

THOMÉ SIMPLICIANO ALMEIDA

**MODELAGEM AGROMETEOROLÓGICA-ESPECTRAL PARA ESTIMATIVA  
DA PRODUTIVIDADE DE CAFEIROS PARA ÁREAS IRRIGADAS DO  
NOROESTE DE MINAS GERAIS**

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

VIÇOSA  
MINAS GERAIS – BRASIL  
2013

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

T

A447m  
2013  
Almeida, Thomé Simpliciano, 1983-  
Modelagem agrometeorológica-espectral para estimativa da  
produtividade de cafeeiros para áreas irrigadas do noroeste de Minas  
Gerais / Thomé Simpliciano Almeida. - Viçosa, MG, 2013.  
xv, 63 f. : il. (algumas color.) ; 29 cm.

Orientador: Gilberto Chohaku Sedyama.  
Tese (doutorado) - Universidade Federal de Viçosa.  
Referências bibliográficas: f.57-63.

1. Meteorologia agrícola - Modelos matemáticos. 2. Café -  
Rendimento - Estimativas. 3. Plantas e solo. I. Universidade Federal de  
Viçosa. Departamento de Engenharia Agrícola. Programa de  
Pós-Graduação em Meteorologia Agrícola. II. Título.

CDD 22. ed. 630.2515

THOMÉ SIMPLICIANO ALMEIDA

**MODELAGEM AGROMETEOROLÓGICA-ESPECTRAL PARA ESTIMATIVA  
DA PRODUTIVIDADE DE CAFEIROS PARA ÁREAS IRRIGADAS DO  
NOROESTE DE MINAS GERAIS**

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

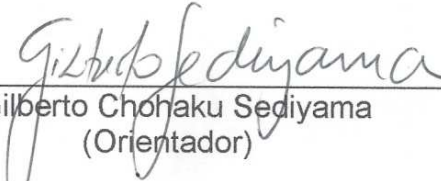
APROVADA: 19 de julho de 2013.

  
Rafael Coll Delgado

  
Williams Pinto Marques Ferreira

  
Hemley Maria Acioli Imbuzeiro

  
Everardo Chartuni Mantovani  
(Coorientador)

  
Gilberto Chohaku Sedyama  
(Orientador)

Ao meu pai Antônio,  
à minha mãe Maria,  
à minha irmã Thaís,  
ao meu irmão Thales  
e ao meu afilhado João.

## **AGRADECIMENTOS**

À Universidade Federal de Viçosa (UFV), especialmente ao Departamento de Engenharia Agrícola, pela oportunidade de realizar o curso.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (Fapemig), pela concessão da bolsa de estudos.

Ao meu pai Antônio de Pádua Almeida e à minha mãe Maria Goreti Almeida, pelo grande apoio nas horas difíceis, pelos incentivos profissionais, pelo amor, pela força e pela amizade.

Ao professor Dr. Gilberto Chohaku Sedyama, pela orientação, amizade e apoio profissional.

À Graça Freitas, pelo enorme profissionalismo, dedicação e amizade.

À Lailla Gandra, pelo imenso apoio, pelo carinho e pela presença.

À empresa Irriger<sup>®</sup> e ao professor Everardo Chartuni Mantovani, pelo apoio profissional e pelo fornecimento dos dados de campo, possibilitando o enriquecimento deste trabalho.

A todos os professores do curso de Meteorologia Agrícola, pelos valiosos conhecimentos, pela dedicação, pelo profissionalismo e pela amizade.

A todos os demais professores, colegas e funcionários que participaram da realização deste trabalho, o meu sincero agradecimento.

## **BIOGRAFIA**

THOMÉ SIMPLICIANO ALMEIDA, filho de Antônio de Pádua Almeida e Maria Goreti Almeida, nasceu em São José dos Campos, São Paulo, em 12 de maio de 1983.

Em outubro de 2006, concluiu o curso de Bacharelado e Licenciatura em Física pela Universidade Federal de Viçosa (UFV), mês e ano em que também iniciou o curso de pós-graduação em Meteorologia Agrícola pela Universidade Federal de Viçosa (UFV), em nível de mestrado, concluindo-o em 2009.

