



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

INPE-14791-TDI/1234

**MODELO AGROMETEOROLÓGICO-ESPECTRAL PARA
MONITORAMENTO E ESTIMATIVA DA PRODUTIVIDADE DO
CAFÉ NA REGIÃO SUL/SUDOESTE DO ESTADO DE MINAS
GERAIS**

Viviane Gomes Cardoso da Rosa

Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto,
orientada pelos Drs. Maurício Alves Moreira e Bernardo Friedrich Theodor Rudorff,
aprovada em 18 de abril de 2007.

INPE
São José dos Campos
2007

Publicado por:

esta página é responsabilidade do SID

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE)

Gabinete do Diretor – (GB)

Serviço de Informação e Documentação (SID)

Caixa Postal 515 – CEP 12.245-970

São José dos Campos – SP – Brasil

Tel.: (012) 3945-6911

Fax: (012) 3945-6919

E-mail: pubtc@sid.inpe.br

**Solicita-se intercâmbio
We ask for exchange**

Publicação Externa – É permitida sua reprodução para interessados.



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

INPE-14791-TDI/1234

**MODELO AGROMETEOROLÓGICO-ESPECTRAL PARA
MONITORAMENTO E ESTIMATIVA DA PRODUTIVIDADE DO
CAFÉ NA REGIÃO SUL/SUDOESTE DO ESTADO DE MINAS
GERAIS**

Viviane Gomes Cardoso da Rosa

Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto,
orientada pelos Drs. Maurício Alves Moreira e Bernardo Friedrich Theodor Rudorff,
aprovada em 18 de abril de 2007.

INPE
São José dos Campos
2007

528.711.7

Rosa, V. G. C. da

Modelo agrometeorológico-espectral para monitoramento e estimativa da produtividade do café na região sul/sudoeste do estado de Minas Gerais / Viviane Gomes Cardoso da Rosa. - São José dos Campos: INPE, 2007.

142 p. ; (INPE-14791-TDI/1234)


1. Sensoriamento remoto.
2. Modelo agrometeorológico. 3. Café. 4. Produtividade.
5. MODIS-NDVI. I. Título.

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

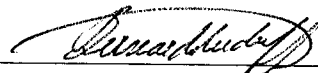
Dr. Yosio Edemir Shimabukuro


Presidente / INPE / SJCampos - SP

Dr. Maurício Alves Moreira


Orientador(a) / INPE / SJCampos - SP

Dr. Bernardo Friedrich Theodor Rudorff


Orientador(a) / INPE / SJCampos - SP

Dra. Angélica Giarolla


Membro da Banca / CPTEC/INPE / Cachoeira Paulista - SP

Dr. Marcelo Bento Paes de Camargo


Convidado(a) / IAC / Campinas - SP

Aluno (a): Viviane Gomes Cardoso Rosa

São José dos Campos, 18 DE ABRIL DE 2007

*A meus pais, fontes de minha existência.
Aos meus amores, Henrique e Isadora.*

AGRADECIMENTOS

A Deus, meu Pai querido, por estar sempre a frente das minhas conquistas e me sustentar em todos os momentos difíceis.

A União da Agroindústria Canavieira do Estado de São Paulo – ÚNICA, pela bolsa concedida durante o primeiro ano do mestrado.

A Companhia Nacional de Abastecimento – CONAB, pela bolsa concedida durante o segundo ano do mestrado.

Ao Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE e em particular à Divisão de Sensoriamento Remoto, pela oportunidade de realizar este estudo e utilizar seus equipamentos e instalações.

Aos professores do INPE pelo conhecimento compartilhado.

Ao Dr. Mauricio Alves Moreira, pela orientação e confiança em mim depositada quando aceitou ser o meu orientador.

Ao Dr. Bernardo F. T. Rudorff, pela oportunidade, apoio e ensinamentos.

A Dra. Angélica Giarolla, pela incessante contribuição em todo o trabalho sem a qual os objetivos não teriam sido atingidos e principalmente, pela amizade e incentivo.

Ao Dr. Marcelo Bento Paes de Camargo por ter nos cedido o modelo agrometeorológico e pela disponibilidade e atenção em nos atender.

Ao Dr. Rodrigo Rizzi, pelo apoio na realização deste trabalho e grande amizade.

Aos amigos Marcos Adami, Marco Aurélio dos Santos e Marco Antônio pela contribuição prática no trabalho.

Aos meus amigos do Curso de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto.

Ao pessoal do Laboratório de Monitoramento dos Recursos Agronômicos e Florestais: Ramon, Daniel e André Lima pelo companheirismo.

A minha querida amiga e madrinha Eliana Miglioranza pelo carinho, conselhos e incentivo em todos os momentos em que precisei.

Ao meu amor, amigo e esposo Henrique, pelo amor e compreensão desmedida.

A meus pais, Neuza e Waldomiro, e à minha amiga e irmã Júlia por sempre acreditarem em mim e me apoiarem acima de tudo.

A minha jóia preciosa Isadora que foi concebida durante o mestrado.

RESUMO

A importante participação do café na balança comercial brasileira tem incentivado a realização de pesquisas científicas que possam contribuir no monitoramento da cultura, bem como fornecer subsídios à adoção de políticas de planejamento e comercialização agrícola. Neste sentido, o presente trabalho objetivou monitorar e estimar a produtividade do café na região Sul/Sudoeste do Estado de Minas Gerais a partir de um modelo agrometeorológico-espectral. A fim de obter uma caracterização espectral da cultura do café, foi avaliado o comportamento dos índices de vegetação EVI e NDVI oriundos do produto MOD13Q1 para três tipos de lavouras: café em produção, formação e podado. Os resultados mostraram que os índices apresentaram relação com a fenologia e o manejo da cultura. A estimativa da produtividade regional, microrregional e municipal foi realizada para os anos agrícolas 2001/02, 2002/03, 2003/04 e 2004/05. A metodologia consistiu em adaptar um modelo agrometeorológico-espectral inserido em um Sistema de Informação Geográfica (SIG), cuja variável espectral de entrada é o Índice de Área Foliar (IAF) estimado a partir das imagens NDVI do sensor MODIS. Outras variáveis de entrada foram os dados meteorológicos gerados pelo modelo regional de previsão de tempo ETA e a capacidade de água disponível no solo obtida a partir de um mapa de solos. Os parâmetros do modelo foram ajustados com base nos dados de produtividade disponibilizados pelo IBGE, para os anos agrícolas 2003/04 e 2004/05. As diferenças relativas entre a estimativa da produtividade pelo modelo e o IBGE para escala regional foram de 0%; 14,36%; 0,6% e 2,4% para os anos agrícolas 2001/02, 2002/03, 2003/04 e 2004/05, respectivamente. Em escala microrregional, os melhores resultados foram obtidos para os anos agrícolas 2003/04 e 2004/05 cujas diferenças relativas não ultrapassaram a 11%. Em nível municipal, as discrepâncias entre a produtividade estimada e o dado de referência foram maiores, embora na média, ao aplicar o teste estatístico *T-Student*, não apresentaram diferenças significativas para $\alpha = 0,05$. Os resultados satisfatórios comprovaram o grande potencial da aplicação do modelo agrometeorológico-espectral para obtenção da estimativa da produtividade do café em escala regional.

AGROMETEOROLOGICAL–SPECTRAL MODEL TO MONITOR AND ESTIMATE YIELD OF COFFEE CROP IN SOUTHERN MINAS GERAIS STATE

ABSTRACT

The important participation of the coffee crop in the Brazilian commercial balance has motivated the accomplishment of scientific research to contribute in the crop monitoring as well as to provide subsidies to the adoption of politics for planning and agribusiness. In this sense, the present work has the objective to monitor and estimate coffee crop yield in the southern region of Minas Gerais State through an agrometeorological-spectral model. In order to obtain the spectral characterization of the coffee crop the behavior of the NDVI and EVI vegetation indices from the MODIS product MOD13Q1 was evaluated for three types of coffee crop fields: coffee crop in production, in formation and trimmed. The results showed that the indices presented a relationship with crop phenology and crop management. Crop yield estimates for regional, microrregional and municipality scales were performed for crop years 2001/02, 2002/03, 2003/04 and 2004/05. The methodology consisted in the adaptation of an agrometeorological-spectral model running in a Geographic Information System (GIS), whose spectral input variable is the Leaf Area Index (LAI) estimated from the NDVI product of the sensor MODIS. Other input variables were meteorological data generated from the regional weather forecast model ETA and soil water holding capacity estimated from a soil map. The model parameters were adjusted based on crop yield data provided by IBGE, for crop years 2003/04 and 2004/05. Relative differences between crop yield of the model and of IBGE for the regional scale were: 0%, 14.36%, 0.6% and 2.4% for crop years 2001/02, 2002/03 2003/04 and 2004/05, respectively. At the microrregional scale, best results were obtained for crop years 2003/04 and 2004/05 whose relative differences were under 11%. At municipality scale, the differences between yield estimate from the model and from IBGE were greater, although on an average basis the T-Student statistical test indicated that no significant difference was observed for $\alpha = 0.05$. The satisfactory results indicate a great potential for the agrometeorological-spectral model to estimate coffee crop yield, especially at regional scale.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS

LISTA DE TABELAS

1. INTRODUÇÃO	223
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	27
2.1. Histórico	27
2.1.1.1. Produção nacional.....	29
2.1.1.2. Exportações	31
2.2. A cultura do café.....	32
2.2.1. Fenologia do cafeeiro	32
2.2.2. Bionalidade do cafeeiro	34
2.2.3. Solo e relevo	34
2.3. Exigências climáticas	35
2.4. Modelos matemáticos	38
2.4.1. Modelos agrometeorológicos	39
2.4.1.1. Modelos agrometeorológicos para a cultura do café	40
2.5. Sensoriamento Remoto como fonte de informações	42
2.5.1. Sensor MODIS	44
2.5.1.1. Índices de vegetação EVI e NDVI	45
2.5.2. Modelos agrometeorológicos-espectrais	48
3. MATERIAIS E MÉTODOS	53
3.1. Área de Estudo.....	53
3.1.1 Caracterização do ambiente cafeeiro da área de estudo	54
3.1.1.1. Topografia	54
3.1.1.2. Distribuição espacial da cafeicultura na área de estudo	57
3.1.2. Área de teste	61
3.2. Dados utilizados	61
3.2.1. Imagens índices de vegetação.....	61
3.2.2. Dados climáticos.....	61
3.2.3. Dados de produtividade e área plantada de café.....	62
3.2.4. Mapa de solos	63
3.3. Ferramentas computacionais	63
3.4. Métodos	63

3.4.1. Fase 1: Montagem do banco de dados geográfico.....	64
3.4.1.1. Ajuste das datas das imagens NDVI e EVI ao período fenológico do café	65
3.4.1.2. Formatação das variáveis meteorológicas	66
3.4.2. Fase 2: Análise espectral da cultura do café e comportamento climático da região de estudo.....	67
3.4.2.1. Avaliação do comportamento dos índices NDVI e EVI para cultura do café... 67	
3.4.2.1.1. Seleção dos pixels puros.....	67
3.4.2.1.2. Atribuição dos IV e de variáveis meteorológicas por segmento	68
3.4.2.1.3. Balanço hídrico geral para a área de estudo	69
3.4.2.1.4. Teste estatístico para obtenção do valor médio de NDVI e EVI representativos de três diferentes tipos de lavouras de café	69
3.4.3. Fase 3: Parametrização do modelo agrometeorológico-espectral para estimativa da produtividade da cultura do café.....	72
3.4.3.1. Mapa temático com a distribuição espacial das lavouras cafeeiras.....	73
3.4.3.2. Cálculo do balanço hídrico pelo modelo AGROMET	74
3.4.3.2.1. Cálculo da capacidade de água disponível no solo (CAD)	74
3.4.3.2.2. Determinação do coeficiente da cultura (kc).....	74
3.4.3.2.3. Determinação do fator de resposta a produtividade (ky).....	75
3.4.3.2.4. Determinação da profundidade do sistema radicular (D).....	75
3.4.3.3. Obtenção da variável espectral	76
3.4.3.4. Fator de produtividade agrícola (FPA).....	77
3.4.3.5. Cálculo da produtividade do café para a região Sul/Sudoeste	78
3.4.3.6. Estimativa da quebra da produtividade da cultura do café.....	78
3.4.3.6.1. Correlação entre o índice de penalização gerado pelo modelo agrometeorológico-espectral e a precipitação	79
3.4.4. Fase 4: Parametrização do modelo agrometeorológico de Santos e Camargo (2006) para estimativa da quebra e produtividade da cultura do café em área teste	80
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	85
4.1. Fase 2: Análise espectral da cultura do café e comportamento climático da região de estudo.....	85
4.1.1. Balanços hídricos obtidos pelo modelo ETA	85
4.1.2. Comportamento dos índices de vegetação: NDVI e EVI.....	88
4.2. Fase 3: Aplicação de modelo agrometeorológico-espectral para estimativa da produtividade do café	93
4.2.1 Mapa da capacidade de armazenamento de água no solo (CAD)	93
4.2.2 Ajuste do fator de produtividade agrícola para a cultura do café.....	94
4.2.3 Estimativa da produtividade da cultura do café para região Sul/Sudoeste.....	96
4.2.3.1. Monitoramento da penalização da produtividade da cultura do café	103
4.2.4. Estimativa da produtividade da cultura do café por microrregião geográfica....	114
4.2.5. Estimativa da produtividade da cultura do café por município	116

4.3. Fase 4: Análise das produtividades obtidas pelos modelos agrometeorológico-espectral e agrometeorológico, tendo como área teste o município de Alfenas.....	118
4.3.1. Contextualização dos modelos	120
5. CONCLUSÕES.....	123
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	125
APÊNDICE A - MAPAS TEMÁTICOS REFERENTES À PRODUTIVIDADE PARCIAL ESTIMADA	135
A.1 Produtividade parcial estimada para o ano agrícola 2001/02	135
A.2 Produtividade parcial estimada para o ano agrícola 2002/03	136
A.3 Produtividade parcial estimada para o ano agrícola 2003/04	137
A.4 Produtividade parcial estimada para o ano agrícola 2004/05	138
APÊNDICE B – DIFERENÇA RELATIVA ENTRE A PRODUTIVIDADE ESTIMADA E O IBGE PARA ESCALA MUNICIPAL	139

LISTA DE FIGURAS

2.1 – Principais países produtores de café em grão.	28
2.2 – Principais Estados produtores de café no Brasil no ano de 2005/06.	30
2.3 – Fases fenológicas do café arábica.	32
3.1 – Área de estudo.	53
3.2 – Mapa temático referente à altimetria na região Sul/Sudoeste de Minas Gerais.	55
3.3 – Mapa temático referente à declividade na região Sul/Sudoeste de Minas Gerais.	56
3.4 – Mapa temático referente à orientação de vertentes na região Sul/Sudoeste de Minas Gerais.	57
3.5 – Mapa temático referente à distribuição espacial das lavouras de café na região Sul/Sudoeste do Estado de Minas Gerais.	58
3.6 – Histograma da altitude em áreas cultivadas pela cultura do café na região Sul/Sudoeste do Estado de Minas Gerais.	59
3.7 – Histograma da declividade em áreas cultivadas pela cultura do café.	60
3.8 – Histograma da orientação de vertente em áreas cultivadas pela cultura do café na região Sul/Sudoeste do Estado de Minas Gerais.	60
3.9 - Fluxograma da Metodologia.	64
3.10 - Seleção dos segmentos cuja área correspondesse à cultura de café.	68
3.11 – Fotos de campo de lavouras no Estado de Minas Gerais representativas da diversidade da cultura do café na região, (a) lavoura de café em produção, município de Boa Esperança; (b) lavoura de café sem manejo e tratamentos culturais, município de Campo Belo; (c) lavoura de café em formação, município de Boa Esperança e (d) lavoura de café podado, município de Aguanil.	70
4.1 – Balanços hídricos gerais da região Sul/Sudoeste do Estado de Minas Gerais: (a) ano 2002, (b) ano 2003, (c) ano 2004 e (d) ano 2005.	85
4.2 – Comportamento médio da precipitação e temperatura da região Sul/Sudoeste do Estado de Minas Gerais: (a) 2002, (b) 2003, (c) 2004 e (d) 2005.	86
4.3 - Comportamento temporal do NDVI médio de acordo com os agrupamentos gerados pelo teste de <i>Friedman</i> em que a, b, c representam os grupos para o café em produção; d, e, f para café em formação. IPA_1, 2 e 3, referem-se as amostras na	

fazenda Ipanema, ALF_1, 2 e3, as amostras no município de Alfenas, CM_1, 3 e 4 as amostras no município de Campo do Meio. (*) São identificadores das amostras de café em formação.	89
4.4 – Lavoura de café em formação no Município de Boa Esperança, MG.....	90
4.5 – Comportamento médio dos índices de vegetação para lavouras cafeeiras, (a) valores de NDVI para café produção, formação e podado e (b) valores de EVI para café produção, formação e podado.....	91
4.6 – Mapa temático referente à capacidade de armazenamento de água dos solos na região Sul/Sudoeste do Estado de Minas Gerais.	94
4.7 – Ajuste do fator de produtividade agrícola (a) ano agrícola 2003/04, (b) ano agrícola 2004/05 e (c) ajustes para os anos agrícolas 2001/02 e 2002/03.	95
4.8 – Produtividade média, máxima e mínima observadas na região Sul/Sudoeste após estimava para os anos 2001/02, 2002/03, 2003/04 e 2004/05.	97
4.9 – Produtividade final estimada nos anos agrícolas (a) 2001/02, (b) 2002/03, (c) 2003/04 e (d) 2004/05.....	98
4.10 – Mapas temáticos referentes à produtividade acumulada estimada nos anos-agrícolas 2001/02, 2002/03 acumulada por período fenológico.....	100
4.11 – Mapas temáticos referentes à produtividade acumulada estimada nos anos-agrícolas 2003/04 e 2004/05 acumulada por período fenológico.....	101
4.12 – Produtividade estimada acumulada durante o ciclo fenológico da cultura do café para os anos agrícolas (a) 2001/02; (b) 2002/03; (c) 2003/04 e (d) 2004/05.	102
4.13 – Índice de penalização estimado para a cultura do café na região Sul/Sudoeste de Minas Gerais, para os anos agrícolas de 2001/02, 2002/03, 2003/04 e 2004/05.....	103
4.14 – Comportamento da penalização parcial estimada para o ano-agrícola 2001/02 na região Sul/Sudoeste de Minas Gerais.	104
4.15 – Comportamento da penalização parcial estimada para o ano-agrícola 2002/03 na região Sul/Sudoeste de Minas Gerais.	106
4.16 – Comportamento da penalização parcial estimada para o ano-agrícola 2003/04 na região Sul/Sudoeste de Minas Gerais.	107
4.17 – Comportamento da penalização parcial estimada para o ano-agrícola 2004/05 na região Sul/Sudoeste de Minas Gerais.	108
4.18 – Mapas temáticos referentes à penalização acumulada final estimada para o período de abril a março para os anos agrícolas 2001/02, 2002/03, 2003/04, 2004/05.	109

- 4.19 – Mapas temáticos referentes à penalização estimada nos anos-agrícolas 2001/02 e 2002/03 por período fenológico na região Sul/Sudoeste de Minas Gerais..... **111**
- 4.20 – Mapas temáticos referentes à penalização estimada nos anos-agrícolas 2003/04 e 2004/05 por período fenológico na região Sul/Sudoeste de Minas Gerais..... **112**
- 4.21 – Índice de penalização parcial e acumulado estimados durante o ciclo fenológico da cultura do café para os anos agrícolas (a) 2001/02; (b) 2002/03; (c) 2003/04 e (d) 2004/05. **113**
- 4.22 – Comportamento médio da precipitação e da penalização estimada nos anos-agrícolas 2001/02, 2002/03, 2003/04 e 2004/05 por período fenológico: (a) maturação, (b) repouso (c) florada e formação do chumbinho e (d) granação dos frutos. **114**
- 4.23 – Estimativa da produtividade por microrregião geográfica: (a) ano agrícola 2001/02, (b) ano agrícola 2002/03, (c) ano agrícola 2003/04 e (d) ano agrícola 2004/05. **115**
- 4.24 – Mapa temático referente ao índice de penalização estimada no município de Alfenas pelo modelo (a) agrometeorológico-espectral e (b) agrometeorológico. **119**

LISTA DE TABELAS

2.1 – Características gerais do satélite Terra e do sistema sensor MODIS.	45
3.1 – Classes utilizadas nos mapas temáticos de declividade e vertente.....	55
3.2 - Disposição dos mosaicos do produto MOD13Q1 aos meses correspondentes aos estádios fenológicos do café.	66
3.3 – Distribuição dos segmentos amostrados por municípios e por tipo de lavoura.....	71
3.4 – Variáveis de entrada do modelo AGROMET.....	73
3.5 – Capacidade de armazenamento de água para as diferentes classes de solo.....	74
3.6 – Resumo dos parâmetros utilizados na parametrização do modelo agrometeorológico-espectral.	76
4.1 – Produtividade estimada pelo modelo agrometeorológico-espectral para região Sul/Sudoeste de Minas Gerais.	97
4.2 – Diferença relativa entre a produtividade estimada pelo modelo agrometeorológico-espectral e a informação do IBGE.	117

1. INTRODUÇÃO

O Brasil é atualmente o maior produtor mundial de café, apresentando uma área plantada de 2,7 milhões de hectares, o que corresponde a aproximadamente 6 bilhões de pés. Com uma exportação média de 28 milhões de sacas, é o principal exportador e responde por mais de um terço de toda a produção mundial. O setor é responsável pela geração de sete milhões de empregos diretos e indiretos no país e por uma riqueza anual de 10 bilhões de reais, cerca de 3 bilhões de dólares (EMBRAPA CAFÉ, 2006).

A importância do café para a economia brasileira, dada especialmente por sua ampla participação na balança comercial, o torna uma cultura cujo monitoramento é de grande interesse aos setores público e privado. Não obstante, informações objetivas e confiáveis sobre a produção final desse produto são relevantes para direcionar os planejamentos governamentais quanto aos financiamentos da produção, abastecimento do mercado interno, bolsa de mercadoria e futuros, exportações e importações, bem como minimizar a especulação de mercado.

A produção de café é altamente dependente de fatores fisiológicos, tratos culturais e ambientais. Dos fatores ambientais, o clima exerce um importante papel, uma vez que as condições meteorológicas como temperaturas mínimas e máximas do ar durante os estádios fenológicos críticos, interferem na produtividade da cultura. Do mesmo modo, a disponibilidade hídrica constitui o principal fator que pode afetar a produtividade biológica e, conseqüentemente, a econômica. Além disso, o clima também interfere na bienalidade produtiva, na qualidade do produto e na sustentabilidade da planta (PICINI *et al.*, 1999; ASSAD *et al.*, 2004). Dos fatores fisiológicos, a característica de bienalidade da cultura do café, explicada pela ocorrência simultânea das funções vegetativas e reprodutivas no mesmo ramo, é um dos fatores de maior influência na produtividade da cultura. Ou seja, o volume da produção é proporcional ao número de nós ou gemas formadas na estação vegetativa anterior, o que torna esta característica relevante para pesquisas voltadas à produtividade do café (BEAUMONT, 1939; RENA e MAESTRI, 1985).

No Brasil, a quantificação dos efeitos da variabilidade climática em culturas agrícolas e, conseqüentemente, o impacto sobre a produção é realizada de duas maneiras: a primeira, inteiramente subjetiva, a safra é estimada a partir de informações baseadas em opiniões de agentes técnicos e econômicos relacionados ao setor agrícola. Tal subjetividade deve-se em parte à dinâmica espaço-temporal da atividade agrícola que, aliada a grande extensão territorial brasileira dificulta a obtenção de informações atualizadas e confiáveis (PINO *et al.*, 2001). A segunda, a safra é estimada em função da quebra de rendimento a partir de modelos agrometeorológicos e agrometeorológicos-espectrais.

Os modelos agrometeorológicos foram os primeiros a serem desenvolvidos e são muito utilizados atualmente. Esses modelos consideram a interferência dos efeitos ambientais aos processos fisiológicos da cultura, cujo impacto é observado na produtividade. Os modelos agrometeorológicos-espectrais, por sua vez, além de considerarem as condições meteorológicas, tentam a partir do componente espectral, inferir informações intrínsecas a cultura, não incluídas no modelo agrometeorológico.

Com relação aos modelos aplicados a cultura do café no que tange a estimativa da quebra da produtividade da cultura, modelos agrometeorológicos têm sido desenvolvidos (PICINI, 1999, CAMARGO *et al.*, 2003, SANTOS e CAMARGO 2006). Todavia, a dificuldade de parametrizar um modelo agrometeorológico dada à alta heterogeneidade da cultura do café quanto à variedade, adensamento, idade das lavouras, tipos de solos e sistemas de manejo aplicado numa mesma área, somado à característica de bienalidade da cultura e a ausência da distribuição espacial da área plantada, tornam-se grande limitação para utilização de modelos de estimativas específicos para a cultura do café em grandes áreas territoriais.

Segundo Fontana e Berlato, (1998) parte dessas questões podem consideradas a partir da incorporação de um termo espectral, representado pelo índice de vegetação. Em geral, a utilização do índice de vegetação integrado em um determinado período do desenvolvimento das culturas, ou ainda, em todo o seu ciclo, tem gerado boas relações com parâmetros agrônômicos, como a estimativa da produção de culturas anuais

(RUDORFF e BATISTA, 1991; FONTANA e BERLATO, 1998; MELO *et al.*, 2003; RIZZI, 2004; PICOLLI, 2006).

Dessa forma, os modelos agrometeorológicos-espectrais até então utilizados especificamente para culturas anuais, se mostram como uma possibilidade de aplicação às culturas perenes como o café. Todavia, para que as estimativas da penalização sejam as mais coerentes possíveis, é fundamental que se tenha conhecimento prévio da relação entre os dados espectrais e a cultura e, que os dados espectrais sejam disponibilizados com uma alta frequência.

Neste sentido, as imagens oriundas do sensor *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer* (MODIS) a bordo dos satélites Terra e Aqua, dada sua resolução temporal de recobrimento, o que favorece a aquisição de imagens livres de cobertura de nuvens viabilizam o monitoramento da cultura com maior frequência de observação, ao longo de seu ciclo vegetativo e produtivo. Dentre os produtos gerados a partir dos dados coletados por este sensor, os índices de vegetação *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI) e *Enhanced Vegetation Index* (EVI) contidos no produto MOD13Q1, são voltados especialmente para vegetação, fornecidos a cada 16 dias, georreferenciados e corrigidos para os efeitos atmosféricos, com resolução espacial de 250 x 250m.

Resultados positivos foram encontrados por diversas pesquisas quanto ao potencial das imagens índice de vegetação do sensor MODIS no monitoramento da vegetação (HUETE *et al.*, 2002; ZHANG *et al.*, 2005), mudanças no vigor vegetativo das culturas de café e soja ocasionadas por influência de condições climáticas adversas, como geadas e déficit hídrico (RAFAELLI, 2004; YI, 2005) e modelos de estimativa de produtividade para culturas anuais, soja e cana-de-açúcar (RIZZI, 2004; PICOLLI, 2006).

Diante disso, o conhecimento da distribuição espacial da área plantada de café, aliado aos dados meteorológicos fornecidos pelo CPTEC/INPE e às informações espectrais obtidas das imagens MODIS, distribuídas gratuitamente pela NASA, permitem formular

uma hipótese de que é possível monitorar e estimar a produtividade da cultura do café em escala regional. Desta forma, esta pesquisa tem os seguintes objetivos:

- **Objetivo Geral**

Obter o monitoramento e a estimativa da produtividade de café na região Sul/Sudoeste do Estado de Minas Gerais a partir de um modelo agrometeorológico-espectral.

- **Objetivos Específicos**

- ✓ Verificar o comportamento dos índices de vegetação NDVI e EVI obtidos pelo produto MOD13Q1 do sensor MODIS para diferentes lavouras de café.
- ✓ Avaliar a relação dos índices de vegetação com os estádios fenológicos da cultura.
- ✓ Obter uma caracterização da área de estudo em relação à topografia e a variabilidade climática nos anos 2002, 2003, 2004 e 2005.
- ✓ Adaptar pioneiramente o modelo agrometeorológico-espectral utilizado para culturas anuais proposto por Rizzi (2004) a uma cultura perene, como é o caso do café, na região Sul/Sudoeste de Minas Gerais, visando quantificar o impacto das variáveis agrometeorológicas durante os estádios fenológicos do café através do índice de penalização e obter a estimativa da produtividade do cafeeiro.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1. Histórico

O cafeeiro (*Coffea sp*) é um arbusto da família Rubiaceae, gênero *Coffea*. De acordo com Malavolta (2000), a espécie *Coffea arabica L.* é oriunda da Etiópia, e se expandiu para Arábia no início do século XVII e posteriormente para Holanda. No Brasil o café data da época do império, trazido das Guianas para Belém do Pará, de onde foi levado para o Rio de Janeiro e se espalhou pelos Estados de São Paulo, Minas Gerais e Espírito Santo.

O café arábico produz um café de melhor qualidade, de aroma e sabor intenso, preferido pelos mercados mais exigentes, sendo basicamente a espécie que contribui para o mercado dos cafés especiais. Essa espécie representa 75% da produção brasileira (Medina Filho, 2003). Os cultivares comerciais de café arábica em utilização extensiva no país são Mundo Novo e Catuaí, ambos com bom potencial de produção. O Mundo Novo tem sido preferido ultimamente nas áreas mecanizáveis das regiões de cerrados, por possuir um melhor vigor vegetativo, maturação mais uniforme e precoce, apresentando menor risco em áreas sujeitas a geadas. O Catuaí possui porte baixo, o que facilita a colheita especialmente em áreas montanhosas, e quando utilizado em espaçamentos adensados, apresenta maior produtividade que o Mundo Novo. Além disso, é menos prejudicado pela deficiência de cálcio, magnésio e zinco, e mais resistente à ferrugem (MATIELLO, 1986; MALAVOLTA, 2000).

Temperaturas médias anuais entre 18 e 21°C, são os limites mais indicados para *Coffea arabica* (PEZZOPANE, 2004). Com relação à demanda hídrica, DaMatta e Rena (2002) indicam que a faixa ideal situa-se entre 1200 a 1800 mm, embora seja necessário observar não somente a quantidade de precipitação, mas também a sua distribuição e limites de evapotranspiração.

2.1.1. Panorama da produção mundial e nacional

Reconhecida como uma das bebidas mais populares do mundo, o café está entre as *commodities*¹ de maior importância mundial devido ao volume financeiro movimentado em sua comercialização (TEIXEIRA e MILHOMEN, 2001). A produção mundial de café estimada para o ano agrícola 2005/06 foi de 121 milhões de sacas. Em 2004/05 a produção foi de 107 milhões de sacas, sendo 69 milhões de arábica e 38 milhões de sacas de robusta (SINDCAFÉ, 2006).

Atualmente, o Brasil é o maior produtor mundial de café, sendo responsável por 34% do mercado internacional, volume equivalente à soma da produção dos outros cinco maiores países produtores (Vietnã, Colômbia, Indonésia, Etiópia e Índia), como mostra a Figura 2.1, e possui a posição de segundo mercado consumidor, após os Estados Unidos.

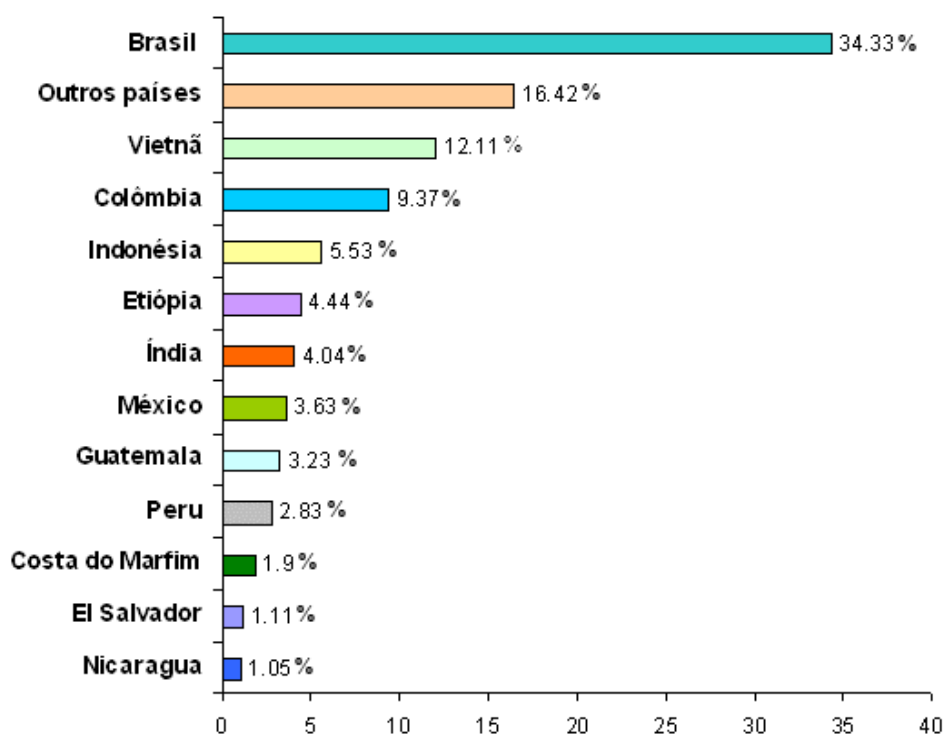


Figura 2.1 – Principais países produtores de café em grão.
Fonte: ABIC (2007).

¹ Commodities - termo utilizado para comercialização mercadorias que não possuem valor agregado.

Em decorrência da própria estrutura do processo produtivo, o setor do café apresenta maior variabilidade nos preços em relação aos demais setores da economia e tem ampla dificuldade para ajustar a produção e os preços às condições do mercado. Altos preços associam-se a expectativas de alta rentabilidade e induzem à ampliação da capacidade produtiva, seja com a formação de novas lavouras ou com um melhor trato às lavouras já existentes. A grande produção por sua vez, determina queda de preços, redução de estímulo a novos plantios, menores cuidados com a cultura ou até mesmo erradicação. Contudo, a baixa produção induz uma nova alta de preço, iniciando-se um ciclo. Esses ciclos, aliados à instabilidade dos retornos econômicos, ao alto grau de internacionalização, à competição acirrada, à especulação em torno de preço e níveis crescentes de exigência, fazem do café, uma cultura, cujas informações do cenário internacional são imprescindíveis para torná-lo uma atividade lucrativa (CAIXETA, 2001).

2.1.1.1. Produção nacional

O Brasil possui uma área plantada de 2,7 milhões de hectares, com aproximadamente seis bilhões de pés - pouco mais da metade só no Estado de Minas Gerais. A exportação média anual é de 28 milhões de sacas, o que representa 30% do mercado internacional e responde por mais de um terço de toda produção mundial – três vezes mais do que a Colômbia, o segundo maior exportador (EMBRAPA CAFÉ, 2006).

De acordo com a Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB, 2007), a produção nacional do ano agrícola 2005/06 atingiu 42,5 milhões de sacas de café beneficiado, sendo 33 milhões de arábica e 9,5 milhões de robusta, superior à safra 2004/05 em 29%, em razão de um crescimento de 32,9% na produtividade. A produtividade média nessa safra foi de 19,75 sacas/ha e a área cultivada de 2,3 milhões de hectares. Destes, 2,2 milhões de hectares (92,7%) encontravam-se em produção. Tal aumento deveu-se aos bons tratos culturais, incentivados pela recuperação dos preços de mercados, e à ocorrência de bienalidade de alta produção da cultura.

Para o ano agrícola 2006/07 estima-se uma produção entre 31,1 e 32,3 milhões de sacas de café beneficiado, na qual a participação do café arábica situa-se entre 21,3 a 22,4 milhões de sacas. Com relação à safra anterior, houve uma redução entre 26,9% e 23,9%, motivada por queda de 3,1% na área de cafezais em produção, e na produtividade, que passou de 19,75 sacas/ha para um valor entre 14,89 e 15,50 sacas/ha. Essa redução também se deveu às condições climáticas adversas no período de floração, além da ocorrência de bienalidade de baixa produção (CONAB, 2007).

O parque cafeeiro no Brasil concentra-se no centro-sul do país, onde se destacam quatro estados produtores: Minas Gerais (43,4%), Espírito Santo (28,4%), São Paulo (7,5%) e Paraná (5,6%), que juntos foram responsáveis por 85% do total produzido no país em 2006, como mostra a Figura 2.2. Encontram-se ainda plantações no Nordeste, especialmente na Bahia (7,1%), e na região Norte, no Estado de Rondônia, responsável por 4,6% da produção federal (CONAB, 2007).

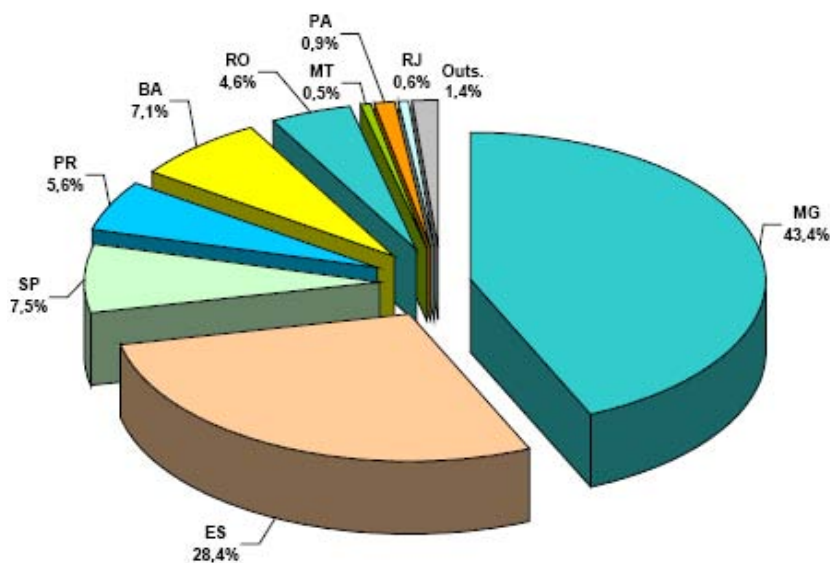


Figura 2.2 – Principais Estados produtores de café no Brasil no ano de 2005/06.
Fonte: CONAB (2007).

A produção no ano agrícola 2005/06 no Estado de Minas Gerais atingiu a cifra de 22 milhões de sacas de café beneficiado, o que correspondeu a um aumento de 44,5% em relação à safra anterior, devido aos tratos culturais adequados, estimulados pela recuperação dos preços do café a partir de 2004 e considerando os efeitos de ano de alta

produção. Estima-se que no ano agrícola 2006/07, a produção seja entre 13,4 e 14,1 milhões de sacas de café, representando uma queda entre 39,1% e 35,9%, em comparação com a safra anterior. Em todas as regiões do Estado foram observadas perdas na produção variando entre 49,1% e 48,6% nas regiões Sul e Centro-Oeste, entre 38,7% e 31,8% nas do Triângulo, Alto Paranaíba e Noroeste e de 16,1% e 11,8% nas da Zona da Mata, Jequitinhonha, Mucuri, Rio Doce, Central e Norte. Esta expectativa de quebra baseia-se nos seguintes fatores: bionalidade em baixa, floradas de baixa intensidade, aumento da incidência de algumas doenças e efeitos decorrentes da deficiência hídrica ocorrida ao longo do ano em curso (CONAB, 2007).

2.1.1.2. Exportações

Os números, que constam do último relatório do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA, 2007), revelam que as exportações de café verde atingiram 26 milhões de sacas. A Alemanha foi a principal responsável pela importação do café verde brasileiro, cerca de 5,1 milhões de sacas (19,6% do total exportado), os Estados Unidos ficaram em segundo lugar, cujas importações foram de 4,7 milhões de sacas, equivalente a 18% do total exportado e a Itália, em terceiro lugar, com uma importação aproximada de 2,5 milhões de sacas (9,6%).

O café torrado por sua vez, teve 89 mil sacas exportadas para 43 países diferentes. O principal destino foi o mercado dos Estados Unidos que importou aproximadamente 56 mil sacas. A Itália e o Japão também foram grandes compradores de café dessa safra, cerca de 16 e 6,7 mil sacas respectivamente.

