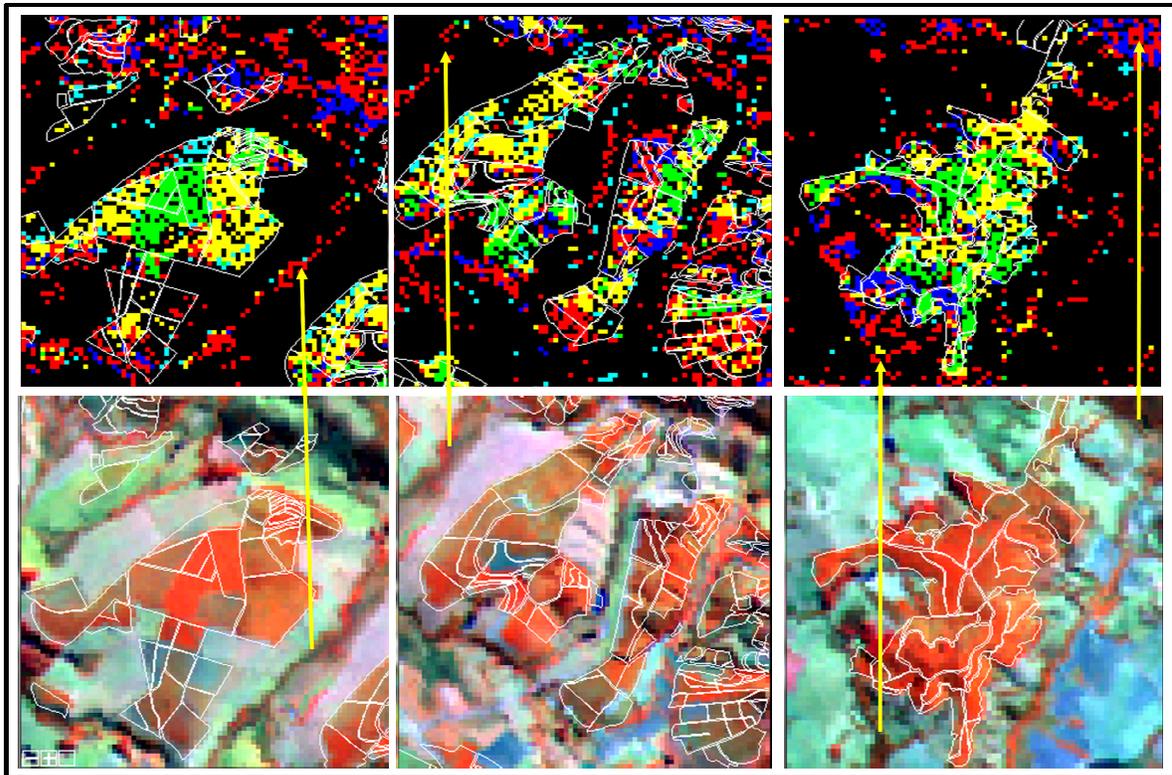


Figura 42: Recortes da imagem TM/Landsat 5 de 15/08/01 (linha inferior) e os correspondentes recortes do mapa temático gerado pela classificação utilizando-se a Técnica 1 (linha superior).

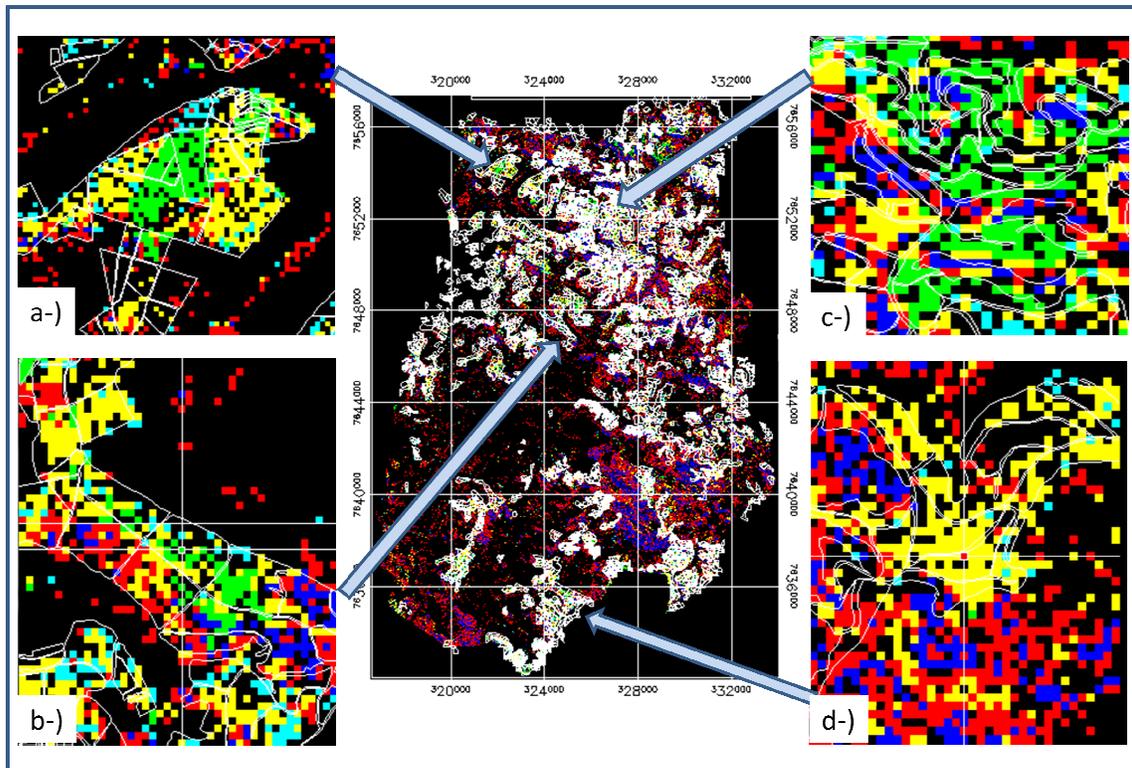


Figura 43: Distribuição espacial dos resultados da classificação supervisionada.

Os resultados discutidos sobre as técnicas de classificação aplicadas, demonstrando-se os locais específicos das ocorrências citadas, correspondem a toda a cobertura da imagem conforme a distribuição espacial dos locais examinados e apresentados na Figura 43.

As setas (linha na cor amarela) nas Figuras 40 e 41 indicam os pontos onde as cores adotadas na classificação, para identificar as classes de café ADEN_ES (pixel na cor vermelha) e ADUL_ES (pixel na cor azul), classificaram áreas de mata densa e mata ciliar.

A utilização das técnicas de fatiamento, em função dos intervalos de iluminação, pode ser direcionada para auxiliar na localização e mapeamento de classes referentes à mata densa e, principalmente, para mata ciliar (próxima dos cursos-d'água) quando utilizadas imagens TM/Landsat 5 nas datas relativas aos resultados desta pesquisa.

4.6. Análise da validação dos dados

Os resultados finais obtidos pela aplicação da técnica de classificação supervisionada passaram pela análise da validação dos dados, conforme tem sido adotado como procedimento na literatura especializada, de forma a se estabelecer parâmetros que orientem quanto à qualidade do processo aplicado. Os resultados estatísticos obtidos na validação dos dados nesta pesquisa são baseados nos valores obtidos pela matriz de erro, pela exatidão global e pelos valores referentes ao coeficiente Kappa. Os valores obtidos sintetizam os resultados da classificação do ponto de vista da análise sobre os erros de inclusão e erro de exclusão que devido à diferença existente entre a área ocupada pela lavoura de café e a área total do município, pode-se constatar algumas discrepâncias nos resultados.

A avaliação dos mapas temáticos foi precedida pelo lançamento de 100 pontos amostrais gerados pelo método aleatório e que foram salvos em arquivo separado e utilizados como conjunto de pontos básico na verificação de todos os mapas temáticos resultantes do processo de classificação.

As matrizes de erro foram organizadas em dois blocos, de forma a apresentarem, no primeiro bloco (ex. Tabela 9a) os resultados referentes ao número de amostras utilizado e os erros de inclusão e omissão. No segundo bloco foram apresentados os valores referentes à exatidão global e o coeficiente Kappa (ex. Tabela 9b).

Os resultados das matrizes de erro, os valores referentes à Exatidão Global e o coeficiente Kappa estão apresentados nas Tabelas 9a até 13b:

Tabela 9: Matriz de Erro (a) e Coeficiente Kappa (b) para a classificação da imagem de 15/08/01 adotando-se a Técnica 1.

Tabela 9a: Matriz de Erro para a classificação da imagem de 15/08/2001.

Máscara	Amostras de Campo			
	Café	Não Café	Soma da Linha	Erro de Inclusão
Café	13	15	28	0,536
Não Café	7	65	72	0,097
Soma da Coluna	20	80	100	
Erro de Omissão	0,35	0,188		

Tabela 9b: Exatidão Global e Coeficiente Kappa para a classificação da imagem de 15/08/2001.

Proporção por Linha		
Classe	Café	Não Café
Café	0,46	0,54
Não Café	0,10	0,90
Exatidão Global	0,78	
Índice Kappa	0,40	

Na matriz construída com os valores amostrais referentes à aplicação da Técnica 1 sobre a imagem de 15/08/01, apresentada nas Tabelas 9a e 9b, pode-se constatar que número de amostras referentes à classe Café foram bastante inferiores às amostras classificadas como Não Café, o que confirma a grande variação entre as áreas ocupadas por lavouras de café em relação a área do município. Verifica-se que 35% (7 amostras) do total de amostras da classe Café não foram classificadas no processamento, ou seja, número que representa a quantidade de amostras que ficaram dentro dos limites dos polígonos de café utilizados como base de verificação, porém, não classificadas no processamento, representando, no total geral, somente 7% quando comparados ao número total de amostras.

O número de amostras correspondente aos acertos na classe Café, representaram 65% (13 amostras) do total de amostras referentes à classe, representando um número 1,87 superior ao número de amostras não classificadas.

A classe Não Café, responsável por um total de 80 amostras, foi caracterizada por 81,25% das amostras e, representou 18,75% das amostras localizadas em área de mata.

O valor referente ao resultado da Exatidão Global reflete o alto percentual de acertos na classificação, porém, fortemente influenciado pelos acertos das amostras da classe Não Café. Quanto ao coeficiente Kappa, reflete a classificação de uma maneira geral, incluindo os erros e acertos, mas espelhando a diferença entre as áreas de lavoura de café (6002 ha) e a área total do município utilizada pela classe Não Café (28.600 ha).

As Tabelas 10a e 10b, representam os valores referentes à matriz de confusão para a classificação utilizando a Técnica 1 na imagem de 05/12/01, onde os resultados mostram a forte redução das amostras classificadas na classe Café, localizando somente 28,57% do total das amostras da Classe Café (6 amostras). A matriz apresenta também, a aumento do número de amostras de café localizadas dentro dos polígonos (15 amostras), mas não classificada pelo processamento (71,43%).

Novamente o valor referente à Exatidão Global reflete os acertos correspondentes às amostras da classe Não Café, responsável por 94,94% (75 amostras) do valor total. O alto índice de acertos na Classe Não Café não compensou os baixos valores de acerto nas amostras da classe Café, refletido no valor do coeficiente Kappa.

A utilização de um número menor de classes de iluminação para a imagem FI de 05/12/01, é comprovada pela forte redução das amostras referentes à mata (erro de inclusão na classe Café) representada por 5,06% das amostras da classe Não Café (4 amostras), o que colabora com a afirmação de que valores de classes de fator de iluminação baixos, contribuem com a identificação de mata e mata ciliar.

Tabela 10: Matriz de Erro (a) e Coeficiente Kappa (b) para a classificação da imagem de 05/12/01 adotando-se a Técnica 1.

Tabela 10a: Matriz de Erro para a classificação da imagem de 05/12/2001.

Máscara	Amostras de Campo			
	Café	Não Café	Soma da Linha	Erro de Inclusão
Café	6	4	10	0,400
Não Café	15	75	90	0,167
Soma da Coluna	21	79	100	
Erro de Omissão	0,714	0,051		

Tabela 10b: Exatidão Global e Índice Kappa para a classificação da imagem de 05/12/2001.

Classe	Proporção por Linha	
	Café	Não Café
Café	0,60	0,40
Não Café	0,17	0,83
Exatidão Global	0,81	
Índice Kappa	0,29	

O pior desempenho representado pela matriz de confusão, refere-se à classificação adotando-se a Técnica 1 para a imagem de 12/04/02 (Tabelas 11a e 11b) onde, os percentuais referentes às amostras da classe Café classificados corretamente, representaram 75% das amostras desta classe porém, representando somente 6% do total de amostras (6 amostras). Em

contrapartida, a quantidade de amostras que identificaram a mata (22 amostras) representou 23,91% das amostras da classe Não Café e, o percentual de acerto na classificação das amostras da classe Não Café, ficou na casa de 76,09% (70 amostras).

Os resultados referentes à classe Não Café novamente contribuíram para o alto valor da Exatidão Global e, mostraram que a baixa identificação da classe Café resultou em valor baixo do coeficiente Kappa.

Tabela 11: Matriz de Erro (a) e Coeficiente Kappa (b) para a classificação da imagem de 12/04/02 adotando-se a Técnica 1.

Tabela 11a: Matriz de Erro para a classificação da imagem de 12/04/2002.

Máscara	Amostras de Campo			
	Café	Não Café	Soma da Linha	Erro de Inclusão
Café	6	22	28	0,786
Não Café	2	70	72	0,028
Soma da Coluna	8	92	100	
Erro de Omissão	0,250	0,239		

Tabela 11b: Exatidão Global e Coeficiente Kappa para a classificação da imagem de 12/04/2002.

Classe	Proporção por Linha	
	Café	Não Café
Café	0,21	0,79
Não Café	0,03	0,97
Exatidão Global	0,76	
Índice Kappa	0,24	

Procurando manter os procedimentos adotados em um processo de classificação supervisionada onde, a localização das amostras de treinamento é feita pelo critério de escolha do operador, baseado no reconhecimento dessas amostras em campo, adotou-se os procedimentos referentes à Técnica 2, utilizando a imagem de 15/08/01 que ofereceu o melhor desempenho na classificação quando comparados os resultados com os valores obtidos na classificação das outras duas datas (05/12/01 e 12/04/02) utilizando-se as mesmas amostras de treinamento para todas as imagens.