Em fevereiro de 2009, iniciou o curso de pós-graduação em Meteorologia Agrícola pela Universidade Federal de Viçosa (UFV), em nível de Doutorado.

## SUMÁRIO

LISTA DE TABELAS .....	vii
LISTA DE FIGURAS .....	viii
LISTA DE SÍMBOLOS .....	x
RESUMO .....	xiii
ABSTRACT .....	xv
1. INTRODUÇÃO .....	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	5
2.1. Requerimentos climáticos .....	6
2.1.1. Temperatura .....	6
2.1.2. Déficit hídrico .....	7
2.1.3. Fatores edáficos .....	8
2.2. Fenologia do cafeeiro .....	9
2.2.1. Bionalidade do cafeeiro .....	9
2.2.2. Fases fenológicas do cafeeiro .....	10
2.3. Manejo em cafeeiros.....	12
2.3.1. Irrigação.....	12
2.4. Sensoriamento remoto e propriedades espectrais da vegetação .....	13
2.4.1. Característica do sensor MODIS .....	16
2.4.2. Índice de vegetação (produtos MOD13 e MYD13).....	17
2.5. Modelos agrometeorológicos e agrometeorológicos-espectrais .....	19
3. MATERIAIS E MÉTODOS .....	26
3.1. Descrição da área de estudo .....	26
3.2. Dados utilizados.....	27
3.2.1. Imagens espectrais .....	27
3.2.2. Dados meteorológicos e características do solo .....	28
3.3. Método .....	30
3.4. Modelo agrometeorológico-espectral.....	31
3.4.1. Produtividade potencial .....	31
3.4.2. Determinação da componente espectral .....	33
3.4.3. Balanço hídrico .....	35
3.4.4. Penalização por déficit hídrico e pela produtividade do ano anterior .....	38
3.5. Avaliação do modelo.....	40

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	41
4.1. Caracterização dos elementos climáticos, irrigação e balanço hídrico .	41
4.1.1. Temperatura do ar .....	41
4.1.2. Precipitação, irrigação e balanço de água no solo .....	42
4.2. Comportamento dos índices NDVI e EVI .....	45
4.3. Calibração do modelo agrometeorológico-espectral e comparação da produtividade estimada com a observada .....	49
5. CONCLUSÕES .....	55
6. CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	56
REFERÊNCIAS.....	57



## LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Características do sensor MODIS (TERRA - AQUA).....	17
Tabela 2 - Dados meteorológicos utilizados no modelo.....	29
Tabela 3 - Características do solo e propriedades da cultura .....	30
Tabela 4 - Valores de $k_y$ para cada dia das imagens MODIS.....	39
Tabela 5 - Resumo dos valores de coeficiente de penalização pela produtividade do ano anterior $k_{y0}$ , do fator de colheita $cH$ e da análise estatística para cada pivô .....	53