No mercado de café solúvel, o Brasil exportou 1,13 milhões de sacas em 2006, o que representou uma cifra de 382 milhões de dólares na balança comercial, sendo os Estados Unidos o principal cliente do café solúvel nacional, responsável pela aquisição de 18,6% do total exportado. O segundo maior consumidor foi a Rússia, responsável pela importação de aproximadamente 160 mil sacas, equivalente a 14,2%.

2.2. A cultura do café

2.2.1. Fenologia do cafeeiro

A fenologia pode ser definida como o estudo dos eventos periódicos da vida de uma planta em função da sua reação às condições do ambiente. Segundo Gouveia (1984) citado em Camargo e Camargo (2001), a maioria das plantas emite as inflorescências na primavera e frutificam no mesmo ano fenológico. O café arábica é uma planta especial, que necessita de dois anos para completar o ciclo fenológico, sendo distinguidas duas fases durante seu ciclo: preparativa ou vegetativa e construtiva ou reprodutiva, para as condições de cultivo na maioria das regiões do Brasil. No período seco, associado a baixas temperaturas, ocorre a fase preparativa, que não se manifesta claramente por caracteres externos. Durante o período quente e chuvoso predomina a fase construtiva, quando se manifestam as atividades de crescimento dos ramos, folhas, gemas, flores e frutos (ORTOLANI *et al.*, 1970).

Com o objetivo de facilitar e racionalizar as pesquisas e observações na cafeicultura, Camargo e Camargo (2001) apresentaram uma nova esquematização da fenologia do café arábica (Catuaí e Mundo Novo) em seis fases, no período de 24 meses, segundo as condições climáticas do Brasil (Figura 2.3).

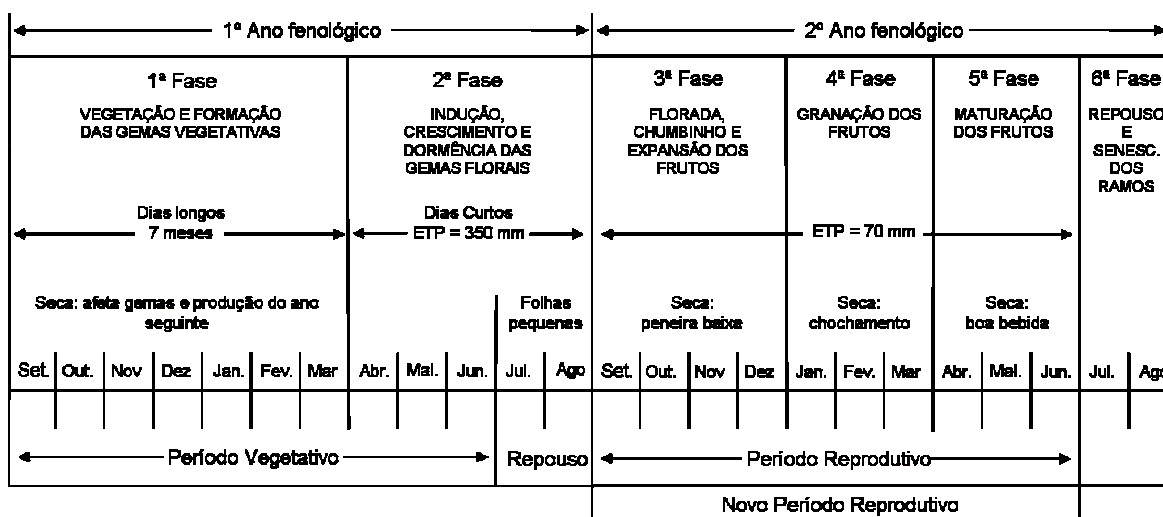


Figura 2.3 – Fases fenológicas do café arábica.

Fonte: Adaptada de Camargo e Camargo (2001).

Como se pode observar na Figura 2.3, duas fases fenológicas ocorrem no primeiro ano, e quatro fases no segundo ano. As duas primeiras correspondem ao período vegetativo, e as três fases seguintes (3^a, 4^a e 5^a) correspondem ao período reprodutivo do cafeeiro.

A primeira fase corresponde à vegetação e formação das gemas foliares, que ocorre no período de setembro a março, meses de dias longos com foto período acima de 12 horas de brilho solar. A segunda fase, indução/crescimento/dormência das gemas florais, ocorre no período de abril a agosto. Nesta fase os dias são curtos e ocorre a indução das gemas foliares formadas na primeira fase para gemas florais. No final da segunda fase, entre julho e agosto, as plantas entram em relativo repouso com a formação de um ou dois pares de folhas pequenas, o que delimita os anos fenológicos.

A terceira fase é a primeira do segundo ano fenológico, ou seja, do período reprodutivo do cafeeiro e inicia-se com a florada e expansão dos frutos nos meses de setembro a dezembro. A quarta fase corresponde a granação dos frutos, quando os líquidos internos solidificam-se, dando formação aos grãos. Ocorre em pleno verão, de janeiro a março. Na quinta fase, se dá a maturação dos frutos, no período de abril a junho. A sexta e última fase, corresponde ao repouso e senescência dos ramos produtivos não primários, que secam e morrem, conhecido como auto-poda dos cafeeiros. Na primavera do ano civil seguinte brotam novos ramos vegetativos, que se transformam em reprodutivos, permitindo nova produção.

A esquematização das diferentes fases fenológicas do cafeeiro arábica possibilita identificar as fases que exigem maior demanda pela água disponível no solo e aquelas nas quais se torna conveniente ocorrer um pequeno estresse hídrico, para condicionar uma abundante florada. Facilita ainda, o reconhecimento das melhores épocas de aplicação de tratamentos fitossanitários e a execução das diversas operações agrícolas necessárias (CAMARGO e CAMARGO, 2001).

2.2.2. Bienalidade do cafeeiro

Devido sua natureza fisiológica, o cafeeiro apresenta uma característica particular quanto à produção, conhecida como bienalidade. Tal característica pode ser explicada pela ocorrência das funções vegetativas e reprodutivas. Nos anos de grande produção, o crescimento dos frutos absorve maior parte do fotoassimilado produzido pela planta na fotossíntese, diminuindo o desenvolvimento vegetativo. O fruto do ano seguinte, entretanto, se desenvolve nas partes novas dos ramos, sendo o crescimento desses novos ramos dependente da quantidade de frutos desenvolvidos nos ramos do ano anterior (CAMARGO e FAHL, 2001). Assim, o volume da produção é proporcional ao número de nós ou gemas formadas na estação vegetativa anterior (BEAUMONT, 1939; RENA e MAESTRI, 1985).

2.2.3. Solo e relevo

O café arábica é normalmente cultivado em altitudes acima de 600 metros, não só no Brasil como na Colômbia, América Central, África e mesmo na Ásia (MEDINA FILHO e BORDIGNON, 2003).

Segundo Sedyama *et al.* (2001) o café adequa-se melhor em locais de solos profundos, porosos e bem drenados, com uma estrutura granular de tamanho médio, e moderadamente desenvolvidos. A textura média é a mais favorável. Solos com teor de argila menor que 20% não são recomendados e, quando muito argilosa, deve apresentar estrutura e porosidade favorável à cultura. O relevo também é um fator importante na instalação dos cafezais, principalmente, quanto à mecanização e à conservação do solo. Recomenda-se implantar a lavoura cafeeira na face norte ou na poente ou ainda em pontos intermediários, e evitar as encostas de exposição sul, devido aos ventos frios do sul aos quais nosso hemisfério está exposto. Nas zonas sujeitas ao fenômeno das geadas de radiação, devem ser evitados os vales de difícil circulação de ar.

Os fatores topográficos também devem ser considerados nos projetos de implantação da cultura, dentro dos campos climáticos homogêneos, alterando possivelmente os níveis de adaptabilidade climática (SEDIYAMA *et al.*, 2001). Além disso, a produtividade da

lavoura de café depende da cultivar e da densidade de plantio adotadas no estabelecimento da cultura, uma vez que diferenças na produtividade podem ocorrer em função do espaçamento e número de plantas por cova (PAULO *et al.*, 2005).

2.3. Exigências climáticas

O café arábico é afetado, nos seus diversos estádios fenológicos, pelas condições meteorológicas, em especial pela disponibilidade hídrica, que constitui o principal fator que afeta a produtividade biológica e, conseqüentemente, a econômica (CAMARGO *et al.*, 1984). Além desse tipo de condicionamento, o clima interfere na bienalidade produtiva, na qualidade do produto e na sustentabilidade da planta (CAMARGO, 1985; PICINI *et al.*, 1999; ASSAD *et al.*, 2004).

Segundo Picini *et al.* (1999), o déficit hídrico, capaz de alterar o metabolismo da planta, ocupa uma posição de destaque entre os fatores climáticos que limitam a produção do cafeeiro, dada sua ocorrência em grandes áreas cultiváveis.

As principais regiões produtoras de café no Brasil se concentram nos Estados de Minas Gerais, São Paulo, Paraná, Rio de Janeiro e Espírito Santo, onde ocorre mais de 150 mm de chuva por mês nas fases de florescimento, formação e maturação dos frutos, nos meses de setembro a março, que correspondem ao período de renovação de ramos e folhas (SEDIYAMA *et al.*, 2001). Entretanto, Pezzopane (2004) ressalta que a necessidade hídrica depende de outros fatores, como a distribuição das chuvas e do ritmo anual da evapotranspiração.

Nesse sentido, Camargo (1977) estabeleceu faixas térmicas e necessidades hídricas para o cultivo do café arábica no Estado de São Paulo, o que permitiu assim, estabelecer áreas aptas, marginais e inaptas a partir de combinações entre temperaturas médias e deficiências hídricas anuais. Ortolani *et al.* (1970) indicaram faixas de temperatura média anual ideal entre 19°C e 22°C para cultivos comerciais.

Posteriormente, Caramori (2001) e Astolpho *et al.* (2004) realizaram zoneamentos voltados para riscos climáticos na cafeicultura (geadas, por exemplo), para os Estados do Paraná e São Paulo, respectivamente.

Com o objetivo de determinar a aptidão agrícola para o cultivo do café arábica (*Coffea arabica L.*) em Minas Gerais, Sedyama *et al.* (2001) realizaram o zoneamento climático do Estado. O resultado do estudo mostrou que 48,7% da área total de Minas Gerais são consideradas aptas para o cultivo do café arábica, independente de irrigação. As áreas consideradas aptas caso sejam irrigadas correspondem a 36,2% e as inaptas correspondem a 15,1% da área total do Estado.

De acordo com Matiello *et al.* (1991; 2002) chuvas anuais de 1200 mm podem ser consideradas adequadas ao bom desenvolvimento do café arábico. Caso a deficiência hídrica seja inferior a 150 mm, isto é, déficit hídrico pequeno, porém com temperaturas médias (T_a) superiores a 23°C, consideram-se situação inapta, devido à ocorrência de altas temperaturas. Esta condição restringe a frutificação, resultando numa baixa produtividade.

Por outro lado, Sedyama *et al.* (2001) mencionam que períodos curtos de seca parecem ser importante para o crescimento das raízes, maturação dos ramos formados na estação chuvosa precedente e, principalmente, para a diferenciação floral e maturação dos frutos.

No período de vegetação e frutificação que corresponde ao 1^a ano, durante os meses de setembro a março, o cafeeiro exige maior quantidade de água e, na fase de colheita e repouso, no período de junho a agosto, a exigência é menor, assim, a ocorrência de pequena deficiência hídrica nesta fase não ocasionará grandes prejuízos para a planta (MATIELLO *et al.*, 1991; 2002).

Segundo Camargo e Camargo (2001), a fase da florada e expansão dos frutos (3^a fase) inicia-se cerca de 8 a 15 dias após um aumento do potencial hídrico nas gemas florais maduras (choque hídrico) causado por chuva ou irrigação responsáveis pela acumulação de cerca de 350 mm de evapotranspiração potencial. Caso ocorra estiagem forte nessa

fase, o estresse hídrico poderá prejudicar o crescimento dos frutos e resultar na ocorrência de peneira baixa². Todavia, os cafeeiros que recebem água com muita frequência na fase da florada (3ª fase), têm floração indefinida. Uma florada principal ocorre quando se verifica um período de restrição hídrica, seguido de chuva ou irrigação abundante. Temperatura ambiente elevada associada a um intenso déficit hídrico durante o início da florada provoca a morte dos tubos polínicos pela desidratação e, conseqüentemente, o abortamento das flores, o que resulta nas conhecidas “estrelinhas” (CAMARGO, 1985).

Para Sedyama *et al.* (2001), as “estrelinhas” se formam devido temperaturas iguais ou superiores a 34°C que também podem favorecer o abortamento floral, o que diminui consideravelmente a produtividade. Temperaturas iguais ou inferiores a 2°C no abrigo implicam na formação de geadas de radiação. Nas encostas de face Sul e Sudoeste, pode também ocorrer sintomas típicos de "crestamento" foliar no período de invernos, por ficarem suscetíveis à influência de ventos moderados a fortes, com temperaturas baixas. Conforme menciona Pezzopane (2004), temperatura de -2°C próximas às folhas provoca danos aos tecidos, e temperaturas de -3 a -4°C pode acarretar, inclusive, a morte dos tecidos.

Do mesmo modo, a ocorrência de estiagens severas na fase de granação dos frutos (4ª fase) pode resultar no chamado chochamento³ dos frutos. Já no período de maturação (5ª fase), a evapotranspiração potencial⁴ (ETp) decresce significativamente e as deficiências hídricas moderadas beneficiam a qualidade do produto (CAMARGO e CAMARGO, 2001).

² Peneira baixa – termo empregado para designar quebra de produção, devido a redução do tamanho do grão.

³ Chochamento – refere-se a situação em que não ocorre o enchimento e granação dos grãos.

⁴ Evapotranspiração potencial - representa a perda natural de água do solo vegetado para a atmosfera através da ação conjunta da evaporação e da transpiração.

2.4. Modelos matemáticos

A avaliação da influência das variáveis climáticas no desenvolvimento e na produtividade de culturas agrícolas pode ser realizada desde as correlações mais simples até modelos matemáticos mais complexos, nos quais diferentes parâmetros são considerados. Para Hoogenboom (2000), as variáveis meteorológicas como temperaturas máximas e mínimas do ar, radiação solar total e a precipitação pluvial são primordiais para determinar a variabilidade do clima sobre a produção de culturas.

Baier (1979) classifica os modelos em três categorias: modelo estatístico empírico - que é construído a partir de séries históricas de dados de rendimento e dados meteorológicos de uma determinada região; modelo de análise planta-clima - que objetiva explicar com base nos processos físicos e/ou fisiológicos o efeito de uma ou mais variáveis meteorológicas no crescimento, desenvolvimento e rendimento da cultura e modelo de análise da cultura e seu meio - que visa representar as relações existentes entre a resposta da planta e as variáveis ambientais durante todo o ciclo da cultura.

Outra abordagem é dada por Paustian *et al.* (1992), a qual classifica os modelos matemáticos em três tipos: empíricos - que são baseados em dados puramente observados; estocásticos - que o processo é descrito pelas leis de probabilidade e mecânicos - que consideram as leis físicas, químicas e biológicas no processo, sendo os mais versáteis dentre os tipos de modelos matemáticos. Costa (1997) ainda considera que os modelos estocásticos apresentam certo grau de probabilidade associado à sua resposta, enquanto que os mecânicos já estimam um valor mais preciso da variável dependente.

Em Camargo *et al.* (1999) as classificações de modelos encontrados em literatura são apresentadas conforme o grau de detalhamento: empírico estatístico simples - porém é capaz de descrever as relações entre as variáveis envolvidas; conceitual - que requer grande número de informações dos processos físicos e biológicos e por último, matemático mecânico - que descreve matematicamente a casualidade ou a relação entre os processos envolvidos durante o ciclo da cultura.

2.4.1. Modelos agrometeorológicos

Segundo Moraes *et al.* (1998), as relações entre os parâmetros climáticos e a produção agrícola são bastante complexas, pois os fatores ambientais podem afetar o crescimento e o desenvolvimento das plantas sob diferentes formas nas diversas fases do ciclo da cultura. Os autores comentam ainda que os modelos agrometeorológicos relacionados com crescimento, desenvolvimento e produtividade das culturas fornecem dados que permitem ao setor agrícola tomar importantes decisões, tais como: melhor planejamento do uso do solo, adaptação de culturas, monitoramento e previsão de safras, controle de pragas e doenças, estratégia de pesquisa e planejamento.

Os modelos agrometeorológicos além de fornecerem dados para alimentar os sistemas de previsão de safras agrícolas, permitem a identificação do estresse hídrico ao longo do ciclo da cultura cujos impactos na produtividade podem ser detectados e avaliados (JENSEN, 1968; STEWART *et al.*, 1976; DOORENBOS e KASSAM, 1979; RUDORFF e BATISTA, 1990; CAMARGO *et al.*, 1999). Neste sentido, modelos agrometeorológicos são desenvolvidos para serem aplicados em diversas culturas. Com base na ênfase da relação planta-clima, Jensen (1968) inicialmente propôs um modelo agrometeorológico, o qual considera como produtório a penalização do estresse hídrico por estágio fenológico uma vez que ocasiona redução da produção final na medida em que as necessidades hídricas não estão sendo satisfatórias ao longo do ciclo da cultura.

Posteriormente, Stewart *et al.* (1976) e Doorenbos e Kassam (1979) também desenvolveram um modelo agrometeorológico multiplicativo que se baseou na quantificação do estresse hídrico através da relação entre a evapotranspiração real (ER) e evapotranspiração potencial (EP) limitado por um fator de resposta a produtividade (k_y), que varia de acordo com estágio de desenvolvimento de cada cultura conforme a Equação 2.1.

$$Y_{est} = Y_p \left[1 - k_y \left(1 - \frac{ER}{EP} \right) \right] \quad (2.1)$$

onde:

Y_{est} = produtividade real;

Y_p = produtividade potencial;

k_y = fator de resposta à produtividade que relaciona o déficit da evapotranspiração relativa com a diminuição da produtividade e varia de acordo com o estágio fenológico em que se encontra;

$\frac{ER}{EP}$ = evapotranspiração relativa.

O modelo permite o cálculo da produtividade em períodos parciais ao longo do ciclo da cultura. A produtividade final é determinada através do somatório das produtividades parciais.

No Brasil o modelo foi aplicado para estimar a produtividade de diversas culturas anuais, como: soja (MORAES *et al.*, 1998; FONTANA *et al.*, 2001), milho (FERRAUDO *et al.*, 1995), girassol (MARIN *et al.*, 2000), sorgo (MARIN *et al.*, 2006), entre outras.

2.4.1.1. Modelos agrometeorológicos para a cultura do café

Para a cultura do café no Brasil, especificamente, são encontrados pesquisas com enfoque para a estimativa da produtividade em: Tosello e Arruda (1962), Camargo *et al.* (1984), Silva *et al.* (1987), Liu e Liu (1988), Weill (1990), Picini (1998), Picini *et al.* (1999), Carvalho *et al.* (2003), Camargo *et al.* (2003) e Santos e Camargo (2006).

Picini (1998) parametrizou e testou diversos modelos agrometeorológicos e, dentre estes, o que permitiu obter melhor resultado após a adaptação da produtividade do ano anterior, foi o aditivo desenvolvido por Stewart *et al.* (1976) e proposto por Doorenbos e Kassam (1979). Desta forma o ajuste da produtividade do ano anterior ao modelo mostrou-se relevante na estimativa da produtividade do cafeeiro, fato esse explicado pela bienalidade desta cultura. Além disso, foi possível observar que a produtividade da cultura demonstrou ser particularmente sensível ao estresse hídrico durante o estágio fenológico do “final da dormência das gemas/florescimento” e do estágio “final do florescimento/início da formação do grão”. Também foi constatado que os períodos

trimestrais ago/set/out; nov/dez/jan; fev/mar/abr, adotados na penalização hídrica do modelo, foi a combinação que apresentou melhor resultado.

De acordo com Carvalho *et al.* (2003) e Camargo *et al.* (2003), outros fatores climáticos interferem na produtividade do café, especialmente temperaturas adversas ocorridas nos diferentes estádios fenológicos da cultura, devendo ser considerados juntamente com o fator déficit hídrico nos modelos de estimativa de produtividade.

Neste sentido, Camargo *et al.* (2003) propuseram um modelo matemático fenológico-agrometeorológico de monitoramento adaptando fatores de ajustes para os componentes fenológico, hídrico e térmico ao modelo agrometeorológico proposto por Doorenbos e Kassam (1979), visando estimar a quebra relativa da produtividade do café em nível de talhão. Posteriormente, Santos (2005) ajustou e parametrizou o mesmo modelo para diferentes regiões cafeeiras do Estado de São Paulo.

O modelo agrometeorológico sugerido por Santos e Camargo (2006) para estimar a produtividade do café com base em funções de penalização é expresso por:

$$Y_{est} = \left\{ \left(1 - k_{y_0} \left(\frac{Y_{aa}}{Y_p} \right) \right) * \left[1 - \left(k_y \left(1 - \frac{ER}{EP} \right) \right) \right] * [1 - f.geada] * [1 - f.Tmax] \right\} * Y_p \quad (2.2)$$

onde:

Y_{est} = produtividade estimada ($\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1}$);

Y_{aa} = produtividade do ano anterior ($\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1}$);

Y_p = produtividade potencial da cultura ($\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1}$);

k_{y_0} = coeficiente de penalização relativo à produtividade do ano anterior;

k_y = coeficiente de resposta da cultura ao suprimento de água para os sucessivos estádios fenológicos da cultura;

ER = evapotranspiração real da cultura;

EP = evapotranspiração potencial;

$f.geada$ = fator de penalização por temperatura mínima propícia a ocorrência de geada;

$f.Tmax$ = fator de penalização por temperatura máxima.

Assim como em Picini (1998), o modelo de Santos e Camargo (2006) incorporou um fator de penalização pela produção do ano anterior, que considera o coeficiente de sensibilidade (ky_0), a produtividade do ano anterior (Y_{aa}) e a produtividade potencial. Os valores de ky_0 testados variaram de 0,60 (menos influência de Y_{aa}) a 1,05 (maior influência de Y_{aa}). O monitoramento hídrico foi realizado em escala decendial e as penalizações foram ajustadas por diferentes coeficientes de sensibilidade da cultura ao déficit hídrico (ky), ocorridos nos quatro estádios fenológicos da cultura: indução floral, florescimento, granação e maturação.

Uma consideração bastante inovadora apresentada nesse estudo, foi a análise da época de início da florada, que, conforme Santos e Camargo (2006), ocorre com um acúmulo térmico necessário de 350 mm de EP, contabilizado a partir do início do primeiro decêndio de abril e somado com a ocorrência de chuva de no mínimo 5 mm. Sendo assim, penalização pelo déficit hídrico tem início juntamente com a plena florada (setembro ou outubro) e seu maior valor de penalização se dá entre os meses de outubro e janeiro. Já o componente térmico apresentado pelos autores, demonstra a influência das geadas e temperaturas altas sobre a produtividade do café. Baseia-se, portanto, na ocorrência de temperaturas adversas mínimas e máximas ocorridas durante os estádios fenológicos críticos e que interferem na produtividade da cultura, as quais puderam ser consideradas pelo modelo.

2.5. Sensoriamento Remoto como fonte de informações

Sensoriamento Remoto pode ser definido como a arte e a ciência de se obter informações acerca de objetos presentes na superfície terrestre sem contato físico com os mesmos (JENSEN, 2000). Ou ainda, como um conjunto de atividades utilizadas para obter informações a respeito dos recursos naturais, renováveis e não renováveis do planeta Terra, através de dispositivos sensores colocados a bordo de aviões, satélites ou, até mesmo, na superfície (MOREIRA, 2001).

Quando a radiação solar incide no topo da atmosfera, parte dessa radiação é espalhada e/ou refletida pelas partículas atmosféricas. Outra parte atravessa a atmosfera e interage

com os objetos da superfície terrestre. Ao interagir com os objetos, a radiação solar pode ser fracionada em três partes: absorvida, transmitida e refletida. A radiação refletida ou emitida é então detectada por um sensor que pode estar posicionado a poucos metros do objeto ou dentro de plataformas áreas e orbitais. Dessa forma, cada objeto apresenta um comportamento diferente frente à radiação que nele incide, devido às suas propriedades físico-químicas, denominado comportamento ou resposta espectral. Além das propriedades físico-químicas, outras características inerentes aos alvos imageados interferem no seu comportamento espectral (PONZONI, 2001).

Segundo Goel (1988), a radiação solar incidente sobre um dossel é espalhada e refletida, tendo sua direção e composição espectral alteradas de maneira bastante complexa. Essa alteração é causada tanto por parâmetros inerentes ao próprio dossel, quanto por fatores ambientais.

Além do conteúdo de pigmentos, teor de água, e estrutura das plantas, uma série de fatores como espécie, distribuição espacial dos elementos da vegetação, índice de área foliar, biomassa, distribuição do ângulo foliar, características do solo (granulometria, água e seus nutrientes), relevo, declividade, tipo e geometria do sistema sensor, assim como as condições atmosféricas, interferem na reflectância espectral de dosséis vegetais. Todos estes fatores devem ser levados em consideração para que se obtenha uma adequada identificação e quantificação da vegetação (PONZONI, 2001).

Pesquisas relacionadas com a aplicação do Sensoriamento Remoto à cultura de café no Brasil, especificamente, iniciaram-se com Tardin *et al.* (1992), que visaram a identificação e mapeamento do café a partir de imagens do sensor TM do satélite LANDSAT-5. Posteriormente, Epiphanyo *et al.* (1994) avaliaram as relações entre parâmetros culturais e a resposta espectral de cafezais no sul do Estado de Minas Gerais também com dados do sensor TM/LANDSAT-5. Em Libard *et al.* (1998), foram estudadas as variações estacionais do crescimento vegetativo do cafeeiro (*Coffea Canophora Pierre*) no sul do Estado do Espírito Santo e suas relações com a temperatura do ar e a renovação dos frutos. Mais recentemente, Moreira *et al.* (2004)

verificaram o potencial das imagens adquiridas pelos satélites LANDSAT, no mapeamento da cultura do café para a previsão de safras.

Apesar do comprovado potencial dos sensores TM/LANDSAT-5 e TM+/LANDSAT-7 no mapeamento de lavouras cafeeiras, para pesquisas voltadas ao monitoramento da cultura, esses dados apresentam como fator limitante, resolução *temporal* insuficiente para monitoramentos contínuos. Numa tentativa de contornar esse problema, imagens obtidas pelo sensor MODIS a bordo do satélite TERRA têm sido aplicadas em pesquisas de estimativa de produtividade de culturas agrícolas (RIZZI, 2004; RIZZI *et al.*, 2006; PICOLLI, 2006) uma vez que possibilitam recobrimento quase que diário de uma mesma área e um maior número de imagens livres de cobertura de nuvens.

2.5.1. Sensor MODIS

O primeiro sensor *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer* (MODIS) foi lançado em 1999 a bordo do satélite TERRA e o segundo sensor presente na plataforma AQUA, foi lançado em maio de 2002. Ambos foram concebidos pelo projeto *Earth Observing System* (EOS) da *National Aeronautical and Space Administration* (NASA) para auxiliar os estudos das complexidades das mudanças globais nos três ambientes do sistema Terra: atmosfera, ecossistemas oceânico e terrestre.

O sensor MODIS possui 36 bandas espectrais que abrangem desde a região do visível até a região do infravermelho termal do espectro eletromagnético, cujas características podem ser vistas na Tabela 2.1. As 19 primeiras bandas estão posicionadas entre 405 nm e 2105 nm do espectro eletromagnético. As bandas de 1 a 7 são destinadas a coleta de dados sobre a superfície terrestre; as bandas de 8 a 16 coletam dados da superfície oceânica e as bandas 17-19 para as medições atmosféricas. As bandas 20 a 36 exceto a banda 26 (1360-1390 nm), cobrem a porção termal do espectro (3660 a 14385 nm) e têm aplicações multidisciplinares (MODIS, 2005).

Tabela 2.1 – Características gerais do satélite Terra e do sistema sensor MODIS.

Órbita do satélite Terra	Sol síncrona, quase-polar, descendente, circular, cruza o equador às 10:30h, horário local.
Altitude do satélite Terra	705 km
Largura de imagens MODIS	2230 km (<i>across track</i>) e 10 km (<i>along track</i> e em nadir)
Bandas Espectrais	36 bandas entre 0,405 e 14,385 μm
Resolução Radiométrica	12 bits
Resolução Espacial a nadir	250m (bandas1-2), 500m (bandas3-7), 1km (bandas 8-36)
Período de revisita	1-2 dias
Taxa de transferência de dados	11 Mbps

Fonte: Adaptada de Justice et al., (2002).

Dada a sua ampla faixa de visada, 2.330 km, o sensor MODIS em relação à resolução *temporal*, possui um intervalo quase diário para revisita de uma área, o que lhe confere uma grande capacidade para estudos de dinâmicas terrestres e oceânicas.

Os produtos fornecidos por este sensor como os índices de vegetação *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI) e *Enhanced Vegetation Index* (EVI) do MOD13Q1 e Índice de Área Foliar (IAF) e Fração da Radiação Fotossinteticamente Ativa (fAPAR) do MOD15A2, são particularmente voltados para atividade agrícola. Esses produtos são georreferenciados e corrigidos dos efeitos atmosféricos o que os torna juntamente com sua periodicidade, muito interessantes para aplicações na agricultura.

O produto MOD13Q1 é disponibilizado em mosaicos de 16 dias, os quais são constituídos pelo valor máximo do Índice de Vegetação daquele período. Desta forma, os mosaicos apresentam-se, em sua maioria, livres de cobertura de nuvens.

2.5.1.1. Índices de vegetação EVI e NDVI

Um índice de vegetação (IV) resulta da combinação dos valores de reflectância em dois ou mais intervalos de comprimento de onda, e está intimamente relacionado com a quantidade e o estado da vegetação em uma dada área da superfície terrestre. Em função disto, uma característica inerente aos IVs é a redução no volume dos dados a ser analisado, pois praticamente toda a informação referente à vegetação fica resumida a

somente um valor numérico, permitindo modelar mais facilmente os dados espectrais em conjunto com as variáveis biofísicas da vegetação (RIZZI, 2004).

Segundo Huete *et al.* (1988) a importância destes índices (IV) está em sua estreita correlação com vários parâmetros biofísicos da vegetação, ou seja, na possibilidade de se estimar parâmetros como índices de área foliar (IAF), biomassa vegetal, produtividade e atividade fotossintética.

O *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI) encontra-se entre os índices de vegetação mais utilizados em pesquisas relacionadas à dinâmica da cobertura vegetal (Equação 2.3). O NDVI é uma relação entre medidas espectrais (reflectância - ρ) de duas bandas, a do infravermelho próximo (700-1300 nm) e a do vermelho (600-700 nm), e visa eliminar diferenças sazonais do ângulo solar e minimizar os efeitos da atenuação atmosférica, utilizando-se a Equação 2.3.

$$NDVI = \frac{IVP - V}{IVP + V} \quad (2.3)$$

onde:

IVP = reflectância na banda do infravermelho próximo;

V = reflectância na banda do vermelho.

Os valores do NDVI variam no intervalo de -1 e 1. A vegetação está associada aos valores positivos. Materiais que refletem mais intensamente na porção do vermelho em comparação com o infravermelho próximo (nuvens, água e neve) apresentam NDVI negativo. Solos descobertos e rochas refletem o vermelho e o infravermelho próximo quase na mesma intensidade, por conseguinte, seu NDVI aproxima-se de zero (LILLESAND e KIEFER, 1999).

O *Enhanced Vegetation Index* (EVI), proposto por Huete *et al.* (1999) foi desenvolvido para otimizar o sinal da vegetação (melhorando a sensibilidade em regiões com maiores densidades de biomassa), e atenuar os efeitos tanto do solo como da atmosfera. O EVI é calculado através da seguinte Equação 2.4:

$$EVI = G * \frac{IVP - V}{L + IVP + C_1 * V - C_2 * A} \quad (2.4)$$

onde:

IVP = reflectância na faixa espectral do infravermelho próximo;

V = reflectância na faixa espectral do vermelho;

A = reflectância na faixa espectral do azul;

*C*₁ = coeficiente de correção dos efeitos atmosféricos para o vermelho (6);

*C*₂ = coeficiente de correção dos efeitos atmosféricos para o azul (7,5);

L = fator de correção para a interferência do solo (1);

G = fator de ganho (2,5).

Enquanto o NDVI tem se demonstrado mais sensível à clorofila, o EVI é mais sensível às variações na resposta estrutural do dossel, incluindo o índice de área foliar (IAF), a fisionomia da planta e a arquitetura do dossel (Huete *et al.*, 2002).

Para monitoramento de áreas agrícolas Rafaelli (2004) ao observar imagens NDVI/MODIS notou mudanças significativas no vigor vegetativo de lavouras cafeeiras ocasionadas pela ocorrência de geada. Segundo a autora, foi possível detectar alterações no NDVI de lavouras cafeeiras com três dias após a ocorrência da geada. Além disso, foi possível observar a área de abrangência da geada naquele Estado. Yi (2005) realizou uma análise comparativa entre as imagens índices de vegetação NDVI, EVI e HCVI para detecção e monitoramento de áreas agrícolas em situação marcante de estresse hídrico. Como resultado, o autor observou que as imagens dos índices EVI e *Hidric Condition Vegetation Index* (HCVI) foram mais sensíveis em relação à imagem do NDVI.

Recentemente, Rizzi (2004) e Picolli (2006) utilizaram imagens NDVI obtidas a partir do sensor MODIS para obtenção do IAF utilizado na parametrização de modelos agrometeorológicos-espectrais para estimativa da produtividade da cultura de soja e cana-de-açúcar respectivamente. Ambos os trabalhos mostraram grande contribuição desse índice em modelos de predição.

2.5.2. Modelos agrometeorológicos-espectrais

A busca por estimativas de rendimento de grãos de culturas agrícolas com certo grau de acuracidade peticiona a consideração de fatores como diferenças de cultivares, manejo, tipo de solo, fertilidade e ocorrência de pragas aos modelos de predição. Segundo Fontana e Berlato (1998) parte dessas questões podem ser consideradas a partir da incorporação de um termo espectral, representado pelo índice de vegetação, ao modelo agrometeorológico. Em geral, a utilização do índice de vegetação integrado num determinado período do desenvolvimento das culturas, ou ainda, em todo o seu ciclo, tem gerado boas relações com parâmetros agrônômicos, como rendimento (RUDORFF e BATISTA, 1991; FONTANA e BERLATO, 1998; MELO *et al.*, 2003).

Desta forma, acredita-se que o componente agrometeorológico represente as condições de radiação solar incidente, temperatura, umidade do ar e de disponibilidade hídrica, enquanto que o componente espectral expresse as diferentes práticas de manejo, cultivares e estresses não incluídos no modelo agrometeorológico.

Dentro dessa importante visão sobre a interação entre informações provenientes de sensoriamento remoto e de variáveis meteorológicas, estudos foram sendo conduzidos no Brasil com enfoque para culturas anuais. A partir do modelo agrometeorológico proposto por Doorenbos e Kassam (1979), outros trabalhos se seguiram, tendo em vista a adaptação da componente espectral ao modelo.

Rudorff e Batista (1990) adaptaram ao modelo agrometeorológico, informações espectrais oriundas de imagens do sensor MSS/LANDSAT- 4 expressas pelo índice de vegetação *Ratio Vegetation Index* (RVI) para estimativa da produtividade da cana-de-açúcar em lavouras comerciais. Segundo os autores, os coeficientes de determinação entre a produtividade estimada e observada variaram entre 0,14 e 0,59 (agrometeorológico) e entre 0,24 e 0,64 (agrometeorológico espectral). Em outro estudo Rudorff e Batista (1991) utilizaram novamente o RVI e dados meteorológicos para estimar a produtividade da cultura do trigo. Novamente o modelo agrometeorológico-espectral estimou com maior precisão ($r^2=0,65$) a produtividade da cultura quando

comparado aos modelos espectral ($r^2=0,48$) e agrometeorológico ($r^2=0,43$). Ambos os trabalhos, entretanto, apresentaram uma limitação quanto à escala de aplicação, haja vista sua restrição pontual.

Neste sentido, uma grande contribuição à operacionalidade do modelo proposto por Doorenbos e Kassam (1979), encontra-se em Berka (2003), que adaptou o modelo a um sistema de informação geográfica (SIG) para estimar a produtividade da cultura de soja no Estado do Paraná em nível municipal, o qual foi denominado AGROMET. Desta forma, as informações de entrada e saída do modelo são armazenadas em um banco de dados geográfico permitindo que o cálculo da produtividade seja realizado para grandes áreas.

Recentemente Rizzi (2004), utilizou o mesmo modelo para estimativa da produção da cultura de soja no Estado do Rio Grande do Sul. O autor, no entanto, adaptou ao modelo, informações espectrais do IAF estimado a partir das imagens NDVI do sensor MODIS. Segundo o autor, foi possível monitorar temporal e espacialmente a evolução da produtividade durante todo o ciclo da cultura.

A entrada da variável espectral no modelo da FAO (nº 33) ajustado por Rizzi (2004) se dá através do cálculo da produtividade máxima ou potencial (Y_p), ao estimar o parâmetro fator de compensação do crescimento (F_{cc}), conforme apresenta a Equação 2.5 de Doorenbos e Kassam (1979):

$$Y_p = F_{cc} * F_r * F_{pa} * ND * PMB \quad (2.5)$$

onde:

Y_p = produtividade máxima potencial (kg/ha);

F_{cc} = fator de compensação do crescimento;

F_r = fator de respiração;

F_{pa} = fator de produtividade agrícola;

ND = número de dias da quinzena;

PMB = produção de matéria seca bruta do grupo da cultura.

Sendo o F_{cc} calculado com base na Equação 2.6 desenvolvida por Sugawara (2002) a partir dos dados apresentados na Tabela 6 – *Correction for Crop Development over Time and Leaf Area* (cL) encontrada em Doorenbos e Kassam (1979).

$$F_{cc} = 0,515 - e^{(-0,664 - (0,515 * IAF))} \quad (2.6)$$

F_{cc} = fator de compensação do crescimento;

IAF = índice de área foliar.

No estudo realizado por Rizzi (2004) e Rizzi *et al.*, (2006) com a cultura da soja, o autor observou que no período de máximo desenvolvimento da cultura, o produto MOD15A2 apresentou valores inválidos do índice de área foliar (IAF). Por essa razão, Rizzi *et al.*, (2006) recomenda em que a variável espectral (IAF) exigida pelo modelo AGROMET seja obtida a partir do índice de vegetação NDVI.

Para tanto, as imagens NDVI devem ser primeiramente transformadas em imagens fração da cobertura do solo conforme a Equação 2.7 de Choudhury *et al.*, (1994).

$$F_c = 1 - \left(\frac{IV_{\max} - IV}{IV_{\max} - IV_{\min}} \right)^{0,6} \quad (2.7)$$

onde:

F_c = fração do solo coberto pela cultura;

IV_{\max} e IV_{\min} = valores de máximo e de mínimo do IV da imagem;

IV = valor do IV de cada pixel da imagem.

Assim, o IAF pode ser estimado pela Equação 2.8 conforme Norman *et al.* (2003).

$$IAF = -2 \ln(1 - F_c) \quad (2.8)$$

onde:

F_c = fração do solo coberto pela cultura obtido na equação anterior;

IAF = índice de área foliar para cada pixel da imagem.

Além das variáveis meteorológicas e agronômicas, o modelo AGROMET exige um outro parâmetro conhecido como Fator de Produtividade Agrícola (FPA). Este parâmetro relaciona-se à quantidade de matéria seca produzida pela planta que é contabilizada como rendimento econômico. O FPA é o parâmetro que exerce maior influência no cálculo da produtividade final, apesar de ser constante para todo ciclo da cultura. Como o AGROMET determina a produtividade com base na matéria seca de toda a planta, o FPA é multiplicado pelo valor da produtividade obtido em cada quinzena (RIZZI, 2004).