Aplicando-se a Técnica 2, na análise visual, constatou-se que o resultado da classificação mostrou-se bastante inferior quanto à identificação e localização dos cafezais contornados pelos vetores utilizados como referencia chegando-se, em algumas situações, a não classificar nenhum pixel nas áreas de café sob baixa iluminação (vide coluna 4 das Figuras 39 e 40). Os resultados constantes da matriz de erro apresentados nas Tabelas 12a e

12b, refletiram resultados próximos aos obtidos na classificação da imagem de 05/12/01. A quantidade de amostras na classe Café que se posicionaram dentro dos vetores de café, mas que não foram classificados representou um percentual de 70,58% (12 amostras) do total de amostras da classe, mostrando a baixa capacidade de identificação dos cafezais plantados em área montanhosa, quando se adota o procedimento de coleta de amostras de treinamento sem levar em consideração o fator iluminação.

Analisando-se o valor obtido pela Exatidão Global, pode-se concluir que o nível de acerto na classe Não Café com 96,39% das amostras da classe (80 amostras) foi decisivo para a definição deste valor e, o baixo percentual atingido pelo acerto na classe Café (29,41%), com 5 amostras, refletiu-se no valor do coeficiente Kappa.

Tabela 12: Matriz de Erro (a) e Coeficiente Kappa (b) para a classificação da imagem de 15/08/01 adotando-se a Técnica 2.

Tabela 12a: Matriz de Erro para a classificação da imagem de 15/08/2001 sem iluminação.

Máscara	Amostras de Campo			
	Café	Não Café	Soma da Linha	Erro de Inclusão
Café	5	3	8	0,375
Não Café	12	80	92	0,130
Soma da Coluna	17	83	100	
Erro de Omissão	0,706	0,036		

Tabela 12b: Exatidão Global e Coeficiente Kappa para a classificação da imagem de 15/08/2001 sem iluminação

Classe	Proporção por Linha	
	Café	Não Café
Café	0,63	0,38
Não Café	0,13	0,87
Exatidão Global	0,85	
Índice Kappa	0,33	

Composição de mapas temáticos foi o processo adotado para a aplicação da Técnica-3, denominada Composição. Este processo constitui-se na criação de um mapa contendo todos os pixels obtidos nas classificações realizadas na aplicação da Técnica 1, eliminando-se somente os pixels sobrepostos, desta forma, criando-se uma imagem que contivesse todos os pixels classificados nas classes Café e Não Café. Utilizando-se a mesma grade de pontos amostrais aplicada para a validação dos dados, gerou-se a matriz de erro mostrada nas Figuras 13a e 13b, obtendo-se, com este procedimento, os melhores resultados na validação dos resultados de classificação.

Os valores percentuais obtidos mostram, neste caso específico da escolha das três datas para classificação, que o número de amostras classificadas como Café atingiu o percentual de 95,24% das amostras da classe (20 amostras), deixando de classificar somente 4,76% das amostras (uma amostra).

Coerência também houve na distribuição das amostras da classe Não Café onde, 77,21% das amostras foram classificadas corretamente (61 amostras), e 22,79% das amostras identificaram áreas constituídas de mata densa ou mata ciliar (18 amostras), mantendo-se as características já analisadas que comprovam a melhoria dos resultados buscados nesta pesquisa, ou seja, a distribuição de faixas de iluminação contribuiu com a identificação e localização das lavouras de café em região montanhosa.

Os valores referentes à Exatidão Global e ao coeficiente Kappa ainda refletiram a discrepância entre o total de área plantada em café e a área total do município onde, o número de amostras da classe Não Café foi muito superior ao número de amostras da classe Café.

Tabela 13: Matriz de Erro (a) e Coeficiente Kappa (b) para a classificação da imagem Composição.

Tabela 13a: Matriz de Erro para a classificação da imagem composição.

Máscara	Amostras de Campo			
	Café	Não Café	Soma da Linha	Erro de Inclusão
Café	20	18	38	0,474
Não Café	1	61	62	0,016
Soma da Coluna	21	79	100	
Erro de Omissão	0,048	0,228		

Tabela 13b: Exatidão Global e Coeficiente Kappa para a classificação da imagem composição.

Classe	Proporção por Linha	
	Café	Não Café
Café	0,53	0,47
Não Café	0,02	0,98
Exatidão Global	0,81	
Índice Kappa	0,56	

A visualização da sobreposição da máscara de café sobre o resultado das classificações apresentou claramente, os contornos dos polígonos utilizados para verificação, delimitando os pixels de café nas regiões montanhosas do município. Outro aspecto observado é o fato de que a máscara que representa o cafeeiro plantado perfaz 6.002 ha distribuídos em uma área de 28.600 ha que representa a área de cobertura do município de Guaxupé/MG, essa

diferença na distribuição espacial pode ter influenciado na quantidade de pixels classificados nas classes Café e Não Café.

Com relação às classificações, as classes que mais se ajustaram à máscara de café foram as classes de amostras denominadas ADUL_IL e ADEN_MI autenticando o uso diferenciado de classes de iluminação na fase de identificação de amostras resultantes dos fatores f_1 e f_2 obtidos da Análise por Principais Componentes.

Áreas cobertas pelas classes ADUL_ES e ADEN_ES, quando localizadas próximas de fundo de vale, se confundiram com mata em diversos estágios de crescimento.

As classificações mostraram também que, quando suprimidas as classes de ADUL_ES e ADEN_ES, a supressão das áreas de mata em região de baixa iluminação se tornaram bastante fortes na máscara de classificação, destacando a visualização das culturas de café nas regiões mais iluminadas. De modo inverso, é possível a utilização destas classes como contribuições na identificação de matas em regiões pouco iluminadas.

4.7. Análise dos resultados da determinação de área dos mapeamentos

Buscando a confirmação dos resultados apresentados nos processos de classificação e validação dos dados que, com base nos resultados de Exatidão Global e coeficiente Kappa, apresentaram valores que não retrataram com a eficiência usual, a real situação da distribuição do cafeeiro na região onde, valores referentes à Exatidão Global destacaram o maior número de amostras localizadas fora da área ocupada pelo cafeeiro e, as amostras do cafeeiro se apresentaram em muito menor número, durante a validação, devido à ocupação muito menor em relação à área do município, procedeu-se à determinação das áreas efetivamente classificadas.

Utilizando os mapas resultantes da aplicação da classificação supervisionada, foram geradas imagens onde, as áreas ocupadas pelo cafeeiro foram transformadas em valor igual a um (1) e as áreas de não café, iguais a zero (0). As cinco imagens resultantes (três mapas referentes à aplicação da Técnica 1, um mapa da Técnica 2 e um mapa relativo à aplicação da Técnica 3) foram multiplicadas, uma a uma, com a imagem gerada do mapa de vetores de café utilizado como referencial da área de plantio do município de Guaxupé.

O resultado da utilização do comando de matemática de bandas do software Idrisi, gerou imagens e relatórios da quantificação dos pixels em comum, ou seja, as multiplicações

das imagens resultaram em imagem da quantidade de áreas comuns entre o café classificado e o café existente (mapa de vetores fornecido pela Cooxupé). Dessa forma, foi possível verificar o número real da área cafeeira, em hectares, resultante de cada processo de classificação. Na Tabela 15 é possível verificar a área e o percentual do cafeeiro realmente classificado quando comparado com a efetiva área plantada no município no período relativo a esta pesquisa:

Tabela 15: Quadro comparativo das áreas cafeeiras classificadas

Imagens	Área do cafeeiro (Ha)	Percentual
Técnica 1 – 15/08/01	2.975,67	49,57%
Técnica 1 – 05/12/01	2.159,46	35,97%
Técnica 1 – 12/04/02	2.297,79	38,27%
Técnica 2 – 15/08/01	1.164,51	19,40%
Técnica 3 – Composição	4.385,70	73,06%
Referência	6.002,64	100,00%

O método adotado para a quantificação das áreas ocupadas pela lavoura de café, utilizando-se a matemática de bandas, apresentou o percentual real do cafeeiro identificado no processo de classificação, que neste caso, não levou em conta os pixels classificados fora dos limites do cafeeiro e presentes nas imagens classificadas originais. Na Figura 44 podem ser visualizados os mapas resultantes da operação de multiplicação entre as imagens classificadas e a imagem de referência, utilizados para a quantificação das áreas apresentadas na Tabela 15.

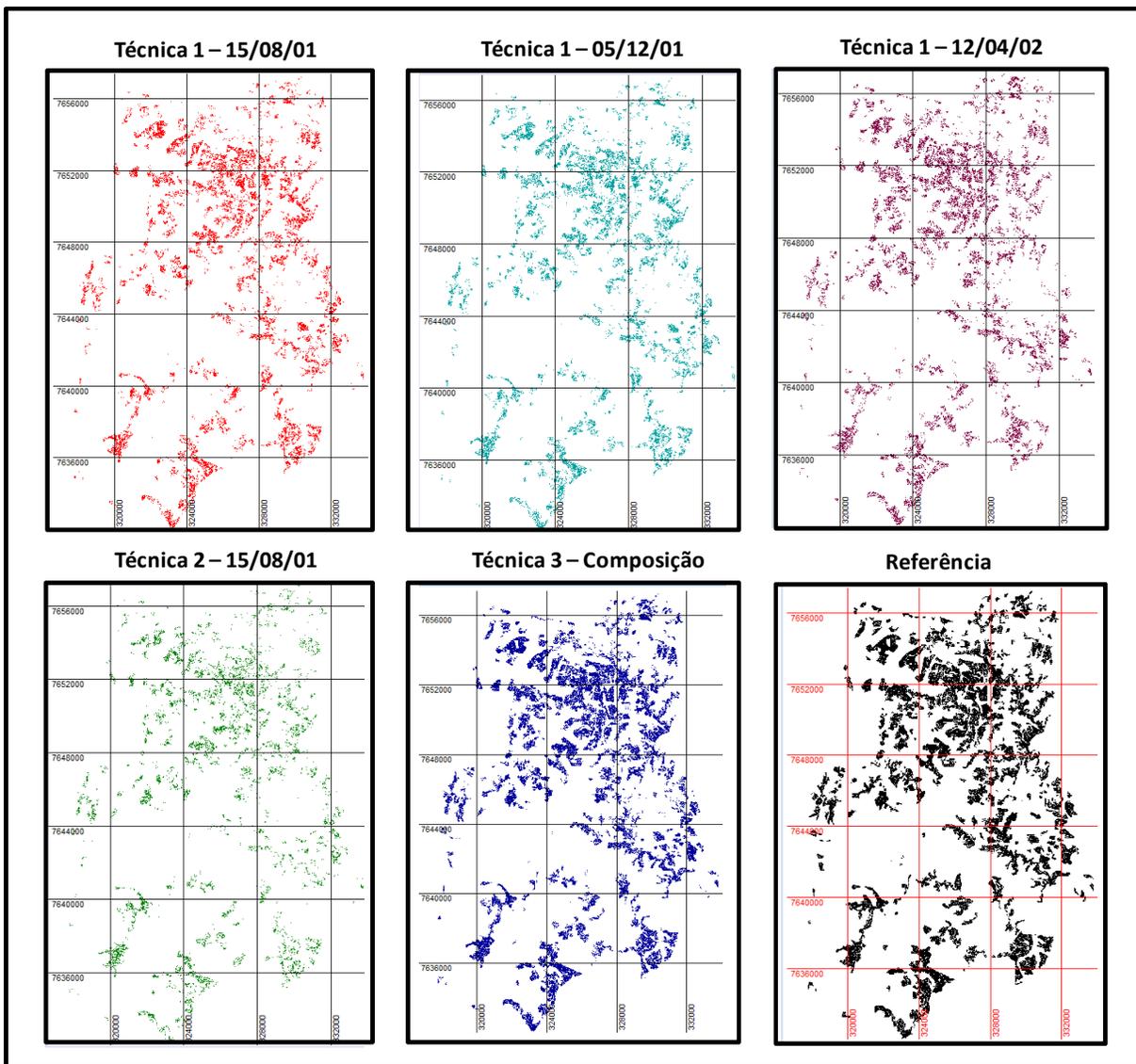


Figura 44: Mapas resultantes da operação de matemática de bandas entre a imagem de referência e as imagens classificadas.

5. CONCLUSÃO

As técnicas de processamento digital de imagens adotadas nesta pesquisa comprovaram que a aplicação da correção atmosférica utilizando dados do sensor Modis resultaram na melhora da qualidade espectral da imagem do sensor ETM+/Landsat 7.

A aplicação da normalização radiométrica atingiu os objetivos esperados quando se pretende comparar informações espectrais em datas diferentes.

A metodologia proposta nesta pesquisa, com base nos resultados obtidos pela aplicação das técnicas de Análise por Principais Componentes e das máscaras resultantes da classificação, confirma a possibilidade de identificação do cafeeiro plantado em região montanhosa, em percentual relativamente superior quando comparada com métodos de classificação que não consideram o fator iluminação obtidos por meio de modelo digital de terreno.

Resultados de classificação de culturas de café de imagens individuais, nas datas utilizadas nesta pesquisa, em áreas de relevo montanhoso, apresentaram resultados bastante variados e baixos quanto à localização do cafeeiro, porém a composição de imagens em datas significativas pôde apresentar resultados positivos quanto à validação dos dados por meio da utilização da técnica de Exatidão Global e coeficiente Kappa, abrindo perspectivas otimistas quanto à aplicação da metodologia direcionada para a composição de imagens em outras datas que caracterizem diferentes comportamentos espectrais da cobertura ocupada pela lavoura do café.

A imagem utilizada na Técnica 3, resultante da composição das imagens classificadas nas três datas, apresentou os resultados mais significativos, tanto no coeficiente Kappa quanto nos erros de omissão na classe Café e de inclusão na classe Não Café, porém, a validação dos dados não representou a área efetivamente classificada, principalmente, pela diferença entre a área total do município e área realmente plantada com a lavoura de café, tendo a técnica de matemática de bandas, retratado mais efetivamente, os locais classificados como café.

A divergência entre os valores obtidos da validação dos dados e os valores referentes à matemática de bandas, pode estar refletida na escolha do tipo de amostragem utilizado onde, a amostragem aleatória, apresenta como principal vantagem, a independência das amostras obtidas aleatoriamente. Entretanto, nesse método existe grande possibilidade de se perder padrões importantes.

O objetivo principal desta pesquisa foi plenamente atingido com a identificação e mapeamento da área cafeeira no município de Guaxupé/MG em um percentual considerado bom para a localização inicial do cafeeiro em imagens de média resolução. A técnica adotada permite a localização do cafeeiro em áreas desconhecidas por parte dos tomadores de decisão e, principalmente, para a verificação das áreas cafeeiras já mapeadas por imagens de alta

resolução, sob o ponto de vista da identificação das áreas com supressão da lavoura para mudanças de cultura ou renovação do cafeeiro ao longo do tempo.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALVES, E. A.; PINTO, F. A. C.; QUEIROZ, D. M., SANTOS, N. T.; ZANDONADI, R. S. **Análise do efeito da face de exposição das plantas de café ao sol sobre a produção e maturação dos frutos.** In: 30º Congresso Brasileiro de Pesquisas Cafeeiras – São Lourenço – MG, p. 121-122, 2004.