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Produção brasileira de café arábica e robusta, dos maiores produtores, para os anos de 2009/2010 e 2010/2011.....	5
Figura 2 - Esquematização das seis fases fenológicas do cafeeiro arábica nas condições climáticas tropicais do Brasil. ....	11
Figura 3 - Espectro de reflectância de uma folha saudável. ....	15
Figura 4 - Localização das fazendas em um mapa de NDVI (2009) e os pivôs da fazenda Canduá (a) e Decisão (b). ....	27
Figura 5 - Tile dos produtos MODIS referente a área de localização das fazendas Canduá e Decisão. ....	28
Figura 6 - Fluxograma metodológico.....	31
Figura 7 - Representação dos pixels puros escolhidos para a utilização das análises dos índices de vegetação. ....	34
Figura 8 - Temperatura média mensal para região das fazendas: (a) Fazenda Canduá e (b) Fazenda Decisão. ....	41
Figura 9 - Precipitação na região das fazendas: (a) Fazenda Canduá e (b) Fazenda Decisão. ....	43
Figura 10 - Balanço hídrico, limites de armazenamento de água no solo e quantidade irrigada para o pivô 3 da Fazenda Canduá durante o ano de 2007. ....	44
Figura 11 - Balanço hídrico, limites de armazenamento de água no solo e quantidade irrigada para o pivô da Fazenda Decisão durante o ano de 2008. ....	44
Figura 12 - Índices de vegetação NDVI e EVI para os pivôs 3, 4 e 5 da fazenda Canduá durante o ano de produção 2005/2006.....	46
Figura 13 - Relação entre o NDVI e o regime de chuvas durante os anos de produção 2006/2007, 2007/2008, 2008/2009, 2009/2010 e 2011/2012.....	47
Figura 14 - Variação do NDVI para os anos de 2005 a 2011 do pivô 3 da fazenda Canduá.....	48
Figura 15 - Evapotranspiração real, evapotranspiração da cultura e valores do coeficiente de penalização hídrica para o ano de 2009/2010 do pivô 4 da fazenda Canduá.....	50
Figura 16 - Produtividades observadas e estimadas ( $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ ) pelo modelo para os pivôs 3, 4 e 5 da fazenda Canduá.....	51

Figura 17 - Produtividades observadas e estimadas (kg/ha) pelo modelo para o pivô da fazenda Decisão..... 52

Figura 18 - Produtividade estimada acumulada e porcentagem do total estimado para o ano de 2008/2009 do pivô 4 - fazenda Canduá..... 54

## LISTA DE SÍMBOLOS

$Amr_i$  - água armazenada em uma das camadas no dia atual (mm)

AVHRR - Advanced Very High Resolution Radiometer

$Arm_{i-1}$  - água armazenada do dia anterior (mm)

$C_1$  - Coeficiente de ajuste para efeito de aerossóis da atmosfera

$C_2$  - Coeficiente de ajuste para efeito de aerossóis da atmosfera

$CC$  - capacidade de campo (%)

$cH$  - fator de colheita;

$cL$  - fator de compensação de crescimento e área foliar;

$cN$  - fator de produção de matéria seca;

CONAB - Companhia Nacional de Abastecimento

$d$  - Índice "d" de concordância de Willmot

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária

EVI - Enhanced Vegetation Index

EOS - Earth Observing System

$ET$  - evapotranspiração real ( $\text{mm.d}^{-1}$ )

$ET_c$  - evapotranspiração da cultura ( $\text{mm.d}^{-1}$ )

$ET_o$  - evapotranspiração de referência ( $\text{mm.d}^{-1}$ )

$e_s - e_a$  - déficit de pressão de vapor de saturação (kPa)

$ET_i$  - evapotranspiração no dia atual ( $\text{mm.d}^{-1}$ )

$EPAM$  - Erro Percentual Absoluto Médio

$F$  - fração do dia do céu está nublado

$F_{cor}$  - fração do solo coberto pela cultura

$G$  - densidade de fluxo de calor do solo ( $\text{MJ.m}^{-1}.\text{d}^{-1}$ )

$G$  - Fator de ganho

GVI - Índice de Vegetação Global

$G$  - número de dias (decendial, quinzenal, ciclo da cultura);

HDF - Hierarchical Data Format

IAF - Índice de Área Foliar

IV - Índice de Vegetação

$ky$  - coeficiente de penalização hídrica

*kyo* - coeficiente de penalização devido à produtividade do ano anterior

*kl* - coeficiente de localização

*kc* - coeficiente da cultura

*ks* - coeficiente de estresse hídrico

L - fator de ajuste para o solo

LEPA - Low Energy Precision Application

MAPA - Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento

MODIS - Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer

NDVI - Normalized Difference Vegetation Index

NASA - National Aeronautics and Space Administration

NOAA - National Oceanic and Atmospheric Administration

NDVI<sub>max</sub> - Valor máximo Índice de Vegetação da imagem

NDVI<sub>min</sub> - Valor de mínimo do Índice de Vegetação da imagem

NCL - NCAR Command Language

ND - níveis digitais

*P* - porcentagem de área sombreada ou molhada (%)