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. Área de Estudo

A área de estudo, refere-se à mesorregião geográfica Sul/Sudoeste do Estado de Minas Gerais/Brasil, localizada entre os paralelos 20°11' e 23°00'S e os meridianos 43°59' e 47°20'WG (Figura 3.1). Nela encontram-se dez microrregiões: Alfenas, Andrelândia, Itajubá, Passos, Poços de Caldas, Pouso Alegre, Santa Rita do Sapucaí, São Lourenço, São Sebastião do Paraíso e Varginha, as quais compreendem 144 municípios, e uma área total de aproximadamente 50 mil km². O café, principal cultura agrícola da região, ocupa uma área média de 450.230 ha, de acordo com informações dos últimos cinco anos do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2005) a qual corresponde aproximadamente a 43% da área plantada com café no Estado. A principal espécie cultivada é a arábica.

Situada em uma altitude média de aproximadamente 950 metros, a temperatura mínima anual da região pode chegar a 5° e 6°C e a máxima pode ultrapassar 34°C. As classes de solo predominantes na região são: Latossolos Vermelho Escuro, Vermelho Amarelo e Roxo; Argissolos Vermelho Amarelo; Cambissolos; Neossolo Litólico e Neossolo Quartzarênico (GEOMINAS, 1996).

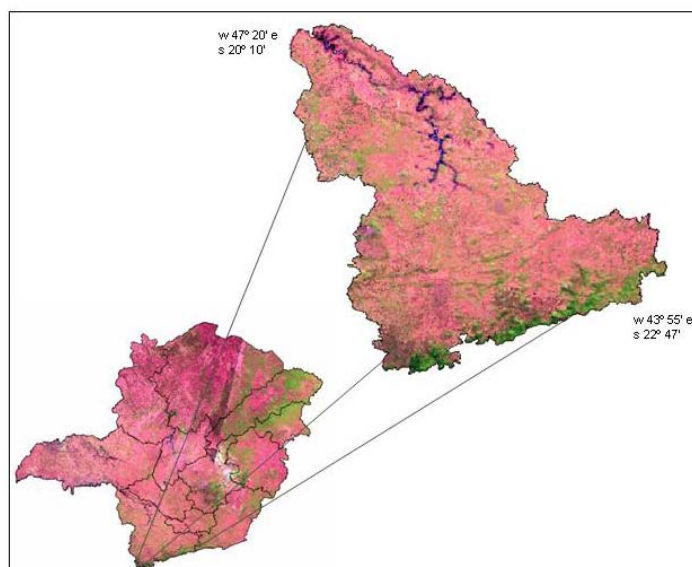


Figura 3.1 – Área de estudo.

3.1.1 Caracterização do ambiente cafeeiro da área de estudo

Esta etapa teve como objetivo o conhecimento prévio da área de estudo em relação ao relevo, a distribuição espacial da cafeicultura e o comportamento climático. Preocupou-se também em avaliar o comportamento dos índices de vegetação para diferentes tipos de lavouras cafeeiras.

3.1.1.1. Topografia

Conforme abordado no item 2.2.3, o relevo também é um fator importante na instalação dos cafezais, principalmente, quanto à mecanização e à conservação do solo. Sendo assim, para obter uma caracterização da área de estudo, foram gerados mapas declividade e orientação de vertentes a partir da altimetria do SRTM.

Para obter o dado de altitude foi utilizado o Modelo Digital de Elevação (MDE) com resolução espacial de 90m, desenvolvido pelo projeto *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM), disponibilizados no endereço eletrônico da *United States Geological Survey* (USGS; <http://srtm.usgs.gov/data/obtainingdata.html>) no formato .TGZ (tipicamente usado em sistemas Unix e MS-Windows). Os MDE gerados para o Brasil possuem resolução espacial de 90 m. O datum e o elipsóide de referência são WGS84. Para a região de estudo foram utilizados 16 cenas.

Dessa forma, as 16 cenas que compunham o modelo digital de elevação (MDE) de toda área de estudo, disponibilizadas pelo programa do SRTM foram mosaicadas no software ENVI. Posteriormente, o MDE foi reamostrado para resolução espacial de 250m. A partir da ferramenta de Modelagem Topográfica do próprio software ENVI, foram obtidos os mapas de declividade e orientação de vertente.

A função de modelagem topográfica serve para extrair parâmetros da imagem, como aspecto ou vertente, declividade, variações de curvaturas, através da análise de uma interpolação quântica e todas as suas derivadas. O resultado é um arquivo de imagem que contém as informações extraídas do MDE. Os parâmetros solicitados são de elevação e azimute solar. Ao fornecer a data da aquisição do MDE e a localidade, em

Lat/Long, o próprio software computa a elevação e o azimute do local para o dado horário. Os resultados foram importados para o software SPRING no qual foi realizada a classificação segundo os critérios da Tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Classes utilizadas nos mapas temáticos de declividade e vertente

DECLIVIDADE (%)		VERTENTES (°)	
0 - 3%	várzea	0 - 45°	N/NE
3 - 6%	Plano a suave ondulado	45 - 90°	NE/E
6 - 12%	Suave ondulado a ondulado	90 - 135°	E/SE
12 - 20%	ondulado a forte	135 - 180°	SE-S
20 - 40%	forte a montanhoso	180 - 225°	S-SW
> 40%	montanhoso	225 - 270°	SW-W
		270 - 315°	W-NW
		315 - 360°	NW-N

Fonte: De Biase, M. (1970)

Na Figura 3.2 são mostradas as variações da altimetria na região.

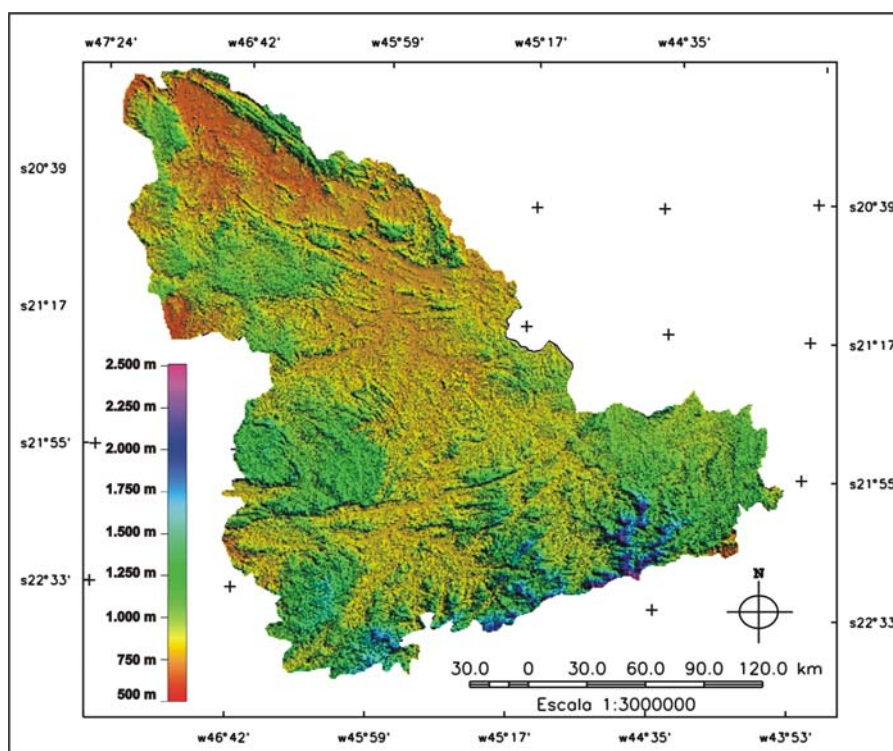


Figura 3.2 – Mapa temático referente à altimetria na região Sul/Sudoeste de Minas Gerais.

Como se pode observar na Figura 3.2 a altimetria da área de estudo varia de 500 a 2500m e a média concentra-se em 980m. Essas informações são coerentes com o mapa publicado pelo IBGE (2007; <http://ibge.gov.br/downloads/geociencias>). Diante disso, pode-se dizer que a maior parte da região Sul/Sudoeste de Minas Gerais encontra-se adequada ao cultivo do café arábica, tendo em vista recomendação de Medina Filho e Bordignon (2003) por altitudes de 600 a 1200 metros.

A Figura 3.3 apresenta o mapa temático referente à declividade na região Sul/Sudoeste do Estado de Minas Gerais. Observa-se que a declividade predominante na área de estudo, calculada a partir dos dados do SRTM, foi de até 12%, representada na imagem pelas tonalidades: amarela, rosa, marrom e verde. Nesta situação o relevo é considerado como plano a ondulado. No entanto, na região sudeste da área, onde se localiza a Serra da Mantiqueira, a declividade em alguns locais pode chegar até 40%.

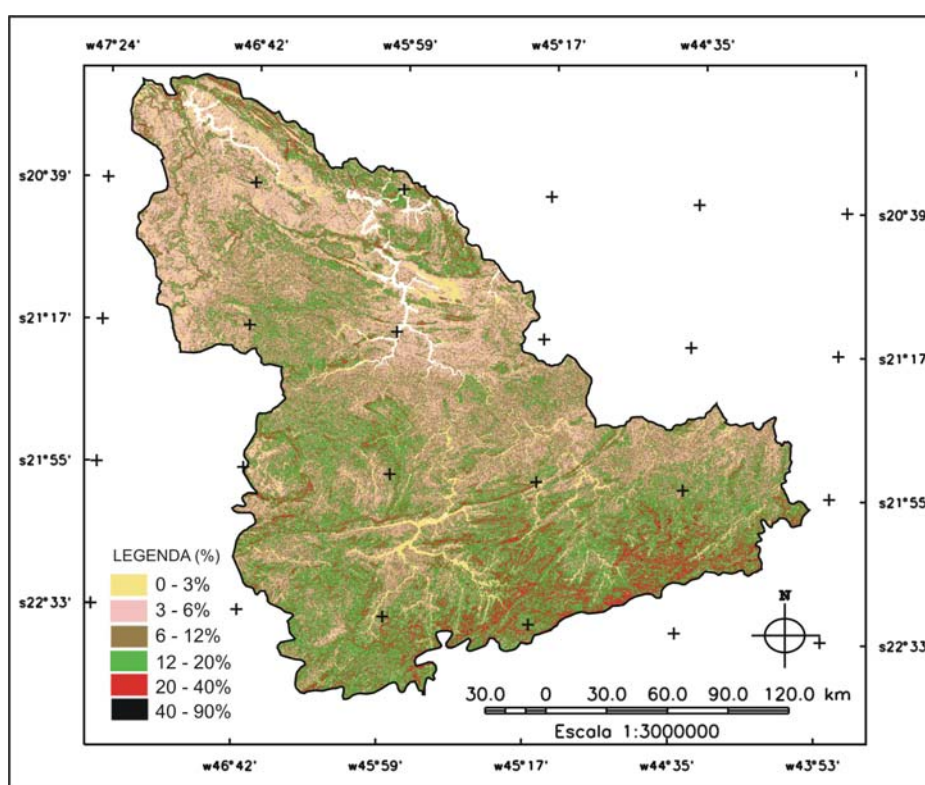


Figura 3.3 – Mapa temático referente à declividade na região Sul/Sudoeste de Minas Gerais.

Da mesma forma, foi obtido o mapa de orientação de vertentes, a fim de possibilitar uma análise em relação à face do relevo em que foram implantadas as lavouras cafeeiras na região, conforme é apresentado pela Figura 3.4.

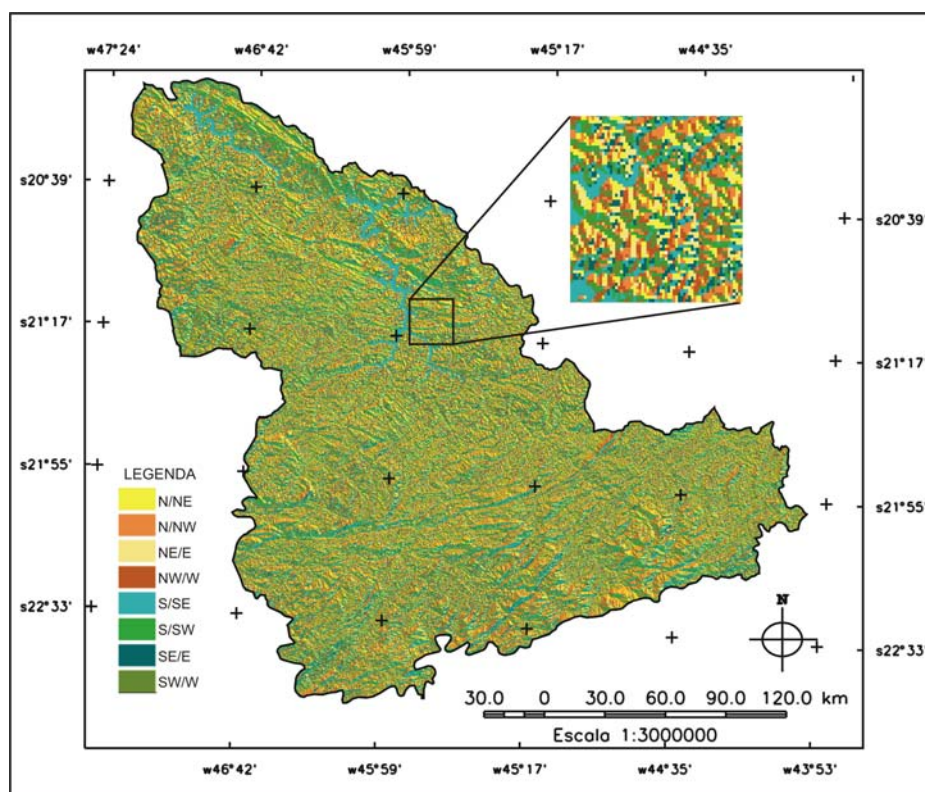


Figura 3.4 – Mapa temático referente à orientação de vertentes na região Sul/Sudoeste de Minas Gerais.

Com base nos resultados obtidos, chegou-se a conclusão de que 30% da região Sul/Sudoeste possuem a face do relevo com orientação Norte, 25% com orientação Sul, 23,3% com orientação Oeste e 21,7% à Leste. Nesse caso, o relevo cuja face está voltada para orientação Sul não deve ser usado para o cultivo do café, devido aos ventos frios do sul aos quais nosso hemisfério está exposto, conforme recomendado por Sedyama *et al.* (2001).

3.1.1.2. Distribuição espacial da cafeicultura na área de estudo

O mapa temático contendo a distribuição política dos municípios na área de estudo e a distribuição espacial das lavouras de café gerado a partir da interpretação visual de

imagens TM/LANDSAT e HRV/SPOT pelo projeto “*Geotecnologias para mapeamento e monitoramento do café*” (MOREIRA *et al.*, 2006), desenvolvido em parceria entre o INPE e a CONAB, é apresentado na Figura 3.5.

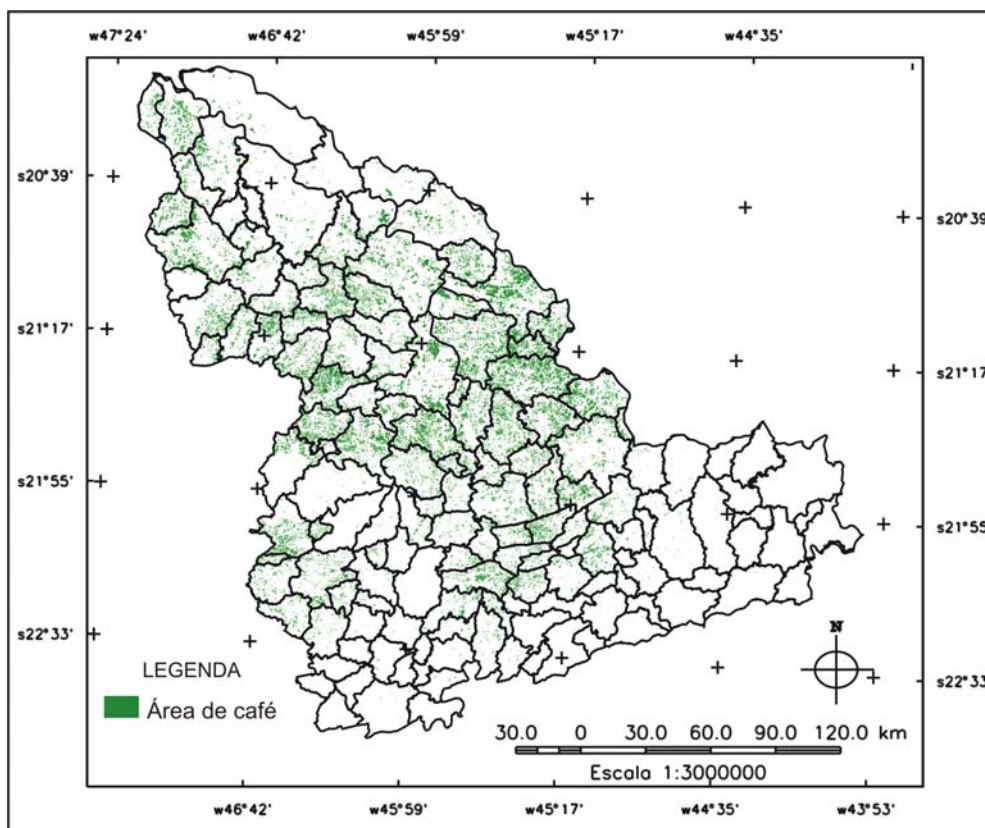


Figura 3.5 – Mapa temático referente à distribuição espacial das lavouras de café na região Sul/Sudoeste do Estado de Minas Gerais.

A mesorregião Sul/Sudoeste é constituída por 144 municípios, destes apenas oito (8) não se cultiva o café. A área mapeada com café nesta região foi de 418.915 ha, o que representa 45% do parque cafeeiro do Estado de Minas Gerais.

Conforme é mostrado na Figura 3.5, o café é mais concentrado na parte central e oeste da área de estudo. Por microrregiões o café está assim distribuído: Varginha (124.229 ha); São Sebastião do Paraíso (86.488 ha); Alfenas (70.937 ha); Poços de Caldas (48.025 ha) e Passos (31.452 ha; MOREIRA *et al.*, 2006). Já na região sudeste da área, a existência de altas altitudes e declividades acentuadas (até 40%) dificulta o cultivo do café.

O cruzamento entre o mapa temático referente à distribuição espacial das lavouras de café (Figura 3.5) e o mapa de altitude (Figura 3.2) mostrou que o café é plantado em altitudes que variam de 700 a 1300m. Em média o café se concentra numa altitude que varia de 900 a 1000m, com moda na faixa de 800 a 900m. Apenas 1% da área encontra-se em altitudes superiores a 1200m (Figura 3.6). Esses resultados concordam com Medina Filho e Bordignon (2003) ao recomendar altitudes de 600 a 1200m para o cultivo do café arábica.

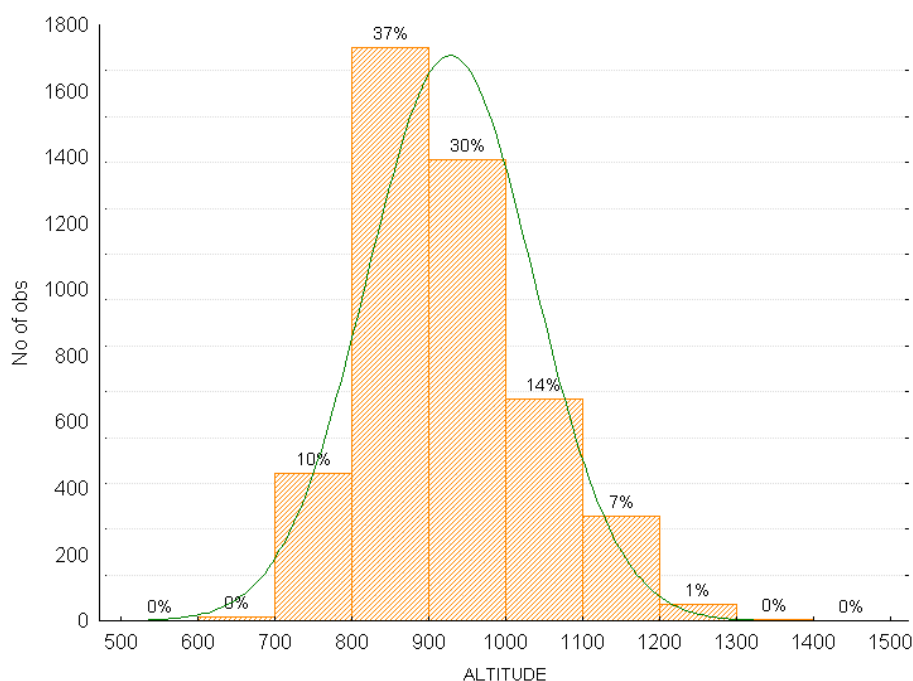


Figura 3.6 – Histograma da altitude em áreas cultivadas pela cultura do café na região Sul/Sudoeste do Estado de Minas Gerais.

Da mesma forma ao realizar o cruzamento do mapa temático referente à distribuição espacial das lavouras de café (Figura 3.5) com o mapa de declividade (Figura 3.3), observou-se que 90% das áreas cafeeiras são cultivadas em áreas com declividade até 12% conforme recomenda Procópio (2002), uma vez que facilita a mecanização da lavoura (Figura 3.7).

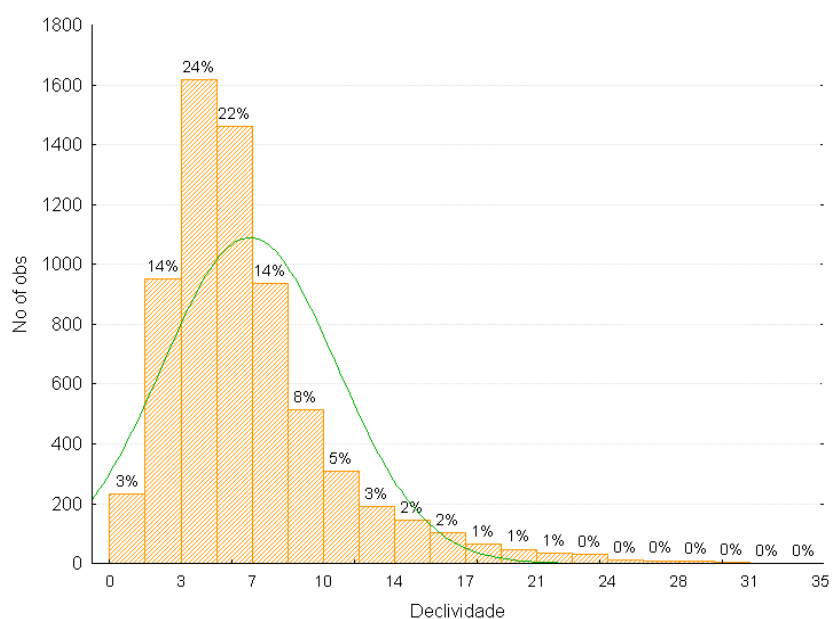


Figura 3.7 – Histograma da declividade em áreas cultivadas pela cultura do café.

Quanto à orientação de vertente, o cruzamento do mapa temático das lavouras de café (Figura 3.5) com o mapa de vertente (Figura 3.4), mostrou que 38,4% das lavouras estão voltadas para face Norte, sendo 16,3% face N/NE e 22,1% face N/NW, as quais são as mais recomendadas para o cultivo da cultura segundo Sedyama *et al.* (2001). As áreas cafeeiras com orientação de vertente ao Sul representam 15,6% (Figura 3.8).

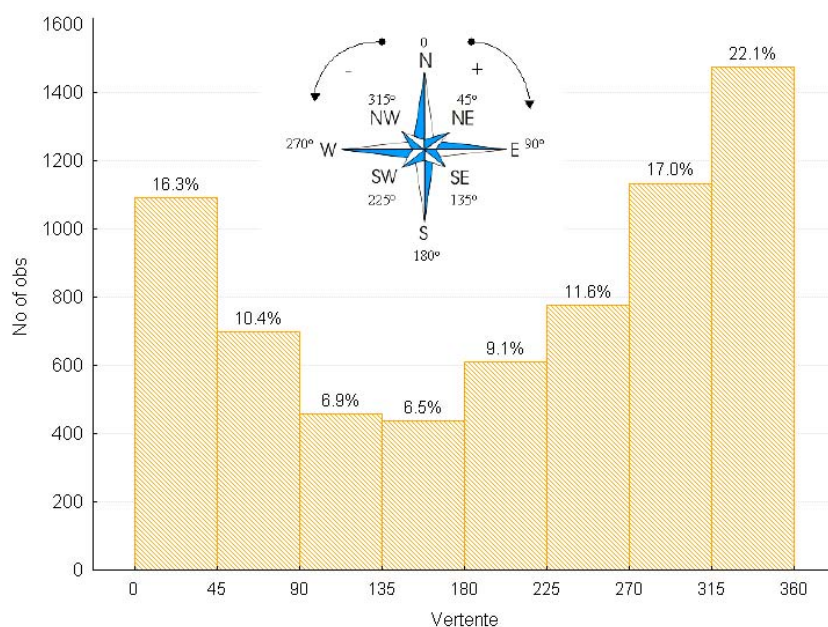


Figura 3.8 – Histograma da orientação de vertente em áreas cultivadas pela cultura do café na região Sul/Sudoeste do Estado de Minas Gerais.

Além do café na área de estudo encontra-se, como cobertura vegetal, áreas de pastagem (natural e artificial), cana-de-açúcar, pequenas reservas florestais, cerrado típico, mata de galeria, reflorestamento e áreas destinadas ao plantio de culturas anuais.

3.1.2. Área de teste

O município de Alfenas foi selecionado como área teste por apresentar grandes áreas de lavouras cafeeiras com características de bons tratos culturais, em sua maioria mecanizada. Situa-se entre os paralelos 21°08' e 21°35S e os meridianos 45°49' e 46°11WG. Ocupa uma área de 849,2 km² de extensão, com altitude máxima 888 m acima do nível do mar, na cabeceira do Córrego Mateus Cego e a mínima de 768 m, na represa de FURNAS. O solo predominante é o tipo Latossolo Vermelho Escuro com textura argilosa (ALFENAS, 2002).

3.2. Dados utilizados

3.2.1. Imagens índices de vegetação

Para esta pesquisa foram utilizados os índices *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI), *Enhanced Vegetation Index* (EVI), cujos mosaicos de 16 dias foram fornecidos pela *National Aeronautics and Space Administration* (NASA/EOS) e são identificados pelo produto MOD13Q1 do sensor MODIS, a bordo do satélite TERRA. A região de estudo abrangeu 2 “tiles”⁵: H13V10, H13V11, cujos respectivos índices foram adquiridos gratuitamente pelo site [www.modis.gsfc.nasa.gov] no período de abril/2001 a março/2005, totalizando 184 imagens.

3.2.2. Dados climáticos

As variáveis meteorológicas utilizadas nesta pesquisa pertencem ao banco de dados do Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC) do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, localizado em Cachoeira Paulista, SP. As informações são

⁵ Tiles - termo convencionalmente chamado para identificar a subdivisão das áreas de abrangência disponíveis dos produtos do sensor MODIS.

provenientes das previsões do modelo regional ETA (CHAN, 1996) e o período considerado para as análises refeririu-se aos anos de 2001 a 2005, em escala diária.

As previsões do modelo regional ETA são fornecidas duas vezes ao dia, com condição inicial às 00:00 e 12:00 horas UTC e englobam previsões para sete dias em um intervalo de seis horas. Neste trabalho foram utilizados dados oriundos das previsões com condição inicial às 00:00h. No entanto, devido às incertezas associadas aos dois primeiros horários (00:00 e 12:00h UTC) principalmente para as variáveis velocidade do vento e precipitação pluvial (CHAN, 1996), optou-se por utilizar os dados a partir da previsão das 12:00h UTC conforme recomendado por Rizzi (2004).

O objetivo dos modelos matemáticos usados em meteorologia é o de calcular a evolução de parâmetros como: temperatura, chuva, pressão atmosférica, umidade relativa do ar, vento, entre outros. Conhecidos os valores desses parâmetros num determinado instante, é possível prever, por meio de extrapolações matemáticas, os valores futuros. O modelo regional ETA vem sendo utilizado operacionalmente desde 1996 no Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC/INPE) e apresenta resoluções espaciais de 40x40 km e de 20x20 km, capaz de cobrir grande parte da América do Sul. No presente estudo, foram consideradas informações presentes em grades com resolução espacial de 40x40 km. O formato cedido foi em *American Standard Code for Information Interchange* (ASCII).

Os dados meteorológicos utilizados foram: temperaturas média, mínima e máxima do ar (°C), velocidade do vento a 2 metros de altura (km.dia^{-1}), umidade relativa do ar (%), radiação solar ($\text{cal m}^2.\text{dia}^{-1}$) e precipitação pluvial (mm.dia^{-1}).

3.2.3. Dados de produtividade e área plantada de café

Para o ano de 2005, a informação de área plantada foi calculada a partir do mapa temático contendo a distribuição espacial das lavouras de café desenvolvido pelo projeto “*Geotecnologias para mapeamento e monitoramento do café*”, disponível no site [<http://www.dsr.inpe.br/cafesat>]. Para os demais anos (2002-2004), foram utilizados como referência dados oficiais fornecidos pelo IBGE.

Informações referentes à produtividade foram obtidas com base nos dados divulgados pelos órgãos: Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB) e Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). Para este último, foi utilizada a fonte <http://www.sidra.ibge.gov.br/bda/acervo>, que fornece um banco de dados sobre diversas culturas do país. Os dados tabelados foram inseridos nas suas respectivas tabelas do banco de dados.

3.2.4. Mapa de solos

Foi utilizado o mapa de classificação de solos na escala 1:100.000 (IBC, 1970), cuja digitalização encontra-se disponível em Geominas (1996) no site <http://www.geominas.mg.gov.br>.

3.3. Ferramentas computacionais

Todas as etapas da pesquisa foram realizadas em um microcomputador PC com configurações de hardware e sistema operacional mínimas para atender as necessidades do trabalho. O banco de dados geográfico foi desenvolvido no software SPRING 4.2 (CÂMARA *et al.*, 1996). As análises geoestatísticas foram realizadas no aplicativo Statistica 6.0. Os aplicativos UltraEdit, Excel, MRT3.0 e Corel Draw foram utilizados como ferramentas de apoio.

3.4. Métodos

A metodologia utilizada foi dividida em quatro fases, conforme apresenta o fluxograma da Figura 3.9. A 1ª fase correspondeu aos processamentos realizados para preparação dos dados e montagem do banco de dados. A 2ª fase referiu-se a avaliação do comportamento dos índices NDVI e EVI para diferentes tipos de lavouras de café e a análise climática da região de estudo. A 3ª fase abordou a parametrização e adaptação do modelo agrometeorológico-espectral proposto por Rizzi (2004) a partir do modelo de Doorenbos e Kassam (1979) para a cultura do café. E a 4ª e última fase restringiu-se a aplicação do modelo agrometeorológico de Santos e Camargo (2006) para estimativa da quebra da produtividade da cultura do café em área teste para fins de comparação.

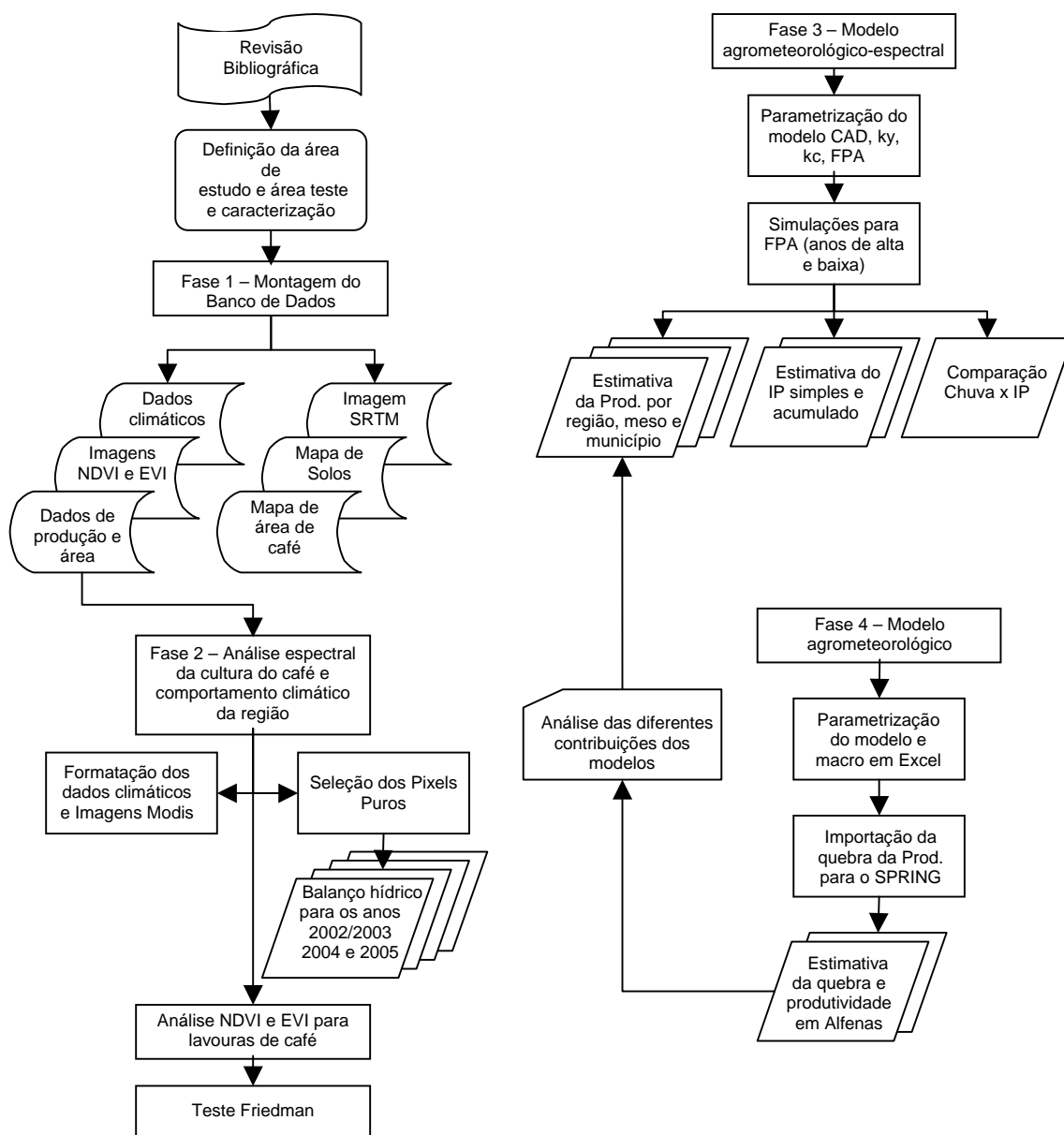


Figura 3.9 - Fluxograma da Metodologia.

3.4.1. Fase 1: Montagem do banco de dados geográfico

Foi criado um banco de dados georreferenciado, o qual abrangeu os limites da área de estudo, com a finalidade de armazenar todos os dados necessários ao estudo. Estes dados referiram-se às imagens NDVI e EVI, ao Modelo Digital de Elevação (MDE), aos dados climáticos e ao mapa temático com a distribuição espacial das lavouras de café. Foram inseridos também, os dados cadastrais correspondentes aos limites municipais,

microrregiões e mesorregiões e, por último, os dados tabulares contendo informações para toda a área de estudo sobre produtividade ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$) e área plantada (ha), fornecidos pelo IBGE os quais foram interligados com os mapas cadastrais correspondentes.

3.4.1.1. Ajuste das datas das imagens NDVI e EVI ao período fenológico do café

No caso da fenologia do cafeeiro, adotou-se a fenologia proposta por Camargo e Camargo (2001) para a fase *reprodutiva*: (1) florada, chumbinho e expansão dos frutos (Set-Dez); (2) granação dos frutos (Jan-Mar); (3) maturação dos frutos (Abr-Jun) e (4) repouso (Jul-Ago), todas as fases, portanto, dispostas em ano agrícola.

O produto MOD13Q1 referente aos índices NDVI e EVI corresponde a períodos de 16 dias de imageamento, entretanto, as datas atribuídas aos mosaicos referem-se à primeira data imageada daquele grupo de 16 dias, expressas em dia juliano.

Com intuito de compatibilizar as datas dos índices com o calendário civil, para que se pudesse agrupá-las de acordo com os meses referentes aos estádios fenológicos da cultura do café (florada, granação, maturação e repouso), foi adotado o seguinte critério: adicionou-se o número 15 ao primeiro dia do ano civil (01 de janeiro) e assim sucessivamente. Quando os dias julianos que compuseram o mosaico correspondiam em sua maior parte a um determinado mês, considerou-se tal data pertencente àquele mês. Desta forma, os 23 mosaicos disponíveis por ano foram agrupados em 12 meses, sendo o mês de junho o único a possuir apenas um mosaico (Tabela 3.2).

Tabela 3.2 - Disposição dos mosaicos do produto MOD13Q1 aos meses correspondentes aos estádios fenológicos do café.

PERÍODO FENOLÓGICO	MESES	DIA JULIANO
MATURAÇÃO DOS FRUTOS	ABRIL	97
	ABRIL	113
	MAIO	129
	MAIO	145
	JUNHO	161
REPOUSO	JULHO	177
	JULHO	193
	AGOSTO	209
	AGOSTO	225
FLORADA, CHUMBINHO E EXPANSÃO DOS FRUTOS	SETEMBRO	241
	SETEMBRO	257
	OUTUBRO	273
	OUTUBRO	289
	NOVEMBRO	305
	NOVEMBRO	321
	DEZEMBRO	337
	DEZEMBRO	353
GRANAÇÃO DOS FRUTOS	JANEIRO	1
	JANEIRO	17
	FEVEREIRO	33
	FEVEREIRO	49
	MARÇO	65
	MARÇO	81

3.4.1.2. Formatação das variáveis meteorológicas

Os dados das variáveis meteorológicas do modelo ETA foram primeiramente organizados em escala diária, de modo a se assemelharem aos dados coletados pelas estações meteorológicas.

A fim de compatibilizar com a mesma resolução *temporal* (16 dias) dos índices de vegetação oriundos do produto MOD13Q1, foram calculados valores médios a cada 16 dias para cada uma das variáveis, salvo os dados referentes à precipitação pluvial para os quais foi feita a soma acumulada a cada 16 dias. Assim sendo, obtiveram-se 23 (vinte e três) grades numéricas para cada uma das variáveis por ano agrícola, totalizando 460 planos de informação. Com o mesmo propósito de padronização, utilizou-se a resolução *espacial* de 250 metros. Para tanto, todos os planos de informação foram interpolados

através algoritmo vizinho mais próximo para resolução *espacial* de 250x250m. Os procedimentos realizados para extrair e importar todas as variáveis para o banco de dados de forma operacional seguiram a metodologia proposta por Rizzi *et al.* (2007).

3.4.2. Fase 2: Análise espectral da cultura do café e comportamento climático da região de estudo

3.4.2.1. Avaliação do comportamento dos índices NDVI e EVI para cultura do café

Diante da ausência de pesquisas relacionadas com o produto MOD13Q1 especificamente para cultura do café aliado ao enfoque dado pelos trabalhos existentes à utilização de imagens obtidas pelos sensores TM e HRV para obtenção do mapeamento das lavouras cafeeiras, esta etapa do trabalho preocupou-se em verificar o comportamento dos índices de vegetação NDVI e EVI para diferentes tipos de lavouras de café, bem como, avaliar a sensibilidade desses índices às fases fenológicas da cultura. Sendo assim, foram realizados alguns procedimentos abordados a seguir.

3.4.2.1.1. Seleção dos pixels puros

A fim de garantir que as análises do comportamento dos índices de vegetação fossem realizadas em áreas exclusivamente cafeeiras, foi necessário selecionar nas imagens do EVI e NDVI, somente os pixels que correspondessem às áreas de café apresentadas no mapa temático. Desta forma evitou-se que os valores de NDVI e EVI utilizados para análise apresentassem mistura espectral, ou seja, sem contaminação com qualquer outra situação que não fosse visualmente identificada como lavoura de café.

Para tal, gerou-se uma grade regular de resolução espacial de 250x250m, mesma resolução *espacial* dos dados MODIS, a partir de uma programação em LEGAL⁶, a qual posteriormente foi transformada em dado do tipo cadastral. Assim, cada área de 250x250m correspondeu a um segmento. Cabe ressaltar que os limites desses segmentos respeitaram os limites dos pixels das imagens EVI e NDVI.

⁶ LEGAL – linguagem de programação utilizada no ambiente SPRING.