ALVIM, P. de T. **Tree growth periodicity in tropical climates.** In: ZIMMERMANN, M. H., ed. The formation of wood in forest trees. New York, Academic Press, 1964. p.479-95.

BARROS, R. S. & MAESTRI, M. **Influência dos fatores climáticos sobre a periodicidade de crescimento vegetativo do café (*Coffea arabica* L.).** Revista Ceres, Viçosa, 21: 268-279, 1974.

BOLSTAD, P. V. e STOWE, T. **An evaluation of DEM accuracy: elevation, slope and aspect.** Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, vol.60, 11, p 1327-1332, 1994.

BENVENUTI, F. A. **Relação de índices espectrais de vegetação com a produtividade da cana-de-açúcar e atributos edáficos.** 96p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Estadual de Campinas, Unicamp, Campinas, 2005.

BROWNING, G. **Shoot growth in *Coffea arabica* L. I. Responses to rainfall when the soil moisture status and gibberellin supply are not limiting.** Journal of Horticultural Science, London, 50:1-11, 1975.

CÂMARA, G.; CASANOVA, M. A.; HEMERLY, A. S.; MAGALHÃES, G. C.; MEDEIROS, C. M. B. **Anatomia de Sistemas de Informação Geográfica.** Campinas: Instituto de Computação, UNICAMP, 1996.

CAMARGO, A.P.; CAMARGO, M.B.P. **Definição e esquematização das fases fenológicas do cafeeiro arábica nas condições tropicais do Brasil.** Bragantia. Campinas, SP. v.60. n.1. p.65-68, 2001.

CAMARGO, A.P.; FRANCO, C.M. **Clima e fenologia do cafeeiro** . In: CULTURA DE CAFÉ NO BRASIL – MANUAL DE RECOMENDAÇÕES. 5.ed. Rio de Janeiro: Instituto Brasileiro do Café, Ministério da Industria e Comercio, p.19-50, 1985.

CAMARGO, M.B.P.; SANTOS, M.A.; PEDRO JUNIOR, M.J.; FAHL, J.I.; BRUNINI, O.; MEIRELES, E.J.L.; BARDIN, L. **Modelo agrometeorológico de monitoramento e de estimativa de quebra de produtividade como subsidio à previsão de safra de café (*Coffea arabica L.*): resultados preliminares.** In: Simpósio de Pesquisa dos Cafés do Brasil, 3., 2003. Porto Seguro, Anais, Porto Seguro: Consórcio Brasileiro de Pesquisa e Desenvolvimento do Café, p. 75-76, 2003.

CAMPBELL, J. B. **Introduction to remote sensing.** New York, NY. Guilford Press, 1987.

CANEELL, M. G. R. **Effects of fruiting, defoliation and ring-barking on the accumulation and distribution of dry matter in branches of *Coffea Arabica L.* in Kenya.** Experimental Agriculture, London, 7: 63-74, 1971.

CANTY, M. J.; NIELSEN, A. A.; SCHMIDT, M. **Automatic radiometric normalization of multitemporal satellite imagery.** Remote Sensing of Environment, v. 91, p 441 – 451, 2004.

CARVALHO, H. **Sistemática do gênero *Coffea* e descrição das variedades econômicas de *C. arábica*.** In: I - Curso de Cafeicultura. Instituto Agrônômico do Estado de São Paulo. Campinas. p. 17-36, 1957.

CAVAYAS, F.; TEILLET, P.M. **Geometric model simulations of conifer canopy reflectance.** In: international colloquium on spectral signatures of objects in remote sensing, 1885, Les Ares, France. Proceedings... Montfavet: INRA, 1985. P.183-190.

CENTENO, J. A. S. **Sensoriamento remoto e processamento de imagens digitais**. Curitiba: Ed. Curso de Pós Graduação em Ciências Geodésicas, Universidade Federal do Paraná, 2003.

CHAVES, P. S. **An improved dark-object subtraction technique for atmospheric scattering correction of multispectral data**. Remote Sensing of Environment, vol. 24 (3), p. 459-479, 1988.

CIVCO, D. L. **Topographic normalization of Landsat thematic mapper digital imagery**. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, vol. 55, p. 1303-1309, 1989.

COHEN, J. A. **Coefficient of agreement for nominal scales**. Educational and Psychological Measurement, Durham, v.20, n.1, p.37-46, 1960.

COLVOCORESSES, A. P. **An automated mapping satellite system (MAPSAT)**. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing. 48 (10), 1585-1591, 1982.

COMBAL, B.; ISAKA, H. **The effects of small topographic variations on reflectance**. IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing, v. 40, n. 3, p.663-670, 2002.

CORDERO-SANCHO, S. **Landsat spectral analysis, waveband selection and classification accuracy assesment of coffee plantations in Central America**. Master thesis, Department of Forest Management, University of Maine, 2004.

COVRE, M. **Influência dos parâmetros culturais de citros sobre dados TM/Landsat**. São José dos Campos: INPE, 1989. 241p. (INPE – 4856 – TDL/367).

CRÓSTA, A. P. **Processamento digital de imagens de sensoriamento remoto**. 3ª Ed. IG/UNICAMP, Campinas, 1999.

CURRAN, P. J. **Principles of Remote Sensing**. New York: Longman Group Limited, 1985.

CURRAN, P. J.; MILTON, E. J. **The relationship between the chlorophyll concentration, LAI and reflectance of a simple vegetation canopy.** International Journal of Remote Sensing, 4, p.247-256, 1983.

DAVIS, F. W. & DOZIER, J. **Information analysis of a spatial database for ecological land classification.** Photogrammetric Engineering & Remote Sensing. 56, p. 605-613, 1990.

EPIPHANIO, J. C. N.; LEONARDI, L.; FORMAGGIO, A. R. **Relações entre parâmetros culturais e resposta espectral de cafezais.** Pesquisa Agropecuária Brasileira, Brasília, v.29, nº3, p. 439-447, 1994.

EPIPHANIO, J. C. N.& FORMAGGIO, A. R. **Abordagens de uso de nível de cinza e de refletância em sensoriamento remoto com dados de satélites.** In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Natal, 1988. Anais.. São José dos Campos: INPE, 1988, p.400-405..

FAZUOLI, L. C. **Genética e melhoramento do cafeeiro. Em: Cultura do cafeeiro – fatores que afetam a produtividade.** p. 87-114. A. B. Rena, E. Malavolta, M. Rocha & T. Yamada, ed. Associação Brasileira para Pesquisa da Potassa e do Fosfato. Piracicaba. 1986.

FEDERACION NACIONAL DE CAFETEROS DE COLOMBIA. Departamento de Estudios y Proyectos Basicos Cafeteros. **Aplicaciones de SPOT em zona cafetera colombiana.** Bogotá, 1987.

FLORINSKY, I.V. **Combined analysis of digital terrain models and remotely sensed data in landscape investigations.** Progress in Physical Geography 22,1, pp. 33-60, 1998.

FRANKLIN, J., LOGAN, T.L., WOODCOCK, C.E. AND STRAHLER, A.H. **Coniferous forest classification and inventory using Landsat and digital terrain data.** IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing GE-24, 139-149, 1986.

FUJISADA, H. **Overview of ASTER Instrument on EOS-AM1 Platform.** Proceedings of Spie, vol. 2268. The International Society for Optical Engineering. pp.14-36, 1994.

FUJISADA, H.; BAILEY, G. B.; KELLY, G. G.; HARA, S. & ABRAMS, M. J. **Aster DEM Performance.** IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, v. 43 (12), p. 2707-2714, 2005.

FUJISADA, H.; **ASTER Level 1 data processing algorithm:** IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, v. 36, n. 4, p. 1101-1112, 1998.

FUKUSHIMA, Y. **Generation of DTM using SPOT image near Mt. Fuji by digital image correlation.** International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, 27, Part B3, Commission III, p. 225-234, 1988

GATES, D. M.; KEEGAN, H.J; CHLETER, J.C.; WEIDNER, V. R. **Spectral properties of plants.** Applied Optics, v.4, n1, p.11-20, 1965.

GAUSMAN, H. W. **Leaf reflectance of near infrared.** Photogrammetric Engineering & Remote Sensing 51, 1725-1734, 1985.

GINDEL, L. **Ecological behavior of the coffee plant under semi-arid condutions.** Coffee, Turialba, 4;p.49-63, 1962.

GOETZ, S. **Digital Terrain Representation and Applications.** Unpublished Masters thesis, Department of Geography, University of California, Santa Barbara. 1984.

GOUVEIA, N.M. **Estudo da diferenciação e crescimento de gemas florais de *Coffea arabica* L. Observações sobre a antese e maturação dos frutos.** 1984, 237p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola). Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

GURTLER, S. **Estimativa de área agrícola a partir de sensoriamento remoto e banco e dados de pixels amostrais.** 179 p. (Dissertação de Mestrado). Instituto de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2003.

GUYOT, G. **Optical properties of vegetation canopies.** In: STEVEN, M. D.; CLARCK, J. A. Applications of remote sensing in agriculture. London, cap.2, p.19-43. 1989.

HALL, F. G.; STREBEL, D. E.; NICKESON, J. E.; GOETS, S. J. **Radiometric Rectification: Toward a Common Radiometric Response Among Multidate, Multisensor Imagens.** Remote Sensing of Environment, New York, 35:11-27, 1991.

HIRANO, A.; WELCH, R.; LANG, H. **Mapping from ASTER stereo image data: DEM validation and accuracy assessment.** ISPRS – Journal of Photogrammetry & Remote Sensing. n°57 , p.356-370, 2003.

HOFFER, R. M. **Biological: physical considerations in applying computer-aided analysis techniques to remote sensing data.** In: Swain, P. H.: Davis, S. M. Remote Sensing the Quantitative Approach, New York: McGraw Hill, p. 227-89.1978.

HOFFER, R. M.; JOHANNSEN, C. J. **Ecological potentials in spectral signature analysis.** In: Johnson, P. L. Remote Sensing in Ecology. Ed. Univ. of Georgia Press, Athens, G. A. 1969. p. 1-16.

HOLBEN, B.; JUSTICE, C. **The topographic effect on spectral response from Nadir pointing sources.** Photogrammetric Engineering. & Remote Sensing, vol. 46, p. 1191-1200, 1980.

INSTITUTO BRASILEIRO DO CAFÉ. **Cultura do café no Brasil: manual de recomendações.** 4.ed. Rio de Janeiro, IBC/GERCA, 1981.

IWASAKI, A.; FUJISADA, H. & TORII, M. **ASTER initial image evaluation.** Proc. SPIE, v. 4169, p. 56-66, 2000.

JOLLIFFE, I.T. **Principal Component Analysis**. 2^a Ed. UK: Springer, 2002. 487 p.

JUSTICE, C.O., WHARTON, S.W. AND HOLBEN, B.N. **Application of digital terrain data to quantify and reduce the topographic effect on Landsat data**. International Journal of Remote Sensing 2, 213-30, 1981.

KÄÄB, A. **Combination of SRTM-3 and repeat ASTER data for deriving alpine glacier flow velocities the bhutan Himalaya**. Remote Sensing of Enviroment. 94, p.463-474, 2005.

KEEFER, B. J.; SMITH, J. L.; GREGOIRE, T. G. **Modeling and evaluating the effects of stream mode digitizing errors on map variables**. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, Bethesda, v.57, n.7, p.957-963, 1991.

KIMES, D. S.; KIRCHNER, J. A. **Modeling the effects of various radiant transfers in mountainous terrain on sensor response**. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 19 (2), p. 100-108, 1981.

LANG, R. H.; WELCH, R.; **Algorithm theoretical basis document for Aster digital elevation models**, 1999.

http://eosps0.gsfc.nasa.gov/eos_homepage/for_scientists/atbd/docs/ASTER/atbd-ast-14.pdf

(acessado em 19/11/2006).

LEONARDI, L. **Influencia de parâmetros culturais de cafezais sobre os dados TM/Landsat-5**. 141p. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) INPE. São José dos Campos,1990.

LEPRIEUR, C. E., DURAND, J. M. AND PEYRON, J. L. **Influence of topographic on forest reflectance using Landsat Thematic Mapper and digital terrain data**. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing 54, 491-496, 1988.

LILLESAND, T. M. & KIEFEL, R. W. **Remote sensing and image interpretations**. 3.a Ed. New York, John Wiley & Sons. Inc., 1994.

LIMA, L. C. **Notícias**. 2ª Conferencia Mundial do Café. Salvador, BA. Setembro/2005. Tempo Comunicação, 2005.

MALAVOLTA, E. **Nutrição, adubação e calagem para o cafeeiro**. In: Cultura do cafeeiro: fatores que afetam a produtividade. Piracicaba: Associação Brasileira para Pesquisa da Potassa e do Fosfato, 1986.

MALAVOLTA, E. **História do café no Brasil: agronomia, agricultura e comercialização**. São Paulo: Ceres. 464p. 2000.

MASON, D. C.; CORR, D. G.; CROSS, A.; HOGG, D. H. LAWRENCE, M. P. & TAILOR, A. M. **The user of digital map data in segmentation and classification of remotely-sensed images**. International Journal of Geographical Information Systems, 2 (3): p.195-215. 1988.

MATIELLO, J. B. **Quentes como o café: indicações de uso de equipamentos, produtos e serviços para a cafeicultura**. Rio de Janeiro: IBC Editora, 1999.185p.

MATHER, P. M. **Computer processing of remotely sensed imagens: an introduction**. 2.a Ed.. England: John Wiley & Sons Ltd., 1999.

MAUNE, D. F. **Digital elevation model technologies and applications: the DEM users manual**. New York, 2001.

MENDES, J.E.T. **Citologia das espécies de Coffea. Sua importância para o melhoramento**. In: I Curso de Cafeicultura. Instituto Agrônômico do Estado de São Paulo. Campinas. p.37-46, 1957.

MERCANTE, Erivelto. **Dinâmica espectral da cultura da soja ao longo ciclo vegetativo e sua relação com a produtividade na região oeste do Paraná.** 241p. Tese (Doutorado em Planejamento e Desenvolvimento Rural Sustentável) – Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, 2007.

MIARELLI, M. **Notícias.** 2ª Conferencia Mundial do Café. Salvador, BA. Setembro/2005. Tempo Comunicação, 2005.