P - precipitação (mm)

*PM* - ponto de murcha do solo (%)

*PDH* - penalização por déficit hídrico

*PPA* - penalização pela produtividade do ano anterior

REM - Radiação Eletromagnética

*r<sub>v</sub>* - Reflectância no vermelho

*r<sub>nir</sub>* - Reflectância no infravermelho próximo

*r<sub>blue</sub>* - Reflectância no azul

*Rse* - radiação ativa de ondas curtas nos dias claros (cal.d.cm<sup>-2</sup>)

*Rs* - radiação de ondas curtas observada (cal.d.cm<sup>-2</sup>)

TM - Thematic Mapper

*T* - temperatura média diária do ar a 2m de altura (°C)

*u<sub>2</sub>* - velocidade do vento a 2m de altura (m.s<sup>-1</sup>)

*Ua* - umidade atual do solo (%)

VF - valores físicos

ZAE - Zona Agrometeorológica

$Y_p$  - produtividade potencial (kg.d.ha<sup>-1</sup>)

$Y_e$  - produtividade estimada (kg.d.ha<sup>-1</sup>)

$Y_{aa}$  - produtividade do ano anterior (kg.d.ha<sup>-1</sup>)

$Y_p$  - produtividade potencial da cultura (kg.d.ha<sup>-1</sup>)

$Y_o$  - produção de matéria seca bruta (kg.d.ha<sup>-1</sup>).

$y_o$  - taxa de produção bruta de matéria seca para uma cultura padrão para dias nublados (kg.dia.ha<sup>-1</sup>)

$y_c$  - taxa de produção bruta de matéria seca para uma cultura padrão para dias claros (kg.dia.ha<sup>-1</sup>)

$y_m$  - taxa de produção (kg.hr.ha<sup>-1</sup>)

$Y_{e_i}$  - i-ésimo valor previsto ou estimado

$Y_{o_i}$  - i-ésimo valor observado

$\bar{Y}_o$  - média dos valores observados

$\Delta$  é a declinação da curva de temperatura-pressão de vapor de saturação à temperatura T (kPa.°C<sup>-1</sup>)

$\gamma$  - constante psicométrica (kPa.°C<sup>-1</sup>)

## RESUMO

ALMEIDA, Thomé Simpliciano, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, julho de 2013. **Modelagem agrometeorológica-espectral para estimativa da produtividade de cafeeiros para áreas irrigadas do noroeste de Minas Gerais**. Orientador: Gilberto Chohaku Sedyama. Coorientadores: Everardo Chartuni Mantovani, Flávio Barbosa Justino e José Marinaldo Gleriani.

A posição de destaque do café na economia brasileira torna importante a realização de pesquisas científicas que contribuam para o monitoramento da cultura e estimativa da produtividade, fornecendo subsídios a políticas de planejamento e comercialização agrícola. Neste sentido, o presente trabalho teve como objetivo o monitoramento e a estimativa da produtividade de duas fazendas cafeeiras na região Noroeste do Estado de Minas Gerais a partir do uso de um modelo agrometeorológico-espectral. O acompanhamento espectral foi realizado por meio do comportamento dos índices de vegetação EVI e NDVI, provido dos dados espectrais do sensor MODIS com o produto MOD13Q1. O modelo matemático agrometeorológico original se baseia na penalização da produtividade potencial da cultura em função do déficit hídrico, ajustados por diferentes coeficientes de sensibilidade, nos vários estádios fenológicos da cultura. A variável espectral de entrada é o Índice de Área Foliar (IAF) estimado a partir do NDVI. Outras variáveis de entrada foram os dados meteorológicos, irrigação e dados de solo, obtido em duas fazendas, sendo que a estimativa da produtividade nessas fazendas foi realizada para os anos agrícolas 2005/06, 2006/07, 2007/08, 2008/09, 2009/10, 2010/11. Os parâmetros do modelo foram ajustados com base nos dados de produtividade disponibilizados pela empresa Irriger<sup>®</sup>, para os anos agrícolas 2005/06 e 2006/07. Como resultado, os índices de vegetação apresentaram boa relação com o período fenológico da cultura, com práticas de manejo, como poda e irrigação e com o regime de chuvas. Com os ajustes dos parâmetros do modelo para as fazendas, obteve-se o valor de  $r^2$  variando entre 0,79 a 0,95, e o índice de concordância de Willmott "d" de 0,93 a 0,95, para diferentes pivôs. Os resultados satisfatórios comprovaram o potencial da aplicação do modelo