Em seguida essa grade foi sobreposta ao mapa temático das lavouras cafeeiras e através de outro programa em LEGAL foi calculado o percentual de área de cada segmento da grade ocupada pelas lavouras cafeeiras. Esses valores foram inseridos nos geo-campos⁷ correspondentes a cada um dos segmentos. A partir da ferramenta de *Consulta Espacial* somente os segmentos que apresentaram 100% da área ocupada pela cultura de café foram selecionados e apresentados em um novo plano de informação (Figura 3.10).

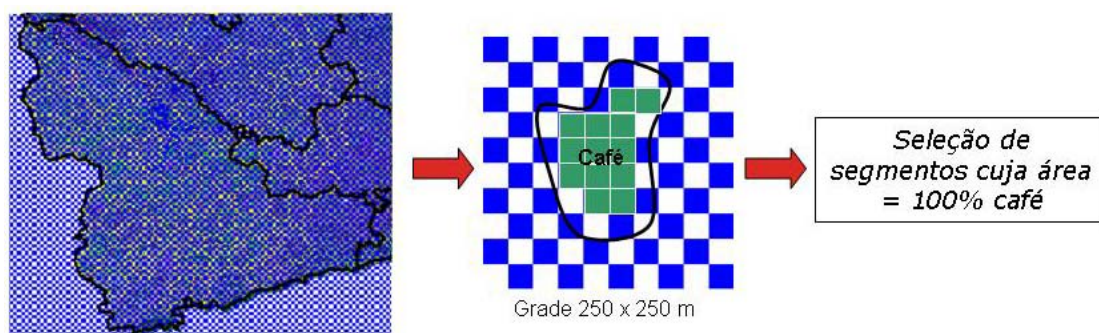


Figura 3.10 - Seleção dos segmentos cuja área correspondesse à cultura de café.

3.4.2.1.2. Atribuição dos IV e de variáveis meteorológicas por segmento

Este procedimento visou atribuir para cada um dos segmentos que apresentaram 100% da área ocupada pela cultura de café o valor médio de NDVI, EVI, precipitação e temperaturas mínimas, médias e máximas.

Primeiramente foram criados os geo-campos necessários para o armazenamento dos valores médios de cada uma das variáveis citadas acima. Os geo-campos foram organizados de acordo com as 23 datas, apresentadas na tabela 3.1, para cada um dos anos em estudo. Pôde-se então, através de uma programação em LEGAL, obter para cada segmento seus respectivos valores de NDVI, EVI, precipitação e temperaturas mínimas, médias e máximas. Posteriormente, esses dados foram exportados em forma de tabela para que as análises estatísticas fossem realizadas.

⁷ Geo-campos – colunas em uma tabela de atributos.

3.4.2.1.3. Balanço hídrico geral para a área de estudo

A fim de conhecer melhor o comportamento meteorológico da região Sul/Sudoeste nos anos 2002, 2003, 2004 e 2005, foram determinados os balanços hídricos da região estudada a partir do método de Thornthwaite e Mather (1955). Para tanto, foram utilizados os dados de temperatura média (°C) e precipitação pluviométrica (mm dia⁻¹) e uma planilha em Excel cedida pelo Instituto Agrônomo de Campinas (IAC), a qual, de forma operacional, gerou os gráficos contendo os extratos do balanço hídrico para cada um dos anos.

3.4.2.1.4. Teste estatístico para obtenção do valor médio de NDVI e EVI representativos de três diferentes tipos de lavouras de café

Conforme abordado anteriormente, existem inúmeros fatores relacionados à cultura do café que promovem variações quanto ao manejo e ao cultivo dessa lavoura. A heterogeneidade das lavouras cafeeiras numa mesma região (Figura 3.4), quanto à idade, adensamento, variedade, estágio fenológico, manejos e estado fitossanitário, são fatores influenciadores na resposta espectral da cultura. Tal influência pôde ser observada ao realizar o mapeamento da cultura a partir das imagens dos sensores TM/LANDSAT e HRV/SPOT.

Algumas fotos de campo (Figura 3.11) demonstraram o quão complexo e heterogêneo apresenta-se a cultura do café, o que dificulta a generalização dos parâmetros da cultura, principalmente, em aplicação de modelos matemáticos para grandes áreas.



Figura 3.11 – Fotos de campo de lavouras no Estado de Minas Gerais representativas da diversidade da cultura do café na região, (a) lavoura de café em produção, município de Boa Esperança; (b) lavoura de café sem manejo e tratamentos culturais, município de Campo Belo; (c) lavoura de café em formação, município de Boa Esperança e (d) lavoura de café podado, município de Aguanil.

Primeiramente, a partir de uma análise visual das imagens TM do satélite LANDSAT-5 do ano de 2005 utilizadas no mapeamento, foram selecionadas amostras de áreas (segmentos) com características visuais semelhantes que representassem três tipos de lavouras: café em produção, café em formação (lavouras com menos de quatro anos) e café podado. Dessa forma, os valores de NDVI e EVI das respectivas lavouras nas imagens MODIS foram mais facilmente identificados, devido a sua degradação quanto à resolução *espacial*. As imagens do Google Earth também foram utilizadas como informação auxiliar na identificação correta das lavouras.

Sendo assim, foi possível selecionar 20 (vinte) conjuntos amostrais de lavouras de café, dos quais 16 (dezesseis) referiram-se a café em produção, 3 (três) corresponderam a café em formação e 1 (um) representou lavoura de café podado. A distribuição dos conjuntos em diferentes municípios pode ser observada na Tabela 3.3.

Tabela 3.3 – Distribuição dos segmentos amostrados por municípios e por tipo de lavoura.

MUNICÍPIO	NÚMERO DE AMOSTRAS POR CONJUNTO					TOTAL DE AMOSTRAS
Carmo da Cachoeira	Conjuntos	1				08 produção
	Nº de Amostras	8				
Cabo Verde	Conjuntos	1	2			21 produção
	Nº de Amostras	15	6			
Campo do Meio	Conjuntos	1	2	3	4	33 produção e 09 formação
	Nº de Amostras	15	8	6	4	
Alfenas (Ipanema)	Conjuntos	1	2	3	4	21 produção e 08 podado
	Nº de Amostras	8	7	6	8**	
Boa Esperança	Conjuntos	1	2	3		15 produção e 01 formação
	Nº de Amostras	16*	6	9		
Guaxupé	Conjuntos	1				07 produção
	Nº de Amostras	7				
Alfenas	Conjuntos	1	2	3	4	28 produção e 05 formação
	Nº de Amostras	9	10	9	5*	
Total de Amostras	Produção = 133, Formação = 30 e Podado = 8					

A fim de obter um comportamento médio dos índices de vegetação (NDVI e EVI) para lavouras cafeeiras em produção, formação e podadas, foi necessário avaliar a igualdade entre os parâmetros das amostras. No entanto, como as amostras não apresentaram distribuições normais, foi utilizado o teste não paramétrico de *Friedman*, existente no aplicativo Statistica.

Este teste é utilizado para comparar duas ou mais populações relacionadas. Sendo assim, os dados são dispostos em uma tabela de dupla entrada com n linhas (que representam os casos, “segmentos”) e k colunas (que representam as populações a serem comparadas, “NDVI”). A cada linha são atribuídos postos separadamente, que variam de 1 a k . O teste de *Friedman* determina a probabilidade de que as diferentes colunas de postos sejam equivalentes. Para aplicar o teste, calcula-se o valor da estatística χ^2 , que tem distribuição qui-quadrado, com $k-1$ graus de liberdade (MURRAY, 2001).

Primeiramente o teste *Friedman* foi realizado entre as amostras de cada conjunto individualmente. As amostras consideradas iguais perante o teste foram agrupadas gerando um valor médio. A partir de então, realizou-se a comparação entre os valores médios dos conjuntos amostrais. Como resultado, obteve-se o comportamento médio

dos índices NDVI e EVI para lavouras de café em produção, formação e podado durante todo ciclo fenológico.

3.4.3. Fase 3: Parametrização do modelo agrometeorológico-espectral para estimativa da produtividade da cultura do café

A estimativa da produtividade da cultura do café foi realizada para os anos agrícolas de 2001/02, 2002/03, 2003/04 e 2004/05. Para tanto, foi utilizado o programa AGROMET proposto por Berka *et al.* (2003) e adaptado por Rizzi (2004).

O programa AGROMET, foi ajustado para cultura do café e adaptado às condições climáticas agrometeorológicas da região Sul/Sudoeste de Minas Gerais. Baseia-se na Equação 3.1 proposta por Doorenbos e Kassam (1979).

$$Y_{est} = Y_p \left[1 - k_y \left(1 - \frac{E_r}{E_p} \right) \right] \quad (3.1)$$

onde:

Y_{est} = produtividade estimada (kg/ha);

Y_p = produtividade potencial (kg/ha);

k_y = fator de resposta à produtividade;

$\frac{E_r}{E_p}$ = evapotranspiração relativa.

Todas as demais equações envolvidas no cálculo da produtividade estão detalhadamente descritas em Doorenbos e Kassam (1979) e Sugawara (2002), cabendo a este documento apenas apresentar os procedimentos que envolveram adaptação do modelo à cultura do café e a região de estudo.

Na Tabela 3.4 são apresentadas resumidamente todas as variáveis de entrada do modelo, cujos procedimentos utilizados para a obtenção de cada uma delas abordadas nos subitens posteriores.

Tabela 3.4 – Variáveis de entrada do modelo AGROMET.

VARIÁVEL	FONTE	PROCEDIMENTO BÁSICO
PARA O CÁLCULO DA PRODUTIVIDADE POTENCIAL		
IAF	Obtida a partir das imagens NDVI/MODIS	Utilização de um LEGAL com base nas equações 2.11 e 2.12
PARA O CÁLCULO DO BALANÇO HÍDRICO		
Temperatura Média	Obtida a partir do modelo regional de previsão do tempo - ETA	Interpolação da resolução espacial de 40x40km para 250x250m
Precipitação Pluvial	Obtida a partir do modelo regional de previsão do tempo - ETA	Interpolação da resolução espacial de 40x40km para 250x250m
Velocidade do Vento	Obtida a partir do modelo regional de previsão do tempo - ETA	Interpolação da resolução espacial de 40x40km para 250x250m
Radiação Solar	Obtida a partir do modelo regional de previsão do tempo - ETA	Interpolação da resolução espacial de 40x40km para 250x250m
Umidade Relativa do Ar	Obtida a partir do modelo regional de previsão do tempo - ETA	Interpolação da resolução espacial de 40x40km para 250x250m
Kc	Camargo e Pereira (1994)	
Profundidade radicular (D)	Franco e Inforzarto (1946)	
CAD	Obtida a partir do mapa de solos disponível em Geominas (2007)	Associação do tipo do solo à CAD segundo Rizzi (2004)
ALTMETRIA	Obtida a partir do SRTM	Interpolação da resolução espacial de 90x90m para 250x250m
PARA O COEFICIENTE DE RESPOSTA À PRODUTIVIDADE		
Ky	Santos e Camargo (2006)	

3.4.3.1. Mapa temático com a distribuição espacial das lavouras cafeeiras

Um parâmetro muito relevante para o cálculo da produtividade pelo programa AGROMET foi o mapa contendo a distribuição espacial das lavouras de café o qual permitiu o cálculo da produtividade apenas nas áreas ocupadas pela cultura.

Devido a diferença de resolução *espacial* entre o mapa da área de café (10x10m) e os dados de entrada do modelo (IAF e dados agroclimáticos – 250x250m), foi necessário adequá-los na mesma resolução *espacial*. Para isso, o mapa da área de café foi reamostrado para a resolução *espacial* de 250x250 metros.

Embora todas as variáveis necessárias ao modelo tenham sido geradas em grades regulares contínuas, ao utilizar este mapa, o modelo AGROMET realizou o cálculo do

balanço hídrico, da produtividade e dos índices de penalização em função do déficit hídrico apenas nessas áreas ocupadas por lavouras cafeeiras.

3.4.3.2. Cálculo do balanço hídrico pelo modelo AGROMET

O programa AGROMET foi desenvolvido para rodar operacionalmente o balanço hídrico a partir do método de Thornthwaite e Mather (1955) cujo cálculo da evapotranspiração potencial baseia-se em Penman-Monteith (MONTEITH, 1965; ALLEN *et al.*, 1998). Além das variáveis meteorológicas: temperatura média do ar (°C), velocidade do vento a 2 metros de altura (km dia^{-1}), umidade relativa do ar (%), radiação solar ($\text{cal m}^2 \text{ dia}^{-1}$) e precipitação pluvial (mm dia^{-1}), outros parâmetros devem ser informados: capacidade de água disponível (CAD), coeficiente da cultura (kc) e fator de resposta a produtividade (ky).

3.4.3.2.1. Cálculo da capacidade de água disponível no solo (CAD)

Para obtenção do dado referente à CAD foi utilizado o mapa de classificação de solos em escala 1:100.000 (Rio de Janeiro, 1970), cuja digitalização encontra-se disponível em Geominas (1996). O valor de CAD foi atribuído adotando-se o critério descrito na Tabela 3.5, mesmo procedimento realizado por Rizzi, (2004).

Tabela 3.5 – Capacidade de armazenamento de água para algumas classes de solo.

CLASSE PEDOLÓGICA DO SOLO	CAD (mm)
Neossolo Quartzarênico, Neossolo Flúvico de textura arenosa, Planossolos	50
Latossolo Vermelho-Amarelo, Latossolo Vermelho (menos de 35% de argila), Neossolo Litólico, Chernossolos	70
Luvisolos, Argilossolos, Latossolos (exceto Latossolo Vermelho com menos de 35% de argila), Cambissolos e Neossolo Flúvico de textura média a argilosa.	100

Fonte: Adaptada de EMBRAPA (1999); Farias (2001); apresentada em Rizzi (2004).

3.4.3.2.2. Determinação do coeficiente da cultura (kc)

O coeficiente da cultura (kc) expressa a relação entre a evapotranspiração máxima de uma cultura, considerada como a que ocorre em condições hídricas ideais no solo e a

evapotranspiração de uma cultura de referência e varia conforme o aumento da área foliar e o estágio de desenvolvimento da cultura (DOORENBOS e PRUITT, 1977; PEREIRA *et al.*, 1997).

Santinato *et al.* (1996) verificaram valores de k_c iguais a 0,8; 0,9 e 1,0 em lavouras de café entre 12 e 36 meses, e iguais a 1,0; 1,1 e 1,2 com idade superior a 36 meses. Em cafezal adulto com 5 anos de idade e densidade de 4000 plantas por hectare, Marin *et al.* (2005) encontraram k_c variando de 0,6 a 1,0.

Partindo do princípio de que o café é uma cultura perene e que a produtividade utilizada nas análises desse estudo são provenientes de cafeeiros adultos, o valor de k_c adotado no cálculo do balanço hídrico se igualou a unidade ($k_c=1$), assumindo-se assim, plena cobertura do terreno pelas plantas adultas (CAMARGO e PEREIRA, 1994).

3.4.3.2.3. Determinação do fator de resposta a produtividade (k_y)

O fator de resposta a produtividade (k_y), refere-se à resposta da cultura à disponibilidade hídrica e relata a diminuição relativa da produtividade em função da diminuição da evapotranspiração.

Os valores de k_y adotados para a cultura do café foram determinados por Santos (2005) em estudo realizado em áreas ecológicas no Estado de São Paulo em nível de propriedade rural.

3.4.3.2.4. Determinação da profundidade do sistema radicular (D)

Outro parâmetro denominado profundidade do sistema radicular (D) da cultura, interfere na capacidade de aproveitamento de água disponível no solo e, conseqüentemente, na produtividade final.

Franco e Inforzato (1946) determinaram que a profundidade média de exploração das raízes de um cafeeiro adulto, nas condições do Estado de São Paulo é, aproximadamente, de um metro. Devido à ausência de trabalhos na literatura para as condições do Estado de Minas Gerais, o mesmo valor foi adotado nesta pesquisa.

A Tabela 3.6 apresenta resumidamente os valores dos parâmetros utilizados no modelo AGROMET para estimativa da produtividade do café.

Tabela 3.6 – Resumo dos parâmetros utilizados na parametrização do modelo agrometeorológico-espectral.

PERÍODO	MÊS	DIA	Ky	Kc	D (m)
Maturação dos frutos	Abril	97	0	1	1
	Abril	113	0	1	1
	Maio	129	0.06	1	1
	Maio	145	0.06	1	1
	Junho	161	0.18	1	1
Repouso do cafeeiro	Julho	177	0.06	1	1
	Julho	193	0.06	1	1
	Agosto	209	0.00	1	1
	Agosto	225	0,00	1	1
Florada, chumbinho, e expansão dos frutos	Setembro	241	0.06	1	1
	Setembro	257	0.78	1	1
	Outubro	273	0.78	1	1
	Outubro	289	0.72	1	1
	Novembro	305	0.66	1	1
	Novembro	321	0.66	1	1
	Dezembro	337	0.54	1	1
	Dezembro	353	0.48	1	1
Granação dos frutos	Janeiro	1	0.36	1	1
	Janeiro	17	0.30	1	1
	Fevereiro	33	0.18	1	1
	Fevereiro	49	0.12	1	1
	Março	65	0,00	1	1
	Março	81	0,00	1	1

3.4.3.3. Obtenção da variável espectral

De acordo com a recomendação de Rizzi *et al.* (2004), as imagens NDVI foram primeiramente transformadas em imagens fração da cobertura do solo (CHOU DHURY *et al.*, 1994), para que se obtivessem os valores estimados do IAF.

$$F_c = 1 - \left(\frac{IV_{\max} - IV}{IV_{\max} - IV_{\min}} \right)^{0.6} \quad (3.2)$$

onde:

F_c = fração do solo coberto pela cultura;

IV_{\max} = valor máximo do IV da imagem;

IV_{min} = valor mínimo do IV da imagem;

IV = valor do IV de cada pixel da imagem.

E o IAF foi estimado pela Equação 3.3 de Norman *et al.* (2003).

$$IAF = -2\ln(1 - Fc) \quad (3.3)$$

onde:

Fc = fração do solo coberto pela cultura obtido na equação anterior;

IAF = índice de área foliar para cada pixel da imagem.

A fim de que essa transformação ocorresse de forma operacional, foi desenvolvida uma programação em LEGAL a partir das equações supracitadas. Desta forma, foram obtidos valores de IAF para cada pixel das 92 imagens de NDVI.

3.4.3.4. Fator de produtividade agrícola (FPA)

O último parâmetro de entrada no modelo AGROMET é o fator de produtividade agrícola (FPA). Este parâmetro relaciona-se à quantidade de matéria seca produzida pela planta que é contabilizada como rendimento econômico (ALLEN *et al.*, 1998; RIZZI *et al.*, 2006).

De acordo com Doorenbos e Kassam (1979) a base de cálculo da matéria seca produtiva leva em consideração a taxa de produção em kg/ha/hora em diferentes temperaturas. A partir desse valor, as culturas são classificadas em culturas de inverno e verão que produzem até 20kg/ha/hora e culturas de inverno e verão que produzem mais de 20 kg/ha/hora. Entretanto, para culturas perenes, o Boletim da FAO (nº 33) apresenta apenas a taxa de produção para citros, classificada como cultura de verão com taxa de produção inferior a 20/kg/ha/hora. Diante da semelhança das culturas citros e café foram adotados os mesmos parâmetros apresentados para esse grupo. Dessa forma, foi possível inserir a cultura do café no modelo AGROMET.

Devido à bienalidade da cultura, o FPA teve de ser estimado tanto para ano de baixa quanto de alta produtividade uma vez que a matéria seca produtiva é menor em anos de

baixa produtividade. Em virtude do ano utilizado para o mapeamento das lavouras cafeeiras, optou-se por selecionar o mesmo ano (2005) como referência de ajuste do FPA para ano de baixa produtividade e o ano anterior (2004), como referência de ajuste para ano de alta produtividade. O melhor resultado para cada ano foi então utilizado nos demais anos, 2002 e 2003, de alta e baixa produtividade respectivamente.

3.4.3.5. Cálculo da produtividade do café para a região Sul/Sudoeste de Minas Gerais

Após a parametrização do modelo, calculou-se a produtividade média para a região do Sul/Sudoeste de Minas Gerais para anos agrícolas 2001/02, 2002/03, 2003/04 e 2004/05.

Os resultados foram expressos em PI's temáticos contendo um valor de produtividade para cada segmento da grade regular representativos das áreas de plantio de café. Desta forma, obteve-se um PI a cada 16 dias, totalizando 23 PI's para cada ano agrícola.

Em seguida, a produtividade média por município foi calculada através do mapa da divisão político municipal, disponibilizado pelo IBGE no site <http://www.sidra.ibge.gov.br/bda/acervo>.

3.4.3.6. Estimativa da quebra da produtividade da cultura do café

Além do cálculo da produtividade final, o modelo agrometeorológico-espectral AGROMET, também permite o cálculo dos índices de penalização em função do déficit hídrico, chamados de parciais (Equação 3.4) e os índices de penalização acumulados (Equação 3.5), que consideram além da restrição hídrica, a penalização em função de outros fatores que prejudicam o desenvolvimento da cultura como falhas de manejo, ataques de pragas e doenças, desde que tais danos tenham se manifestado nas variações do comportamento espectral da cultura registradas pelo índice de vegetação oriundos das imagens MODIS (RIZZI, 2004; RIZZI *et al.*, 2007).

$$IP = 1 - k_y \left(1 - \frac{ER}{EP} \right) \quad (3.4)$$

onde:

IP = Índice de Penalização;

k_y = fator de resposta à produtividade (Tabela 3.6);

ER = evapotranspiração real;

EP = evapotranspiração máxima.

$$IP(a) = \frac{Y_{est}(a)}{Y_p(a)} \quad (3.5)$$

onde:

$IP(a)$ = índice de penalização acumulado;

$Y_{est}(a)$ = produtividade estimada acumulada até o período de interesse;

$Y_p(a)$ = produtividade potencial estimada

Sendo assim, foram calculados os índices de penalização (IP 's) parciais a cada 16 dias e acumulados para todo período fenológico, os quais expressos em PI 's numéricos e temáticos permitiram o acompanhamento da safra de café durante todo o ciclo fenológico da cultura.

3.4.3.6.1. Correlação entre o índice de penalização gerado pelo modelo agrometeorológico-espectral e a precipitação

Uma das alternativas encontradas para verificar a veracidade da penalização calculada pelo modelo AGROMET foi correlacioná-la com a precipitação total média ocorrida durante cada ciclo fenológico da cultura. Presume-se, conforme a literatura, que a quebra de produtividade seja maior quando a restrição hídrica ocorra em períodos críticos ao cafeeiro.

Assim sendo, para cada ano agrícola foi obtido um valor médio de precipitação pluvial e do índice de penalização, para toda área de estudo, os quais foram comparados visualmente através de gráficos.

3.4.4. Fase 4: Parametrização do modelo agrometeorológico de Santos e Camargo (2006) para estimativa da quebra e da produtividade da cultura do café em área teste

Diante da limitação do modelo proposto por Santos e Camargo (2006), quanto à operacionalidade em aplicá-lo para grandes áreas, uma vez que a estimativa da quebra da produtividade é calculada de forma pontual, apenas o município de Alfenas foi selecionado como área teste. Esse teste objetivou verificar e identificar as diferentes contribuições dos modelos agrometeorológico e agrometeorológico-espectral na estimativa da produtividade da cultura do café.

O modelo de Santos e Camargo (2006) foi executado a partir de rotinas de cálculos elaboradas em planilhas Excel as quais foram cedidas pelos próprios autores. O ano agrícola utilizado foi 2004/05 respectivo ao ano utilizado para o mapeamento da área de café.

As variáveis meteorológicas (temperatura do ar média, mínima e máxima) oriundas do modelo ETA, foram exportadas apenas para área do município em formato Surfer XYZ, o qual permitiu a saída de arquivos contendo valores de latitude, longitude e a variável de interesse. Dessa forma, o município de Alfenas abrangeu 1948 segmentos de 250x250m.

Assim sendo, para cada um dos 1948 segmentos foi estimada quebra da produtividade. Entretanto, para que o cálculo da estimativa da quebra da produtividade para cada um dos segmentos fosse realizada de forma operacional, optou-se por desenvolver uma macro no próprio aplicativo Excel. Além disso, adaptou-se o modelo agrometeorológico de Santos e Camargo (2006) à mesma escala *temporal* utilizada no modelo agrometeorológico-espectral proposto por Rizzi (2004), 16 em 16 dias.

A primeira etapa do modelo consistiu no cálculo do balanço hídrico segundo Thornthwaite e Mather (1955) ajustado por diferentes coeficientes de sensibilidade da cultura ao deficit hídrico (ky), ocorridos nos quatro estádios fenológicos da cultura. Preocupou-se em manter os mesmos coeficientes ky utilizados no modelo agrometeorológico-espectral apresentados na Tabela 3.6.

Posteriormente, foi determinada o início da florada, após o acúmulo térmico necessário de 350 mm de ETp, juntamente com chuva de no mínimo 5 mm (SANTOS e CAMARGO, 2006). A partir de então, foi calculada a penalização em função da ocorrência das temperaturas mínimas anuais inferiores a 2°C, e temperaturas máximas anuais superiores a 34°C.

Com relação às temperaturas mínimas absolutas, a porcentagem de cafeeiros danificados a partir da ocorrência de temperaturas mínimas anuais inferiores a 2°C, ocorridas no ano anterior à produção, pode ser estimada por meio da equação gaussiana (Equação 3.6) proposta por Camargo *et al.* (2003).

$$f.T \text{ min} = 1 - \left[a_1 * \exp \left[\frac{-(x_1 - b_1)^2}{2 * C_1^2} \right] \right] \quad (3.6)$$

onde:

$f.T \text{ min}$ = porcentagem de cafeeiros danificados com base em temperatura mínima anual;

x_1 = temperatura mínima absoluta de abrigo (°C);

Coefficientes $a_1 = 140.3445$, $b_1 = 2.9580$ e $c_1 = 1.7701$.

No caso da penalização por temperaturas máximas absolutas do ar, considerou-se valores acima de 34°C durante o florescimento como crítico para a cultura e foram avaliados sempre os três primeiros decêndios após a plena antese. O modelo de Gompertz foi ajustado por Camargo *et al.* (2003) e é expresso pela Equação 3.7:

$$f.T \text{ max} = 1 - \left[a_2 * \exp^{-\exp(b_2 - (c_2 * x_2))} \right] \quad (3.7)$$

onde:

$f.Tmax$ = penalização por temperaturas máximas decendiais durante os estádios do florescimento e chumbinho (%);

x_2 = a maior temperatura média (acima de 23°C) dos três primeiros decêndios subseqüentes a plena florada ou a maior temperatura máxima absoluta do ar acima de 34°C neste mesmo período.

Coefficientes $a_2 = 141.771$, $b_2 = 17.9486$ e $c_2 = 0.6782$.

Sendo assim, a penalização pelo modelo multiplicativo composto por parâmetros fenológicos, hídricos e térmicos, é estimada pela Equação 3.8:

$$Q(\%) = [(f.DH) * (f.T min) * (f.T max)] \quad (3.8)$$

onde:

$Q(\%)$ = estimativa da quebra relativa da produtividade do café;

$f.DH$ = fator de penalização por deficiência hídrica;

$f.Tmin$ = fator de penalização por temperatura mínima;

$f.Tmax$ = fator de penalização por temperatura máxima.

Os resultados da estimativa da quebra da produtividade para a cultura do café foram importados para o ambiente SPRING. A partir de então, pôde-se obter a estimativa da produtividade baseada na Equação 3.9.

$$Y_{est} = \left\{ \left(1 - ky_0 \left(\frac{Y_{aa}}{Y_p} \right) \right) * \left[1 - \left(ky \left(1 - \frac{ER}{EP} \right) \right) \right] * [1 - f.geada] * [1 - f.T max] \right\} * Y_p \quad (3.9)$$

onde:

Y_{est} = produtividade estimada ($kg.ha^{-1}$);

Y_{aa} = produtividade do ano anterior ($kg.ha^{-1}$);

Y_p = produtividade potencial da cultura ($kg.ha^{-1}$);

ky_0 = coeficiente de penalização relativo à produtividade do ano anterior;

Ky = coeficiente de resposta da cultura ao suprimento de água para os sucessivos estádios fenológicos da cultura;

ER = evapotranspiração real da cultura;

EP = evapotranspiração potencial;

$f.g\acute{e}ada$ = fator de penalização por temperatura mínima propícia a ocorrência de geadas;

$f.Tmax$ = fator de penalização por temperatura máxima.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A apresentação dos resultados manteve-se conforme subdivisão adotada no item 3. Metodologia.

4.1. Fase 2: Análise espectral da cultura do café e comportamento climático da região de estudo

4.1.1. Balanços hídricos obtidos pelo modelo ETA

A Figura 4.1 apresenta os balanços hídricos sequenciais segundo Thornthwaite e Mather (1955) em que foram utilizados dados de precipitação (mm) e temperatura média do ar (°C), ambos obtidos pelo modelo regional de previsão do tempo ETA. Os balanços foram gerados a cada 16 dias em função da escala *temporal* dos dados orbitais e a apresentação é feita a partir da deficiência e do excedente hídrico (representação gráfica do extrato do balanço hídrico), conforme Camargo e Camargo (2001).

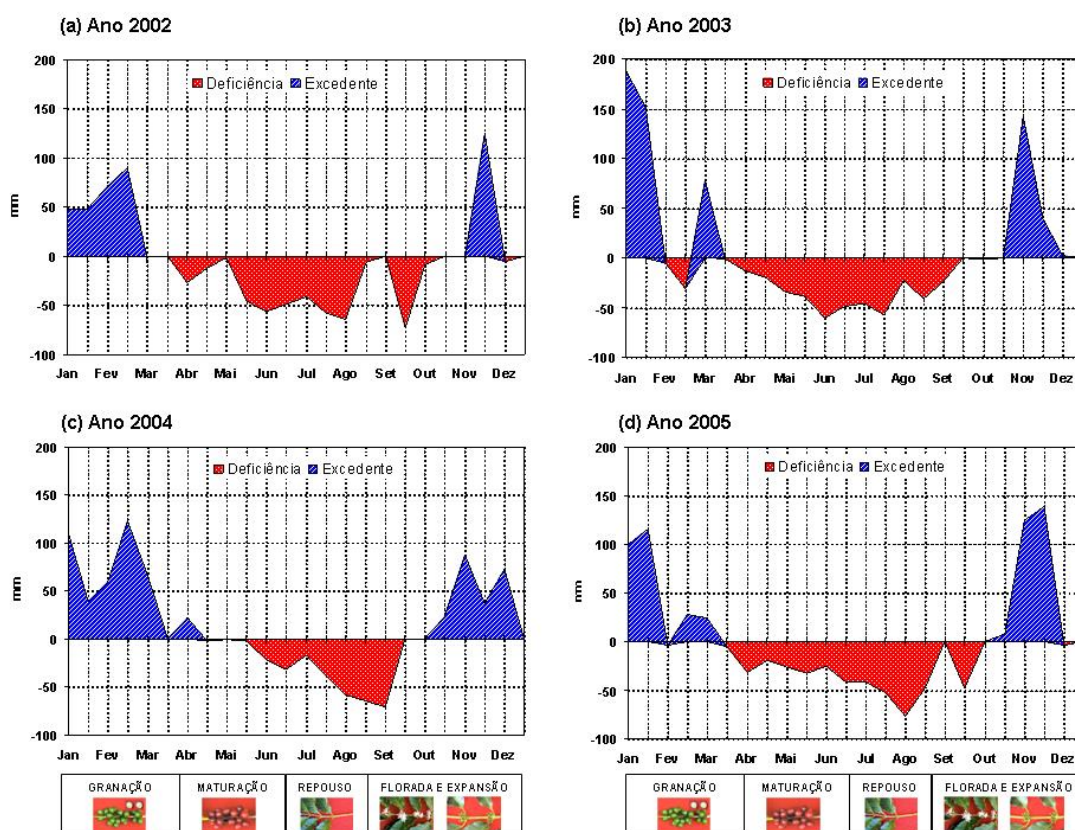


Figura 4.1 – Balanços hídricos gerais da região Sul/Sudoeste do Estado de Minas Gerais: (a) ano 2002, (b) ano 2003, (c) ano 2004 e (d) ano 2005.

Os dados de precipitação e temperatura gerados pelo modelo ETA são estimados e, portanto, sujeitos a erros. Vale ressaltar que a utilização de um único valor médio representativo da área de estudo somada a escala temporal de 16 dias, pode ter mascarado os efeitos de deficiência ou excedente hídrico em relação ao balanço hídrico decendial, comumente utilizado em modelos agrometeorológicos. Entretanto, a mesma resolução temporal dos índices de vegetação foi adotada a fim de compatibilizar os resultados e facilitar as análises. Diante disso, os resultados obtidos restringiram-se apenas à uma caracterização geral da área.

Da mesma forma, a Figura 4.2 apresenta como informação complementar o comportamento médio da chuva e da temperatura média na região, também para escala temporal de 16 dias.

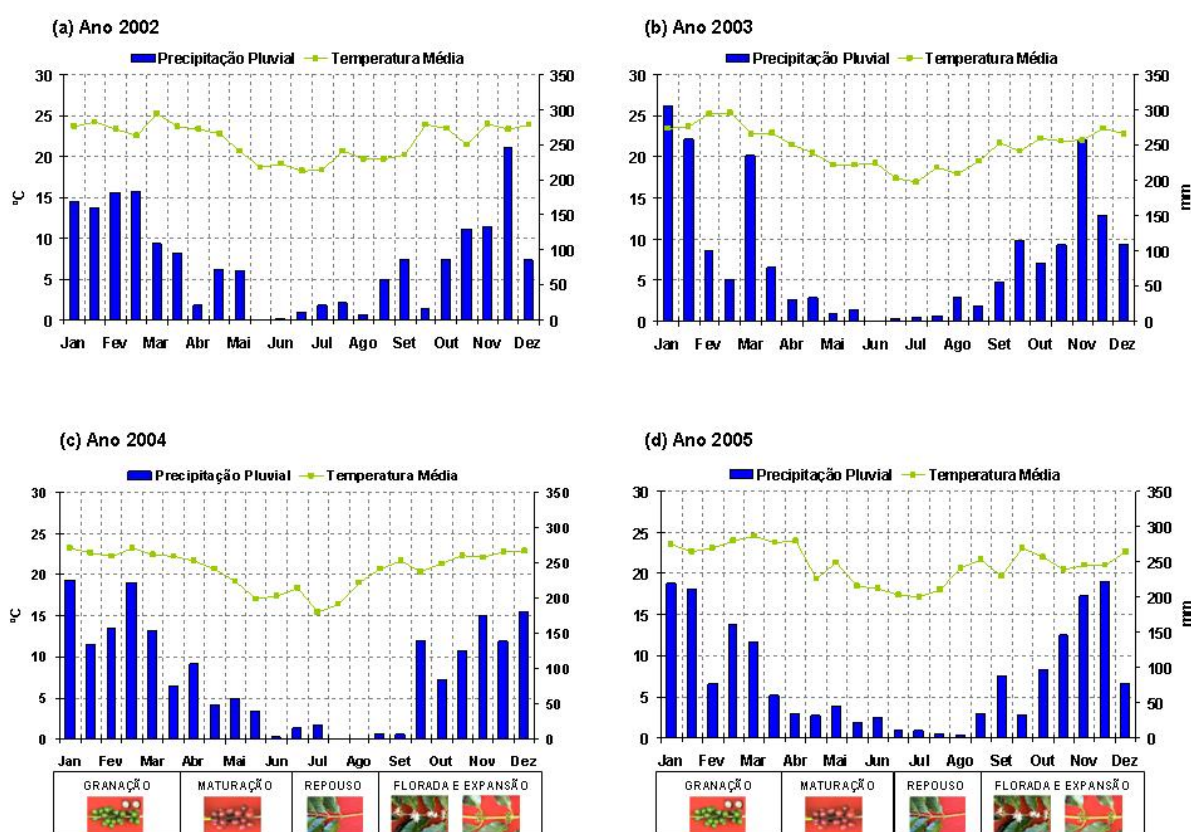


Figura 4.2 – Comportamento médio da precipitação e temperatura da região Sul/Sudoeste do Estado de Minas Gerais: (a) ano 2002, (b) ano 2003, (c) ano 2004 e (d) ano 2005.

Para uma análise mais consistente dos resultados apresentados nas Figuras 4.1 e 4.2, foram tomadas algumas referências junto aos pesquisadores e arquivos do Instituto Agronômico de Campinas:

- No ano de 2002 o déficit hídrico ocorreu de março a novembro salvo o mês de setembro. Nota-se ainda que nos meses de junho, julho, agosto e outubro o déficit hídrico foi bastante acentuado, chegando a atingir aproximadamente 60mm em meados de outubro. Esse longo período de deficiência hídrica, somado às altas temperaturas (média acima de 23°C) ocorridas nos meses de janeiro a março provocou a maturação rápida do grão e o comprometimento da qualidade da bebida no ano agrícola 2001/02. Apesar de não ter ocorrido deficiência hídrica no mês de setembro, as chuvas não foram suficientes para ocasionar excedente de água no solo e, nessa época, normalmente espera-se maior demanda hídrica devido ao início da florada. Além disso, as altas temperaturas ocorridas nos meses de outubro a dezembro (média entre 23° a 24°C) podem ter antecipado a formação do chumbinho e, conseqüentemente, afetado a qualidade do grão para o ano agrícola 2002/03.
- No ano de 2003 observa-se que no mês de janeiro houve excedente hídrico acentuado, além do esperado nessa época chuvosa, o que pode ter afetado o estado fitossanitário da lavoura. Em relação ao déficit hídrico, nota-se que ocorreu em um período mais curto (abril a setembro), em comparação ao ano de 2002. Neste ano a deficiência hídrica máxima foi em torno de 30mm e ocorreu entre os meses de junho a setembro.
- Em 2004 nota-se que a deficiência hídrica foi maior entre os meses de agosto e setembro e nos meses de junho e julho, o déficit hídrico foi menor, não ultrapassando 20mm. Nota-se ainda que no mês de setembro o pico máximo de déficit hídrico atingiu 60mm e posteriormente as chuvas elevaram o armazenamento de água no solo, mas sem ocasionar excedente. Segundo Camargo e Camargo (2001), caso ocorra estiagem forte nessa fase, o estresse hídrico poderá prejudicar o crescimento dos frutos e resultar na ocorrência

de peneira baixa. Assim, a deficiência hídrica observada na Figura 4.2, de certa forma, pode ter influenciado na produtividade do ano agrícola 2004/05.

- Em 2005 o déficit hídrico ocorreu de março a novembro, período semelhante ao observado no ano de 2002, exceto que no mês de setembro, em que se constatou um déficit hídrico de apenas 15mm. Também foi registrada temperatura média acima de 23°C no mês de outubro (Figura 4.2 d), a qual juntamente com a deficiência hídrica pode ter antecipado a formação do chumbinho e, conseqüentemente, afetado a qualidade do grão do ano agrícola 2005/06. Os valores de maior deficiência hídrica (45mm) ocorreram em período de menor comprometimento para o cafeeiro, ou seja, entre os meses de julho e agosto.

4.1.2. Comportamento dos índices de vegetação: NDVI e EVI

Das 133 amostras de NDVI apresentadas em dezesseis (16) conjuntos (Tabela 3.3) referentes às lavouras em produção, doze (12) conjuntos mostraram-se semelhantes com base no teste estatístico não-paramétrico de *Friedman*. Assim, foi obtido um valor médio para cada um desses conjuntos de NDVI os quais foram novamente comparados e submetidos a um novo teste *Friedman*. Esta segunda aplicação do teste resultou na formação de três (3) grupos os quais não apresentaram diferenças significativas para $\alpha = 0,05$ sendo os *valores p* encontrados: 0,73; 0,86 e 0,52 (Figura 4.3 a, b, c).

Da mesma forma, as trinta (30) amostras referentes ao NDVI de lavouras em formação também foram testadas pelo teste *Friedman*. Dessas, onze (11) foram agrupadas em três (3) grupos conforme semelhança apresentada, *valor p*: 0,23; 0,96 e 0,48 (Figura 4.3 d,e,f).