MIGUEL, A.E.; ALMEIDA, S. R.; MATIELLO, J. B. & CARVALHO, S. P. **Efeito da redução do espaçamento entre plantas na linha, em cultivares Catuaí Vermelho e Mundo Novo no sistema adensado e no convencional. Resultados das três primeiras colheitas.** 13.a CBPC (São Lourenço). 94-96p. 1986.

MOELLERING, H. & KIMERLING, A. J. **A new digital slope-aspect display process.** Cartography and Geographic Information Systems, 17, p. 151-160, 1990.

MOREIRA, M. D. **Fundamentos do sensoriamento remoto e metodologia de aplicação.** São José dos Campos: INPE, 2001.

MOREIRA, A. M.; ADAMI, M. RUDORFF, B. F. T. **Análise espectral e temporal da cultura de café em imagem Landsat.** Pesquisa Agropecuária Brasileira, Brasília. v. 39, p. 223-231, 2004.

NASCIMENTO, C. R. & ZULLO JR., J. **Proposta metodológica de utilização de dados do sensor MODIS para correção atmosférica de imagens NOAA/AVHRR visando a geração de imagens NDVI em modelos agrometeorológicos.** In: XIV Congresso Brasileiro de Agrometeorologia. Campinas – SP, 2005.

NIELSEN, A. A.; CONRADSEN, K.; SIMPSON, J. J.. **Multivariate alteration detection (MAD) and MAF processing in multispectral, bitemporal image data: New approaches to change detection studies.** Remote Sensing of Environment. v 64, p. 1–19, 1998.

NIELSEN, A. A.; CONRADSEN, K.; ANDERSEN, O. B.. **A change oriented extension of EOF analysis applied to the 1996-1997 AVHRR sea surface temperature data.** Physics and Chemistry of the Earth. v 27(32-34), p. 1379–1386, 2002.

NOVO, E. M. L. M. **Sensoriamento remoto: Princípios e Aplicações.** 12 ed. São Paulo- SP, 1992.

NUNES, M. A.; BIERHUIZEN, J. F.; PLOEGMAN, C. **Studies on the productivity of coffee. I. Effect of light, temperature and CO₂ concentration on photosynthesis of *Coffea arabica*.** Acta Botanica Neerlandica, Leiden, 17:93-102, 1968.

PALMER, M.W. <http://www.okstate.edu/artsci/botany/ordinate/PCA.htm>, 2002.

PONZONI, F. J. **Comportamento espectral da vegetação. In: Sensoriamento remoto: reflectância dos alvos naturais.** Editora UnB, EMBRAPA, Brasília (DF), 2001.

PONZONI, F. J.; SHIMABUKURO, Y. E. **Sensoriamento remoto no estudo da vegetação.** A. Silva Vieira Ed. São José dos Campos, 2007.

QUINN, P.; BEVEN, K.; CHEVALLIER, P. & PLANCHON, O. **The prediction of hillslope flow paths for distributed hydrological modeling using digital terrain models.** Hydrological Processes. 5, p. 59-79, 1991.

RABUS, B., EINEDER, M. ROTH, A., BAMLER, R. **The shuttle radar topography mission: a new class of digital elevation models acquired by spaceborne radar.** Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. 57, p. 241-262, 2003.

RENA, A.B. & MAESTRI, M. **Fisiologia do cafeeiro.** Informe agropecuário, v.11, n.126, p.26-40, 1986.

RODRIGUEZ, V.; GIGORD, A. C. G.; & MINIER, P. **Evaluation of the stereoscopic accuracy of the SPOT satellite.** Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 54 (2), p. 217-221, 1988.

RICHARDS, J. A. & JIA, X. **Remote Sensing Digital Image Analysis: An introduction.** 3a. Ed. New York. Springer – Verlag Berlin Heidelberg, 2006.

RUDORFF, B. F. T.; AULICINO, L. C. M.; MOREIRA, M. A. **Tecnologias geoespaciais no gerenciamento da cultura de maçã.** Revista Brasileira de Fruticultura, V. 25, p.108-110, 2003.

RUFINO, G., MOCCIA, A., ESPOSITO, S. **DEM Generation by Means of ERS Tandem Data.** IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. Vol. 36, 6, 1998.

RUMMEL, R.J. **Applied Factor Analysis.** USA: Northwestern University Press, 1970. 609 p.

SABINS, F. F., JR. **Remote Sensing: Principles and Interpretation.** 2ª Ed., Freeman, New York, 1986.

SALOMONSON, V. V.; TOLL, D. L. Spectral band characteristics of the EOS Moderate Resolution Imaging Spectrometer (MODIS-N) facility instrument. **Advances in Space Research**, v., n.3, p.231-236, 1990.

SANDALJ, V. **O Café: Ambientes e Diversidade.** 2ª Ed. Rio de Janeiro: Casa da Palavra, 2003.

SCHOWENGERDT, Robert A. **Remote Sensing: models and methods for image processing.** 2.Ed. Tucson, Academic Press.1997.

SCHOTT, J. R.; SAVAGGIO, C.; VOLCHOK, W. J.. **Radiometric scene normalization using psedo-invariant features.** Remote Sensing of Environment. 26, pp. 1-16, 1988.

SETZER, J. **Atlas Climático e Ecológico do Estado de São Paulo**. Comissão Interestadual da Bacia Paraná-Uruguaí, 1966. 61p.

SHASBY, M.; CARNEGGIE, D. **Vegetation and terrain mapping in Alaska using Landsat MSS and digital terrain data**. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing 52, 779-86, 1986.

SKIDMORE, A. K. **A comparison of techniques for calculating gradient and aspect from a gridded digital elevation model**. International Journal of Geographical Information Systems (3) 4: 323-334, 1989.

SPANNER, M. A. **The use of DEM topographic data for soil erosion modeling within a GIS**. Proceedings, ASP Annual Meeting. p. 314-321, 1983.

STORY, M.; CONGALTON, R. G. **Accuracy assessment: a user's perspective**. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, Bethesda, v.52, n.3, p.397-399, 1986.

STRAHLER, A.H. **Stratification of natural vegetation for forest and rangeland inventory using Landsat digital imagery and collateral data**. International Journal of Remote Sensing 2, 15-41, 1981.

SYRÉN, P. **Forest canopy reflectance as a function of solar elevation and forest parameters**. Proceedings of the International Geoscience and Remote Sensing (IGARSS'91). Espoo, Finland. P. 1537-1540, 1991.

TANRÉ, D., DERRO, C., P., HERMAN, M., MORCRETTE, J.J., PERBOS, J., DECHAMPS, P.Y. **Simulation of the Satellite Signal in the Solar Spectrum. User's Guide**, L.O.A., Lille, 264p, 1986.

TARDIN, A. T.; SANTOS, A. P.; BATISTA, G. T.; OHARA, T.; SANTOS, J. R.; HERNANDEZ FILHO, P.; NOVAES, R. A.; CHEN, S. C.; SHIMABUKURO, Y. E. **Uso do**

sensoriamento remoto para avaliação de danos causados pela geada no Noroeste do Paraná. São Jose dos Campos, INPE, 1977.

TARDIN, A. T.; ASSUNÇÃO, G. V.; SOARES, J. V. **Análise preliminar de imagens TM visando a discriminação de café, citrus e cana-de-açúcar na região de Furnas – MG.** Pesquisa Agropecuária Brasileira, v.27, p.1355-1361. 1992.

TEILLET, P. M. & FEDOSEJEVS, G. **On the dark target approach to atmospheric correction of remotely-sensed data.** Canadian Journal of Remote Sensing, 21, p. 374-387, 1995.

THEOBALD, D. M. **Accuracy and bias issues in surface representation.** In: Accuracy of Spatial Databases. Bristol , PA pp. 99-106. 1994.

THOMSON, A. G.; JONES, C. **Effects of topography on radiance from upland vegetation in north wales.** International Journal of Remote Sensing. Vol.11, p. 829-840,1990.

VALERIANO, M. M. **Equação para o cálculo do Fator de Iluminação.** São José dos Campos, SP, 2008.

VALERIANO, M.M. **Modelo digital de variáveis morfométricas com dados SRTM para o território nacional: o projeto TOPODATA.** In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto (SBSR), 12, 16 a 21 abr. 2005, Goiânia. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2005. Artigos. p. 3595-3602. ISBN 85-17-00018-8. On-line. Disponível em: <http://marte.dpi.inpe.br/col/ltid.inpe.br/sbsr/2004/10.29.11.41/doc/3595.pdf>. Acesso em 06 jun. 2007.

VELLOSO, M. H.; MCNEILL, H. W. **Aplicações de sensoriamento remoto na cafeicultura.** In: Programa de aplicações de sensoriamento remoto do Instituto Brasileiro do Café. Rio de Janeiro, IBC/GERCA. 19p. 1971.

VELLOSO, M. H. **Coffee inventory through orbital imagery.** Rio de Janeiro, IBC/GERCA, 20 p. 1974.

VELLOSO, M. H.; SOUZA, D. D. **Sistema automático de inventário cafeeiro.** Rio de Janeiro, IBC/CERES, 1976.

VIANA, A. S.; CAMARGO, A. P.; FREIE, D. **Efeito do espaçamento progressivo na produção de café por cova e por área.** In: CONGRESSO BRASILEIRO DE PESQUISAS CAFEEIRAS, 11., Londrina, 1984. **Resumos.** Rio de Janeiro, IBC/GERCA, 1984.p.171-3.

VIEIRA, T. G. C., ALVES, H. M. R., BERTOLDO, M. A., SOUZA, V. C. O. **Uso de geotecnologias na avaliação espaço-temporal das principais regiões cafeeiras de Minas Gerais.** In: XII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Goiânia, Abril-2005, p. 313-320, 2005.

VIEIRA, T. G. C., ALVES, H. M. R., LACERDA, M. P. C., VEIGA, R. D., EPIPHANIO, J. C. N. **Crop parameters for the evaluation of the spectral response of coffee (Coffea Arabica) áreas within the State of Minas Gerais, Brazil.** INPE/DSR, São José dos Campos, SP, Brasil, 2004.

WELCH, R.; MARKO, W. **Cartographic potential of spacecraft line-array camera system: Stereosat: Photogrammetric Engineering and Remote Sensing,** v. 47, n. 8, p. 1173-1185, 1981.

WOODHAM, R.J. AND GRAY, M. H. **An analytic method for radiometric of satellite multispectral scanner data.** IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing GE-25, 258-271, 1987.

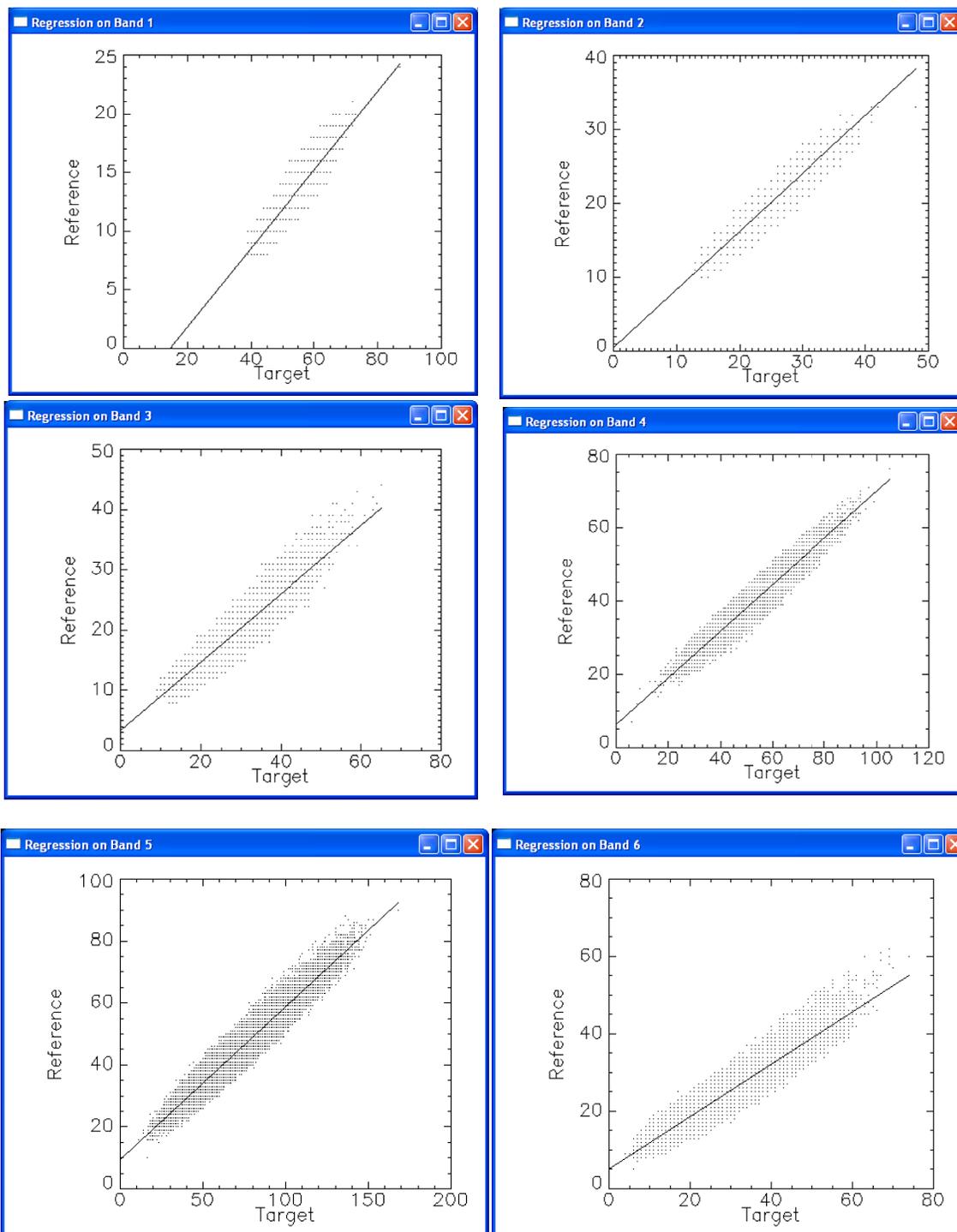
YUAN, D.; ELVIDGE, C. D. **Comparison of relative radiometric normalization techniques.** ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing. n 51, p. 117-126, 1996.

ZULLO, JR., J. **Correção atmosférica de imagens de satélite e aplicações.** 1994. 190p. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica)- Faculdade de Engenharia Elétrica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

7. APÊNDICES

Apêndice I

RESULTADO DA NORMALIZAÇÃO DA IMAGEM DO L5 15 AGO 2001



Radiometric calibration with MAD

Fri Aug 22 15:17:50 2008

Reference: F:\MESTRADOMATERIAL E MÉTODOS\L7_REC3_RSL7_REC3_RS

Target:

F:\MESTRADO\REGISTRO\L5_05Dez2001\L5_05DEZ2001_NORTE_SAD69_REC_REG_FINAL

Compiled module: EIGENQL.

orthogonal regression using 36033 no-change pixels ...