agrometeorológico-espectral para obtenção da estimativa da produtividade em fazendas cafeeiras.



## ABSTRACT

ALMEIDA, Thomé Simpliciano, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, July, 2013. **Modeling agrometeorological-spectral for to yield estimate coffee for irrigated areas in Northwest of Minas Gerais.** Adviser: Gilberto Chohaku Sedyama. Co-advisers: Everardo Chartuni Mantovani, Flávio Barbosa Justino and José Marinaldo Gleriani.

The prominent position of coffee plantation in the Brazilian economy makes it important to conduct scientific research that contributes to the monitoring and estimation of crop productivity by providing subsidies for planning policies and agricultural marketing. In this sense, the present work aimed at monitoring and estimation of the yield of two coffee farms in the northwestern part of the state of Minas Gerais from the use of a spectro-agrometeorological model. The model monitoring was carried out with spectral behavior of the vegetation indices EVI and NDVI, provided by the spectral data with the MODIS product MOD13Q1. The mathematical model was based on agro meteorological penalty of potential crop yield due to water deficit, adjusted for different sensitivity coefficients in the various growing stages. The spectral input variable was the Leaf Area Index (LAI) estimated from the NDVI. Others inputs variables were meteorological observed data, irrigation and soil data obtained in two farms, with an actual observed coffee bean yield of those farms for the years of 2005/06 2006/07 2007/08 2008/09 2009/10, and 2010/11. The model parameters were adjusted based for the yield data provided by the Irriger®, for the years of 2005/06 and 2006/07. As a result, vegetation indices showed a good relationship with the phenological of coffee tree growing stages, with management practices such as pruning and irrigation and also to the rainfall occurrence. With the parameter settings for the model to each farm, the model showed that the coefficient of determination value ranged from 0.79 to 0.95, and Willmott agreement index "d" from 0.93 to 0.95, for different center pivots. The satisfactory results indicated the potential application of the spectro-agrometeorological model to estimate the productivity in coffee plantation farms.

## 1. INTRODUÇÃO

De acordo com dados oficiais do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA) e da Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB), atualmente, o Brasil possui um campo cafeeiro estimado em 2,3 milhões de hectares, com mais de 185 mil produtores, distribuídos em 15 estados. Com cerca de 50.483 sacas produzidas em 2012, o Brasil é o maior produtor mundial de café, com 34,59% da produção mundial, acompanhado de Vietnam, Indonésia e Colômbia, que somados, ainda não alcançam a porcentagem da produção brasileira (COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO - CONAB, 2012; BRASIL, 2012). O setor cafeeiro gera no Brasil sete milhões de empregos diretos e indiretos, e é responsável por um rendimento anual de 10 bilhões de reais (EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA, 2012).

Em vista nacional, o Estado que mais se destaca na produtividade cafeeira é o estado de Minas Gerais, com cerca de 52% da produção nacional, seguido por Espírito Santo, São Paulo e Paraná. Dentre as espécies de café, as principais cultivadas e comercializadas no país são o *Coffea arabica* L. (café arábica), com 80%, considerado um café mais nobre, com melhor qualidade de bebida e aroma, e o *Coffea canephora* Pierre (café robusta), representando 20%.

Dada a sua relevância na economia brasileira, pode-se dizer que o monitoramento da cultura cafeeira também se faz importante. Devido à grande concorrência nacional e internacional exige-se dos produtores de café estratégias comerciais para a boa competitividade no mercado. Dados confiáveis sobre a produtividade cafeeira são essenciais tanto para o planejamento dos produtores quanto para ações governamentais de financiamento – seja da produção de pequena e grande escala, da bolsa de mercadoria, ou ainda ações referentes a exportações e importações.