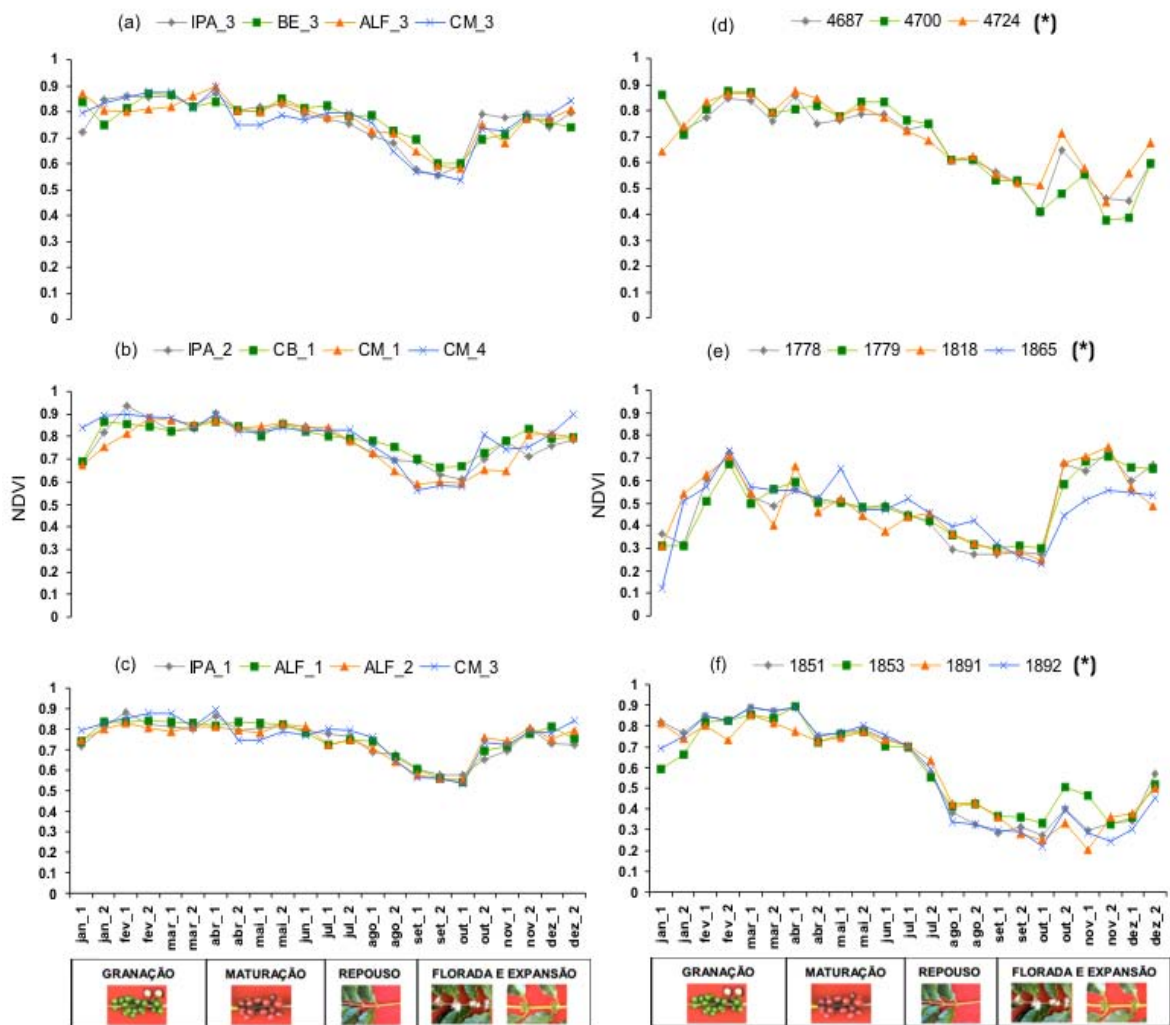


Figura 4.3 - Comportamento temporal do NDVI médio de acordo com os agrupamentos gerados pelo teste de *Friedman* em que a, b, c representam os grupos para o café em produção; d, e, f para café em formação. IPA_1, 2 e 3, referem-se as amostras na fazenda Ipanema, ALF_1, 2 e 3, as amostras no município de Alfenas, CM_1, 3 e 4 as amostras no município de Campo do Meio. (*) São identificadores das amostras de café em formação.

Diante da normalidade encontrada nos valores médios de NDVI referentes às amostras de café em produção, os conjuntos apresentados na Figura 4.3 (a,b,c) puderam ser testados pelo teste de Tukey. No entanto, não apresentaram diferenças significativas para $\alpha = 0,05$, $valor\ p = 0,67$. Dessa forma, foi obtido um único valor médio de NDVI a partir de todos esses conjuntos, o qual foi adotado como representativo do comportamento médio do NDVI das lavouras de café em produção (Figura 4.3 a).

Para as amostras referentes às lavouras de café em formação, entretanto, devido a não normalidade e ao número insuficiente de amostras para aplicação do teste paramétrico Tukey, foi calculado um valor médio de NDVI para cada grupo apresentado na Figura 4.3 (d, e, f), os quais foram submetidos novamente ao teste *Friedman*. Porém, o valor $p = 0,01$ obtido foi significativo para $\alpha = 0,05$, ou seja, os valores do NDVI diferiram estatisticamente entre os conjuntos. Essa diferença entre os valores de NDVI referentes às amostras de lavouras em formação pode ser justificada devido a grande variabilidade na quantidade de biomassa encontrada nessas lavouras.

Diante disso, optou-se por adotar a média referente apenas às amostras de Boa Esperança (Figura 4.3 e) como representativa da lavoura em formação, uma vez que essas lavouras tinham sido visitadas em campo no ano de 2005 e apresentavam idade de 18 meses, conforme mostra a Figura 4.4.



Figura 4.4 – Lavoura de café em formação no Município de Boa Esperança, MG.

Para o café podado, foi gerado um valor médio de NDVI a partir das 8 amostras obtidas numa lavoura localizada em uma das fazendas do Grupo Ipanema, no município de Alfenas/MG.

A análise do comportamento médio do EVI utilizou-se das mesmas amostras empregadas para o NDVI, cujos resultados são apresentados na Figura 4.5.

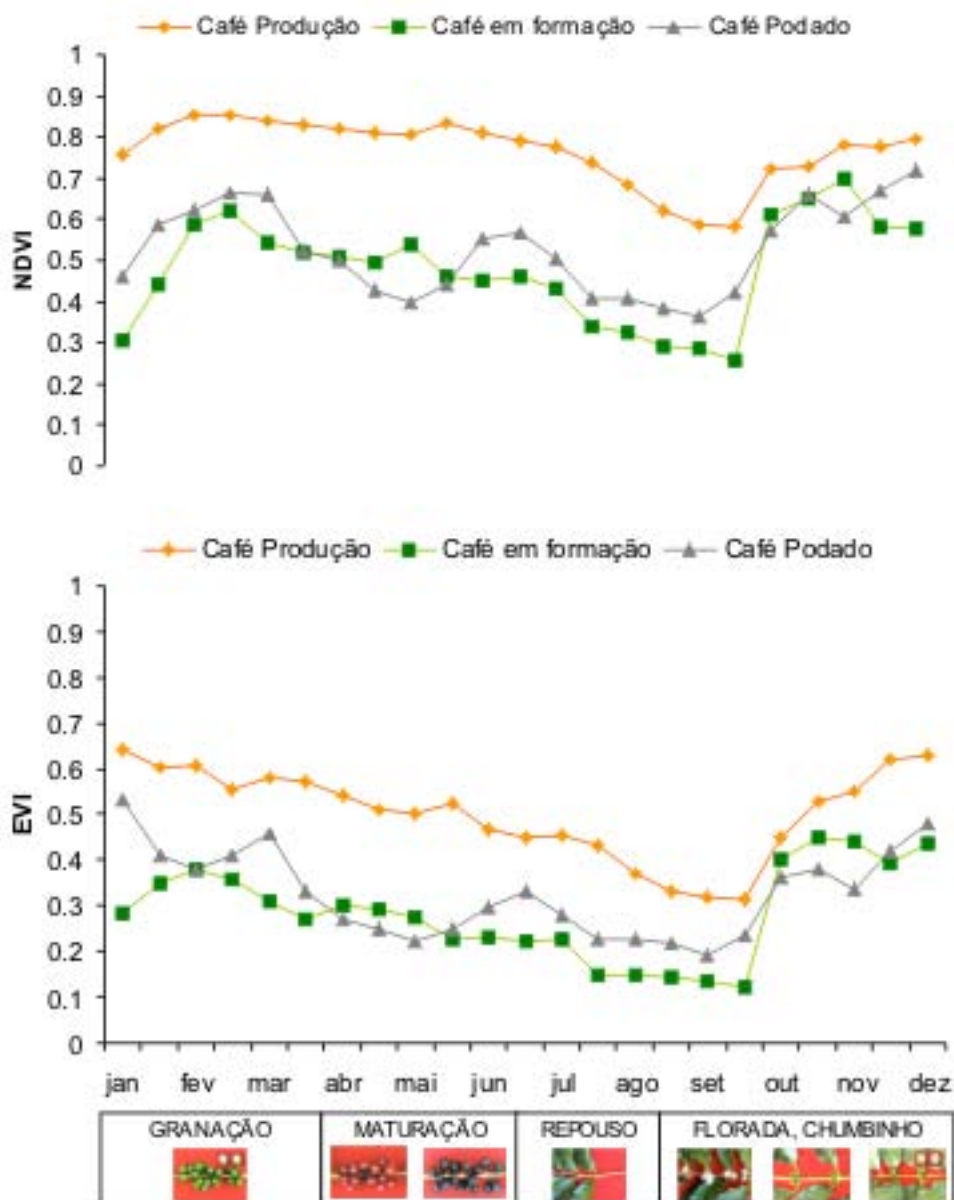


Figura 4.5 – Comportamento médio dos índices de vegetação para lavouras cafeeiras, (a) valores de NDVI para café produção, formação e podado e (b) valores de EVI para café produção, formação e podado. Representação fenológica adaptada de Camargo e Camargo (2001); Pezzopane *et al.* (2004).

A análise da Figura 4.5, demonstra que a evolução temporal dos índices de vegetação relacionou-se às diferentes fases do ciclo fenológico em lavouras de café em produção no ano de 2005. Valores mais baixos dos IVs foram observados no período de agosto e setembro, período de transição do repouso do cafeeiro para o início da florada. Segundo Santos e Camargo (2006) a florada ocorre após um acúmulo térmico de 340 mm de EP,

contabilizado a partir do início do primeiro decêndio de abril e somado com a ocorrência de chuva de no mínimo 5 mm geralmente observada no mês de setembro.

Nas primeiras quinzenas de outubro nota-se um incremento contínuo dos valores dos índices até o final do período, o que demonstra a sensibilidade dos índices ao acréscimo da biomassa por ocasião da florada e posteriormente, pela formação do chumbinho e a expansão dos frutos.

No período de julho a agosto, época de repouso, os índices apresentaram-se em declínio, comprovando a sensibilidade dos índices à diminuição da biomassa no processo de colheita, a qual se inicia a partir do mês de julho podendo se estender até setembro.

O comportamento do NDVI e do EVI para o café em formação e podado tendeu a assemelhar-se ao de produção, entretanto, os valores dos índices apresentaram-se mais baixos. A menor quantidade de biomassa da cultura jovem e em recuperação somada à influência do solo na resposta espectral foram fatores influenciadores dos menores valores dos índices. Além disso, os índices também apresentaram maior variabilidade durante o ciclo da cultura para essas lavouras, a qual pode ser atribuída aos tratamentos culturais aplicados, como capina e adubação. Ou seja, o efeito da capina em lavouras de café em formação e podadas reduz a quantidade de biomassa existente e aumenta a área de solo exposto, cujos impactos na resposta espectral tornam-se maiores, ocasionando a variabilidade encontrada.

Para o modelo agrometeorológico-espectral de estimativa da produtividade optou-se por utilizar o NDVI para obtenção da variável espectral IAF, por se tratar de um índice cujas relações com parâmetros biofísicos de culturas agrícolas já estarem definidas na literatura.

Vale ressaltar que as sucessivas oscilações da resposta dos índices observadas durante o ciclo da cultura, são atribuídas às características de imageamento do sensor MODIS nos diferentes ângulos de visada, com intuito de obter alta repetitividade. Ou seja, a

impossibilidade de obter 16 imagens diárias no nadir em seqüência, implica na utilização dos diferentes ângulos de visada para obtenção de imagens contínuas, a partir do produto MOD09GQK. Entretanto, os valores de reflectância da banda do infravermelho-próximo são comprometidos com a distância, sendo os maiores valores de reflectância observados em alvos fora do nadir (FREITAS *et al.*, 2005). Dessa forma, o produto MOD13Q1 referente aos índices de vegetação também é comprometido, uma vez o produto MOD09GQK são os dados de entrada para geração dos índices. Sendo assim, a variação nos valores de NDVI em decorrência do ângulo de visada e a escolha destes *pixels* comprometem o potencial do IV para comparações multitemporais (HUETE *et al.*, 1999).

4.2. Fase 3: Aplicação de modelo agrometeorológico-espectral para estimativa da produtividade do café

4.2.1 Mapa da capacidade de armazenamento de água no solo (CAD)

O mapa referente à capacidade de água disponível no solo (CAD) da área de estudo é apresentado na Figura 4.6. Ao realizar uma análise quantitativa pôde-se constatar que 92,5% da área de estudo situa-se na faixa de 100 mm de capacidade de armazenamento de água, o que torna os solos da área aptos ao cultivo do café. As regiões de CAD igual a 70 mm representam 6,5% da área de estudo e somente uma pequena porção apresenta uma menor capacidade de armazenamento de água (50 mm), as quais correspondem a menos de 1% da área estudada.

Ao analisar esse mapa juntamente com o mapa temático de distribuição espacial das lavouras cafeeiras (Figura 4.6), foi possível observar que a maior parte das lavouras, localizadas na região central da área de estudo, possui solos com CAD igual a 100 mm e uma pequena parte, localizada na região noroeste, contém solos cuja capacidade de armazenamento de água é igual a 70 mm.

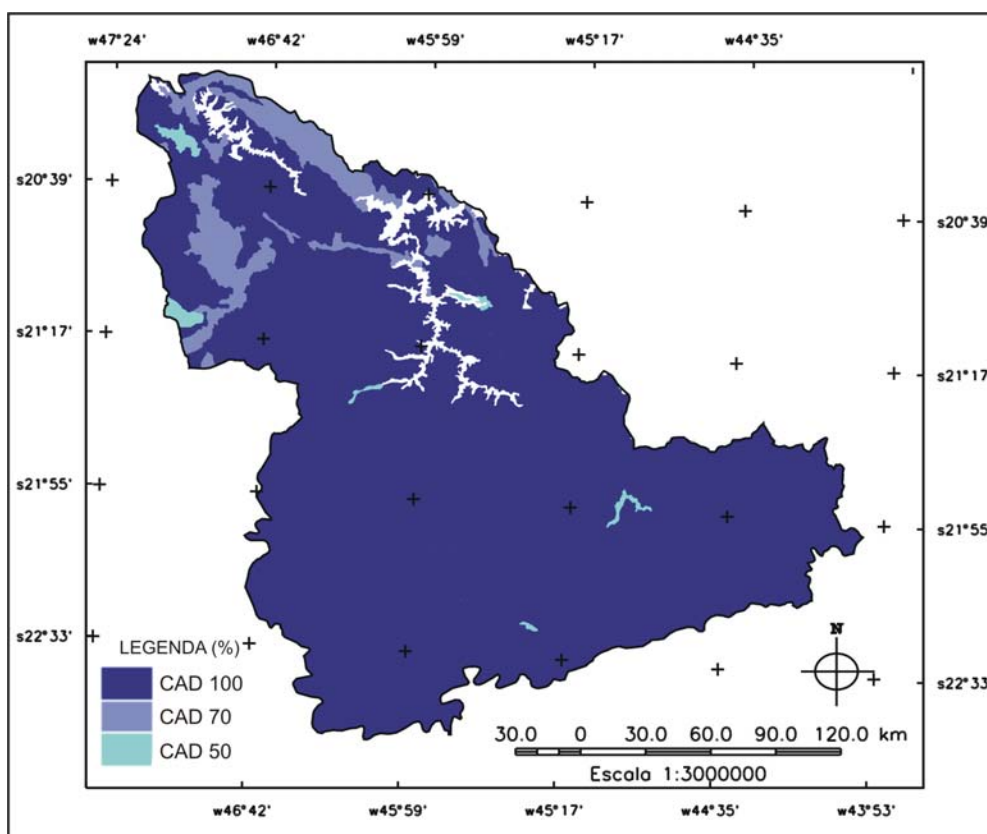


Figura 4.6 – Mapa temático referente à capacidade de armazenamento de água dos solos na região Sul/Sudoeste do Estado de Minas Gerais.

4.2.2 Ajuste do fator de produtividade agrícola para a cultura do café

A Figura 4.7 apresenta o Fator de Produtividade Agrícola (FPA) que melhor se adequou à estimativa da produtividade da cultura do café. Devido à bienalidade da cultura, o FPA teve que ser estimado tanto para ano de baixa quanto de alta produtividade uma vez que a matéria seca produtiva é menor em anos de baixa produtividade.

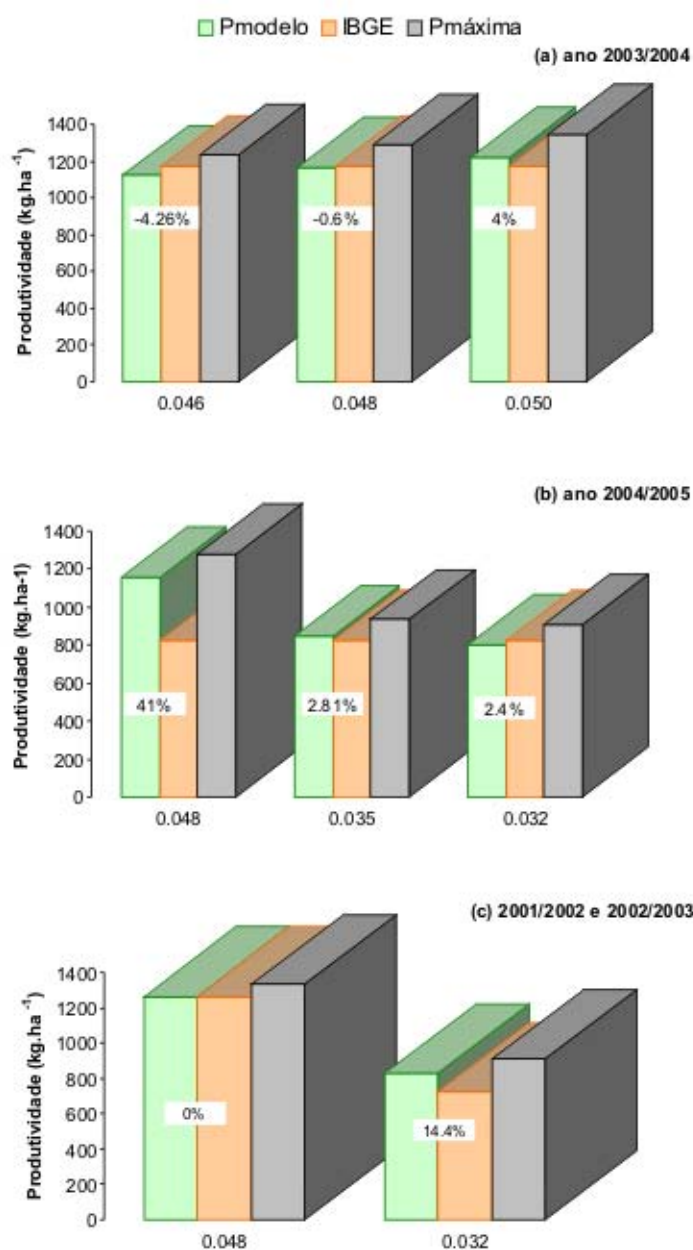


Figura 4.7 – Ajuste do fator de produtividade agrícola (a) ano agrícola 2003/04, (b) ano agrícola 2004/05 e (c) ajustes para os anos agrícolas 2001/02 e 2002/03.

A Figura 4.7 (a) mostra as três simulações de FPA realizadas para o ano agrícola 2003/04, de alta produtividade, com os valores 0,046; 0,048 e 0,050 que representaram respectivamente 4,6%; 4,8% e 5% de matéria seca produzida pela planta contabilizada como rendimento econômico. O melhor ajuste quando comparado à produtividade divulgada pelo IBGE foi o FPA igual a 0,048 que apresentou 0,6% de diferença relativa entre a produtividade de referência e estimada pelo modelo.

Para o ano agrícola 2004/05, ano de baixa produtividade, tentou-se primeiramente aplicar o valor de FPA (0,048) que melhor ajustou ao ano 2003/04. Entretanto, o modelo superestimou a produtividade em 41% quando comparada à referência do IBGE (Figura 4.7 b). Dessa forma pôde-se verificar que os valores de FPA para anos de baixa e alta produtividade deveriam ser diferentes. Sendo assim, duas outras simulações foram testadas com valores de FPA igual a 0,035 e 0,032. O FPA de 0,032 foi o que melhor se ajustou a estimativa da produtividade para ano 2004/05, apresentando diferença relativa igual a 2,4% (Figura 4.7 b).

Para o ano agrícola 2001/02, também ano de alta produtividade, foi adotado o FPA (0,048) que melhor ajustou à estimativa da produtividade do ano 2003/04. Observou-se neste ano (2001/02) o melhor desempenho da série, cuja estimativa foi a mesma da referência. Da mesma forma, o FPA melhor ajustado para estimativa da produtividade do ano de 2004/05 (0,032) foi aplicado no ano 2002/03 apresentando uma diferença relativa de 14,4% quando comparada a referência (Figura 4.7 c).

4.2.3 Estimativa da produtividade da cultura do café para região Sul/Sudoeste

A Tabela 4.1 e as Figuras 4.8 e 4.9 apresentam a estimativa da produtividade obtida para os anos agrícolas 2001/02, 2002/03, 2003/04 e 2004/05.

No que tange ao desempenho do modelo agrometeorológico-espectral, a análise da Tabela 4.1 mostra a eficiência da estimativa para os quatro anos estudados, quando comparada aos dados oficiais disponibilizados pelo IBGE e adotados como referência. No primeiro ano agrícola 2001/02, não foi observado diferença entre a estimativa e o dado de referência. No ano agrícola de 2002/03 a diferença relativa foi de 104 kg.ha⁻¹, ou seja, o modelo superestimou a produtividade em 14,36% em relação ao dado o IBGE. O ano de 2003/04 apresentou um ótimo desempenho, cuja diferença entre a estimativa e a referência foi de apenas 7 kg.ha⁻¹, apenas 0,6%. Em 2004/05, o modelo agrometeorológico-espectral também foi bastante eficiente, superestimando a produtividade em 20 kg.ha⁻¹, diferença relativa de apenas 2,4%.

Tabela 4.1 – Produtividade estimada pelo modelo agrometeorológico-espectral para região Sul/Sudoeste de Minas Gerais.

Ano Agrícola	Dado	Produtividade		Diferença	
		(kg ha ⁻¹)	(kg ha ⁻¹)	(kg ha ⁻¹)	(%)
2001/02	IBGE	1266			
	Modelo	1266	0	0	
2002/03	IBGE	724			
	Modelo	828	104	14,36	
2003/04	IBGE	1175			
	Modelo	1168	-7	-0,6	
2004/05	IBGE	823			
	Modelo	803	20	2,43	

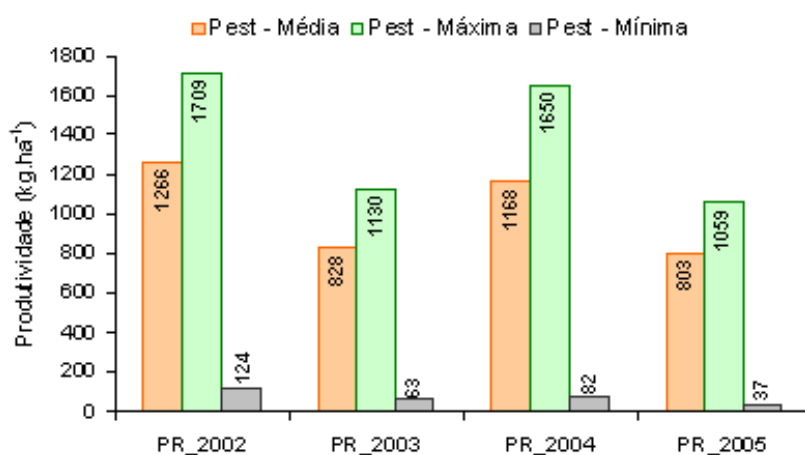


Figura 4.8 – Produtividade média, máxima e mínima observadas na região Sul/Sudoeste após estimativa para os anos 2001/02, 2002/03, 2003/04 e 2004/05.

A partir das diferenças relativas apresentadas pela Tabela 4.1, nota-se que somente o ano agrícola 2002/03 apresentou discrepância entre a produtividade estimada pelo modelo agrometeorológico-espectral e a referência. Para os demais anos, os resultados foram bastante próximos. Pressupõe-se que a produtividade oficial disponibilizada pelo IBGE no ano agrícola 2002/03, possa não estar refletindo a produtividade real do café. Outro fator a ser considerado para justificativa dessa discrepância é a utilização do mesmo mapa temático referente à distribuição espacial das lavouras cafeeiras realizado para o ano de 2005.

Ao observar a Figura 4.8 pôde-se perceber a alternância nos valores estimados entre os anos em estudo, o que condiz com a bienalidade produtiva da cultura. Maiores valores foram obtidos para os anos de alta produtividade, 1266 kg.ha⁻¹ em 2001/02 e 1168 kg.ha⁻¹ em 2003/04; e menores valores para os anos de baixa produtividade, 828 kg.ha⁻¹ em 2002/03 e 803 kg.ha⁻¹ em 2004/05. As estimativas também confirmam a alta produtividade ocorrida no ano 2001/02 em relação aos demais anos, cuja produtividade estimada foi de 98 kg.ha⁻¹ superior a de outro ano de alta, 2004.

Os mapas apresentados na Figura 4.9 evidenciam a variabilidade espacial dos níveis de produtividade estimados na área de estudo.

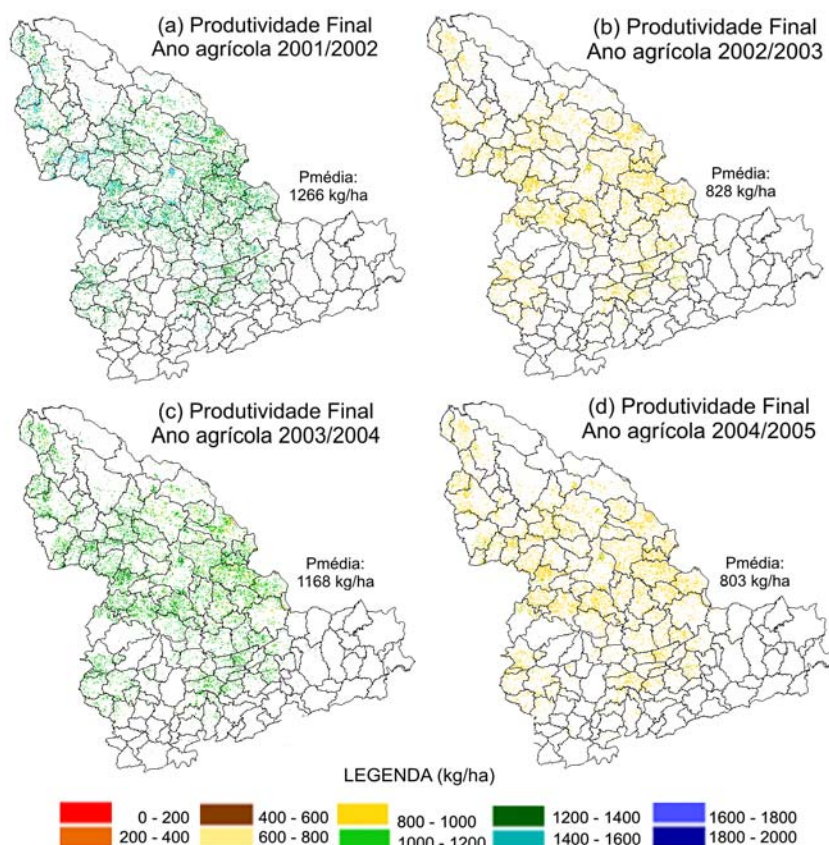


Figura 4.9 – Produtividade final estimada nos anos agrícolas (a) 2001/02, (b) 2002/03, (c) 2003/04 e (d) 2004/05.

No ano agrícola 2001/02, ano mais produtivo da série, a produtividade estimada foi em torno de 1200 a 1400 kg.ha⁻¹ em 55% da área de estudo e entre 1400 a 1600 kg.ha⁻¹ para 25% da área. O ano de 2003/04, também apresentou alta produtividade. Em 64% da

área a produtividade estimada variou de 1000 a 1200 kg.ha⁻¹, em 23% da área de 1200 a 1400 kg.ha⁻¹, e em 13% a produtividade estimada foi de 800 a 1000 kg.ha⁻¹, resultando na produtividade média final de 1168 kg.ha⁻¹. Nos anos de baixa, a produtividade estimada foi de 800 a 1000 kg.ha⁻¹ em 63% da área de estudo no ano agrícola 2002/03 e 34,5% da área apresentaram produtividade na faixa de 600 a 800 kg.ha⁻¹, sendo a produtividade final estimada igual a 828 kg.ha⁻¹. Para o ano agrícola 2004/05, a produtividade estimada foi de 800 a 1000 kg.ha⁻¹ em 77% da área e de 600 a 800 kg.ha⁻¹ em 23% da área, sendo a produtividade final estimada em 803 kg.ha⁻¹, muito semelhante ao ano agrícola 2002/03. Nota-se ainda que o range de variação (mínima e máxima) foi de 400 kg.ha⁻¹, para ambos os anos de baixa produtividade.

Esses resultados apresentaram-se coerentes aos balanços hídricos exibidos na Figura 4.4, através da qual se pôde observar o longo período de deficiência hídrica (março-novembro) ocorrido no ano de 2002, principalmente no mês de outubro chegando a atingir 40 mm. No ano de 2004, o café também foi afetado pelo déficit hídrico ocorrido na fase de florada, o qual somado a bienalidade da cultura pode ter comprometido a produtividade final do ano agrícola 2004/05.

O modelo agrometeorológico-espectral também possibilita a geração de mapas de produtividade parciais ao longo do ciclo da cultura, de forma a auxiliar no monitoramento da produtividade em períodos de interesse. Os mapas de produtividade parciais obtidos a cada 16 dias podem ser visualizados nos Anexos 2 e 3 deste documento. Com o intuito de obter um monitoramento espacial da variação da produtividade em cada um dos períodos fenológicos, os mapas parciais foram acumulados por período para cada ano agrícola (Figuras 4.17 e 4.18).

Através da Figura 4.10, pôde-se observar que o ano-agrícola 2001/02 apresentou menor produtividade no período referente ao repouso do cafeeiro, meses de julho a agosto, cujos valores variaram de 100 a 300 kg.ha⁻¹. A partir de setembro, época de início da florada, até o mês final da fase de granação dos frutos, mês de março, ocorreu um incremento na produtividade, passando a ser na maior parte da área de 350 a 450 kg.ha⁻¹.

¹. Já na fase de maturação e colheita dos frutos, a produtividade começou a apresentar ligeira queda (250 a 350 kg.ha⁻¹).

No ano agrícola de 2002/03, a produtividade na época de florada, variou de 150 a 300 kg.ha⁻¹, pouco mais baixo que no ano anterior. Na época de granação, a produtividade atingiu no máximo 350 kg.ha⁻¹ em algumas regiões, mantendo-se mais baixa que o ano de 2001/02 na maior parte da área. Essa observação confirma a sensibilidade do modelo à característica de bienalidade do cafeeiro. Já no período de abril a junho, a produtividade oscilou entre 150 e 250 kg.ha⁻¹ e na fase de maturação e colheita, foi estimada produtividade entre 150 e 200 kg.ha⁻¹ (Figura 4.10).

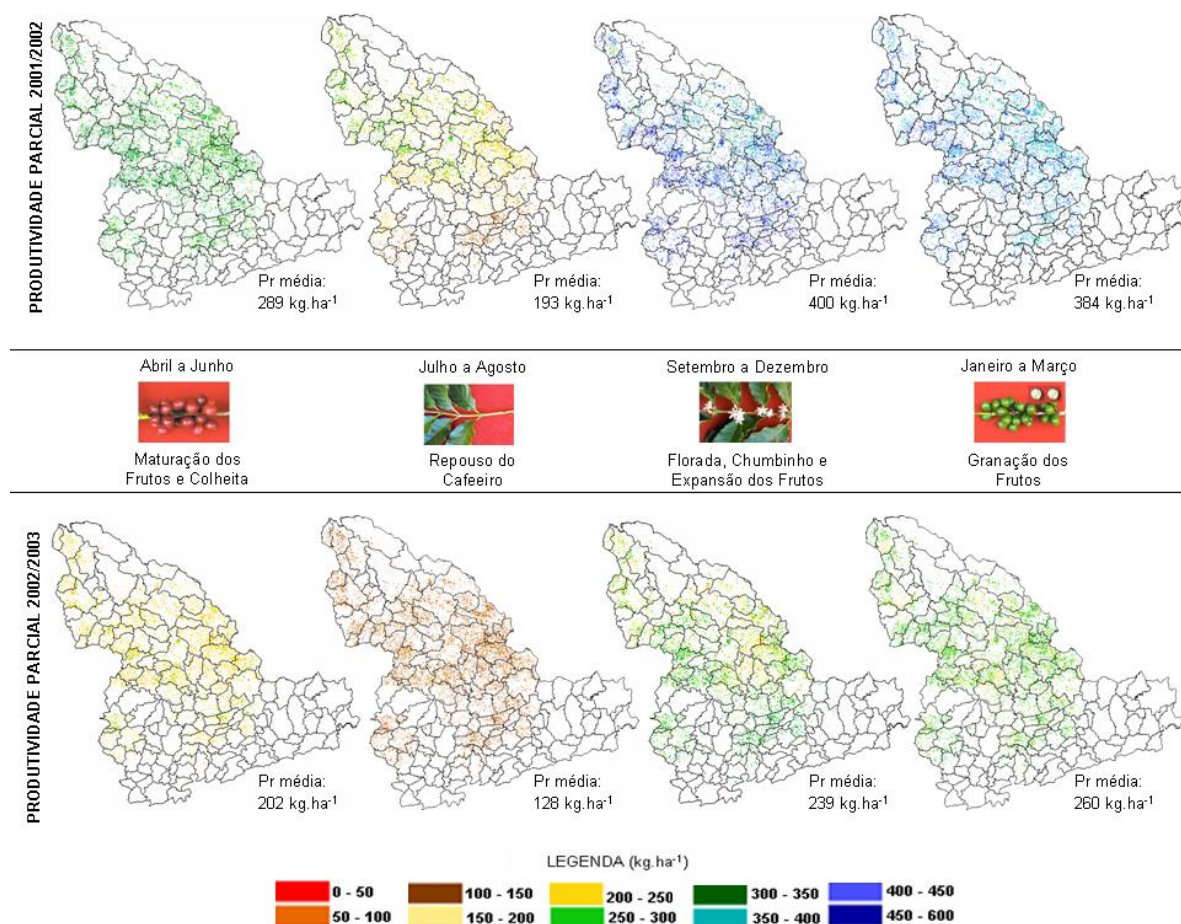


Figura 4.10 – Mapas temáticos referentes à produtividade acumulada estimada nos anos agrícolas 2001/02, 2002/03 acumulada por período fenológico.

Na Figura 4.11 p \hat{o} de ser observado o comportamento da produtividade nos anos agr \acute{e} colas 2003/04 e 2004/05.

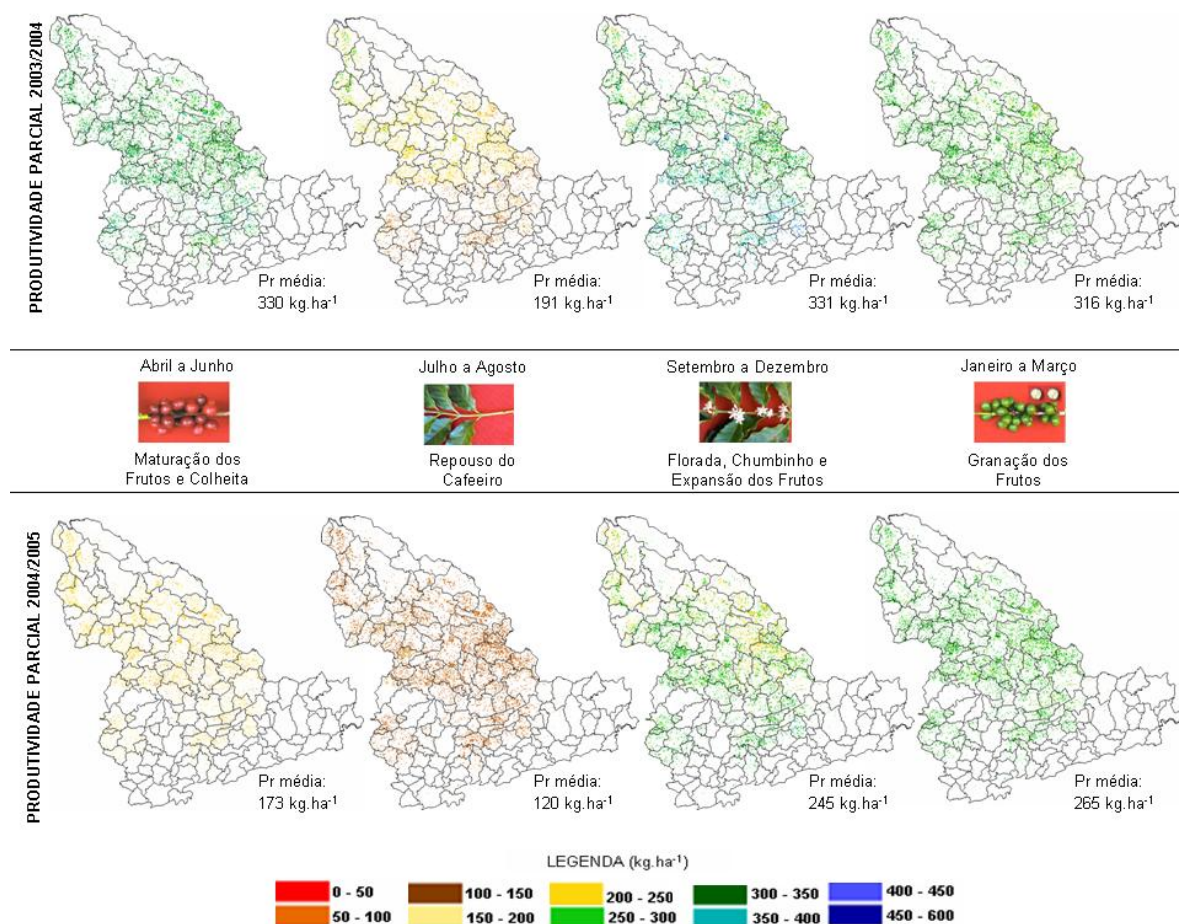


Figura 4.11 – Mapas temáticos referentes à produtividade acumulada estimada nos anos agr \acute{e} colas 2003/04 e 2004/05 acumulada por período fenológico.

O ano de 2003/04 apresentou menor produtividade no período referente ao repouso do cafeeiro, cujos valores variaram de 100 a 250 kg.ha⁻¹. A partir de setembro, época de florada, a produtividade estimada foi de 200 a 400 kg.ha⁻¹, e em algumas áreas, chegou a atingir 450 kg.ha⁻¹. No período de granação dos frutos, a mínima observada foi 250 kg.ha⁻¹ e a máxima de 350 kg.ha⁻¹, porém, na média, as estimativas foram muito próximas nos dois períodos. Na fase de maturação e colheita a produtividade estimada variou entre 250 a 400 kg.ha⁻¹.