Compiled module: CORRELATE.

channel: 1

b= -10.1832 +- 0.054220067

a= 0.330944 +- 0.00081730075

channel: 2

b= -3.24723 +- 0.044264871

a= 0.671706 +- 0.0013957209

channel: 3

b= 1.03189 +- 0.041581477

a= 0.566054 +- 0.0014488179

channel: 4

b= -5.35949 +- 0.13402151

a= 0.419860 +- 0.0011884722

channel: 5

b= -10.4686 +- 0.12484872

a= 0.596416 +- 0.0013411534

channel: 6

b= -0.188314 +- 0.063120252

a= 0.770020 +- 0.0020299943

Comparison Statistics using 18017 test pixels

Means

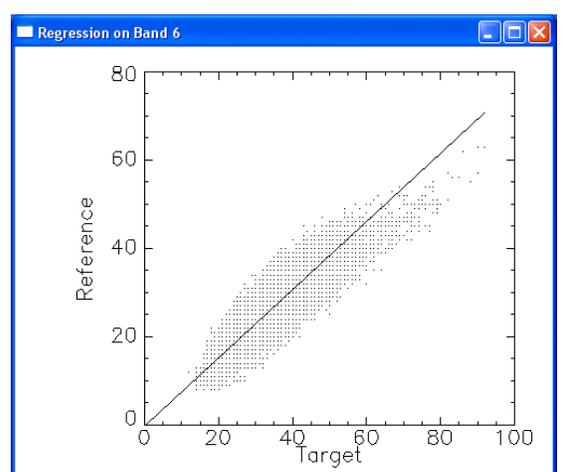
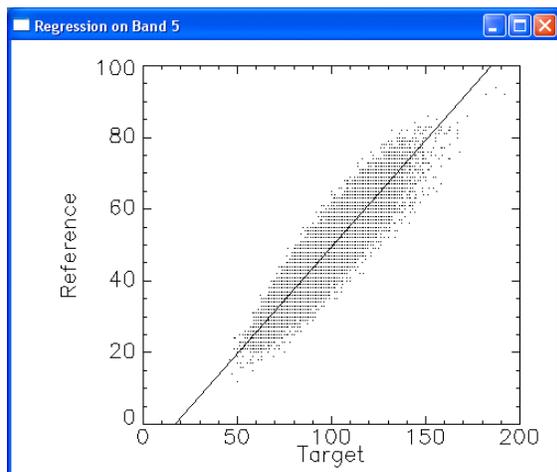
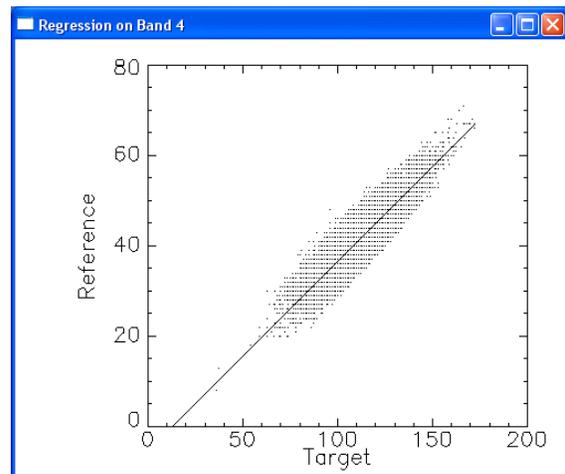
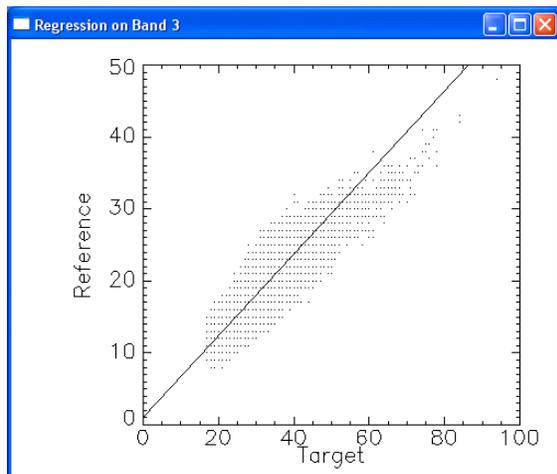
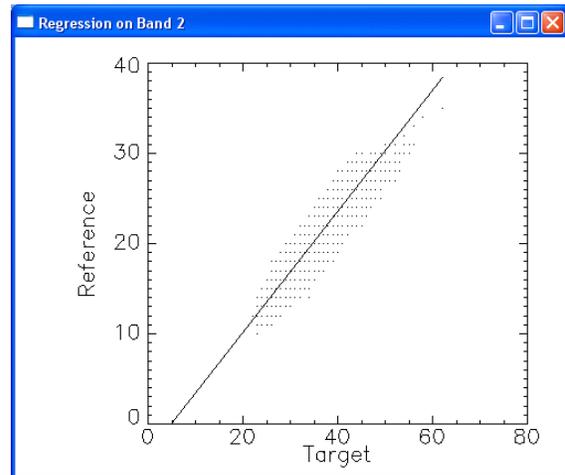
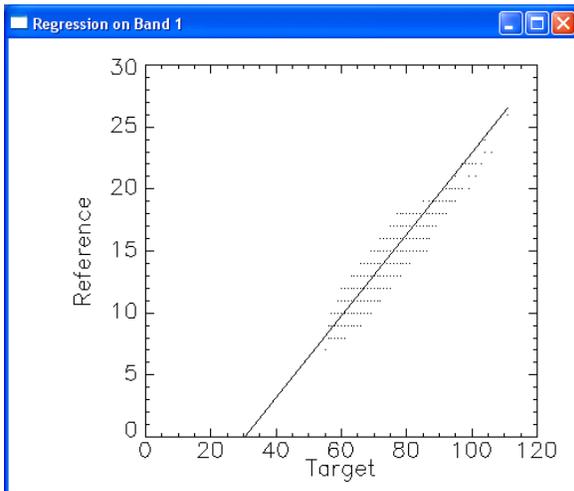
target	66.1510	31.3693	27.7246	112.083	91.4838	29.9558
reference	11.7021	17.8183	16.7209	41.6814	44.0604	22.8590
normalized	11.7091	17.8237	16.7255	41.6996	44.0938	22.8783
std dev	0.0378241	0.0353190	0.0566580	0.100263	0.129588	0.0651627

Variances

target	25.7762	22.4750	57.8369	181.119	302.562	76.5033
reference	3.32397	10.6680	20.5088	38.5253	116.311	47.7998
normalized	2.82311	10.1405	18.5319	31.9281	107.625	45.3611
std dev	0.0419693	0.115767	0.308361	0.333426	1.11240	0.689132

file created F:\MESTRADO\NORMALIZAÇÃ\teste

RESULTADO DA NORMALIZAÇÃO DA IMAGEM DO L5 05DEZ2001



Radiometric calibration with MAD

Tue Aug 19 18:03:27 2008

Reference: F:\MESTRADO\REGISTRO\L7 REC 3\L7_REC3

Target:

F:\MESTRADO\REGISTRO\L5 05DEZ2001\L5_05DEZ2001_NORTE_SAD69_REC_REG_FINAL

orthogonal regression using 36033 no-change pixels ...

channel: 1

b= -10.1832 +- 0.054220067

a= 0.330944 +- 0.00081730075

channel: 2

b= -3.24723 +- 0.044264871

a= 0.671706 +- 0.0013957209

channel: 3

b= 1.03189 +- 0.041581477

a= 0.566054 +- 0.0014488179

channel: 4

b= -5.35949 +- 0.13402151

a= 0.419860 +- 0.0011884722

channel: 5

b= -10.4686 +- 0.12484872

a= 0.596416 +- 0.0013411534

channel: 6

b= -0.188314 +- 0.063120252

a= 0.770020 +- 0.0020299943

Comparison Statistics using 18017 test pixels

Means

target	66.1510	31.3693	27.7246	112.083	91.4838	29.9558
--------	---------	---------	---------	---------	---------	---------

reference	11.7021	17.8183	16.7209	41.6814	44.0604	22.8590
-----------	---------	---------	---------	---------	---------	---------

normalized	11.7091	17.8237	16.7255	41.6996	44.0938	22.8783
------------	---------	---------	---------	---------	---------	---------

std dev	0.0378241	0.0353190	0.0566580	0.100263	0.129588	0.0651627
---------	-----------	-----------	-----------	----------	----------	-----------

Variances

target	25.7762	22.4750	57.8369	181.119	302.562	76.5033
--------	---------	---------	---------	---------	---------	---------

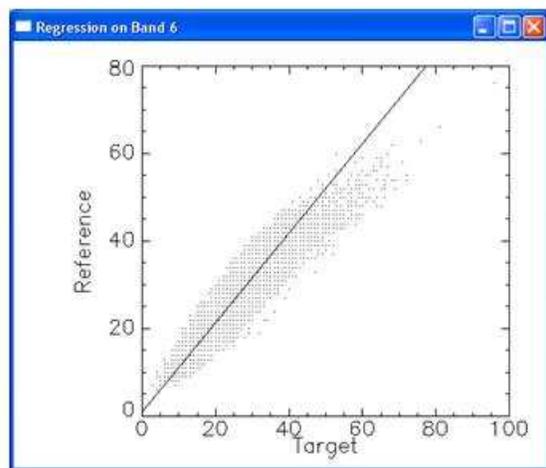
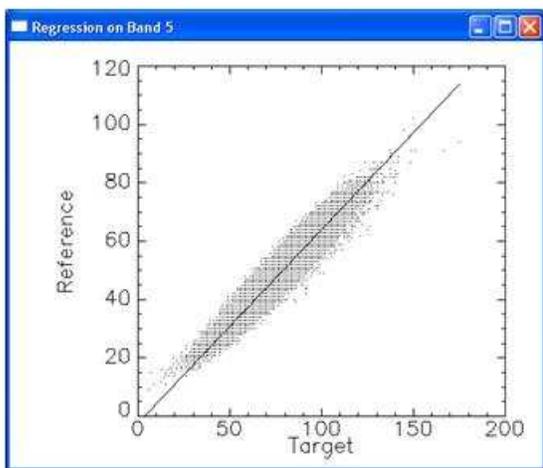
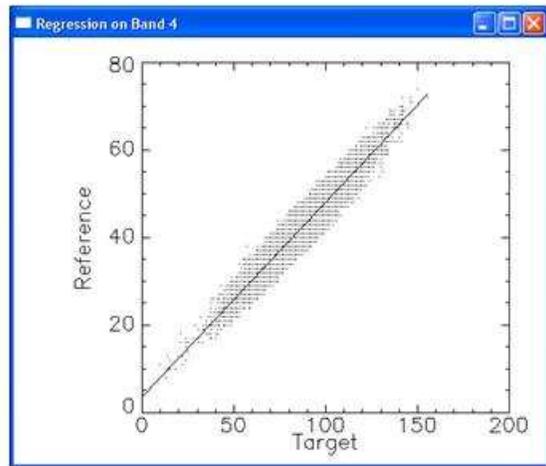
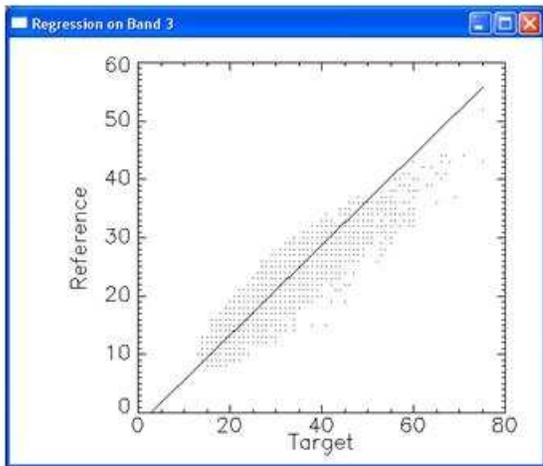
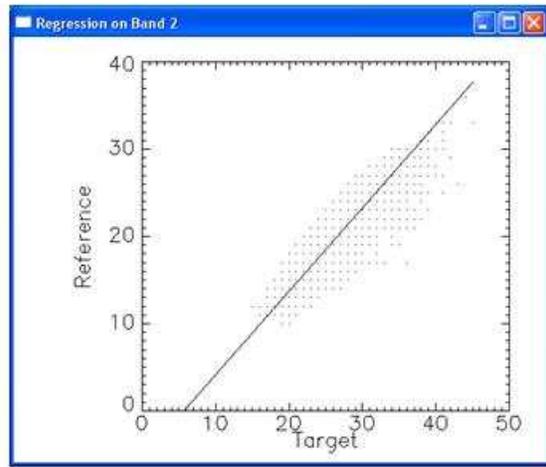
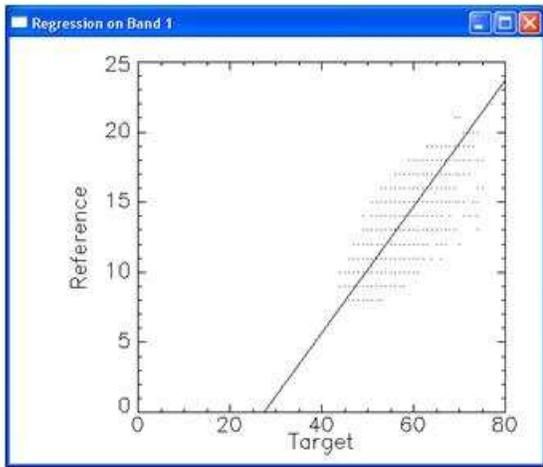
reference	3.32397	10.6680	20.5088	38.5253	116.311	47.7998
-----------	---------	---------	---------	---------	---------	---------

normalized	2.82311	10.1405	18.5319	31.9281	107.625	45.3611
------------	---------	---------	---------	---------	---------	---------

std dev	0.0419693	0.115767	0.308361	0.333426	1.11240	0.689132
---------	-----------	----------	----------	----------	---------	----------

file created F:\MESTRADO\NORMALIZAÇÃOL5_05122001_NORM_3_18ago2007

RESULTADO DA NORMALIZAÇÃO DA IMAGEM DO L5 12ABR2002



Radiometric calibration with MAD

Fri Aug 22 15:31:23 2008

Reference: F:\MESTRADO\MATERIAL E MÉTODOS\L7_REC3_RSL7_REC3_RS

Target:

F:\MESTRADO\REGISTRO\L5_12Abr2002\L5_12Abr2002_NORTE_SAD69_REC_REG3_FINAL

orthogonal regression using 58493 no-change pixels ...

channel: 1

b= -12.5762 +- 0.082321193

a= 0.453550 +- 0.0015276870

channel: 2

b= -5.42792 +- 0.041789984

a= 0.958503 +- 0.0016870175

channel: 3

b= -2.19379 +- 0.034940500

a= 0.772728 +- 0.0013595703

channel: 4

b= 3.55866 +- 0.054531174

a= 0.445877 +- 0.00063459391

channel: 5

b= -2.55221 +- 0.058639493

a= 0.665516 +- 0.00080802387

channel: 6

b= 1.01362 +- 0.036634311

a= 1.01865 +- 0.0016027212

Comparison Statistics using 29247 test pixels

Means

target	53.8175	24.5871	25.1380	84.7479	70.9139	21.9320
--------	---------	---------	---------	---------	---------	---------

reference	11.8443	18.1470	17.2377	41.3442	44.6404	23.3543
-----------	---------	---------	---------	---------	---------	---------

normalized	11.8327	18.1389	17.2311	41.3458	44.6421	23.3546
------------	---------	---------	---------	---------	---------	---------

std dev	0.0200669	0.0205440	0.0352709	0.0833799	0.0993601	0.0423468
---------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------

Variances

target	11.7772	12.3439	36.3843	203.331	288.739	52.4473
--------	---------	---------	---------	---------	---------	---------

reference	3.31604	11.4506	22.6513	43.4987	132.316	54.3305
-----------	---------	---------	---------	---------	---------	---------

normalized	2.42266	11.3407	21.7254	40.4235	127.886	54.4214
------------	---------	---------	---------	---------	---------	---------

std dev	0.0215396	0.0957742	0.280532	0.359155	1.11826	0.694417
---------	-----------	-----------	----------	----------	---------	----------

file created F:\MESTRADO\NORMALIZAÇÃO\L5_12042002_NORM_3_22ago2007

Apêndice II

Tabela com as informações necessárias para a aplicação da APC utilizando o software SPSS-16 das 212 amostras utilizadas nesta pesquisa.