A produtividade cafeeira relaciona-se a fatores climáticos, fisiológicos e também de manejos da cultura. Assim, o clima, primordialmente, exerce grande influência sobre a produtividade, pois temperaturas muito elevadas podem ocasionar abortos florais, culminando na produção de frutos de baixa qualidade e perda de rendimento. Vale considerar ainda que temperaturas muito baixas

acarretam danos e morte do tecido foliar (SEDIYAMA et al., 2001; DaMATTA et al., 2007). A disponibilidade hídrica, por sua vez, destaca-se entre os fatores climatológicos, ao passo que sua escassez em algumas fases fenológicas da cultura pode limitar a produtividade do cafeeiro (PICINI et al., 1999). Dentre os fatores fisiológicos considera-se a bienalidade, dois anos para completar o ciclo fenológico, a principal influência nas altas e baixas produtividades cafeeiras, ocasionando a superprodução e um esgotamento das reservas da planta, causando queda brusca na produtividade do ano seguinte (DaMATTA; RENA, 2002).

Atualmente, no Brasil, a relação entre os fatores que influenciam o bom desenvolvimento das culturas agrícolas e, conseqüentemente, a produtividade são quantificados de forma subjetiva. Tal estimativa em relação à safra, que se baseia na opinião de especialistas e técnicos da área agrícola, leva a grandes divergências na estimativa da produtividade quando comparada a produtividade real, devido às diferentes condições de manejo que cerceiam as atividades agrícolas e às possíveis variações climáticas, reduzindo assim a confiabilidade das informações.

Para evitar tal subjetividade, outro método de estimativa da safra pode ser realizado por intermédio de modelos agrometeorológicos e agrometeorológicos-espectrais. Os modelos agrometeorológicos utilizam dados climáticos e foram desenvolvidos com base em penalizações hídricas durante o ciclo da cultura, repercutindo assim na quebra da produtividade. Vários modelos agrometeorológicos foram validados e são usados para a predição da produtividade agrícola em muitos países como Estados Unidos, Índia, China, Coréia etc. (GHAHRAMAN; SEPASKHAH, 2004). Nesse contexto, destaca-se que modelos agrometeorológicos voltados à produtividade cafeeira têm sido desenvolvidos e testados em alguns trabalhos (PICINI et al., 1999; SANTOS et al., 2009; ZACHARIAS et al., 2008). Porém, características da cultura como adensamento, manejo, tipo de solo, cultivar, bienalidade e parâmetros biofísicos da cultura, como o Índice de Área Foliar (IAF), foram fatores limitantes para a parametrização dos modelos, dificultando a adequada modelagem agrometeorológica.

Nesse aspecto, a adição de dados espectrais, via sensoriamento remoto, torna-se uma alternativa para o monitoramento da cultura e obtenção

de parâmetros, como o IAF, tornando a modelagem agrometeorológica em uma modelagem agrometeorológica-espectral. A utilização de dados espectrais adicionados a modelos agrometeorológicos tem obtido bons resultados para a estimativa da produtividade de culturas agrícolas (RUDORFF; BATISTA, 1990; SUGAWARA, 2002; RIZZI, 2004; JUNGES; FOTANA, 2011; MABILANA et al., 2012).

O sensor MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*) a bordo dos satélites Terra e Aqua, tem sido uma ênfase para estudos e monitoramento da vegetação (HUETE et al., 2002; XIAO et al., 2006). A grande vantagem atribuída ao MODIS é a sua resolução temporal, possibilitando uma maior frequência de obtenção de dados durante as fases fenológicas da cultura, com mais dados livres de cobertura de nuvens.