No ano agrícola de 2004/05, ano considerado de baixa produtividade, os valores encontrados foram menores que o ano anterior. No período de florada, a produtividade estimada foi de 200 a 350 kg.ha⁻¹. Na época de granação praticamente toda área apresentou produtividade de 250 a 350 kg.ha⁻¹. Já na fase de maturação e colheita, a produtividade caiu consideravelmente, passando a ser de 150 a 250 kg.ha⁻¹ na maior parte da região, e no período de repouso, a produtividade estimada não ultrapassou a faixa de 100 a 150 kg.ha⁻¹.

Uma informação muito importante aos órgãos ligados à previsão de safras é o conhecimento antecipado da produtividade da cultura, a qual possibilita um melhor planejamento de sua comercialização. A fim de verificar a possibilidade de fornecer essa informação para a cultura do café, as produtividades parciais médias foram acumuladas ao longo do ciclo fenológico da cultura. Dessa forma, foi possível determinar o período em que a estimativa representou a maior parte da produtividade final podendo ser disponibilizada com confiabilidade. Neste sentido, a Figura 4.12 apresenta o acúmulo das produtividades parciais ao longo do ciclo fenológico do café.

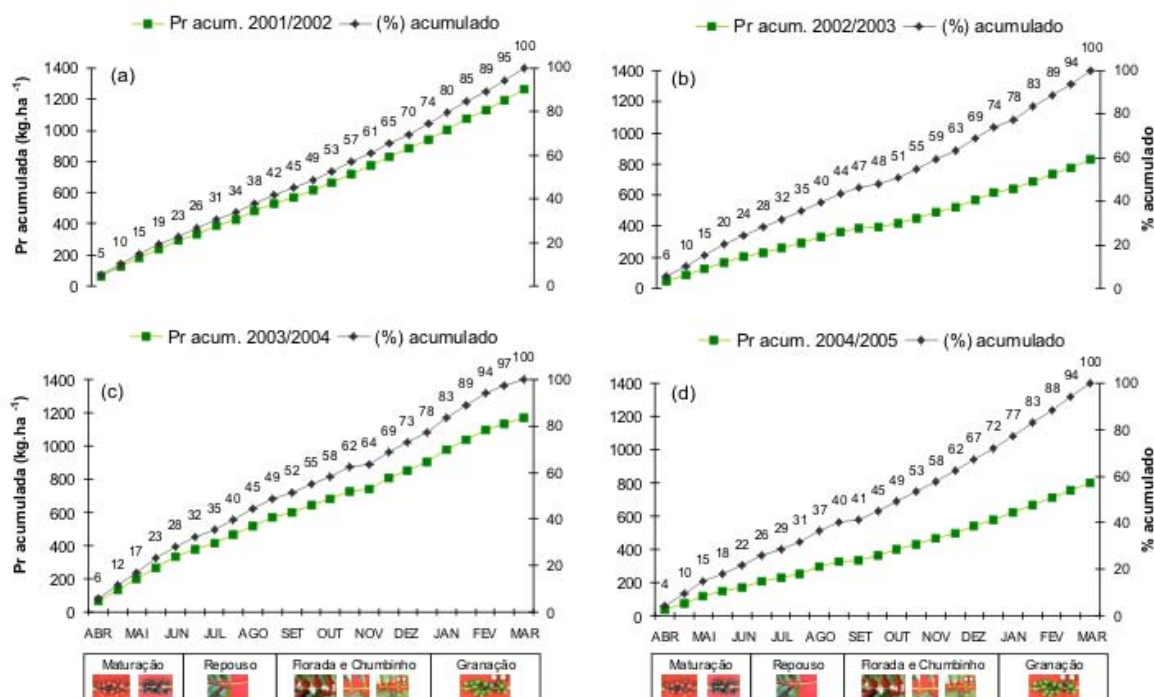


Figura 4.12 – Produtividade estimada acumulada durante o ciclo fenológico da cultura do café para os anos agrícolas (a) 2001/02; (b) 2002/03; (c) 2003/04 e (d) 2004/05.

Ao observar os gráficos da Figura 4.12, pôde-se dizer que mais de 70% da produtividade final foram estimadas até a primeira quinzena do mês de janeiro para os quatro anos agrícolas estudados. A partir da primeira quinzena do mês de fevereiro, foram compreendidos 80% da produtividade final. Esta análise indica que no início da fase de granação dos frutos já se tem estimada grande parte da produtividade da cultura.

4.2.3.1. Monitoramento da penalização da produtividade da cultura do café

A Figura 4.13 apresenta a trajetória do índice médio de penalização para os quatro anos agrícolas, na qual os valores mais altos indicam as maiores perdas na produtividade em função do déficit hídrico.

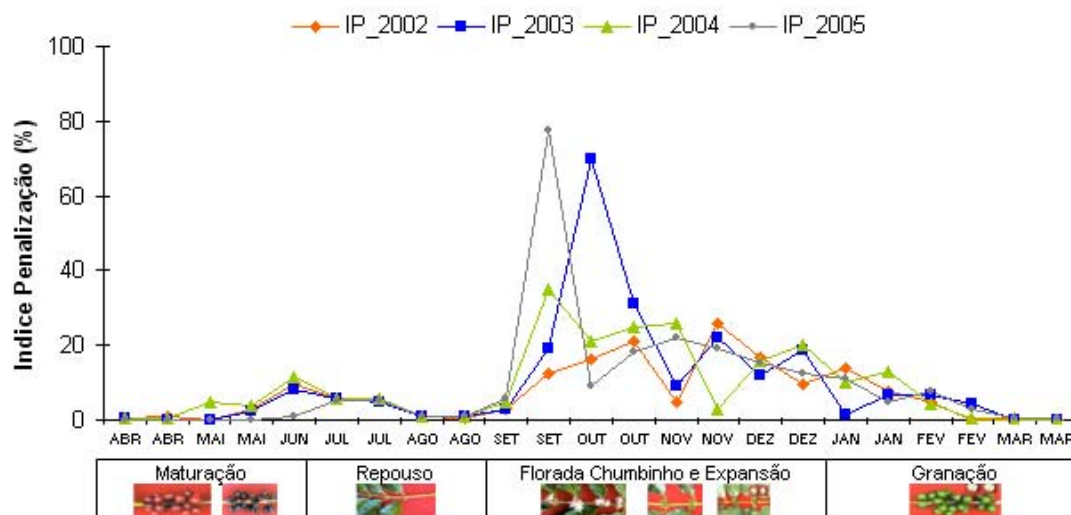


Figura 4.13 – Índice de penalização estimado para a cultura do café na região Sul/Sudoeste de Minas Gerais, para os anos agrícolas de 2001/02, 2002/03, 2003/04 e 2004/05.

Nota-se que a maior penalização ocorreu no período da florada, meses de setembro a dezembro em todos os anos. Neste período, os valores mais altos foram registrados nos anos de 2003, na segunda quinzena do mês de setembro e em 2005, na primeira quinzena do mês de outubro (Figura 4.13).

Além de monitorar as condições médias da região de estudo, foi possível também, visualizar espacialmente as perdas no potencial produtivo da cultura provocadas pelo déficit hídrico em cada período (Figuras 4.14 a 4.17). Desta forma, as áreas mais

prejudicadas podem ser vistoriadas *in situ* para uma melhor quantificação das perdas ocorridas, fornecendo informações adicionais acerca das condições de cultivo, as quais podem ser introduzidas no modelo como parâmetros adicionais, na busca de melhorar a exatidão das estimativas (RIZZI, 2004).

Ao analisar as Figuras 4.14 a 4.17 observou-se que tais perdas não foram espacialmente uniformes para toda área de estudo nos quatro anos estudados. Na Figura 4.14 é mostrada a evolução das perdas do potencial produtivo para o ano de 2001/02.

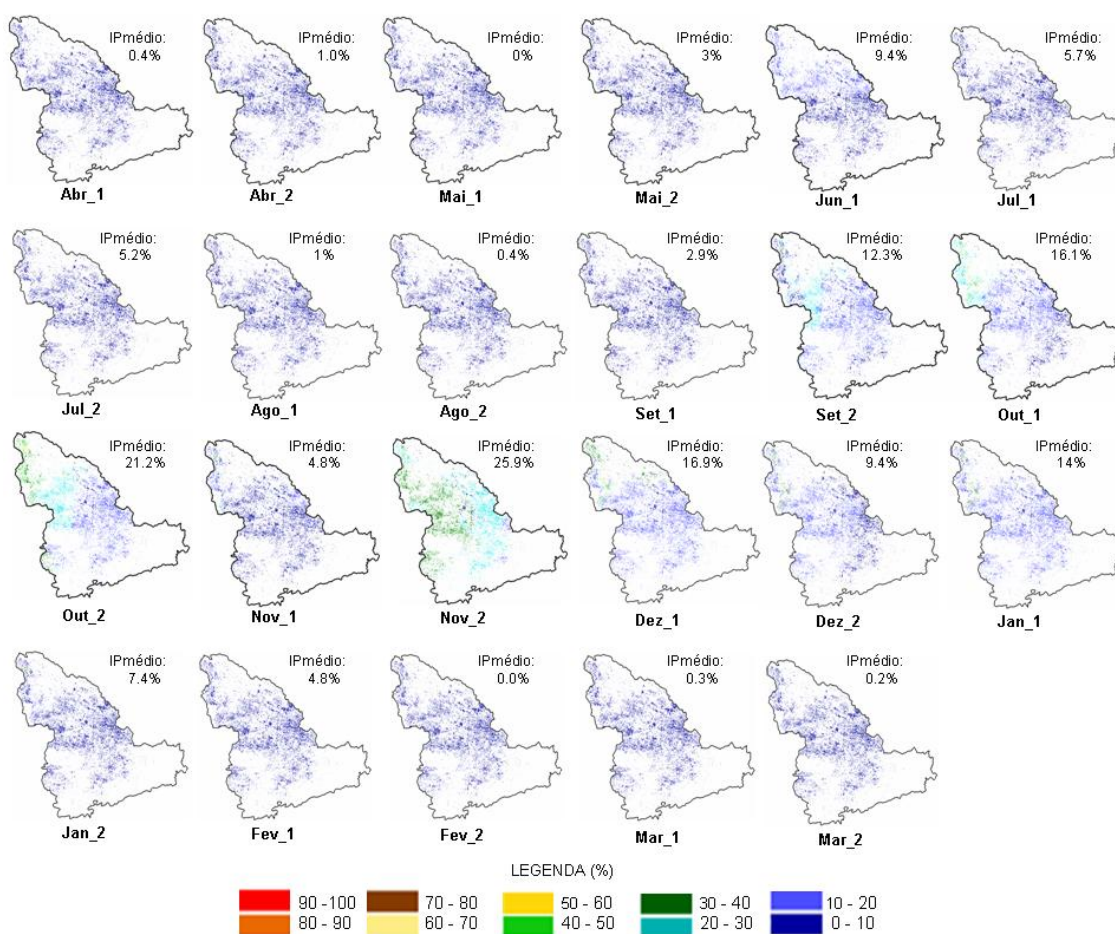


Figura 4.14 – Comportamento da penalização parcial estimada para o ano-agrícola 2001/02 na região Sul/Sudoeste de Minas Gerais.

Para esse ano agrícola as maiores penalizações ocorreram na segunda quinzena do mês de outubro (21,8%) e segunda quinzena do mês de novembro (25,9%), ambas no período da florada e formação de chumbinho. No entanto, pôde-se observar na Figura

4.14 que a penalização do mês de outubro foi mais acentuada na região noroeste da área, onde se localiza a microrregião de Passos, chegando a atingir 30%. Já no mês de novembro, a penalização de 30% abrangeu grande parte de toda a região. Observando o balanço hídrico obtido para este ano (Figura 4.1) nota-se que o déficit hídrico atingiu os picos de máximo em agosto e outubro. Essa informação permite dizer que o efeito de penalização é defasado do pico de máximo déficit hídrico. Por outro lado, o fato da penalização ter sido mais acentuada na região noroeste da área, evidencia a influência da altitude e do relevo desta área, conseqüentemente, do tipo de solo. A região central, por ser mais plana e de menor altitude, não foi seriamente prejudicada pelo máximo de déficit hídrico que ocorreu no mês de agosto. Todavia, como esse déficit hídrico continuou até o mês de outubro, a perda da produtividade foi generalizada para toda área de estudo. É importante observar que na região noroeste que já vinha sendo afetada, a perda de produtividade chegou até 40% ou mais.

No ano agrícola 2002/03, as penalizações significativas ocorreram a partir do mês de setembro até a segunda quinzena de dezembro. Porém, a mais marcante, foi registrada na primeira quinzena de outubro, que chegou até 70% nas regiões centrais e noroeste da área de estudo (Figura 4.15). Observando a Figura 4.1 do balanço hídrico, nota-se que neste ano o déficit hídrico ocorreu num período muito extenso e com bastante intensidade (em torno de 40%). Por esta razão, a penalização foi registrada em diferentes épocas, cerca de 30% nas segundas quinzenas dos meses de setembro, novembro e dezembro na maior parte da região. É importante destacar que a penalização foi maior justamente na região noroeste e oeste da área de estudo (primeira quinzena de outubro), onde o relevo é mais acidentado e as lavouras de café situam-se em maiores altitudes. Além disso, a CAD para essa região é de 70%, conforme foi mostrado na Figura 4.6. Esse fato vem mais uma vez reforçar a interferência do relevo e da altimetria, conforme discutido no parágrafo anterior.

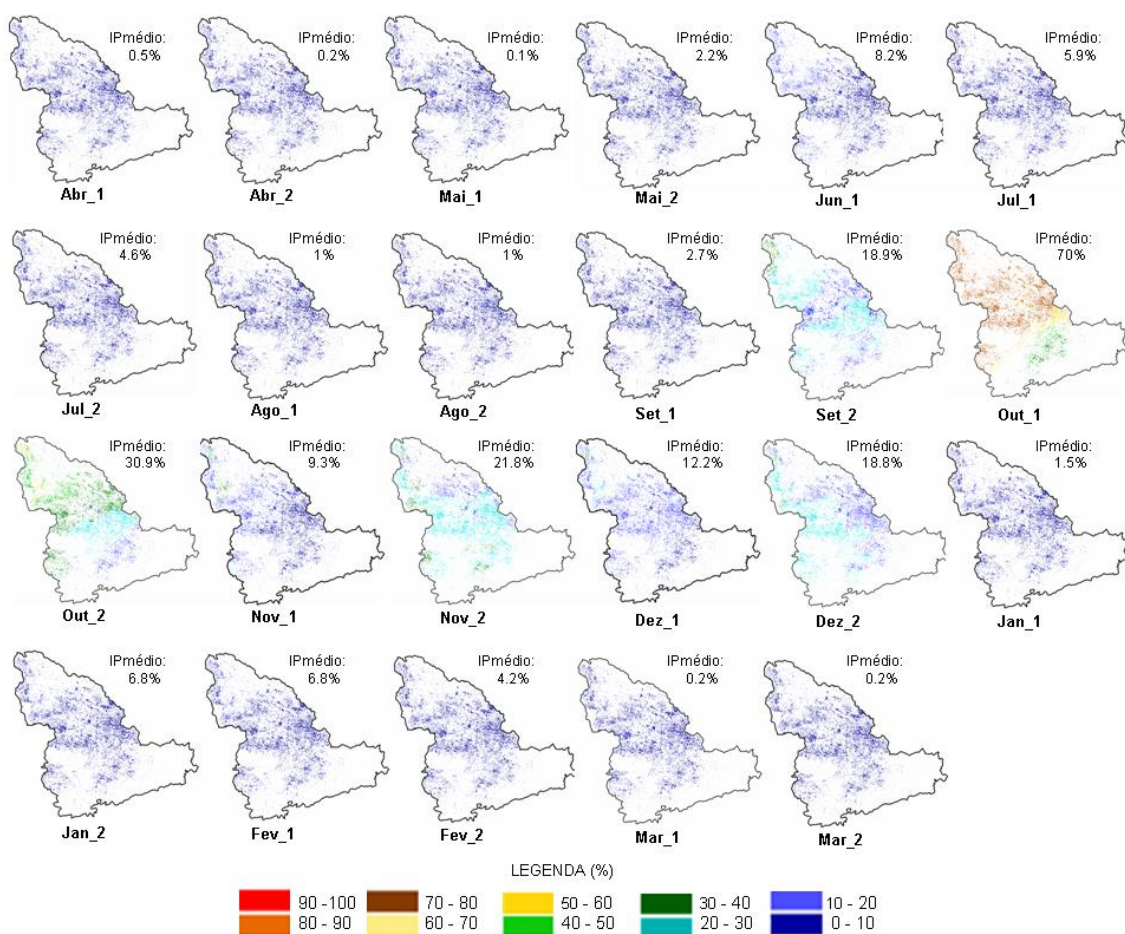


Figura 4.15 – Comportamento da penalização parcial estimada para o ano-agrícola 2002/03 na região Sul/Sudoeste de Minas Gerais.

A Figura 4.16 exibe os mapas de penalização no ano-agrícola 2003/04. Nota-se que as principais perdas ocorreram na segunda quinzena do mês de setembro, atingindo 60% e 70% em algumas localidades a noroeste da área de estudo. Na segunda quinzena do mês de outubro, também foi possível observar perdas de até 60% em algumas áreas a noroeste da região, embora na maior parte, as perdas observadas não ultrapassaram 40%. Na primeira quinzena do mês de novembro, a penalização mais intensa ocorreu na região oeste da área de estudo, onde foi possível observar perdas de até 40%, já na região leste, as perdas foram de 30%. Na primeira quinzena do mês de outubro e na segunda quinzena do mês de dezembro, penalizações de 30% foram registradas em grande parte da área.

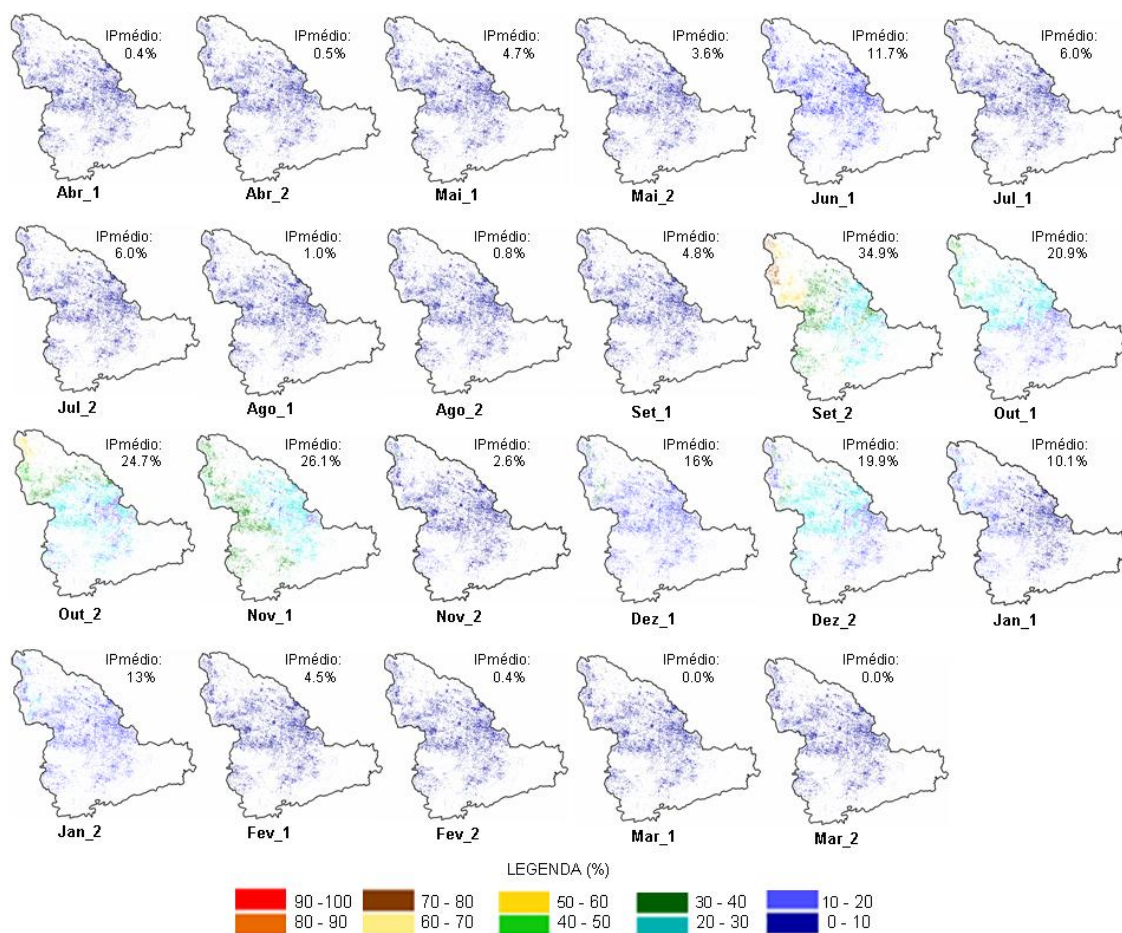


Figura 4.16 – Comportamento da penalização parcial estimada para o ano-agrícola 2003/04 na região Sul/Sudoeste de Minas Gerais.

No ano agrícola 2004/05, a maior penalização foi registrada na segunda quinzena do mês de setembro, em torno de 70%, em praticamente toda área de estudo. Observando a Figura 4.1, referente ao balanço hídrico, nota-se que agosto foi o mês de maior ocorrência de déficit hídrico (próximo a 60%). Essa observação reforça a idéia de que o efeito do déficit hídrico apresenta influência cumulativa, ou seja, apesar da deficiência acentuada ter ocorrido em agosto, seu efeito foi verificado no período de florescimento já que as chuvas não foram suficientes para suprir a demanda hídrica dessa fase. Outra perda bastante significativa ocorreu na primeira quinzena do mês de novembro, a qual apresentou uma penalização de 30% chegando a 60% em alguns pontos mais a noroeste e norte da região (Figura 4.17).

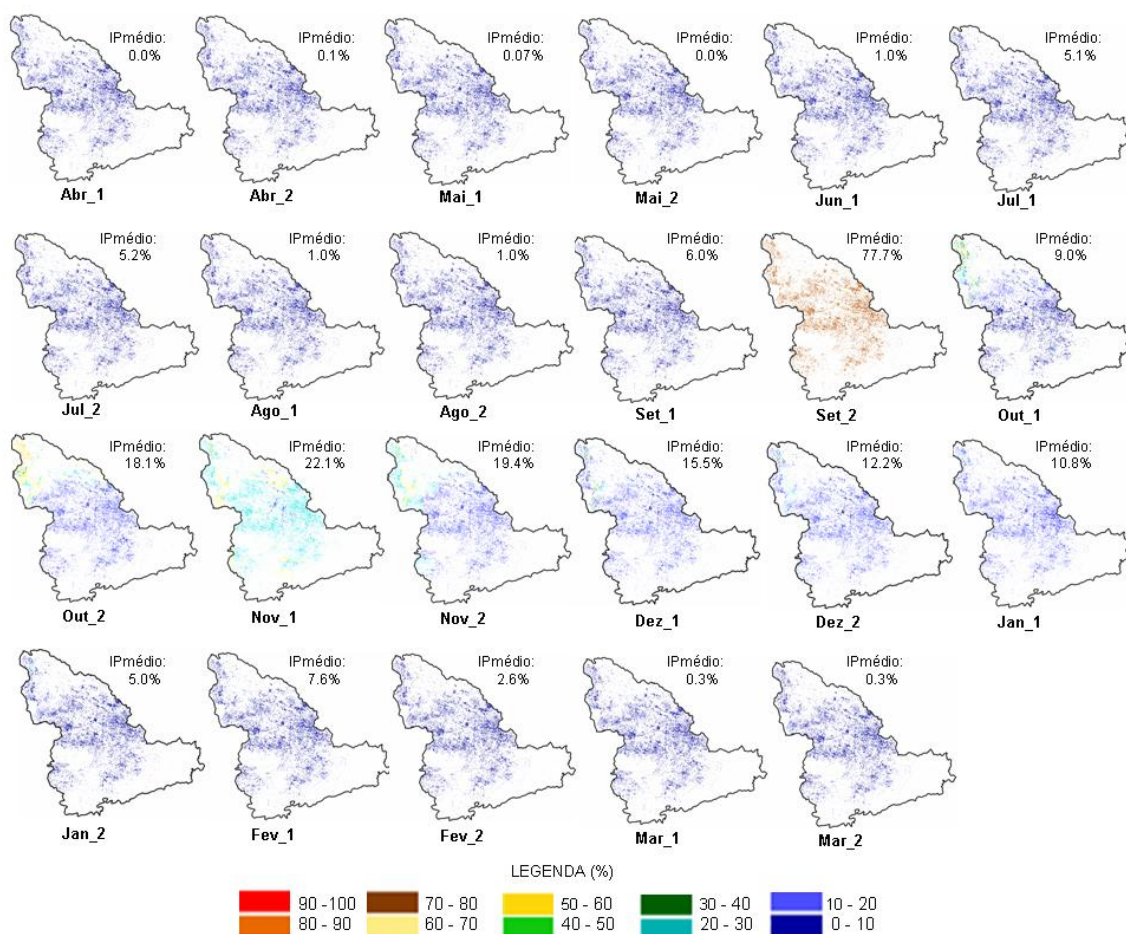


Figura 4.17 – Comportamento da penalização parcial estimada para o ano-agrícola 2004/05 na região Sul/Sudoeste de Minas Gerais.

Além de ser possível monitorar a perda da produtividade parcial causada pelo déficit hídrico a partir dos IP's parciais, o modelo agrometeorológico-espectral, permite ainda a contabilização da perda da produtividade acumulada, a qual envolve outros fatores que prejudicam o desenvolvimento da cultura como falhas de manejo, ataques de pragas e doenças, desde que tais danos tenham se manifestado nas variações do comportamento espectral da cultura e registrados nas imagens índice de vegetação provenientes do sensor MODIS (RIZZI, 2004).

Neste sentido, foram obtidos os mapas temáticos de penalização acumulada ao longo de todo o ciclo da cultura referente ao período de abril a março (Figura 4.18) e por período fenológico, os quais são exibidos nas Figuras 4.19 e 4.20.

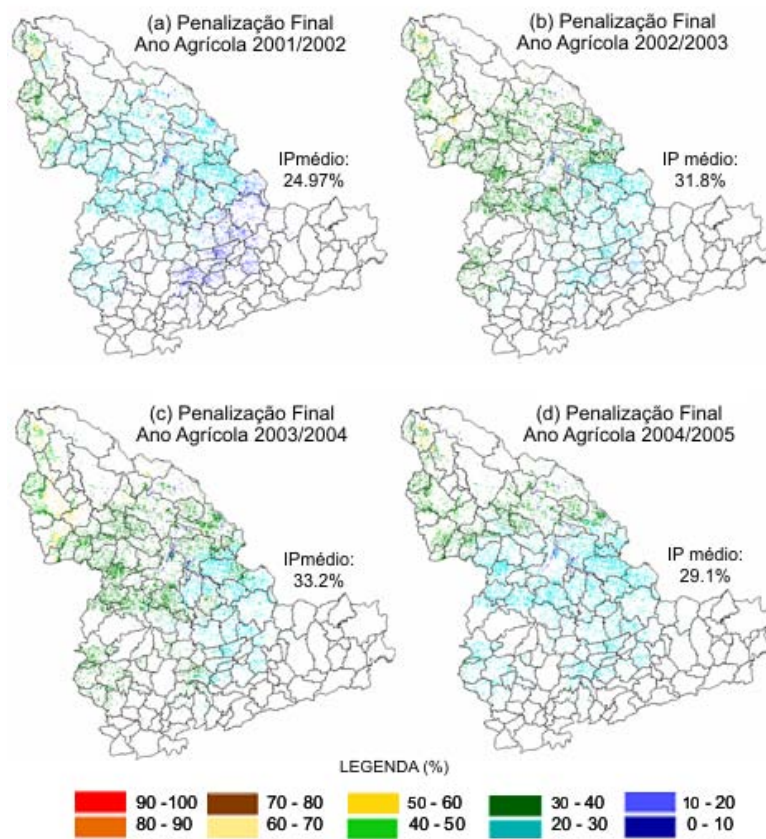


Figura 4.18 – Mapas temáticos referentes à penalização acumulada final estimada para o período de abril a março para os anos agrícolas 2001/02, 2002/03, 2003/04, 2004/05.

A Figura 4.18 exibe a variabilidade espacial da penalização acumulada estimada pelo modelo agrometeorológico-espectral para cada um dos anos estudados. Numa primeira análise, pôde-se observar que as penalizações mais intensas ocorreram na região noroeste da área de estudo. O ano-agrícola 2001/02, apresentou-se um ano em que os fatores climáticos causaram uma menor penalização à cultura em relação aos demais anos, fato que, aliado a bienalidade positiva da cultura, refletiu em sua alta produtividade (Figura 4.8). Cerca de 90% das lavouras apresentaram penalização de até 30%. Em algumas localidades a noroeste da região a penalização foi mais intensa, chegando a atingir 60%. No ano agrícola 2002/03, a maior parte das lavouras (56%) sofreu penalizações entre 30 e 40%. Em 37% foram observadas perdas de até 30% e apenas 7% das lavouras apresentaram penalizações na faixa de 40 a 60%. O ano de 2003/04, também considerado ano de bienalidade positiva, entretanto, sofreu perdas de

até 30% em 31% das lavouras. Em 54% foram observadas perdas entre 30 e 40% e em 15% das lavouras a penalização atingiu 40 a 50%. Tal resultado se mostrou coerente com a deficiência hídrica, apesar de baixa (30 mm) registrada nos meses de abril a setembro do ano de 2003 (Figura 4.4). No ano agrícola 2004/05, perdas de até 30% atingiram 71% das lavouras. Em 24% foram registradas penalizações entre 30 a 40% e em apenas 5% das lavouras a penalização ultrapassou os 40%.

Nas Figuras 4.19 e 4.20 é possível observar a variabilidade das penalizações acumuladas durante os períodos fenológicos. Nota-se que a fase referente à florada e formação do chumbinho foi a que apresentou maiores penalizações nos quatro anos estudados.

No ano agrícola de 2001/02, na fase de florada e formação do chumbinho, 87% das lavouras registraram penalização de 10 a 20% neste período. Para 12% das lavouras as perdas de produtividade foram de 0 a 10% e em algumas áreas (1%) foram registradas penalizações de até 30%. No período de granação (janeiro a março), apesar de não ter ocorrido déficit hídrico, foi registrado uma penalização de 5,8% a qual pode ser atribuída à diminuição dos valores do IAF diante da ocorrência da ferrugem, ou seja, altas temperaturas somadas à ocorrência de chuva em vários dias propiciam o ataque desse fungo e dependendo da intensidade pode causar desfolha do cafeeiro (Figura 4.19).

Em 2002/03, as penalizações no período da florada e formação do chumbinho apresentaram-se mais intensas. Cerca de 70% das lavouras sofreram penalização de 20 a 30% e em 20% a penalização foi entre 10 e 20%. Ocorreram também penalizações entre 30% e 50% em 8% das lavouras (Figura 4.19). No período de verão, foram registradas temperaturas acima de 34°C no mês de fevereiro, cujas conseqüências podem ter influenciado o IAF, e conseqüentemente, ocasionado a penalização de 3,2% nesse período.

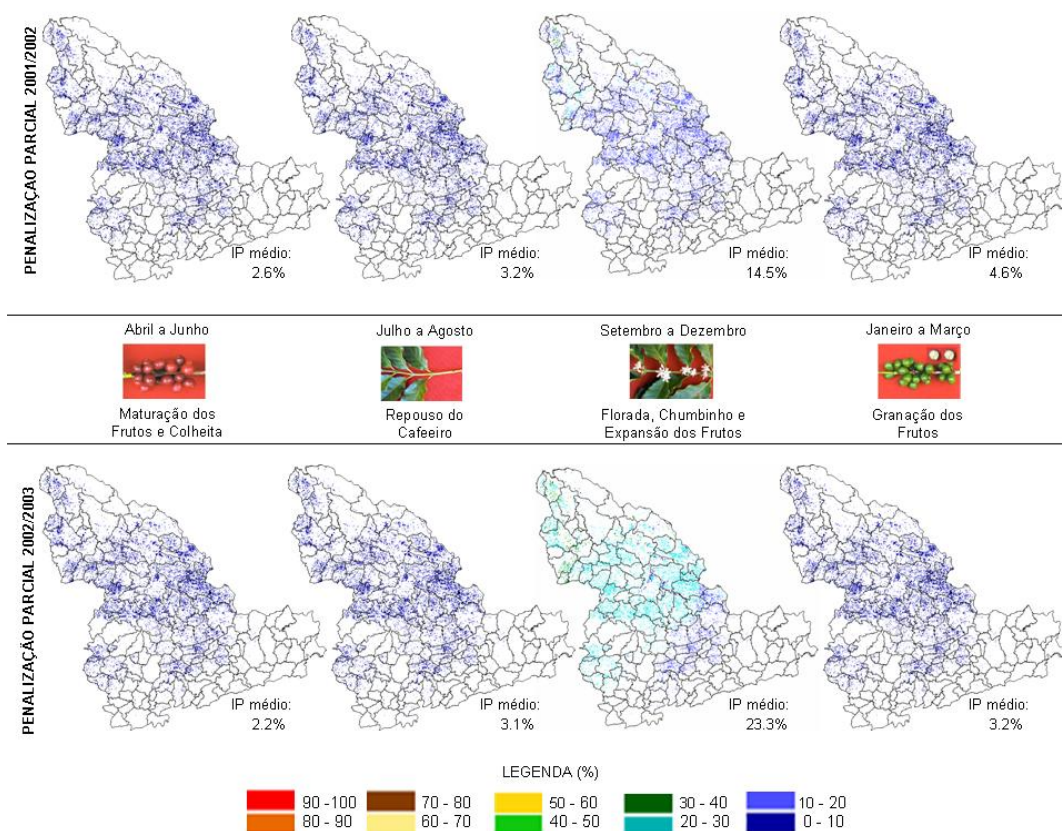


Figura 4.19 – Mapas temáticos referentes à penalização estimada nos anos-agrícolas 2001/02 e 2002/03 por período fenológico na região Sul/Sudoeste de Minas Gerais.

No ano agrícola 2003/04, no período da floração e formação do chumbinho, a maior parte da área (60%) registrou penalização entre 10 e 20%. Penalizações de 20 a 30% ocorreram em 33,5% das lavouras, especialmente na parte central. Os outros 6,5% das lavouras apresentaram penalizações de até 40% localizadas principalmente, a noroeste da região. O ano agrícola 2004/05, também se mostrou um ano de alta penalização no período da floração e formação do chumbinho, confirmada pela ocorrência de penalizações de 30% em 65% da área. Perdas entre 10 e 20% também foram registradas em 28,5% das lavouras e as demais (6,5%) a penalização oscilou entre 40 e 50% com maior predominância na região noroeste. Também foi observada a penalização de 4,4% no período de janeiro a março, a qual pode ser atribuída à diminuição dos valores de IAF provocado provavelmente por ação de doenças como ferrugem, pragas, como bicho mineiro e mecânica como escaldaduras (Figura 4.20).

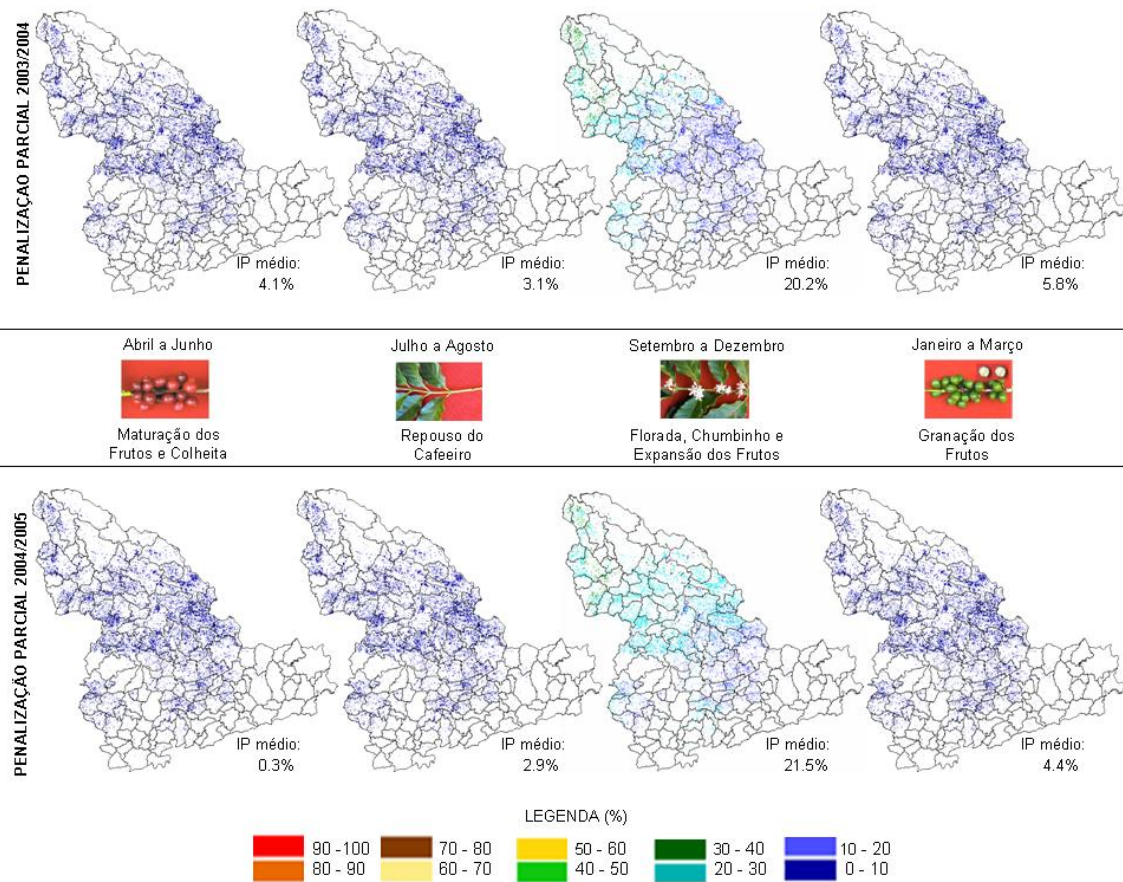


Figura 4.20 – Mapas temáticos referentes à penalização estimada nos anos-agrícolas 2003/04 e 2004/05 por período fenológico na região Sul/Sudoeste de Minas Gerais.

Sob o mesmo intuito em que se preocupou em verificar o período em que a estimativa da produtividade representasse a maior parte da produtividade final visualizada na Figura 4.12, foi também verificado através do acúmulo das penalizações parciais, o período cujas penalizações pudessem dar indicativos da maior parte da quebra final, permitindo assim, o monitoramento da quebra da produtividade antes mesmo do final da colheita. Dessa forma, a Figura 4.21 apresenta as penalizações acumuladas no período de abril a março para cada ano estudado.

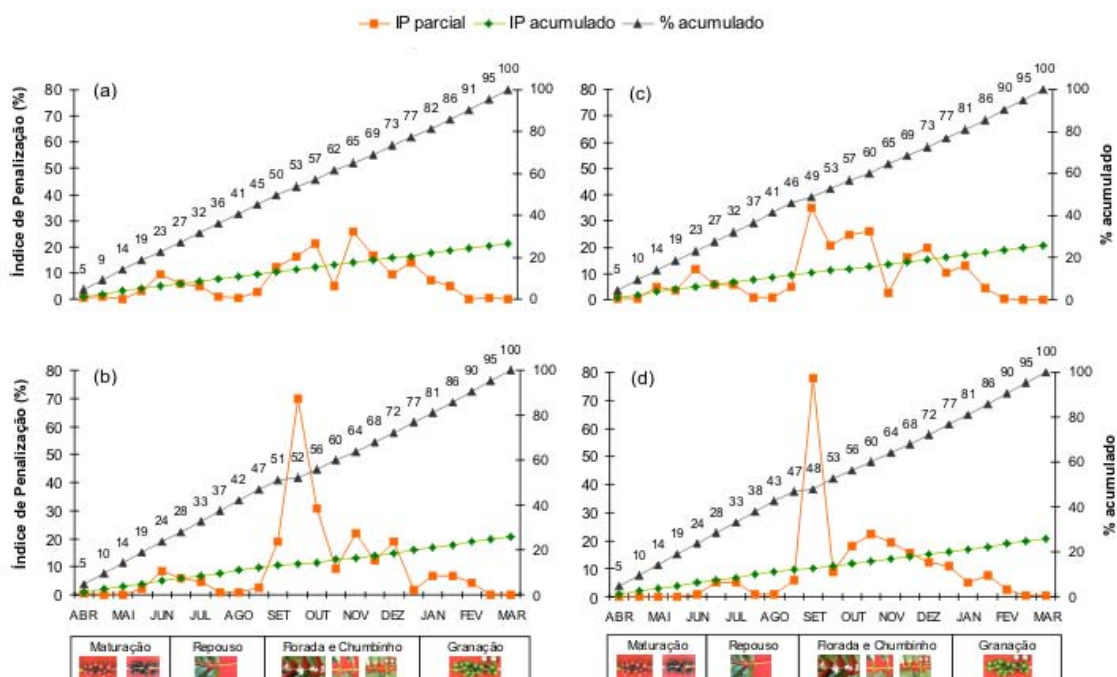


Figura 4.21 – Índice de penalização parcial e acumulado estimados durante o ciclo fenológico da cultura do café para os anos agrícolas (a) 2001/02; (b) 2002/03; (c) 2003/04 e (d) 2004/05.