ENVI Output of ROIs (4.3) [Sat Apr 26 17:10:02 2008]

Number of ROIs: 1

File Dimension: 1085 x 1527

;

;ROI name: Thresh (ADENSADO ESCURO L5)

ROI rgb value: {255, 0, 0}

ROI npts: 212

;

ID	X	Y	Map X	Map Y	Lat	Lon	B1	B2	B3	B4	B5	B7
1	652	363	328340.41	7655797.56	-21.191112	-46.653641	10.1319	16.1778	14.7069	54.0558	45.1063	22.0029
2	653	364	328370.41	7655767.56	-21.191386	-46.653355	10.1319	14.6097	12.4343	40.6877	32.271	13.8899
3	652	364	328340.41	7655767.56	-21.191383	-46.653644	9.4591	15.3938	11.298	50.8729	36.2203	16.5943
4	653	365	328370.41	7655737.56	-21.191656	-46.653358	10.1319	15.3938	13.5706	40.6877	34.7394	16.5943
5	652	365	328340.41	7655737.56	-21.191654	-46.653647	9.4591	15.3938	13.5706	43.8706	35.233	14.566
6	653	366	328370.41	7655707.56	-21.191927	-46.653361	10.1319	16.1778	14.1387	36.2317	33.2584	17.2703
7	665	366	328730.41	7655707.56	-21.191961	-46.649894	9.4591	10.6894	9.0255	25.4099	19.4358	9.1573
8	653	367	328370.41	7655677.56	-21.192198	-46.653364	10.1319	16.9619	15.275	34.3219	37.2077	19.2986
9	653	368	328370.41	7655647.56	-21.192469	-46.653367	10.4684	16.9619	13.5706	41.3243	40.1696	21.3268
10	654	369	328400.41	7655617.56	-21.192743	-46.653081	10.4684	15.3938	13.5706	36.8682	33.2584	15.9182
11	654	370	328400.41	7655587.56	-21.193014	-46.653084	10.8048	17.7459	15.8431	35.5951	39.676	21.3268
12	654	371	328400.41	7655557.56	-21.193285	-46.653087	9.7955	15.3938	13.0024	33.6854	41.157	22.0029
13	611	377	327110.41	7655377.56	-21.194789	-46.665529	10.4684	16.1778	13.5706	55.3289	36.2203	16.5943
14	610	378	327080.41	7655347.56	-21.195057	-46.665821	10.4684	15.3938	13.5706	62.9678	38.195	17.9464
15	615	378	327230.41	7655347.56	-21.195071	-46.664376	9.7955	13.8257	11.298	40.6877	29.3091	13.8899
16	616	379	327260.41	7655317.56	-21.195345	-46.66409	8.7862	13.8257	11.298	36.2317	28.3217	13.2138
17	615	379	327230.41	7655317.56	-21.195342	-46.664379	9.1226	13.8257	10.7299	33.6854	25.8534	13.8899
18	615	380	327230.41	7655287.56	-21.195613	-46.664382	9.1226	14.6097	10.7299	36.8682	25.8534	13.8899
19	616	380	327260.41	7655287.56	-21.195616	-46.664093	9.1226	13.8257	11.298	38.1414	28.3217	12.5378
20	614	380	327200.41	7655287.56	-21.19561	-46.664671	9.1226	12.2575	10.1617	30.5025	23.3851	11.8617
21	611	387	327110.41	7655077.56	-21.197498	-46.665559	9.7955	13.8257	11.298	38.778	28.8154	13.2138
22	612	387	327140.41	7655077.56	-21.197501	-46.66527	9.1226	13.8257	11.298	48.3266	31.7774	14.566
23	612	388	327140.41	7655047.56	-21.197772	-46.665273	9.7955	16.1778	13.0024	46.4169	35.7267	15.2421
24	611	388	327110.41	7655047.56	-21.197769	-46.665562	9.7955	13.0416	10.7299	35.5951	27.8281	12.5378
25	618	390	327320.41	7654987.56	-21.198331	-46.663546	10.1319	13.8257	11.298	31.7756	29.3091	15.2421

26	618	391	327320.41	7654957.56	-21.198602	-46.663549	9.4591	13.8257	11.8662	28.5928	27.8281	15.2421
27	618	392	327320.41	7654927.56	-21.198873	-46.663552	9.1226	13.8257	11.8662	26.683	25.3598	13.8899
28	619	393	327350.41	7654897.56	-21.199147	-46.663266	9.4591	13.8257	10.7299	36.2317	29.3091	13.8899
29	491	396	323510.41	7654807.56	-21.199591	-46.700257	11.1412	16.9619	14.7069	44.5071	38.195	19.2986
30	663	399	328670.41	7654717.56	-21.200897	-46.650572	9.7955	13.0416	11.8662	18.4075	24.8661	12.5378
31	450	414	322280.41	7654267.56	-21.204348	-46.712159	10.4684	15.3938	13.0024	63.6044	37.2077	16.5943
32	481	450	323210.41	7653187.56	-21.214193	-46.703314	11.4777	16.9619	15.8431	49.5997	42.1443	21.3268
33	480	450	323180.41	7653187.56	-21.21419	-46.703603	10.8048	16.1778	14.7069	47.69	39.1823	19.9747
34	481	451	323210.41	7653157.56	-21.214464	-46.703317	10.4684	16.1778	14.7069	54.0558	41.157	21.3268
35	482	451	323240.41	7653157.56	-21.214467	-46.703028	10.1319	14.6097	11.8662	59.1484	36.714	15.9182
36	484	462	323300.41	7652827.56	-21.217453	-46.702484	13.8327	24.0184	27.2059	41.3243	53.4985	30.792
37	484	463	323300.41	7652797.56	-21.217724	-46.702487	13.8327	22.4503	26.0696	41.3243	53.4985	30.1159
38	485	464	323330.41	7652767.56	-21.217998	-46.702202	12.1505	19.3141	21.5245	37.5048	46.0936	26.0594
39	484	464	323300.41	7652767.56	-21.217995	-46.70249	12.8234	19.3141	18.6838	39.4145	43.6253	22.0029
40	556	752	325460.41	7644127.56	-21.296235	-46.682572	12.8234	20.0981	19.252	35.5951	44.1189	26.7355
41	556	753	325460.41	7644097.56	-21.296506	-46.682575	11.4777	17.7459	17.5476	37.5048	44.1189	22.679
42	562	753	325640.41	7644097.56	-21.296523	-46.680841	11.1412	16.1778	14.7069	41.3243	40.1696	22.679
43	563	753	325670.41	7644097.56	-21.296526	-46.680551	11.4777	16.9619	16.4113	43.234	45.5999	24.0312
44	564	753	325700.41	7644097.56	-21.296529	-46.680262	11.1412	17.7459	15.275	41.3243	43.1316	22.679
45	565	753	325730.41	7644097.56	-21.296532	-46.679973	11.8141	19.3141	18.6838	41.3243	44.1189	24.7073
46	555	753	325430.41	7644097.56	-21.296503	-46.682864	12.487	18.53	18.1157	29.8659	42.638	28.7638
47	555	754	325430.41	7644067.56	-21.296774	-46.682867	12.1505	18.53	18.6838	35.5951	42.1443	27.4116
48	556	754	325460.41	7644067.56	-21.296777	-46.682578	11.1412	16.9619	15.8431	38.1414	39.676	22.0029
49	557	754	325490.41	7644067.56	-21.29678	-46.682289	11.1412	16.9619	15.8431	36.2317	41.157	20.6508
50	558	754	325520.41	7644067.56	-21.296783	-46.682	11.4777	17.7459	15.8431	38.1414	41.6506	23.3551
51	563	754	325670.41	7644067.56	-21.296797	-46.680555	11.1412	17.7459	15.8431	43.8706	41.157	25.3834
52	567	754	325790.41	7644067.56	-21.296809	-46.679398	12.1505	19.3141	18.6838	41.9608	48.5619	26.0594
53	556	755	325460.41	7644037.56	-21.297048	-46.682581	11.4777	16.1778	15.275	41.9608	38.195	19.9747
54	557	755	325490.41	7644037.56	-21.297051	-46.682292	11.8141	16.9619	16.4113	38.778	42.1443	24.0312
55	558	755	325520.41	7644037.56	-21.297054	-46.682003	11.8141	18.53	17.5476	37.5048	43.6253	24.7073
56	566	755	325760.41	7644037.56	-21.297077	-46.67969	11.4777	16.9619	15.8431	42.5974	42.638	22.0029
57	567	755	325790.41	7644037.56	-21.29708	-46.679401	11.4777	17.7459	15.275	42.5974	42.1443	22.0029
58	568	755	325820.41	7644037.56	-21.297082	-46.679112	11.1412	16.9619	16.4113	41.3243	42.1443	22.0029
59	569	755	325850.41	7644037.56	-21.297085	-46.678823	11.8141	16.9619	16.4113	38.1414	43.6253	22.679
60	575	755	326030.41	7644037.56	-21.297103	-46.677088	9.4591	15.3938	13.0024	36.2317	31.7774	14.566
61	576	755	326060.41	7644037.56	-21.297106	-46.676799	10.1319	13.8257	11.298	36.2317	30.2964	14.566
62	556	756	325460.41	7644007.56	-21.297319	-46.682584	10.4684	15.3938	13.5706	43.234	38.6887	19.2986
63	565	756	325730.41	7644007.56	-21.297345	-46.679982	10.1319	14.6097	13.0024	36.2317	35.233	19.2986
64	566	756	325760.41	7644007.56	-21.297348	-46.679693	10.4684	15.3938	13.5706	38.778	35.7267	18.6225
65	567	756	325790.41	7644007.56	-21.297351	-46.679404	10.1319	16.1778	14.7069	37.5048	38.195	18.6225
66	568	756	325820.41	7644007.56	-21.297353	-46.679115	11.4777	18.53	17.5476	40.0511	42.638	23.3551

67	569	756	325850.41	7644007.56	-21.297356	-46.678826	10.8048	17.7459	16.4113	35.5951	42.638	22.679
68	571	756	325910.41	7644007.56	-21.297362	-46.678248	11.4777	16.9619	16.4113	38.778	39.1823	21.3268
69	572	756	325940.41	7644007.56	-21.297365	-46.677959	11.4777	16.1778	14.1387	38.778	34.2457	17.2703
70	573	756	325970.41	7644007.56	-21.297368	-46.67767	10.1319	15.3938	13.0024	37.5048	35.7267	17.9464
71	574	756	326000.41	7644007.56	-21.297371	-46.67738	10.8048	16.1778	14.1387	34.9585	37.2077	18.6225
72	575	756	326030.41	7644007.56	-21.297374	-46.677091	10.1319	14.6097	13.0024	33.0488	32.271	17.2703
73	576	756	326060.41	7644007.56	-21.297376	-46.676802	10.4684	14.6097	12.4343	33.6854	32.271	17.2703
74	567	757	325790.41	7643977.56	-21.297621	-46.679407	12.1505	17.7459	18.1157	39.4145	41.6506	24.0312
75	568	757	325820.41	7643977.56	-21.297624	-46.679118	12.1505	17.7459	18.1157	39.4145	41.6506	24.0312
76	569	757	325850.41	7643977.56	-21.297627	-46.678829	11.8141	17.7459	17.5476	38.1414	43.1316	23.3551
77	570	757	325880.41	7643977.56	-21.29763	-46.67854	11.4777	17.7459	16.9794	39.4145	41.6506	23.3551
78	571	757	325910.41	7643977.56	-21.297633	-46.678251	12.1505	17.7459	16.9794	41.3243	39.676	19.2986
79	573	757	325970.41	7643977.56	-21.297639	-46.677673	11.4777	16.1778	14.7069	40.0511	36.714	19.2986
80	556	757	325460.41	7643977.56	-21.29759	-46.682588	11.4777	16.9619	16.9794	41.9608	41.157	22.0029
81	568	758	325820.41	7643947.56	-21.297895	-46.679121	12.8234	18.53	18.6838	40.6877	44.1189	24.0312
82	569	758	325850.41	7643947.56	-21.297898	-46.678832	11.4777	18.53	18.1157	40.6877	41.6506	24.7073
83	576	758	326060.41	7643947.56	-21.297918	-46.676808	10.4684	15.3938	13.0024	37.5048	34.7394	17.2703
84	578	758	326120.41	7643947.56	-21.297924	-46.67623	10.4684	16.1778	14.1387	32.4122	34.2457	17.9464
85	579	758	326150.41	7643947.56	-21.297927	-46.675941	9.7955	13.8257	11.8662	31.1391	27.3344	15.2421
86	576	759	326060.41	7643917.56	-21.298189	-46.676811	11.1412	16.1778	14.1387	39.4145	36.2203	19.2986
87	578	759	326120.41	7643917.56	-21.298195	-46.676233	10.4684	16.1778	15.8431	38.1414	40.6633	20.6508
88	579	759	326150.41	7643917.56	-21.298198	-46.675944	10.4684	14.6097	12.4343	33.0488	30.7901	15.2421
89	580	759	326180.41	7643917.56	-21.298201	-46.675655	10.1319	14.6097	13.0024	35.5951	32.271	16.5943
90	581	759	326210.41	7643917.56	-21.298204	-46.675366	10.4684	15.3938	14.1387	38.1414	34.2457	17.9464
91	582	759	326240.41	7643917.56	-21.298207	-46.675077	9.7955	15.3938	13.5706	36.8682	33.2584	17.9464
92	575	759	326030.41	7643917.56	-21.298186	-46.677101	10.1319	14.6097	11.8662	35.5951	34.7394	16.5943
93	574	760	326000.41	7643887.56	-21.298454	-46.677393	10.4684	14.6097	12.4343	34.3219	30.7901	14.566
94	575	760	326030.41	7643887.56	-21.298457	-46.677104	10.8048	16.1778	15.275	38.1414	33.752	17.2703
95	579	760	326150.41	7643887.56	-21.298469	-46.675947	11.1412	15.3938	14.7069	36.8682	36.2203	18.6225
96	580	760	326180.41	7643887.56	-21.298472	-46.675658	9.7955	14.6097	13.0024	37.5048	32.7647	16.5943
97	581	760	326210.41	7643887.56	-21.298475	-46.675369	10.8048	14.6097	13.0024	39.4145	32.271	15.9182
98	582	760	326240.41	7643887.56	-21.298478	-46.67508	10.4684	15.3938	13.5706	38.1414	35.233	17.9464
99	576	761	326060.41	7643857.56	-21.298731	-46.676818	13.1598	19.3141	18.1157	40.6877	46.5873	25.3834
100	579	761	326150.41	7643857.56	-21.29874	-46.67595	10.4684	16.1778	14.7069	37.5048	38.195	17.9464
101	580	761	326180.41	7643857.56	-21.298743	-46.675661	10.8048	16.1778	15.275	38.1414	36.2203	17.9464
102	581	761	326210.41	7643857.56	-21.298746	-46.675372	10.4684	14.6097	13.5706	38.1414	33.752	16.5943
103	582	761	326240.41	7643857.56	-21.298748	-46.675083	10.4684	14.6097	12.4343	39.4145	31.7774	13.8899
104	583	761	326270.41	7643857.56	-21.298751	-46.674794	10.8048	16.1778	13.5706	40.0511	35.233	17.9464
105	575	761	326030.41	7643857.56	-21.298728	-46.677107	12.1505	18.53	16.9794	38.778	45.1063	26.0594
106	574	762	326000.41	7643827.56	-21.298996	-46.677399	12.487	18.53	19.252	40.6877	45.1063	23.3551
107	575	762	326030.41	7643827.56	-21.298999	-46.67711	11.8141	18.53	17.5476	40.0511	45.5999	25.3834

108	576	762	326060.41	7643827.56	-21.299002	-46.676821	11.4777	16.9619	15.8431	40.0511	42.638	23.3551
109	579	762	326150.41	7643827.56	-21.299011	-46.675953	9.7955	15.3938	13.5706	38.1414	36.2203	19.2986
110	581	762	326210.41	7643827.56	-21.299017	-46.675375	10.8048	16.1778	14.7069	35.5951	38.195	19.9747
111	582	762	326240.41	7643827.56	-21.299019	-46.675086	10.8048	16.1778	14.7069	36.2317	33.752	17.9464
112	583	762	326270.41	7643827.56	-21.299022	-46.674797	11.1412	16.9619	15.275	38.1414	32.7647	17.2703
113	576	763	326060.41	7643797.56	-21.299273	-46.676824	11.1412	15.3938	14.7069	39.4145	40.6633	20.6508
114	582	763	326240.41	7643797.56	-21.29929	-46.675089	12.1505	17.7459	16.9794	32.4122	36.2203	19.2986
115	583	763	326270.41	7643797.56	-21.299293	-46.6748	11.8141	17.7459	16.9794	33.6854	40.1696	22.0029
116	584	763	326300.41	7643797.56	-21.299296	-46.674511	11.1412	16.9619	16.4113	35.5951	37.2077	20.6508
117	575	763	326030.41	7643797.56	-21.29927	-46.677113	10.8048	17.7459	16.4113	38.778	43.6253	22.0029
118	575	764	326030.41	7643767.56	-21.299541	-46.677116	10.1319	16.1778	14.7069	37.5048	39.1823	20.6508
119	576	764	326060.41	7643767.56	-21.299544	-46.676827	11.4777	16.1778	15.275	36.8682	39.676	21.3268
120	582	764	326240.41	7643767.56	-21.299561	-46.675092	12.8234	17.7459	16.4113	33.0488	34.7394	18.6225
121	583	764	326270.41	7643767.56	-21.299564	-46.674803	11.8141	18.53	18.1157	35.5951	36.714	20.6508
122	584	764	326300.41	7643767.56	-21.299567	-46.674514	12.1505	18.53	18.1157	37.5048	41.6506	22.679
123	585	764	326330.41	7643767.56	-21.29957	-46.674225	11.8141	15.3938	14.1387	36.2317	37.7013	19.9747
124	586	764	326360.41	7643767.56	-21.299573	-46.673936	11.1412	17.7459	16.4113	38.1414	40.6633	21.3268
125	587	764	326390.41	7643767.56	-21.299576	-46.673647	10.1319	15.3938	13.5706	39.4145	39.676	21.3268
126	576	765	326060.41	7643737.56	-21.299815	-46.67683	11.8141	16.9619	16.9794	36.2317	40.6633	22.0029
127	581	765	326210.41	7643737.56	-21.299829	-46.675384	12.1505	18.53	18.1157	36.8682	40.6633	22.0029
128	584	765	326300.41	7643737.56	-21.299838	-46.674517	13.4962	19.3141	19.252	38.778	42.1443	22.679
129	586	765	326360.41	7643737.56	-21.299844	-46.673939	10.4684	16.1778	14.1387	37.5048	36.2203	17.9464
130	587	765	326390.41	7643737.56	-21.299847	-46.67365	10.8048	16.9619	14.1387	38.1414	36.2203	19.2986
131	588	765	326420.41	7643737.56	-21.29985	-46.673361	11.8141	16.1778	14.7069	40.0511	37.7013	19.2986
132	575	765	326030.41	7643737.56	-21.299812	-46.677119	11.1412	16.9619	16.4113	38.1414	40.1696	20.6508
133	575	766	326030.41	7643707.56	-21.300083	-46.677122	11.8141	18.53	18.1157	41.3243	41.157	22.679
134	581	766	326210.41	7643707.56	-21.3001	-46.675387	11.4777	16.9619	16.9794	38.1414	39.676	19.9747
135	582	766	326240.41	7643707.56	-21.300103	-46.675098	12.487	18.53	18.1157	35.5951	42.1443	22.0029
136	583	766	326270.41	7643707.56	-21.300106	-46.674809	11.8141	16.9619	15.8431	34.3219	38.6887	22.0029
137	585	766	326330.41	7643707.56	-21.300112	-46.674231	11.4777	16.9619	15.8431	34.9585	38.6887	20.6508
138	586	766	326360.41	7643707.56	-21.300115	-46.673942	10.8048	15.3938	13.5706	35.5951	34.7394	17.9464
139	587	766	326390.41	7643707.56	-21.300118	-46.673653	12.1505	15.3938	14.1387	37.5048	33.2584	17.9464
140	583	767	326270.41	7643677.56	-21.300377	-46.674812	11.1412	16.9619	15.8431	34.9585	37.7013	20.6508
141	584	767	326300.41	7643677.56	-21.30038	-46.674523	10.8048	16.9619	15.275	35.5951	38.195	20.6508
142	586	767	326360.41	7643677.56	-21.300386	-46.673945	10.8048	16.1778	15.275	34.9585	39.1823	19.9747
143	587	767	326390.41	7643677.56	-21.300389	-46.673656	10.8048	16.1778	14.7069	36.2317	38.195	19.9747
144	582	767	326240.41	7643677.56	-21.300374	-46.675101	12.1505	16.9619	17.5476	36.2317	41.6506	21.3268
145	583	768	326270.41	7643647.56	-21.300648	-46.674815	11.1412	16.1778	14.7069	38.1414	38.195	21.3268
146	584	768	326300.41	7643647.56	-21.300651	-46.674526	11.4777	16.1778	15.275	37.5048	37.2077	18.6225
147	585	768	326330.41	7643647.56	-21.300654	-46.674237	10.8048	16.1778	15.275	34.9585	38.195	19.9747
148	587	768	326390.41	7643647.56	-21.300659	-46.673659	11.8141	16.9619	15.8431	38.1414	38.6887	20.6508

149	585	769	326330.41	7643617.56	-21.300925	-46.67424	10.4684	16.1778	16.4113	36.8682	38.6887	19.2986
150	585	770	326330.41	7643587.56	-21.301196	-46.674243	10.4684	16.9619	15.8431	41.3243	42.1443	21.3268
151	628	791	327620.41	7642957.56	-21.307009	-46.661875	10.8048	16.1778	13.5706	47.69	36.714	17.2703
152	635	791	327830.41	7642957.56	-21.307029	-46.659851	10.1319	14.6097	13.5706	45.1437	35.7267	17.9464
153	627	791	327590.41	7642957.56	-21.307006	-46.662164	10.4684	14.6097	13.0024	43.8706	35.233	16.5943
154	627	792	327590.41	7642927.56	-21.307277	-46.662167	10.4684	15.3938	13.0024	41.3243	33.2584	16.5943
155	628	792	327620.41	7642927.56	-21.30728	-46.661878	10.1319	15.3938	13.5706	45.1437	34.7394	16.5943
156	631	792	327710.41	7642927.56	-21.307288	-46.661011	10.1319	15.3938	13.0024	45.7803	34.7394	16.5943
157	632	792	327740.41	7642927.56	-21.307291	-46.660722	9.4591	13.8257	10.1617	40.0511	29.8027	13.2138
158	634	792	327800.41	7642927.56	-21.307297	-46.660143	10.1319	14.6097	12.4343	41.9608	31.2837	15.2421
159	635	792	327830.41	7642927.56	-21.3073	-46.659854	10.1319	15.3938	13.5706	40.0511	31.2837	15.2421
160	636	792	327860.41	7642927.56	-21.307302	-46.659565	9.1226	15.3938	11.8662	40.0511	29.3091	14.566
161	633	793	327770.41	7642897.56	-21.307565	-46.660436	10.1319	14.6097	11.298	45.7803	28.8154	13.2138
162	634	793	327800.41	7642897.56	-21.307568	-46.660146	9.4591	14.6097	10.1617	48.3266	29.8027	13.8899
163	635	793	327830.41	7642897.56	-21.307571	-46.659857	9.7955	13.8257	11.298	43.234	31.2837	14.566
164	636	793	327860.41	7642897.56	-21.307573	-46.659568	10.1319	14.6097	13.0024	40.6877	31.7774	14.566
165	637	793	327890.41	7642897.56	-21.307576	-46.659279	9.7955	13.8257	10.7299	40.6877	30.2964	13.8899
166	626	794	327560.41	7642867.56	-21.307816	-46.662463	10.4684	14.6097	12.4343	40.0511	32.271	15.9182
167	634	794	327800.41	7642867.56	-21.307839	-46.660149	10.1319	15.3938	11.8662	45.1437	29.8027	13.2138
168	635	794	327830.41	7642867.56	-21.307841	-46.65986	9.1226	13.8257	10.7299	46.4169	29.8027	13.2138
169	636	794	327860.41	7642867.56	-21.307844	-46.659571	9.4591	14.6097	11.298	43.8706	32.7647	14.566
170	637	794	327890.41	7642867.56	-21.307847	-46.659282	9.7955	15.3938	12.4343	40.6877	30.2964	15.2421
171	638	794	327920.41	7642867.56	-21.30785	-46.658993	9.7955	13.8257	10.7299	42.5974	30.2964	13.8899
172	639	794	327950.41	7642867.56	-21.307853	-46.658704	9.1226	13.8257	10.7299	42.5974	28.3217	13.2138
173	640	794	327980.41	7642867.56	-21.307856	-46.658415	9.4591	13.8257	10.7299	40.6877	28.3217	11.1856
174	641	794	328010.41	7642867.56	-21.307859	-46.658126	9.7955	13.0416	10.7299	40.0511	28.8154	13.8899
175	642	794	328040.41	7642867.56	-21.307861	-46.657836	8.7862	13.8257	10.7299	37.5048	27.3344	12.5378
176	635	795	327830.41	7642837.56	-21.308112	-46.659863	9.1226	14.6097	10.7299	41.9608	30.7901	14.566
177	636	795	327860.41	7642837.56	-21.308115	-46.659574	9.4591	13.8257	10.1617	41.3243	27.8281	13.2138
178	637	795	327890.41	7642837.56	-21.308118	-46.659285	9.7955	13.8257	11.298	41.9608	29.8027	13.8899
179	638	795	327920.41	7642837.56	-21.308121	-46.658996	9.7955	14.6097	11.298	41.3243	30.2964	13.8899
180	639	795	327950.41	7642837.56	-21.308124	-46.658707	9.7955	13.0416	9.5936	40.6877	29.3091	12.5378
181	640	795	327980.41	7642837.56	-21.308127	-46.658418	9.4591	13.0416	10.1617	41.3243	28.8154	14.566
182	641	795	328010.41	7642837.56	-21.30813	-46.658129	9.7955	13.0416	10.1617	40.6877	27.3344	12.5378
183	642	795	328040.41	7642837.56	-21.308132	-46.657839	9.1226	13.8257	10.7299	38.1414	27.3344	12.5378
184	651	795	328310.41	7642837.56	-21.308158	-46.655237	10.1319	13.8257	12.4343	32.4122	27.8281	13.8899
185	626	796	327560.41	7642807.56	-21.308358	-46.662469	10.8048	17.7459	16.4113	43.8706	38.195	18.6225
186	627	796	327590.41	7642807.56	-21.308361	-46.662179	10.4684	15.3938	13.0024	41.9608	37.2077	16.5943
187	628	796	327620.41	7642807.56	-21.308363	-46.66189	10.1319	15.3938	12.4343	45.1437	37.7013	17.9464
188	638	796	327920.41	7642807.56	-21.308392	-46.658999	9.1226	13.8257	11.298	39.4145	29.3091	13.8899
189	641	796	328010.41	7642807.56	-21.3084	-46.658132	10.4684	13.8257	10.7299	41.3243	32.271	15.2421