Ao comparar as penalizações apresentadas na Figura 4.21 notou-se que apesar da penalização parcial ter sido acentuada no período de florada e formação do chumbinho, ao considerar a acumulada, essa discrepância foi atenuada em virtude da baixa penalização ocorrida nos demais períodos. Também foi possível observar que a penalização acumulada até a primeira quinzena do mês de janeiro referiu-se a mais de 77% da penalização total em todos os anos. Essa observação se mostrou condizente com a análise realizada quanto à produtividade (Figura 4.12), na qual mais de 70% da produtividade final foi estimada até a primeira quinzena do mês de janeiro.

Com a finalidade de validar os mapas temáticos de penalização gerados pelo modelo agrometeorológico-espectral, a Figura 4.22 apresenta uma comparação entre a precipitação e a penalização estimada por período fenológico para os quatro anos estudados.

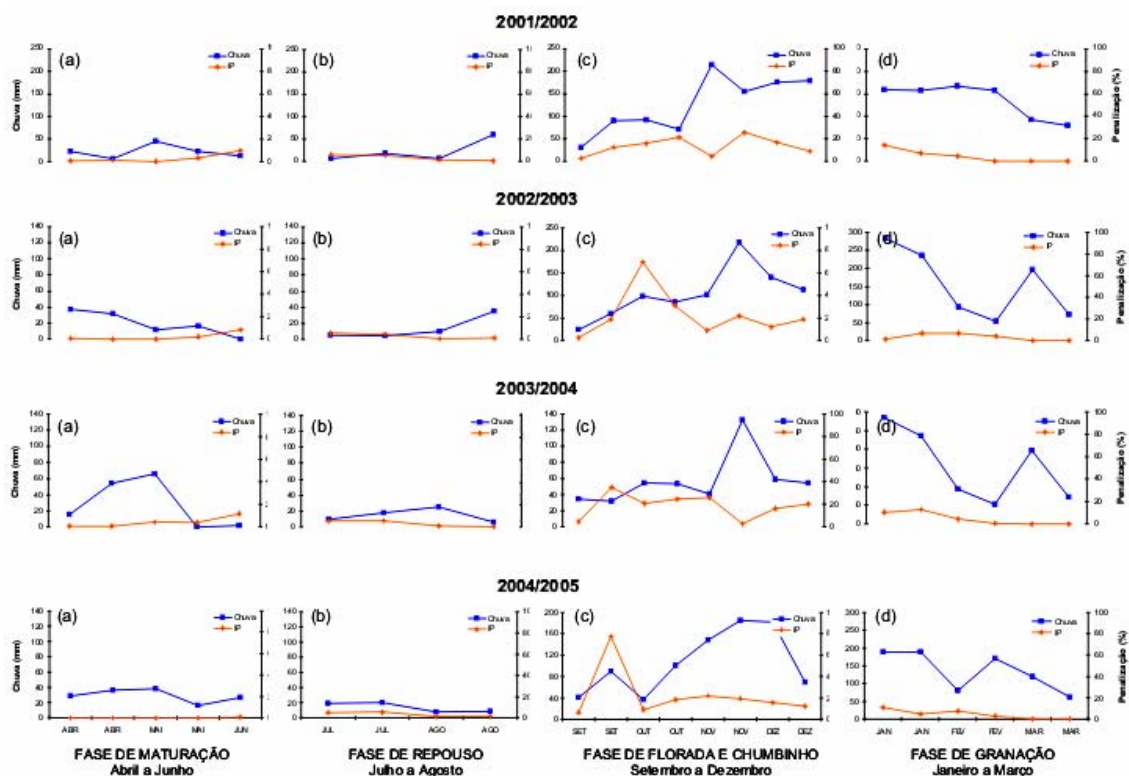


Figura 4.22 – Comportamento médio da precipitação e da penalização estimada nos anos-agrícolas 2001/02, 2002/03, 2003/04 e 2004/05 por período fenológico: (a) maturação, (b) repouso (c) florada e formação do chumbinho e (d) granação dos frutos.

Ao analisar os gráficos de precipitação e de penalização da Figura 4.22, percebe-se que em geral o modelo agrometeorológico foi eficiente, pois quando houve demanda hídrica, a penalização foi amena. No gráfico (c) de todos os anos, ficou evidente o comportamento inverso da precipitação e da penalização. Tal evidência reforça que nesta fase considerada crítica à cultura, a penalização se acentua diante da restrição hídrica e diminui, quando a demanda hídrica é maior. Nos demais períodos, nos quais a restrição hídrica é menos prejudicial ao cafeeiro, percebeu-se que a penalização apresentou uma oscilação muito pequena em função da demanda hídrica.

4.2.4. Estimativa da produtividade da cultura do café por microrregião geográfica

A Figura 4.23 apresenta a diferença relativa entre a produtividade estimada pelo modelo agrometeorológico espectral e o dado de referência divulgado pelo IBGE para as dez microrregiões geográficas contidas na área de estudo.

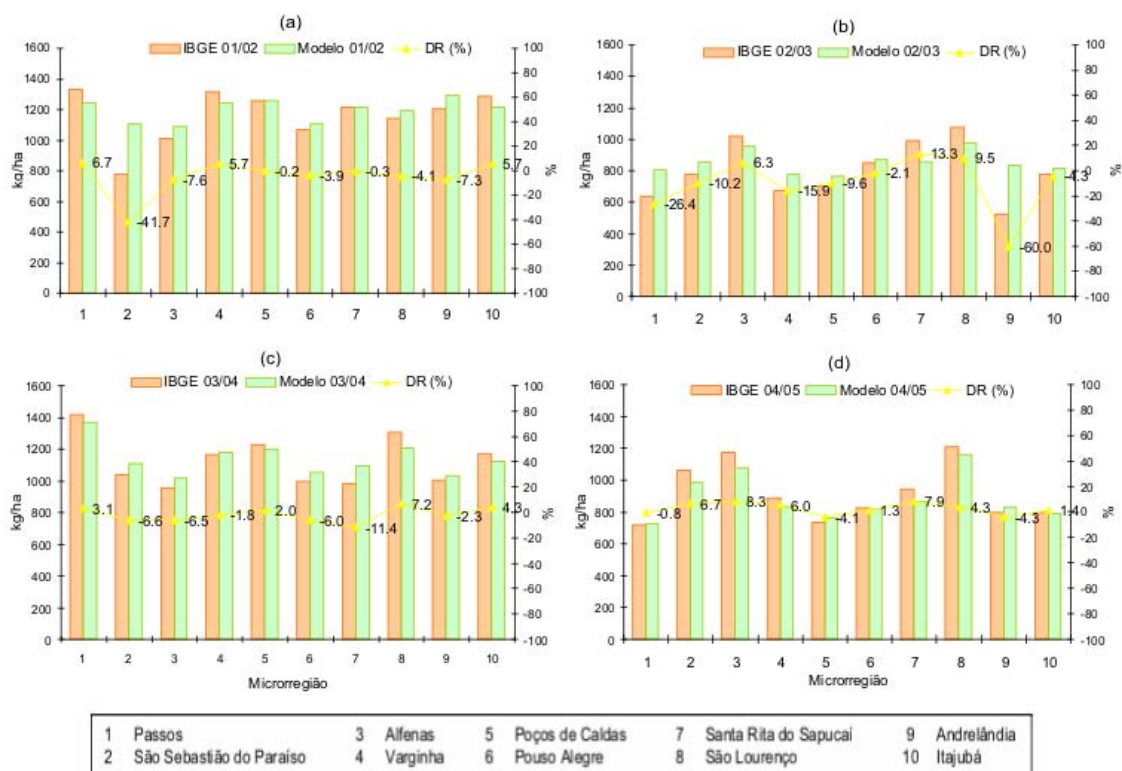


Figura 4.23 – Estimativa da produtividade por microrregião geográfica: (a) ano agrícola 2001/02, (b) ano agrícola 2002/03, (c) ano agrícola 2003/04 e (d) ano agrícola 2004/05.

Uma importante consideração a ser feita sobre a estimativa da produtividade diz respeito à diminuição do desempenho do modelo quando utilizado para menores áreas. A Figura 4.23 ilustra claramente as diferenças encontradas entre a produtividade estimada pelo modelo agrometeorológico-espectral e os dados oficiais fornecidos pelo IBGE para as dez microrregiões compreendidas na área de estudo. Para o ano agrícola 2001/02 a maior diferença foi observada na microrregião de São Sebastião do Paraíso (2), a qual foi superestimada pelo modelo agrometeorológico-espectral em 41,7% em relação ao dado de referência. As demais microrregiões apresentaram diferenças relativas menores que 8%.

No ano de 2002/03, seis das dez microrregiões apresentaram diferenças de até 10%, São Sebastião do Paraíso (2), Alfenas (3), Poços de Caldas (5), Pouso Alegre (6), São Lourenço (8) e Itajubá (10) e as maiores diferenças foram registradas nas microrregiões de Santa Rita do Sapucaí (7), Varginha (4), Passos (1) e Andrelândia (9), 13,3%; 15,3%;

26,4% e 60%, respectivamente. Para o ano agrícola de 2003/04, as diferenças encontradas foram menores, sendo a microrregião de Santa Rita do Sapucaí (7) a única a ultrapassar 10%. Em 2004/05, a maior diferença encontrada foi na microrregião de Alfenas (3), 8.3%.

Diante desses resultados, pôde-se verificar que a estimativa obtida pelo modelo agrometeorológico-espectral apresentou melhor desempenho para os anos mais próximos ao ano utilizado como mapeamento, 2005. Embora o café seja uma cultura perene e sua localização em campo manter-se a mesma por um período maior, não impede que muitas lavouras possam ter sido erradicadas em função da política de preços adotadas pelo mercado, ou podadas, a fim de aplicação de medidas de tratamentos culturais. O fato da área ocupada pela cultura do café não ter sido ajustada para os anos anteriores a 2005, pode ter influenciado a estimativa da produtividade. Ou seja, as diferenças entre a estimativa e a referência se salientaram ao reduzir a área para microrregiões geográficas.

Apesar disso, o que deve ser ressaltado frente aos resultados encontrados é que considerando a complexidade da cultura do café quanto à heterogeneidade encontrada em campo pelos fatores ambientais (tipos de solo, topografia), da planta (variedade, idade) e práticas de manejo (adensamento, podas, adubação) cujos exemplos puderam ser vistos na Figura 3.4 do capítulo 3, aliados a utilização generalizada de *ky* para todas as lavouras, o modelo conseguiu acompanhar a trajetória dos valores de produtividade na maioria das microrregiões, principalmente nos anos agrícolas 2003/04 e 2004/05.

4.2.5. Estimativa da produtividade da cultura do café por município

A Tabela 4.2 apresenta as diferenças relativas entre as estimativas da produtividade obtidas pelo modelo agrometeorológico-espectral em comparação aos dados de referência, para cultura do café nos 144 municípios compreendidos na região Sul/Sudoeste de Minas Gerais, para os anos agrícolas: 2001/02, 2002/03, 2003/04 e 2004/05.

Tabela 4.2 – Diferença relativa entre a produtividade estimada pelo modelo agrometeorológico-espectral e a informação do IBGE.

2001/02 - Valor p = 0.16(*)		
DR (IBGE x Modelo)	Nº Municípios	%
até 10%	44	31
de 10-20%	42	30
de 20-50%	40	29
acima de 50%	14	10
Total	140	100
2002/03 – Valor p = 0.25(*)		
DR (IBGE x Modelo)	Nº Municípios	%
até 10%	37	26
de 10-20%	34	24
de 20-50%	51	36
acima de 50%	18	13
Total	140	100
2003/04 – Valor p = 0.35(*)		
DR (IBGE x Modelo)	Nº Municípios	%
até 10%	49	35
de 10-20%	31	22
de 20-50%	46	33
acima de 50%	14	10
Total	140	100
2004/05 – Valor p= 0.06(*)		
DR (IBGE x Modelo)	Nº Municípios	%
até 10%	45	32
de 10-20%	44	31
de 20-50%	49	35
acima de 50%	2	1
Total	140	100

(*) Não apresenta diferença significativa para $\alpha=0.05$, ou seja, aceita-se H_0 , considera-se médias iguais.

Da mesma forma que para microrregião geográfica, ao estimar a produtividade por município, as diferenças relativas entre a estimativa do modelo agrometeorológico-espectral e os dados de referência se acentuaram.

A fim de verificar se as diferenças observadas nas produtividades estimadas por município diferiam estatisticamente dos dados de referência aplicou-se teste paramétrico, de *Student* - Teste *T*. Para todos os anos, as diferenças não foram significativas ao adotar $\alpha = 0,05$.

Entretanto, em uma análise mais detalhada da Tabela 4.2, pôde-se observar que em todos os anos, mais de 50% dos municípios apresentaram diferenças relativas até 20% e no ano agrícola 2004/05 foram registrados apenas dois municípios com diferenças acima de 50%. A produtividade estimada e diferenças relativas para cada um dos 144 municípios podem ser observadas no Anexo 1.

Por outro lado, é importante salientar que a heterogeneidade da cultura tende a se acentuar em áreas menores, uma vez que a diferença relativa diminui muito quando se trata a área de estudo como um todo. Em outras palavras, a estimativa da produtividade para a mesorregião apresentou diferenças relativas menores, em comparação às microrregiões e municípios. Isso leva a crer que além do aumento da heterogeneidade da cultura, a subjetividade do método do IBGE tende a ser menor na medida em que a área é aumentada. Discrepâncias semelhantes foram encontradas em Rizzi (2004), para estimativa da produtividade da cultura da soja em municípios do Estado do Rio Grande do Sul.

4.3. Fase 4: Análise das produtividades obtidas pelos modelos agrometeorológico-espectral e agrometeorológico, tendo como área teste o município de Alfenas.

Na Figura 4.24 são apresentados os mapas referentes à penalização estimada pelos modelos agrometeorológico-espectral (a) e agrometeorológico (b) para o ano agrícola 2004/05 no município de Alfenas.

Em uma primeira análise percebeu-se que o modelo agrometeorológico-espectral apresentou maior variabilidade espacial dos índices de penalização em relação ao modelo agrometeorológico. Tal fato pode ser justificado pela utilização da componente espectral no modelo, a qual permitiu inserir indiretamente, informações inerentes à cultura que não são consideradas pelo modelo agrometeorológico.

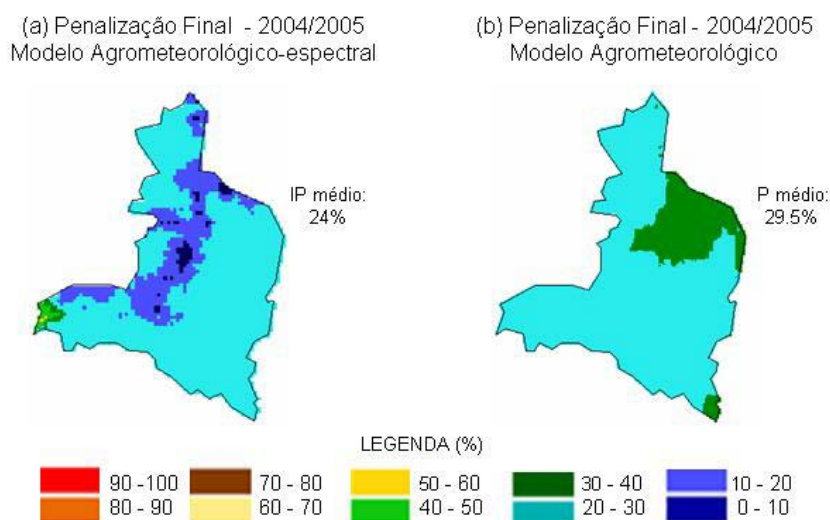


Figura 4.24 – Mapa temático referente ao índice de penalização estimada no município de Alfenas pelo modelo (a) agrometeorológico-espectral e (b) agrometeorológico.

Observa-se que a penalização estimada por ambos os modelos foram 24% e 29,5%. A diferença de 4,5% observada pelas estimativas neste ano pode ter ocorrido em função de uma maior penalização aplicada pelo modelo agrometeorológico ao déficit hídrico de 60 mm registrado no mês de setembro (Figura 4.1) somado ao fator de correção para a temperatura média de 23°C registrada no período da florada. Por outro lado, apesar de ambos os modelos se basearem no método para o cálculo do balanço hídrico de Thornthwaite e Mather (1955), a evapotranspiração potencial estimada pelo modelo agrometeorológico-espectral baseia-se no método de Penman-Monteith (MONTEITH, 1965; ALLEN *et al.*, 1998) e o modelo agrometeorológico em Thornthwaite (1948).

Quanto à produtividade, o valor estimado pelo modelo agrometeorológico-espectral foi 808 kg.ha⁻¹ e o dado divulgado pelo IBGE foi de 690 kg.ha⁻¹, ou seja, uma diferença relativa de 13% em relação ao dado oficial. A produtividade estimada pelo modelo agrometeorológico, entretanto, foi 675,4 kg.ha⁻¹, o que resultou numa diferença 2,11% quando comparado ao dado oficial.

Vale ressaltar que a produtividade estimada pelo modelo agrometeorológico, além de considerar o índice de penalização obtido, também se baseia na penalização em função da produtividade do ano anterior (Equação 2.3, Item 2.5.1.1). Para tanto, foi considerada

como produtividade potencial, a maior produtividade apresentada pelo município divulgada pelo IBGE nos últimos dez anos, acrescida de 10%, sendo esta igual a 1914 kg.ha⁻¹. Para a produtividade do ano anterior (2003/04), também adotou-se a referência do IBGE igual a 1740 kg.ha⁻¹. Dessa forma a produtividade estimada obtida pelo modelo agrometeorológico foi mais próxima da oficial.

Embora o resultado tenha mostrado melhor desempenho do modelo agrometeorológico na área teste, seria necessário a aplicação deste modelo em outros municípios, a fim de verificar a importância de adaptar os fatores de correção do componente térmico e da produtividade do ano anterior no modelo agrometeorológico-espectral. Por outro lado, a utilização da componente espectral no modelo agrometeorológico-espectral permitiu inserir indiretamente informações inerentes à cultura, apresentando assim, uma melhor espacialização da penalização.

4.3.1. Contextualização dos modelos

Apesar das limitações encontradas quanto à utilização de parâmetros generalizados para a área teste e a onerosidade para aplicação do modelo agrometeorológico, ao analisar e comparar os dois modelos foi possível identificar seus pontos positivos e negativos, os quais permitiram uma avaliação das contribuições por eles apresentadas.

O modelo agrometeorológico proposto por Santos e Camargo (2006), apresenta três grandes contribuições. A primeira refere-se à determinação exata do início da florada, que além de permitir o melhor ajuste do coeficiente k_y , também possibilita a aplicação de um fator de correção devido à ocorrência de temperaturas elevadas registradas nas quinzenas ou decêndios subsequentes, as quais afetam a produtividade da cultura. A segunda refere-se à aplicação do fator de ajuste para ocorrência de temperatura mínima ao longo do ciclo fenológico da cultura, o qual permite considerar uma penalização em casos de geada. E a terceira, diz respeito à consideração da produtividade do ano anterior, através da qual se pode considerar a bienalidade produtiva da cultura.

Por outro lado, algumas limitações são encontradas. Primeiramente, quanto aos dados meteorológicos utilizados. Os autores parametrizam o modelo com dados pontuais a partir de estações meteorológicas. Entretanto, estas estações têm uma distribuição muito esparsa, em especial na zona rural, dificultando e até impossibilitando o uso destes dados para muitas regiões de intenso cultivo, particularmente na fronteira agrícola. Além disso, os dados coletados por uma estação representam apenas uma pequena região em torno desta e muitas vezes são adquiridos ou armazenados numa escala temporal inadequada para os modelos (HOOGENBOON, 2000). No caso da variável precipitação, o problema se intensifica, pois a informação obtida a partir de um ou dois postos acaba sendo extrapolada para toda uma região o que não representa a realidade da espacialização da chuva ocorrida. Para a variável temperatura mínima, a localização altimétrica do posto mais próximo da região de estudo dificilmente encontra-se na mesma altitude das lavouras, o que muitas vezes, apesar de ter ocorrido geada na região, a temperatura mínima registrada não foi condizente e, conseqüentemente, não é considerada no modelo. Aliado a estas restrições soma-se a dificuldade de acesso aos dados coletados nos postos meteorológicos em tempo oportuno, podendo inclusive inviabilizar o monitoramento da safra agrícola em relação à tomada de decisões em tempo hábil.

Outra limitação refere-se à utilização de uma referência subjetiva para o cálculo da produtividade potencial. O modelo se baseia no valor máximo encontrado a partir de uma série histórica fornecida por órgãos como a CONAB, ao qual são acrescentados 10% com intuito de eliminar o efeito do meio ambiente que pudesse interferir sobre o valor potencial de produtividade, recomendado por Kanemasu (1983) apresentado em Santos (2005).

O modelo agrometeorológico-espectral por sua vez, apresenta três grandes contribuições. A primeira no que diz respeito da operacionalidade de sua aplicação em grandes áreas, uma vez que se encontra implementado em um SIG (Sistema de Informações Geográficas). A segunda e, provavelmente, a mais importante, refere-se à utilização de dados espectrais, ao considerar a componente espectral (IAF), para a

estimativa da produtividade potencial. Além de ser uma alternativa para evitar a utilização de dados subjetivos, é possível inferir as condições da vegetação, quando prejudicadas por outros fatores além da adversidade climática, e ainda permite uma melhor espacialização da produtividade e penalização estimadas. E a terceira contribuição, diz respeito à utilização de dados meteorológicos provenientes de modelos numéricos de previsão de tempo como o ETA, os quais podem ser disponibilizados diariamente e para grandes regiões, imediatamente após a sua geração. Dessa forma é possível realizar o monitoramento da penalização e da produtividade em períodos quinzenais ao longo de todo ciclo da cultura e ainda, observar as regiões mais atingidas auxiliando na tomada de decisões. Esse fato ficou demonstrado em todos os anos estudados, ao observar que a penalização ocorreu em maior intensidade na fase de florada e formação do chumbinho e iniciava-se na parte noroeste da Mesorregião Sul/Sudoeste, mais especificamente, na microrregião de Poços de Caldas.

Entretanto, o modelo agrometeorológico-espectral não considera os fatores de correção em relação às temperaturas mínima, máxima e produtividade do ano anterior, cujos impactos na estimativa da produtividade do café foram confirmados em Santos e Camargo (2006). Diante desses resultados recomenda-se que o modelo agrometeorológico seja aplicado em outros municípios a fim de confirmar a importância de se adaptar os fatores de correção para o componente térmico, a determinação da época de início da florada e a produtividade do ano anterior, no modelo agrometeorológico-espectral. Com isso, acredita-se que o monitoramento e a estimativa da produtividade do café, principalmente para escala municipal, poderiam se tornar mais eficientes.

5. CONCLUSÕES

A partir da metodologia proposta, fundamentada em dados coletados por satélites orbitais, em modelos de estimativa da penalização e produtividade e em sistema de informações geográficas pôde-se relatar as seguintes conclusões:

Os dados do modelo de previsão de tempo ETA além de terem sido utilizados como entrada no modelo agrometeorológico-espectral foram úteis para traçar o balanço hídrico da região, ao longo de cada ano agrícola estudado.

Foi possível verificar diferenças no comportamento dos índices de vegetação NDVI e EVI obtidos a partir do produto MOD13Q1 do sensor MODIS entre lavouras de café em produção, formação e podadas. Ambos os índices apresentaram coerência aos estádios fenológicos da cultura.

O modelo agrometeorológico-espectral mostrou-se eficiente na estimativa da produtividade para os anos agrícolas 2001/02, 2002/03, 2003/04 e 2004/05 para escala regional, cujas diferenças relativas entre a estimativa da produtividade e a oficial foram de 0%; 14,36%; 0,6% e 2,4% respectivamente.

Através do modelo agrometeorológico-espectral foi possível estimar a produtividade e determinar a quebra de produção acumulada por período fenológico da cultura.

Para microrregião geográfica, os melhores resultados foram obtidos nos anos agrícolas 2003/04 e 2004/05 para os quais as diferenças relativas não ultrapassaram a 11%.

Em escala municipal, as discrepâncias entre a produtividade estimada e o dado de referência foram maiores, embora na média, os resultados não apresentaram diferenças significativas para $\alpha = 0,05$ ao utilizar o teste estatístico *T-Student*, cujos valores *p* obtidos para os referidos anos foram: 0,16; 0,25; 0,35 e 0,06.

Para o município de Alfenas, os resultados das estimativas da penalização obtidos pelos modelos agrometeorológico-espectral e agrometeorológico no ano agrícola 2004/05 foram muito próximos, 24% e 29,5%. No entanto, ao comparar a estimativa da produtividade obtida pelos dois modelos com os dados oficiais, o desempenho do

modelo agrometeorológico foi mais consistente, pois a diferença relativa em relação à informação oficial foi de 2,11%, e a do modelo agrometeorológico-espectral foi 13%.

A espacialização da penalização obtida pelo modelo agrometeorológico-espectral durante as fases fenológicas do café, possibilitou o monitoramento dos efeitos climáticos na região e a identificação das áreas onde o impacto foi mais acentuado. Além disso, foi possível determinar o período fenológico mais crítico para a cultura, o qual apresentou maior penalização.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALFENAS. Atlas Escolar Histórico e Geográfico do Município de Alfenas – MG. **Alfenas hoje**. 2002. Disponível em: <<http://www.alfenas.com.br/sgc/base/new4web.asp?idn=381>>. Acesso em: Jan. 2007.
- ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D; SMITH, M. **Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements**. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1998. 300p. (Irrigation and Drainage, Paper 56)
- ASSAD, E. D; PINTO, H. S.; JUNIOR, J. Z.; ÁVILA, A. M. Impactos das mudanças climáticas no zoneamento agroclimático do café no Brasil. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 39, n.11, 1057-1064p. 2004.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DE CAFÉ (ABIC). **Estatísticas: exportações**. Disponível em: <http://www.abic.com.br/estat_exporta_ppaises.html>. Acesso em: 6 jan. 2007.
- ASTOLPHO, F.; CAMARGO, M. B. P.; PEDRO JÚNIOR, M. J.; PALLONE FILHO, W. J. Probabilidade de ocorrência de geadas no Estado de São Paulo. **O Agrônomo**, Campinas, v. 56, n.1. 10-11p. 2004.
- BAIER, W. Notes on terminology of crop-weather models. **Agriculture Meteorology**, v. 20, n. 8, 137-145 p. 1979.
- BEAUMONT, J.H. An analysis of growth and yield relationships of coffee trees in the Kona District, Hawaii. **Journal of Agricultural Research**, Washington, D.C., v. 59, n. 3, 223-235 p. 1939.
- BERKA, L. M. S.; RUDORFF, B. F. T.; SHIMABUKURO, Y. E. Soybean yield estimation by an agrometeorological model in a GIS. **Scientia Agricola**, v. 60, n. 3, 433-440 p. Mar. 2003.
- BERLATO, M. A. **Modelo de relação entre o rendimento de grãos de soja e o déficit hídrico para o Estado do Rio Grande do Sul**. 1987. 93 p. Tese (Doutorado). Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, SP.
- CAIXETA, G. Z. T. Gerenciamento da cafeicultura em época de crise. In: Zambolim, L. (Ed.) **Tecnologias de produção de café com qualidade**. Viçosa: UFV, Departamento de Fitopatologia, 2001. 1-24 p.
- CÂMARA, G; SOUZA, R.C.M.; FREITAS, U.M.; GARRIDO, J. 1996. SPRING: Integrating remote sensing and GIS by objectoriented data modelling. **Computers & Graphics**, v. 20, n.3. 395-403p.

CAMARGO, A. P. Zoneamento de aptidão climática para a cafeicultura de arábica e robusta no Brasil. Fundação IBGE: recursos, meio ambiente e poluição. 68-76 p. 1977.

CAMARGO, A. P. Clima e a cafeicultura no Brasil. **Informe Agropecuário**, n. 126, p. 13-26, 1985.

CAMARGO, A. P. Clima e fenologia. In: **Cultura de café no Brasil**: pequeno manual de recomendações. Rio de Janeiro: Instituto Brasileiro do Café, MIC. 8-22 p. 1986.

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

CAMARGO, M.B.P.; FAHL, J. I. Seca afeta produção de café deste ano e pode comprometer safra futura. **Folha Rural** –Guaxupé, Minas Gerais, v. 278, 10-11p. 2001.

CAMARGO, A. P.; GROHMAN, F.; DESSIMONI, L. M.; TEIXEIRA, A. A. Efeitos na produção de café de épocas de rega e de supressão da água, por meio de cobertura transparente. In: Congresso Brasileiro de Pesquisas Cafeeiras, 21, Londrina, 1984. **Anais...** Rio de Janeiro: MAA/IBC/GERCA, 1984. 62-64 p.

CAMARGO, M.B.P.; ORTOLONI, A. A.; PEDRO JUNIOR, M. J.; ROSA, S. M. Modelo agrometeorológico de estimativa de produtividade para o cultivar de laranja Valência. **Bragantina**, v.58, n.1, 171-178 p. 1999.

CAMARGO, M.B.P.; PEDRO JUNIOR, M.J.; ORTOLANI, A.A.; ALFONSI, R.R.; PINTO, H.S. Relações entre a precipitação pluviométrica e a produtividade do cafeeiro. **Ecossistema**, Espírito Santo do Pinhal, v.9, n.1, 166-171 p. 1984.

CAMARGO, A. P.; PEREIRA, A. R. **Agrometeorology of the coffee crop**. Geneva: World Meteorological Organization. WMO/TD. n. 615, 43 p. 1994.

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 subsídio 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, 2003. p. 75-76.

CARAMORI, P. H.; CAVIGLIONE, J. H.; WREGE, M. S.; GONÇALVES, S. L.; FARIA, R. T.; ANDROCIOLI FILHO, A.; SERA, T.; CHAVES, J. C. D.; KOGUISHI, M. S. Zoneamento de riscos climáticos para a cultura do café (*Coffea arabica* L.) no estado do Paraná. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Passo Fundo, v. 9, n. 3, 486-494 p. 2001.

CARVALHO, L. G.; SEDIYAMA, G. C.; CECON, P. R.; ALVEZ, H. M. R. Avaliação de um modelo agrometeorológico para previsão da produtividade de café em três localidades da região Sul do estado de Minas Gerais. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v.11, n.2, 343-352 p. 2003.

CHAN, S.C. Modelo regional ETA. **Climanálise especial, edição comemorativa de 10 anos**. CPTEC/INPE, v. 10. Out. 1996.

CHOUDHURY, B.J.; AHAMED, N.U.; IDSO, S.B.; REGINATO, R.J.; DAUGHTRY, C.S.T. Relations between evaporation coefficients and vegetation indices studied by model simulations. **Remote Sensing of Environment**, v. 50, n. 1, p. 1-17, Out. 1994.

COMPANHIA NACIONAL DO ABASTECIMENTO - CONAB. **Safras: I** levantamento safra 2006-2007. [S.l.] MAPA. 2005. Acesso em: 2 fev. 2007.

COSTA, L. C. Modelagem e simulação em agrometeorologia. In: Congresso Brasileiro de Agrometeorologia, 10., Piracicaba, 1997. **Anais...** Piracicaba: Sociedade Brasileira de Agrometeorologia. 3-6 p.

DE BIASE, M. Carta de declividade de vertentes: confecção e utilização. **Geomorfologia**. São Paulo. Instituto de Geografia, 21p. p. 8-13, 1970.

DAMATTA, F.M.; RENA, A. B. Ecofisiologia de cafezais sombreados a pleno sol. In: ZAMBOLIM, L. (Ed). **O estado da arte e tecnologia na produção de café**. Viçosa: UFV, 2002. 93-135p.

DOORENBOS, J.; KASSAM, A. H. **Yield response to water**. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1979, 193 p. (FAO-Irrigation and Drainage Paper, n.33)

DOORENBOS, J., PRUIT, W.O. **Crop water requirements**. Roma: FAO. 1977. 144 p. (FAO: Irrigation and Drainage Paper, n. 24).

EMBRAPA CAFÉ.. **Histórico**. 2004. Disponível em: <<http://www22.sede.embrapa.br/cafe/unidade/historico.htm>>. Acesso em: 6 dez. 2006.

EIPHANIO, J. C. N.; LEONARDI, L.; FORMAGGIO, A. R. Relações entre parâmetros culturais e resposta espectral de cafezais. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 29. n.3, 439-447 p. Mar 1994.

FERRAUDO, A.S.; ANDRÉ, R. G. B.; PINHO, S. Z. Modelo agrometeorológico para estimar rendimento de grãos de milho. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v.3, 93-96 p. 1995.

FONTANA, D. C.; BERLATO, M. A. Modelo agrometeorológico-espectral para a estimativa do rendimento de soja no Rio Grande do Sul: um estudo preliminar. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 9., 1998, Santos. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 1998. 1 CD ROM.

FONTANA, D.C.; BERLATO, M. B., LAUSCHNER, M. H.; MELLO, R.W. Modelo de estimativa de rendimento de soja no Rio Grande do Sul. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**. Brasília, v.6., n.3, 399-403 p. Mar, 2001.

FRANCO, C. M. e INFORZATO, R. O sistema radicular do cafeeiro nos principais tipos de solos do Estado de São Paulo. **Bragantina**. Campinas, n.6, 443-478 p. 1946.

FREITAS, R. M.; SHIMABUKURO, Y. E.; XAVIER, A. C. NOVO, E. M. L. M. Análise da resposta espacial e radiométrica dos dados MOD09 nos diferentes ângulos de visada. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, XII, 2005. Goiânia. **Anais...** Goiânia. INPE, 541-548 p. Abr. 2005.

GEOMINAS. [PRODEMGE](http://www.geominas.mg.gov.br) - Companhia de Tecnologia da Informação do Estado de Minas Gerais, 1996. **Mapas/Downloads**. Disponível em: <<http://www.geominas.mg.gov.br>>. Acesso em: 13 Out 2005.

GOEL, N. S. Models of vegetation canopy reflectance and their use in estimation of biophysical parameters from reflectance data. **Remote Sensing Reviews**, v. 4 p. 1-21, 1988.

HOOGENBOOM, G. Contribution of agrometeorology to the simulation of crop production and its applications. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 103, 137-157p. 2000.

HUETE, A. R. A soil-adjusted vegetation index (SAVI). **Remote Sensing of Environment**, v. 25, n. 3, p. 295-309, Aug. 1988.

HUETE, A. R.; DIDAN, K.; MIURA, T., RODRIGUEZ, E.P.; GAO, X.; FERREIRA, L. G. Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetations indices. **Remote Sensing of Environment**, v 83, n.1-2, 195-213 p. 2002.

HUETE, A; JUSTICE. C.; LEEUWEN, W. V. MODIS Vegetation Index (MOD 13) Algorithm Theoretical Basis Document, Versão 3, 1-142 p. 1999. Disponível em: <modis.gsfc.nasa.gov/data/atbd/atbd_mod13.pdf> Acesso em: Jan. 2006.

INSTITUTO BRASILEIRO DO CAFÉ - IBC. Serviço de Fotointerpretação. **Minas Gerais** - levantamento de reconhecimento detalhado dos solos em área piloto no estado de Minas Gerais: Escala 100.000. Rio de Janeiro, RJ: IBC, 1970. ISBN ROSE/16/11.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Cidades**. [S.l.]. Disponível em: <<http://www1.ibge.gov.br/cidadesat/default.php>>. Acesso em: 5 out. 2005.

JENSEN, M.E. Water consumption by agricultural plants. In: KOZLOWSKI, T.T. (Ed.) **Water deficits and plant growth**. New York : Academic Press, v. 2, 1-22 p. 1968.

JENSEN, J.R. Remote sensing of vegetation. In: _____. **Remote sensing of the environment, an earth resource perspective**. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 2000. 544 p, cap.10. p. 333-377.

LIBARDI, V. C. M., AMARAL, J. A. T., AMARAL, J. F. T. Crescimento Vegetativo Sazonal do Cafeeiro (*coffea canephora* pierre var. conilon) no sul do estado do Espírito Santo. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 6, n. 1, 23-28 p. 1998.

LILLESAND, T.M.; KIEFER, R.W. **Remote sensing and image interpretation**. New York: John Wiley & Sons, 1994. 724p.

LIU, W. T. H.; LIU, B. W. Y. Comparação de três modelos de previsão de safra de café no Estado de Minas Gerais. **Ciência e Cultura**, São Paulo, v. 40, n.8, 801–807 p. 1988.

MALAVOLTA, E. **História do café no Brasil**. São Paulo: Editora Agronômica Ceres. 464 p. 2000.

MARIN, F. R.; ANGELOCCI, L. R.; RIGHI, E. Z.; SENTELHAS, P.C. Evapotranspiration and irrigation requirements of a coffee plantation in Southern Brazil **Experimental Agriculture**, v. 41, n.2, 2005.

MARIN, F. R.; PANDORF, H.; SENTELHAS, P.C.; CAMARGO, M.B.P.; HERNANDEZ, F.B.T. Perda de produtividade potencial da cultura do sorgo no Estado de São Paulo. **Bragantia**, v. 65, n.1, 157-162 p., 2006.

MARIN, F. R.; SENTELHAS, P. C.; UNGARO, M. R. G. Perda de rendimento potencial da cultura do girassol por deficiência hídrica, no Estado de São Paulo. **Scientia Agrícola**. Piracicaba, v. 57, n. 1, 2000.

MATIELLO, J. B. **Fatores que afetam a produtividade**. In: Cultura do cafeeiro. Piracicaba: ABPPF, 1986. p. 1-11, 447p.

MATIELLO, J. B. **O café: do cultivo ao consumo**. São Paulo: Globo, 1991. 320p. (Coleção do agricultor: Grãos)

MATIELLO, J. B.; SANTINATO, R.; GARCIA, A. W. R.; ALMEIDA, S. R.; FERNÁNDEZ, D. R. **Cultura de Café no Brasil: novo manual de recomendações**. Rio de Janeiro: MAPA/Procafé, 2002.

MEDINA FILHO, H. P.; BORDIGNON, R. Arabustas: Interessantes híbridos dos cafés Arábica e Robusta. **O Agrônomo**. Campinas. vol. 55, n. 2, 8-9 p, 56 p, 2003. ISSN 0365-2726.

MELO, R. W.; FONTANA, D. C.; BERLATO, M. A. Modelo agrometeorológico-espectral de estimativa de rendimento da soja para o estado do Rio Grande do Sul. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, XI, 2003. Belo Horizonte. **Anais...** Belo Horizonte: INPE, 173-179 p. Abr. 2003.

MEYER, S.J., HUBBARD, K G., WILHITE, D.A. A crop specific drought index for corn. I. Model development and validation. **Agronomy Journal**, Madison, v. 86, n. 1, 388-395 p. 1992.

MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO – MAPA. **Agronegócio café**: relatórios e estatísticas. Disponível em: <<http://www.agricultura.gov.br/>>. Acesso em: Jan. 2007.

MODERATE RESOLUTION IMAGING SPECTRORADIOMETER - MODIS. Technical Specifications, 2005. Disponível em: <<http://MODIS.gsfc.nasa.gov/data>>. Acesso em: jan. 2005.

MONTEITH, J.L. Evaporation and environment. Symp. of the Society for Experimental Biology, Cambridge, v. 19, p. 205-234, 1965.

MORAES, A. V.C; CAMARGO, M. B. P.; MASCARENHAS, H. A. A.; MIRANDA, M.A.C.; PEREIRA, J.C.V.N.A. Teste e análise de modelos agrometeorológicos de estimativa de produtividade para a cultura da soja na região de Ribeirão Preto. **Bragantia**, Campinas, v. 57, n. 2, 393-406 p. 1998.

MOREIRA, M.A. **Fundamentos do sensoriamento remoto e metodologias de aplicação**. 1. ed. São José dos Campos – SP, INPE, 2001. 250 p.

MOREIRA, M. A; ADAMI, M.; RUDORFF, B. F. T. Análise espectral e temporal da cultura do café em imagens LANDSAT. Pesquisa **Agropecuária Brasileira**, v. 39. n.3, 223-231 p. Mar 2004.

MURRAY R. S. **Probabilidade e estatística**. 1. ed. São Paulo: Makron Books, 2001. 528p. ISBN: 8534613001.

NORMAN, J.M.; ANDERSON, M.C.; KUSTAS, W.P.; FRENCH, A.N.; MECIKALSKI, J.; TORN, R.; DIAK, G.R.; SCHMUGGE, T.J. Remote sensing of evapotranspiration for precision-farming applications. **International Geoscience and Remote Sensing Symposium**, Toulouse, France, July 21-25, 2003.

ORTOLANI, A.A.; PINTO, H. S.; ALFONSI, R.R. **Parâmetros climáticos e a cafeicultura**. Rio de Janeiro: MIC-IBC, GERCA. 1970. 27p.

PAULO, E. M.; FURLANI JUNIOR, E.; FAZUOLI, L. C. Comportamento de cultivares de cafeeiro em diferentes densidades de plantio. **Bragantina**. Campinas, v. 64, n.3, 397-409 p. 2005.

PAUSTIAN, K.; PARTON, W. J.; PERSSON, J. Modeling soil organic matter in organic-amended and nitrogen fertilized long-term plots. **Soil Science Society of America Journal**, v.56, p. 476-488, 1992.

PEREIRA, A. R.; VILA NOVA, N. A.; SEDYAMA, G. C. **Evapotranspiração**. Piracicaba: ESALQ/USP, 1997, 183p.

PEZZOPANE, J. R. M. **Avaliação microclimáticas, fenológicas e agronômicas em café arábica cultivado a pleno sol e consorciado com banana “prata anã”**. 2004. 136p. Tese (Doutorado). Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba.

PICINI, A. G. **Desenvolvimento e teste de modelos agrometeorológicos para a estimativa de produtividade do cafeeiro a partir do monitoramento da disponibilidade hídrica do solo**. Dissertação (Mestrado em Agronomia)- Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1998.

PICINI, A. G., CAMARGO, M. B. P., ORTOLANI, A. A., GALLO, P. B. Desenvolvimento e teste de modelos agrometeorológicos para a estimativa de produtividade do cafeeiro. **X Agrometeorologia**. Bragantina: Campinas. v. 58, n. 1, 157-170 p. 1999.

PICOLI, M. C. A. **Estimativa da produtividade agrícola da cana de açúcar utilizando agregados de redes neurais artificiais: estudo de caso usina Catanduva**. 95 p. (INPE-12271-TDI/983)- Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos. 2006.

PINO, F. A. Estimativa subjetiva de safras agrícolas. **Informações Econômicas**, v. 31, n. 6, São Paulo. 2001.

PONZONI, F. J. Comportamento espectral da vegetação. In: Paulo Roberto Meneses, P. R.; José da Silva Madeira Netto, J. S. (Orgs.). **Sensoriamento remoto: Reflectância de alvos naturais**. 1º ed. Brasília: Editora UNB, 2002, v. 1, p. 157-199.

PROCÓPIO, J.R. **Estruturação de dados geoambientais no contexto de plantações florestais**. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte. 57 p. 2002.

RAFAELLI, D. R. **Geoprocessamento para avaliação do impacto de geadas na região cafeeira de Cornélio Procópio, PR**. Tese (Doutorado em Agronomia) – Universidade Estadual Paulista (UNESP - FCA), Botucatu, São Paulo, 106 p. 2004.

RENA, A. B.; MAESTRI, M. Fisiologia do cafeeiro. **Informe Agropecuário**. Belo Horizonte, v. 11, n. 126, 26-40p. 1985.

RIZZI, R. **Geotecnologias em um sistema de estimativa da produção de soja: estudo de caso no Rio Grande do Sul**. 214 p. (INPE-12271-TDI/983). Tese (Doutorado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos. 2004.

RIZZI, R.; RUDORFF, B.F.T; FREITAS, R. M.; FONTANA, D. C. Monitoramento e estimativa da produtividade de soja auxiliados pelo modelo regional de previsão de tempo ETA. **Revista Ambiente & Água**, v. 1, n. 1. 2007.

RIZZI, R.; RUDORFF, B.F.T; SHIMABUKURO, Y. E.; DORAISWAMY, P. C. Assessment of MODIS LAI retrievals over soybean crop in Southern Brazil. **International Journal of Remote Sensing**, v. 27, n. 19, 4091 – 4100 p. Oct, 2006.

RUDORFF, B. F. T.; BATISTA, G. T. Yield estimation of sugarcane based on agrometeorological-spectral models. **Remote Sensing of Environment**, v. 33, n. 3, 182 – 192 p. Sep. 1990.

RUDORFF, B. F. T., BATISTA, G. T. Wheat yield estimation at the farm level using LANDSAT TM and agrometeorological data. **International Journal of Remote Sensing**, v.12, 2477-2484p. 1991.

SANTOS, M. A. **Parametrização de coeficientes de sensibilidade e teste de modelos agrometeorológicos de estimativa de quebra de produtividade do cafeeiro (Coffea arábica L.)**. 2005. Dissertação (Mestrado em Agricultura Tropical e Subtropical) – Instituto Agrônomo de Campinas, 138 p. 2005.

SANTOS, M. A.; CAMARGO, M.B.P. Parametrização de modelo agrometeorológico de estimativa de produtividade do cafeeiro nas condições do estado de São Paulo(1). **Bragantia**, Campinas, v. 65, n.1, 173-183 p. 2006.

SANTINATO, R.; FERNANDES, A.L.T.; FERNANDES, D.R. Irrigação na cultura do café. **Arbore**, Campinas, 146 p. 1996.

SEDIYAMA, G. C.; MELO JUNIOR, J. C. F.; SANTOS, A. R.; RIBEIRO, A.; COSTA, M. H.; HAMAKAWA, P. J.; COSTA, J. M. N.; COSTA, L. C. Zoneamento agroclimático do cafeeiro (coffea arábica L.) para o estado de Minas Gerais. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**. v. 9, n. 3. (Edição especial: Zoneamento Agrícola) 2001. 501-509 p. ISSN 0104 -1347.

SINDICATO DA INDÚSTRIA DE CAFÉ DO ESTADO DE SÃO PAULO-SINDCAFÉ. **OIC estima produção mundial de Café em 121 milhões de sacas**. Disponível em: <http://www.sindicafesp.com.br/nota_safra_mar06.html>. Acesso em: Mar. 2006.

SILVA, G.L.S.P.; VICENTE, J.R.; CASER, D.V. Avaliação de previsões de rendimento de culturas no Estado de São Paulo, fornecidas por modelos agrometeorológicos, anos agrícolas 1984/85 e 1985/86. **Informações Econômicas**, São Paulo, v.17, n.6, 61-45 p. 1987.

STEWART, J. I.; HAGAN, R. M.; PRUITT, W. O. **Production functions and predicted irrigation programmes for principal crops as required for water resources planning and increased water use efficiency**: final report. Washington: U.S. Department of Interior, 80 p. 1976.

SUGAWARA, L. M. **Avaliação de modelo agrometeorológico e imagens NOAA/AVHRR no acompanhamento e estimativa de produtividade da soja no Estado do Paraná**. 2002. 181p. (INPE-8702-TDI/794). Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto). Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos. 2002.

TARDIN, A. T. I.; 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, n. 9, p.1355-1361. 1992.

TEIXEIRA, S. M.; MILHOMEM, A. V. A competitividade e custos da cafeicultura brasileira. In: Zambolim, L. (Ed.) **Tecnologias de produção de café com qualidade**. Viçosa: UFV, Departamento de Fitopatologia, 2001. 25-64p.

THORNTHWAITE, C.W. An approach toward a rational classification of climate. *Geographical Review*, New York, v.38, n.1, p.55-94, 1948.

THORNTHWAITE, C. W.; MATHER, J. R. **The water balance**. Centerton: Drexel Institute of Technology, 1955. 104 p. (Publications in Climatology. v. 8, n. 1).

TOSELLO, R.N.; ARRUDA, H.V. Correlação entre estimativas oficiais de produção de café e precipitação pluviométrica, no Estado de São Paulo. **Bragantia**, Campinas, v.21, 449-465 p. 1962.

USGS – Shuttle Radar Topography Mission. U.S Geological Survey, 2004. Disponível em: < <http://srtm.usgs.gov/index.html>>. Acesso em: Jan. 2006.

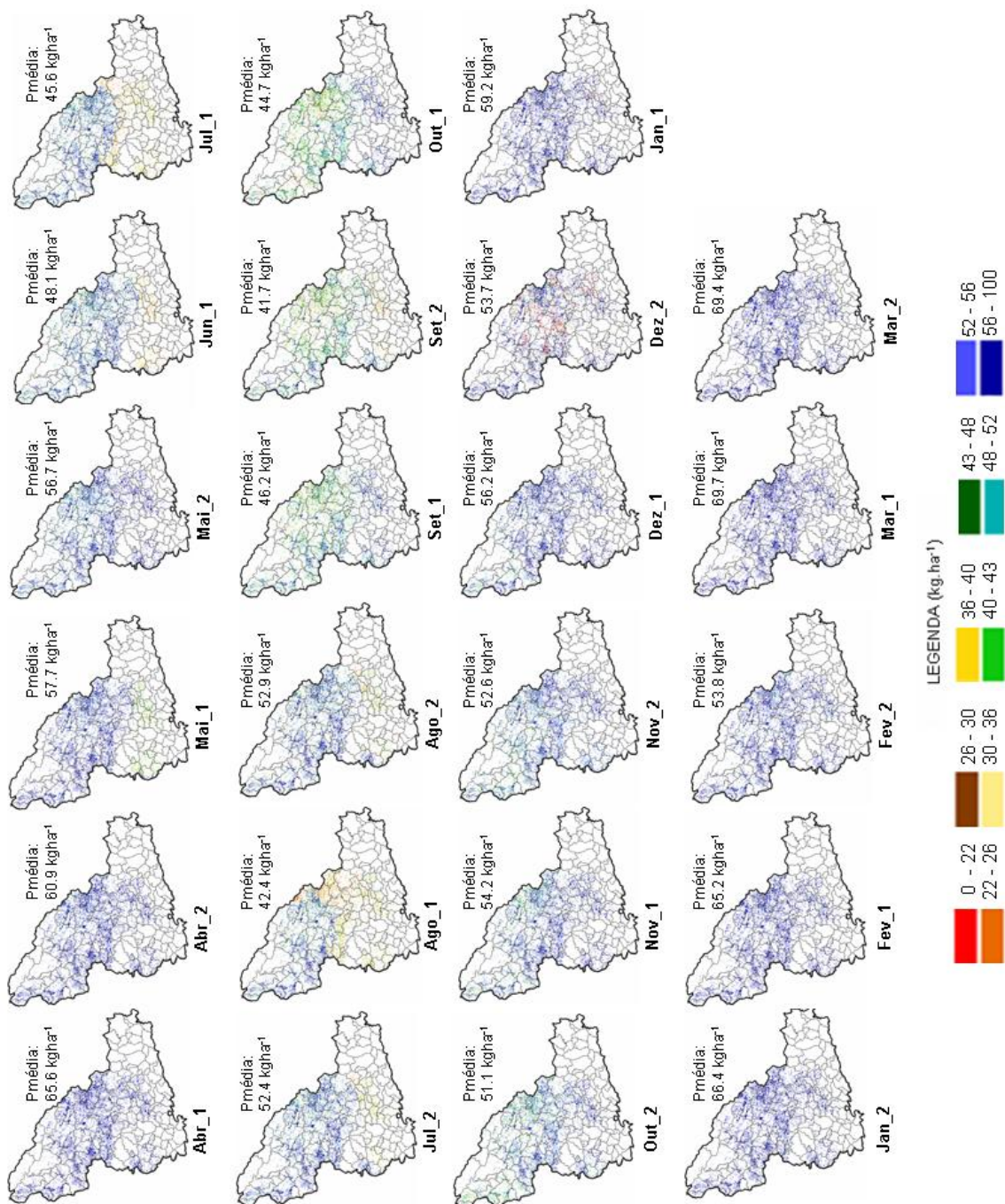
YI, J. L. **Dados do sistema sensor MODIS-Terra para avaliação e monitoramento de áreas agrícolas na região sul do Brasil**. Tese (Doutorado em Engenharia) – Universidade de São Paulo (USP), São Paulo, 174 p. 2005.

WEILL, M.A.M. **Avaliação de fatores edafoclimáticos e do manejo na produção de cafeeiros (Coffea arabica L.) na região de Marília e Garça, SP**. 1990. 182 p. Dissertação (Mestrado). Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba.

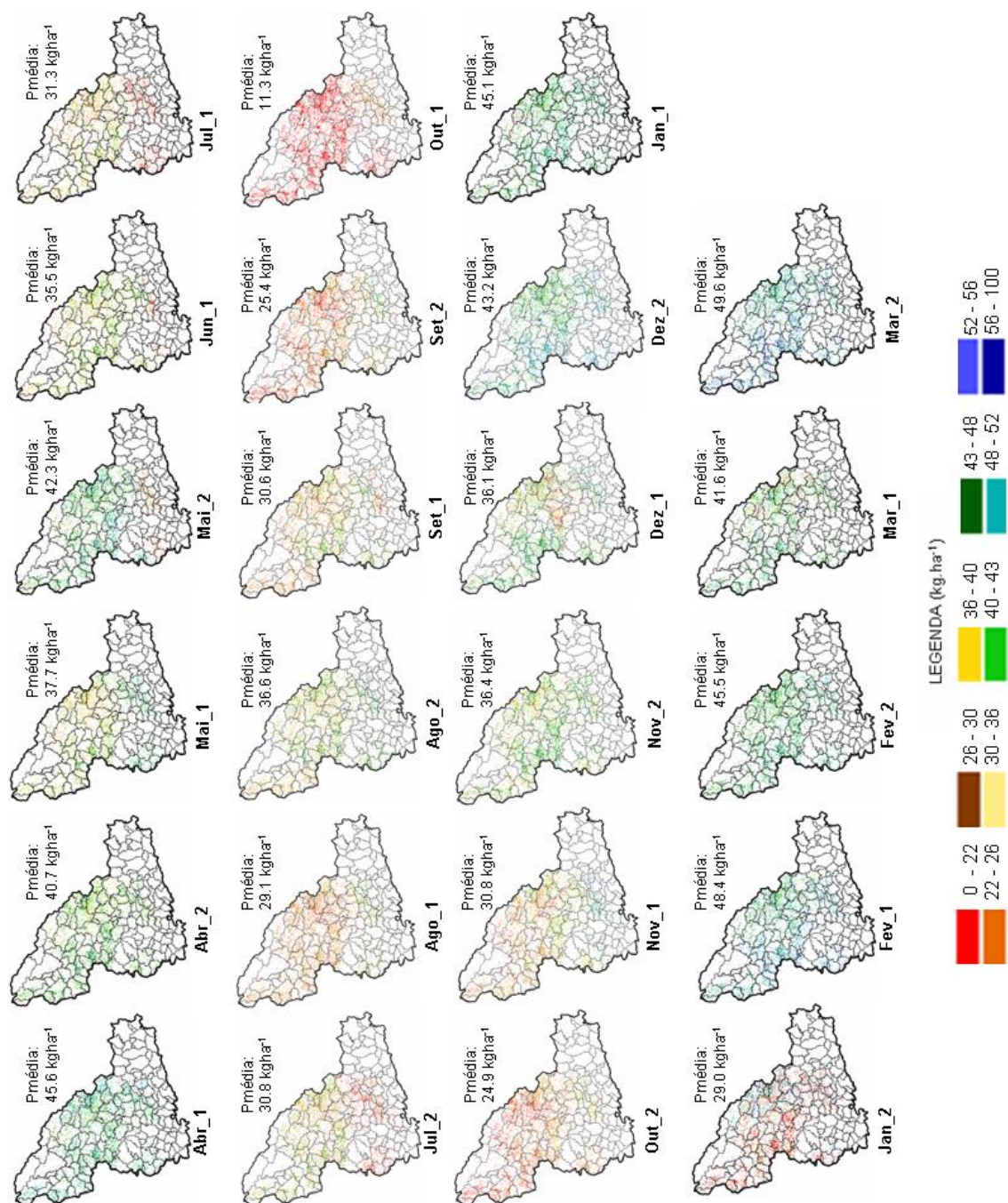
ZHANG, X.; BRUCE, A.; TAN, B.; HUANG, D.; MYNENI, R. Potential monitoring of crop production using a satellite based Climate Variability Impact Index. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 132, p. 344–358, 2005.

APÊNDICE A - MAPAS TEMÁTICOS REFERENTES À PRODUTIVIDADE PARCIAL ESTIMADA

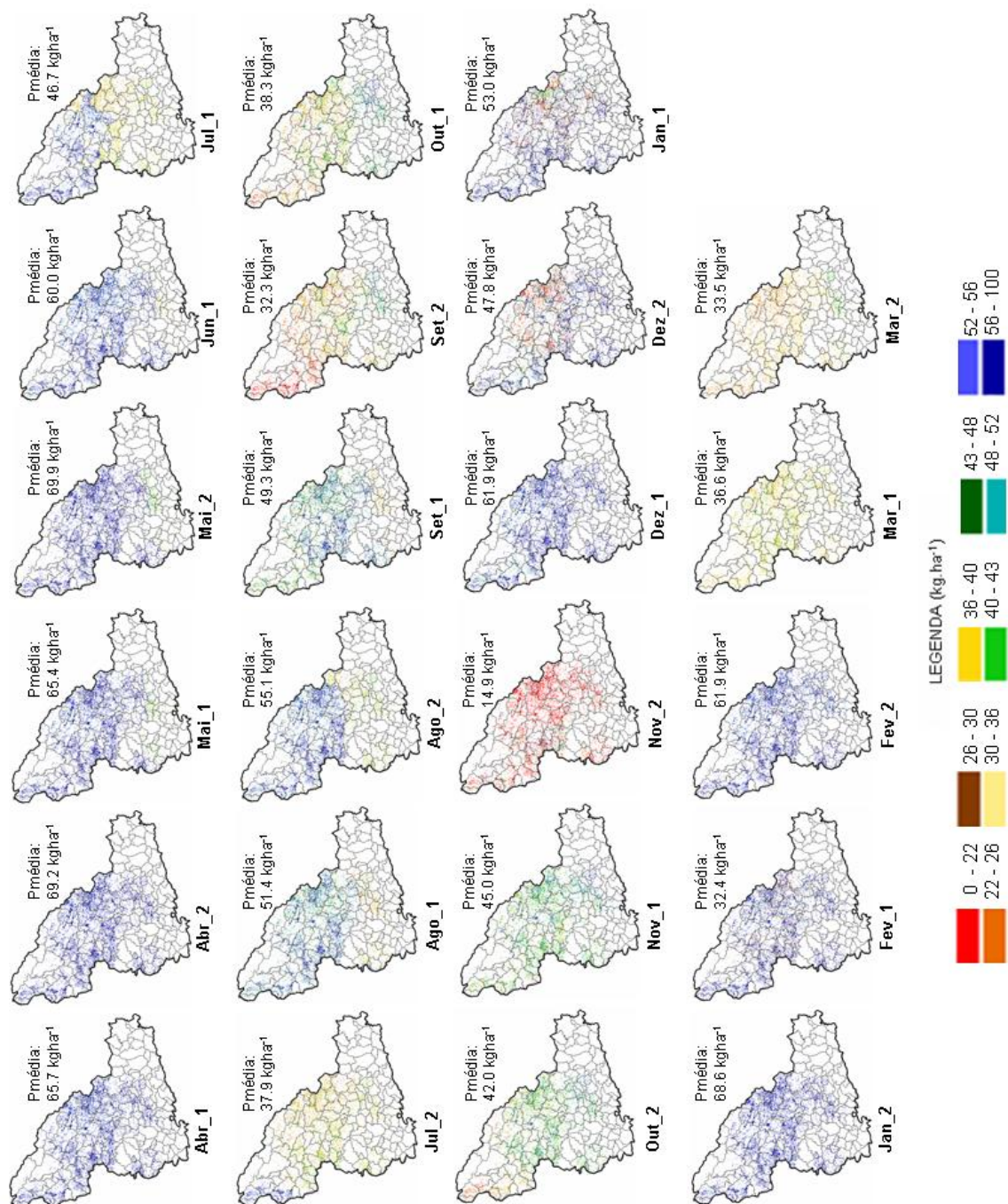
A.1 Produtividade parcial estimada para o ano agrícola 2001/02



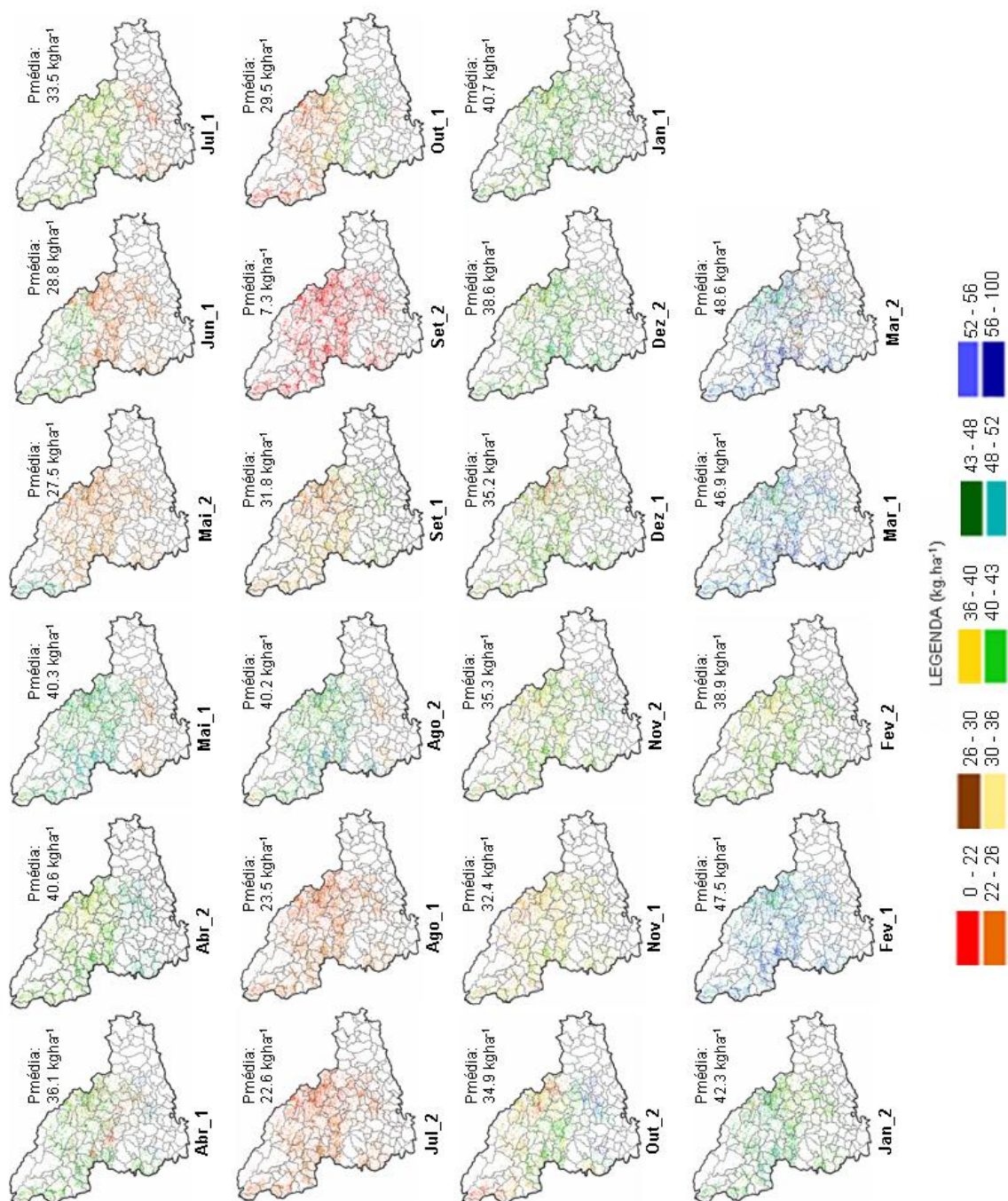
A.2 Produtividade parcial estimada para o ano agrícola 2002/03



A.3 Produtividade parcial estimada para o ano agrícola 2003/04



A.4 Produtividade parcial estimada para o ano agrícola 2004/05



**APÊNDICE B – DIFERENÇA RELATIVA ENTRE A PRODUTIVIDADE
ESTIMADA E O IBGE PARA ESCALA MUNICIPAL**

MUNICÍPIO	2002			2003			2004			2005		
	IBGE	MODELO	DR	IBGE	MODELO	DR	IBGE	MODELO	DR	IBGE	MODELO	DR
Aiuruoca	906	1037	-14	906	792	13	1000	1106	-11	1000	787	21
Alagoa	2000	1658	17	1000	985	2	1000	1022	-2	1000	987	1
Albertina	1020	1261	-24	906	870	4	905	952	-5	1020	888	13
Alfenas	1500	1280	15	900	824	8	1740	1180	32	690	782	13
Alpinópolis	1764	1250	29	600	814	-36	1200	1201	0	1260	825	34
Alterosa	1320	1187	10	600	777	-30	900	1105	-23	900	767	15
Andradas	1371	1265	8	600	864	-44	1500	1220	19	923	749	19
Andrelândia	1000	899	10	1000	856	14	1000	985	1.5	1333	888	33
Arantina	1000	768	23	1000	659	34	1000	1389	-39	1000	1077	-8
Arceburgo	1155	1328	-15	600	830	-38	578	1212	110	360	444	-23
Areado	1620	1283	21	825	851	-3	1800	1215	32	900	820	9
Baependi	900	1004	-12	720	769	-7	1020	1012	1	1020	811	20
Bandeira do Sul	1080	1234	-14	600	846	-41	1200	1184	1	582	652	-12
Boa Esperança	1000	1196	-20	600	813	-36	899	1126	-25	600	745	-24
Bocaina de Minas	1000	859	14	1000	777	22	1000	887	11	1000	986	1
Bom Jardim de Minas	1000	968	3	1000	869	13	1000	1255	-26	1000	1102	-10
Bom Jesus da Penha	1080	1223	-13	600	798	-33	1200	1141	5	720	783	-9
Bom Repouso	666	1165	-75	750	758	-1	500	688	-38	500	652	-30
Borda da Mata	1080	1175	-9	1080	790	27	900	1067	-19	1080	762	29
Botelhos	1200	1274	-6	480	848	-77	1200	1156	4	600	705	-18
Brasópolis	600	1192	-99	540	844	-56	600	1183	-97	800	804	-1
Bueno Brandão	1020	1172	-15	840	859	-2	1079	1002	7	780	482	38
Cabo Verde	1287	1304	-1	650	873	-34	643	1256	-95	840	842	0
Cachoeira de Minas	840	1176	-40	960	835	13	1020	1131	-11	1020	750	26
Caldas	1080	1230	-14	600	816	-36	1139	1224	-7	570	809	-42
Camanducaia	1110	1253	-13	800	878	-10	1220	1265	-4	850	901	-6
CambuÍ	750	1219	-63	750	854	-14	472	785	-66	472	489	-4
Cambuquira	900	1221	-36	1320	842	36	1500	1180	21	1020	803	21
Campanha	1680	1227	27	840	862	-3	1500	1186	21	1200	777	35
Campestre	1320	1265	4	780	866	-11	1200	1204	0	720	803	-11
Campo do Meio	1200	1185	1	480	771	-61	1500	1150	23	600	723	-20
Campos Gerais	1680	1202	28	780	785	-1	1320	1133	14	815	730	10
Capetinga	1589	1254	21	780	795	-2	1080	1230	-14	1500	1230	18
CapitÓlio	1320	1195	9	720	754	-5	1080	1116	-3	1079	745	31
Careaçu	900	1217	-35	900	842	6	899	1177	-31	1019	743	27
Carmo da Cachoeira	1200	1232	-3	1200	856	29	847	1108	-31	847	741	12
Carmo de Minas	1499	1186	21	1319	908	31	1202	1247	-4	1920	1254	35
Carmo do Rio Claro	900	1164	-29	471	757	-61	1019	1113	-9	720	750	-4
Carvalhópolis	1300	1258	3	720	843	-17	1319	1163	12	600	658	-10
Cássia	1620	1219	25	720	787	-9	1020	1251	-23	780	811	-4
Caxambu	1198	1292	-8	1198	893	25	1200	1212	-1	1200	1145	5
Claraval	900	1233	-37	900	796	12	1020	1168	-14	660	800	-21
Continua...												

Continuação..												
Conceição da Aparecida	1320	1232	7	600	826	-38	1500	1176	22	720	803	-12
Conceição das Pedras	1259	1119	11	1200	928	23	1000	1219	-22	1000	781	22
Conceição do Rio Verde	1079	1149	-6	900	859	5	1080	1166	-8	1020	781	23
Conceição dos Ouros	901	1229	-36	962	811	16	980	1192	-22	980	787	20
Congonhal	958	1139	-19	958	843	12	898	1118	-25	1080	777	28
Consolação	740	666	10	740	628	15	736	777	-6	947	923	3
Coqueiral	840	1184	-41	840	844	0	840	1090	-30	840	725	14
Cordislândia	1900	1288	32	900	876	3	1320	1210	8	539	555	-3
Córrego do Bom Jesus	1000	1233	-23	1000	1097	-10	1000	1325	-33	1000	1147	-15
Cristina	1080	1173	-9	1500	915	39	1080	1219	-13	1500	831	45
Cruzília	720	1126	-56	720	878	-22	1039	1109	-7	1039	822	21
Delfim Moreira	666	589	12	666	588	12	666	856	-29	666	736	-11
Delfinópolis	1559	1198	23	1439	761	47	1439	1193	17	1440	1258	13
Divisa Nova	1000	1277	-28	599	834	-39	1200	1174	2	720	798	-11
Dom Viçoso	1681	1185	30	1318	913	31	1320	1248	5	1800	1100	39
Elói Mendes	1200	1244	-4	600	809	-35	1500	1133	24	900	751	17
Espírito Santo do Dourado	1080	1217	-13	600	851	-42	600	1221	103	329	456	-39
Estiva	750	1205	-61	750	802	-7	483	777	-61	483	746	-54
Extrema	750	888	-18	750	763	-2	500	778	-56	500	458	8
Fama	1379	1187	14	540	752	-39	1380	1074	22	689	614	11
Fortaleza de Minas	720	1251	-74	719	822	-14	810	1178	-45	960	784	18
Gonçalves	750	1288	-72	750	907	-21	500	925	-85	500	652	-30
Guapé	1194	1104	8	480	712	-48	690	1029	-49	485	548	-13
Guaranésia	1080	1383	-28	386	848	120	386	422	-9	869	834	4
Guaxupé	1188	1394	-17	594	871	-47	840	1285	-53	960	864	10
Heliadora	1200	1246	-4	600	906	-51	600	1248	108	1229	777	37
Ibiraci	1500	1163	22	660	751	-14	1260	1145	9	780	753	4
Ibitiúra de Minas	1680	1246	26	600	848	-41	1200	1213	-1	550	783	-42
Ilicínea	1320	1178	11	900	785	13	839	1115	-33	960	769	20
Inconfidentes	1140	1200	-5	960	889	7	1440	1191	17	1409	808	43
Itajubá	528	1137	115	528	954	-81	528	685	-30	528	621	-18
Itamoji	1180	1320	-12	600	787	-31	1350	1211	10	630	821	-30
Itamonte	1000	987	1	2000	965	52	1533	1458	5	1533	1120	27
Itanhandu	1080	1200	-11	1080	1106	-2	1080	988	9	1800	1652	8
Itapeva	750	700	7	750	658	12	500	654	-31	500	699	-40
Itaú de Minas	1324	1236	7	655	789	-20	965	999	-4	1086	859	21
Jacuí	1080	1215	-12	660	809	-23	900	1158	-29	810	777	4
Jacutinga	1200	1303	-9	1020	877	14	1200	1250	-4	1080	806	25
Jesuânia	1200	1163	3	1200	894	25	780	1215	-56	1800	1475	18
Juruaia	1020	1334	-31	330	897	172	1380	1267	8	720	847	-18
Lambari	1100	1209	-10	719	908	-26	1500	1244	17	900	814	10
Liberdade	1000	985	2	1000	853	15	1000	1243	-24	1000	1120	-12
Machado	1440	1283	11	570	834	-46	1380	1207	13	630	803	-27
Maria da Fé	800	975	-22	800	764	5	800	785	2	800	698	13
Monsenhor Paulo	900	1233	-37	959	841	12	1079	1156	-7	600	777	-29
Monte Belo	1140	1245	-9	479	814	-70	1140	1176	-3	720	794	-10
Monte Santo de Minas	1080	1271	-18	600	831	-38	900	1225	-36	960	792	18
Continua...												

Continuação...											
Monte Sião	1140	1250	-10	900	892	1	900	1237	-37	670	808 -21
Munhoz	1000	897	10	1000	798	20	1000	1222	-22	1000	1022 -2
Muzambinho	1140	1293	-13	357	843	136	1020	1226	-20	900	825 8
Natércia	1200	1153	4	1080	878	19	1080	1191	-10	1199	783 35
Nepomuceno	1320	1222	7	780	877	-12	1500	1104	26	900	729 19
Nova Resende	1080	1265	-17	495	849	-72	1500	1217	19	870	813 7
Olímpio Noronha	1203	1170	3	1203	862	28	1500	1120	25	1200	1085 10
Ouro Fino	1140	1201	-5	720	876	-22	1320	1220	8	630	788 -25
Paraguaçu	1380	1213	12	600	770	-28	1380	1141	17	689	747 -8
Paraisópolis	628	1255	100	500	869	-74	600	1242	107	600	814 -36
Passa-Quatro	1400	1434	-2	950	953	0	1300	1323	-2	785	790 -1
Passa-Vinte	1000	1555	-56	1000	1085	-9	1000	987	1	1000	859 14
Passos	1500	1172	22	568	775	-36	1200	1165	3	720	789 -10
Pedralva	1500	1161	23	1700	871	49	1200	1184	1	1100	791 28
Pirangaçu	800	1211	-51	900	833	7	900	1253	-39	1200	854 29
Piranguinho	1249	1173	6	840	799	5	960	1082	-13	960	770 20
Poço Fundo	1499	1226	18	599	835	-39	1959	1201	39	840	803 4
Poços de Caldas	1262	1311	-4	570	883	-55	1137	1261	-11	587	689 -17
Pouso Alegre	1287	1120	13	839	805	4	955	1138	-19	955	781 18
Pouso Alto	1080	1221	-13	1200	880	27	1580	1208	24	1800	759 58
Pratápolis	718	666	7	717	625	13	960	999	-4	866	756 13
Santa Rita de Caldas	1800	1097	39	1200	816	32	1400	1178	16	1200	958 20
Santa Rita do Sapucaí	1500	1198	20	960	853	11	960	1187	-24	900	789 12
Santana da Vargem	1200	1278	-7	720	855	-19	1200	1181	2	720	777 -8
São Bento Abade	900	1122	-25	900	770	14	2400	1059	56	900	732 19
São Gonçalo do Sapucaí	840	1298	-55	840	867	-3	1020	1225	-20	840	781 7
São João Batista do Glória	1080	960	11	600	577	4	839	999	-19	839	689 18
São João da Mata	898	1231	-37	898	797	11	900	1197	-33	1020	786 23
São José da Barra	720	1244	-73	540	794	-47	1500	1194	20	720	809 -12
São José do Alegre	600	1249	108	600	919	-53	800	1264	-58	800	840 -5
São Lourenço	1071	1258	-17	1071	1033	4	1672	1222	27	1810	1235 32
São Pedro da União	1020	1263	-24	357	826	131	1200	1201	0	660	790 -20
São Sebastião da Bela Vista	1147	1148	0	959	842	12	960	1163	-21	959	760 21
São Sebastião do Paraíso	1380	1268	8	420	797	-90	1020	1209	-19	720	800 -11
São Sebastião do Rio Verde	1000	722	28	1000	658	34	1000	879	12	1500	866 42
São Tomás de Aquino	1680	1304	22	660	807	-22	1260	1256	0	780	816 -5
São Tomé das Letras	900	1218	-35	899	817	9	1080	1076	0	960	773 20
São Vicente de Minas	1000	788	21	666	651	2	1500	1055	30	1333	1021 23
Sapucaí-Mirim	666	1465	120	600	1049	-75	600	788	-31	800	826 -3
Senador José Bento	1068	1224	-15	1200	902	25	1800	1251	31	1518	809 47
Serrania	1500	1279	15	900	811	10	1500	1149	23	900	759 16
Serranos	1090	1077	1	1090	933	14	1090	1120	-3	1090	1010 7
Silvianópolis	1017	1219	-20	981	802	18	981	1175	-20	779	781 0
Soledade de Minas	1501	943	37	2098	884	58	1077	1378	-28	2099	1450 31
Tocos do Moji	1224	1212	1	1026	870	15	1020	1162	-14	1139	801 30
Toledo	666	485	27	666	685	-3	500	555	-11	500	471 6
Três Corações	1440	1188	18	1200	822	32	1439	1103	23	1080	759 30
Três Pontas	1380	1212	12	780	808	-4	1320	1105	16	720	714 1
Continua...											

Continuação...												
Turvolândia	1080	1238	-15	960	832	13	780	1174	-50	780	784	0
Varginha	1500	1276	15	720	862	-20	1200	1161	3	900	791	12
Venceslau Brás	1100	1187	-8	865	868	0	1140	1148	-1	780	782	0
Virgínia	1080	1365	-26	1383	1065	23	2400	1452	40	1800	1258	30

Os municípios Carvalhos, Ipuíuna, Marmelópolis, Minduri, Senador Amaral e Seritinga não estão inclusos no Anexo B pois não apresentam valor de produtividade estimada pelo IBGE.

PUBLICAÇÕES TÉCNICO-CIENTÍFICAS EDITADAS PELO INPE

Teses e Dissertações (TDI)

Teses e Dissertações apresentadas nos Cursos de Pós-Graduação do INPE.

Manuais Técnicos (MAN)

São publicações de caráter técnico que incluem normas, procedimentos, instruções e orientações.

Notas Técnico-Científicas (NTC)

Incluem resultados preliminares de pesquisa, descrição de equipamentos, descrição e ou documentação de programa de computador, descrição de sistemas e experimentos, apresentação de testes, dados, atlas, e documentação de projetos de engenharia.

Relatórios de Pesquisa (RPQ)

Reportam resultados ou progressos de pesquisas tanto de natureza técnica quanto científica, cujo nível seja compatível com o de uma publicação em periódico nacional ou internacional.

Propostas e Relatórios de Projetos (PRP)

São propostas de projetos técnico-científicos e relatórios de acompanhamento de projetos, atividades e convênios.

Publicações Didáticas (PUD)

Incluem apostilas, notas de aula e manuais didáticos.

Publicações Seriadas

São os seriados técnico-científicos: boletins, periódicos, anuários e anais de eventos (simpósios e congressos). Constam destas publicações o Internacional Standard Serial Number (ISSN), que é um código único e definitivo para identificação de títulos de seriados.

Programas de Computador (PDC)

São a seqüência de instruções ou códigos, expressos em uma linguagem de programação compilada ou interpretada, a ser executada por um computador para alcançar um determinado objetivo. São aceitos tanto programas fonte quanto executáveis.

Pré-publicações (PRE)

Todos os artigos publicados em periódicos, anais e como capítulos de livros.