190	642	796	328040.41	7642807.56	-21.308403	-46.657842	9.4591	12.2575	10.1617	33.6854	28.3217	12.5378
191	660	796	328580.41	7642807.56	-21.308455	-46.652638	8.7862	13.8257	10.7299	37.5048	26.3471	11.8617
192	623	797	327470.41	7642777.56	-21.30862	-46.663339	10.4684	16.1778	13.5706	41.3243	33.2584	14.566
193	624	797	327500.41	7642777.56	-21.308623	-46.66305	10.4684	16.1778	14.1387	40.6877	37.7013	19.2986
194	625	797	327530.41	7642777.56	-21.308626	-46.662761	10.4684	15.3938	14.1387	42.5974	36.2203	17.9464
195	626	797	327560.41	7642777.56	-21.308629	-46.662472	10.1319	15.3938	13.5706	43.8706	35.233	15.9182
196	627	797	327590.41	7642777.56	-21.308631	-46.662183	10.1319	14.6097	12.4343	43.234	33.752	14.566
197	641	797	328010.41	7642777.56	-21.308671	-46.658135	10.8048	15.3938	13.5706	36.8682	33.2584	15.9182
198	642	797	328040.41	7642777.56	-21.308674	-46.657845	9.4591	12.2575	9.5936	34.3219	23.8788	11.1856
199	635	798	327830.41	7642747.56	-21.308925	-46.659872	9.4591	13.8257	12.4343	36.2317	24.8661	13.2138
200	635	799	327830.41	7642717.56	-21.309196	-46.659876	9.7955	13.8257	12.4343	43.8706	31.7774	15.2421
201	551	950	325310.41	7638187.56	-21.349867	-46.68463	10.8048	16.1778	14.1387	48.3266	39.1823	19.9747
202	551	951	325310.41	7638157.56	-21.350138	-46.684633	10.4684	13.8257	11.8662	38.1414	33.752	15.9182
203	552	952	325340.41	7638127.56	-21.350412	-46.684347	9.7955	14.6097	10.7299	43.234	29.3091	13.2138
204	551	952	325310.41	7638127.56	-21.350409	-46.684636	10.4684	15.3938	12.4343	33.6854	29.8027	15.9182
205	552	953	325340.41	7638097.56	-21.350682	-46.68435	9.7955	14.6097	11.298	38.1414	28.3217	13.2138
206	551	953	325310.41	7638097.56	-21.35068	-46.684639	11.1412	16.1778	14.1387	33.6854	35.7267	17.9464
207	594	1000	326600.41	7636687.56	-21.363538	-46.672347	14.5055	23.2344	25.5015	48.9632	54.9795	30.792
208	593	1001	326570.41	7636657.56	-21.363806	-46.67264	12.487	18.53	19.252	47.0534	45.5999	26.0594
209	594	1001	326600.41	7636657.56	-21.363809	-46.672351	10.1319	15.3938	15.8431	44.5071	40.6633	19.9747
210	595	1002	326630.41	7636627.56	-21.364083	-46.672064	10.1319	14.6097	12.4343	41.9608	29.8027	12.5378
211	594	1002	326600.41	7636627.56	-21.36408	-46.672354	10.1319	14.6097	11.298	38.778	28.3217	14.566
212	595	1003	326630.41	7636597.56	-21.364354	-46.672067	10.1319	13.0416	11.8662	35.5951	28.8154	13.8899

Apêndice III

Exemplo (parte dos dados) dos dados obtidos após a aplicação da APC para a imagem

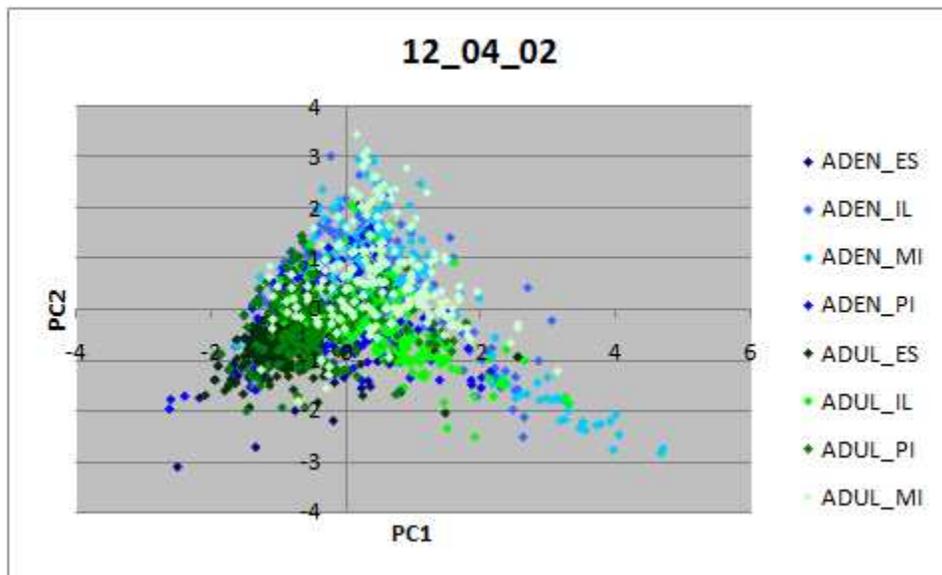
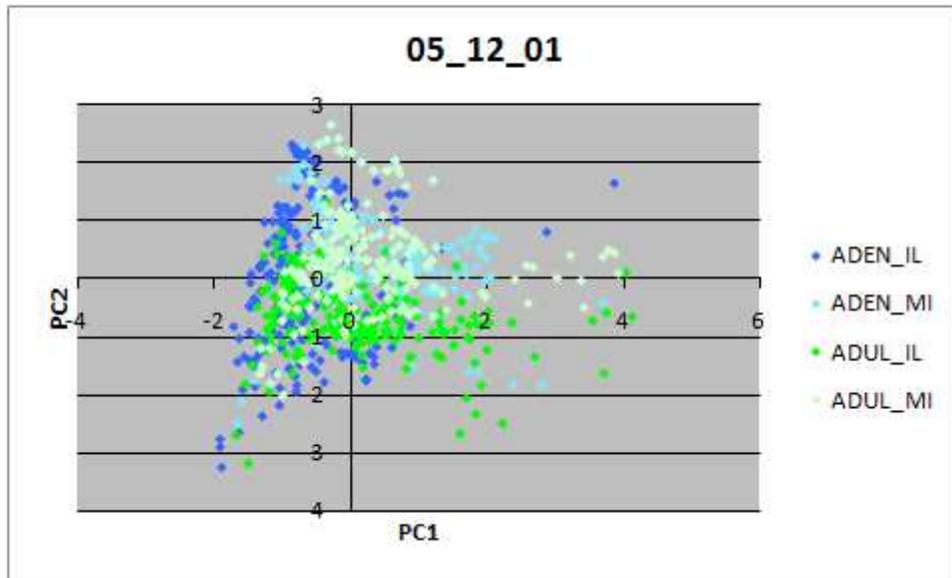
TM/Landsat 5 de 15/08/2001

CLASSES	ID	Map X	Map Y	Lat	Lon	Fator_PC1	Fator_PC2
ADEN_I	1	329450.41	7656067.56	-21.1888	-46.6429	-0.48425	0.95905
ADEN_I	2	329480.41	7656067.56	-21.1888	-46.6426	-0.66925	1.34434
ADEN_I	3	329420.41	7656067.56	-21.1888	-46.6432	-0.19372	1.08121
ADEN_I	4	329420.41	7656037.56	-21.189	-46.6432	-0.49784	0.98211
ADEN_I	5	329450.41	7656037.56	-21.189	-46.6429	-0.45582	0.73546
ADEN_I	6	329480.41	7656037.56	-21.1891	-46.6426	-0.71594	1.03763
ADEN_I	7	329450.41	7656007.56	-21.1893	-46.6429	-0.65071	0.75221
ADEN_I	8	329480.41	7656007.56	-21.1893	-46.6426	-0.88523	1.03559
ADEN_I	9	329420.41	7656007.56	-21.1893	-46.6432	-0.66338	0.67013
ADEN_I	10	329450.41	7655977.56	-21.1896	-46.6429	-1.01789	0.31396
ADEN_I	11	329480.41	7655977.56	-21.1896	-46.6426	-0.76381	0.91163
ADEN_I	12	329600.41	7655887.56	-21.1904	-46.6415	-0.54824	1.00041
ADEN_I	13	329630.41	7655887.56	-21.1904	-46.6412	-0.52577	0.73175
ADEN_I	14	329660.41	7655887.56	-21.1904	-46.6409	-0.57543	0.97995
ADEN_I	15	329570.41	7655887.56	-21.1904	-46.6418	-0.61137	0.74895
ADEN_I	16	329600.41	7655857.56	-21.1907	-46.6415	-0.67736	0.38226
ADEN_I	17	329630.41	7655857.56	-21.1907	-46.6412	-0.87535	0.7216
ADEN_I	18	329660.41	7655857.56	-21.1907	-46.6409	-0.88581	0.65257
ADEN_I	19	329570.41	7655857.56	-21.1907	-46.6418	-0.56074	0.39886
ADEN_I	20	329570.41	7655827.56	-21.191	-46.6418	-0.99614	0.01238
ADEN_I	21	329600.41	7655827.56	-21.191	-46.6415	-0.91025	0.00186
ADEN_I	22	329630.41	7655827.56	-21.191	-46.6412	-0.89044	-0.41211
ADEN_I	23	329660.41	7655827.56	-21.191	-46.6409	-1.56419	-1.01943
ADEN_I	24	329750.41	7655827.56	-21.191	-46.6401	-1.17721	0.37524
ADEN_I	25	329780.41	7655827.56	-21.191	-46.6398	-1.23487	0.43063
ADEN_I	26	329810.41	7655827.56	-21.191	-46.6395	-1.04043	0.62751
ADEN_I	27	329780.41	7655797.56	-21.1912	-46.6398	-1.37694	0.27971
ADEN_I	28	329810.41	7655797.56	-21.1913	-46.6395	-1.09605	0.33591
ADEN_I	29	329750.41	7655797.56	-21.1912	-46.6401	-1.31189	0.31677
ADEN_I	30	328130.41	7655767.56	-21.1914	-46.6557	0.0009	-0.28824
ADEN_I	31	328160.41	7655767.56	-21.1914	-46.6554	-0.22683	0.28108
ADEN_I	32	328190.41	7655767.56	-21.1914	-46.6551	-0.10692	2.3062
ADEN_I	33	328220.41	7655767.56	-21.1914	-46.6548	0.4288	1.86777
ADEN_I	34	329750.41	7655767.56	-21.1915	-46.6401	-1.13952	-0.31996
ADEN_I	35	329780.41	7655767.56	-21.1915	-46.6398	-1.4364	-0.65901
ADEN_I	36	329810.41	7655767.56	-21.1915	-46.6395	-1.50066	-0.79901
ADEN_I	37	329840.41	7655767.56	-21.1915	-46.6392	-1.52135	-0.90455
ADEN_I	38	328130.41	7655737.56	-21.1916	-46.6557	-0.30668	0.27519
ADEN_I	39	328160.41	7655737.56	-21.1916	-46.6554	0.35376	1.16325
ADEN_I	40	328190.41	7655737.56	-21.1916	-46.6551	0.33756	2.203
ADEN_I	41	328220.41	7655737.56	-21.1916	-46.6548	0.65173	2.2665
ADEN_I	42	328130.41	7655707.56	-21.1919	-46.6557	0.05911	1.45258

ADEN_I	43	328160.41	7655707.56	-21.1919	-46.6554	0.15571	1.73529
ADEN_I	44	328100.41	7655707.56	-21.1919	-46.656	0.36651	0.51792
ADEN_I	45	328130.41	7655677.56	-21.1922	-46.6557	1.11	1.08709
ADEN_I	46	328160.41	7655677.56	-21.1922	-46.6554	-0.03323	2.26746
ADEN_I	47	328100.41	7655677.56	-21.1922	-46.656	0.20068	0.75524
ADEN_I	48	328130.41	7655557.56	-21.1933	-46.6557	0.59956	1.70109
ADEN_I	49	328100.41	7655557.56	-21.1933	-46.656	0.79453	0.76379
ADEN_I	50	328070.41	7655527.56	-21.1935	-46.6563	-1.28474	-1.55544
ADEN_I	51	328100.41	7655527.56	-21.1935	-46.656	-0.35434	0.32138

Apêndice IV

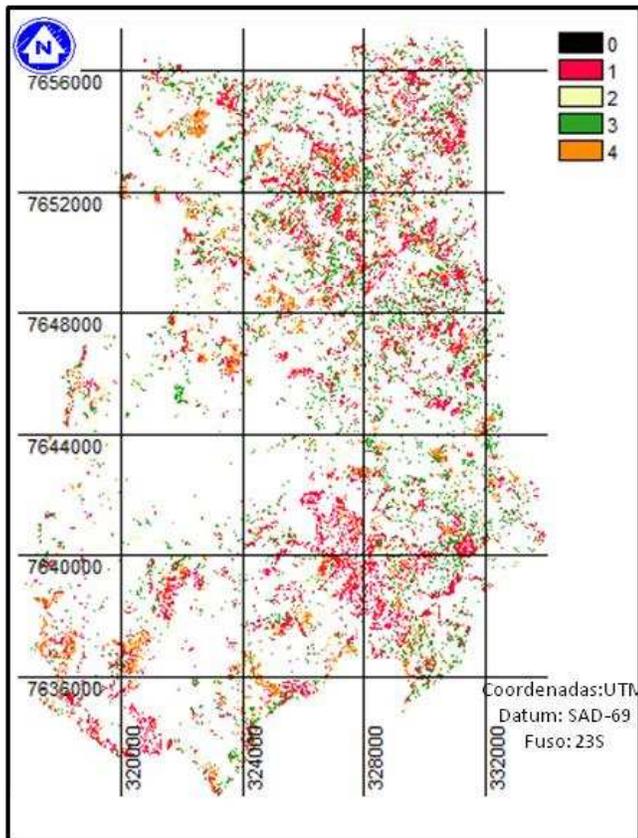
Gráficos referentes ao total de amostras obtidas pela aplicação da APC nas imagens
TM/Landsat 5 de 05/12/2001 e 12/04/2002.



Apêndice V

Imagens resultantes da classificação supervisionada aplicada nas imagens do TM/Landsat 5
nas datas 05/12/2001 e 12/04/2002

05/12/01



12/04/02