A partir dos dados espectrais adquiridos através do sensor MODIS são desenvolvidos alguns produtos e, dentre eles, temos os índices de vegetação (IV), que se resume em uma combinação dos valores de reflectância em dois ou mais comprimento de onda e este relaciona-se com o estado da vegetação em determinada região ou época do ano. Uma característica inerente aos IV's é a redução de volume dos dados a serem analisados, pois praticamente toda a informação referente à vegetação resume-se a um valor numérico, permitindo modelar mais facilmente os dados espectrais em conjunto com as variáveis biofísicas da vegetação (RIZZI, 2004).

Os IVs gerados pelos dados do MODIS são o NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) e o EVI (*Enhanced Vegetation Index*), referente ao produto MOD13Q1, com resolução espacial de 250 metros, georreferenciado e com correções atmosféricas, sendo fornecidos gratuitamente a cada 16 dias (total de 23 imagens por ano) pela NASA (National Aeronautics and Space Administration). Estes índices fornecem comparações consistentes de dados temporais e espaciais das condições da vegetação, de interpretações biofísicas e fenológicas, além de um monitoramento da atividade fotossintética e detecção de mudança da cobertura do solo (HUETE et al., 2002).

Diante do exposto, com a possibilidade das análises espectrais obtidas através das imagens MODIS, dados meteorológicos e de solos, adquiridos em campo aliados aos modelos agrometeorológicos-espectrais, objetivou-se com

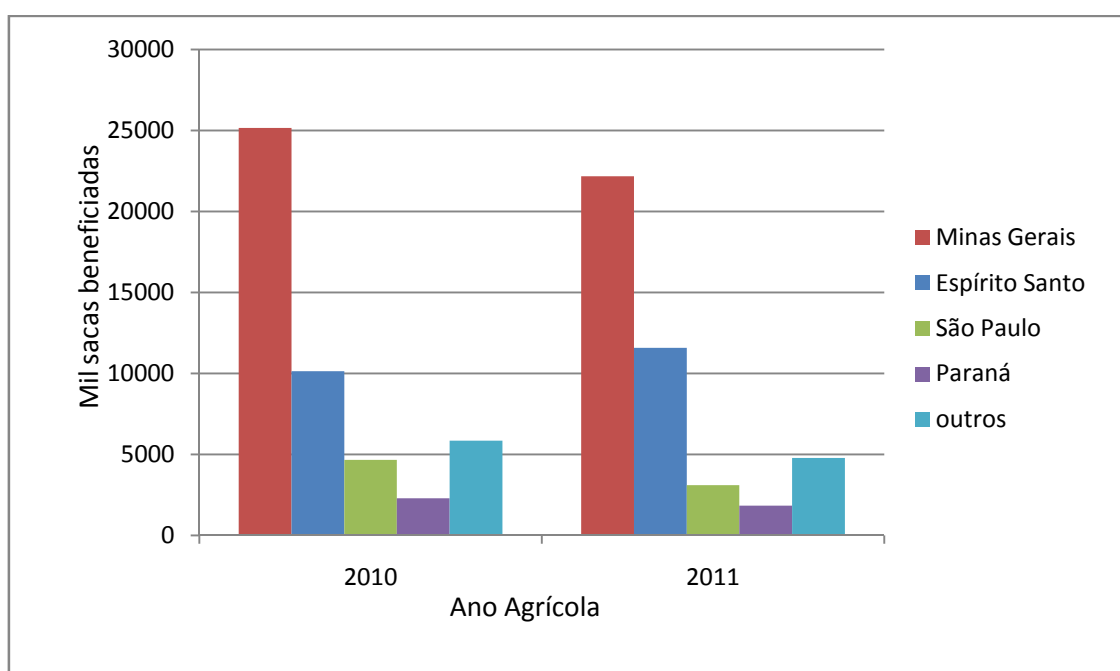
este trabalho o monitoramento e a estimativa da produtividade cafeeira em nível de propriedade rural para duas fazendas no Estado de Minas Gerais.

De forma específica, objetivou-se com este trabalho:

- Obter e converter os dados em Índice de Vegetação do produto MOD13Q1 para a região das fazendas, no período de 2005 a 2011;
- Analisar e correlacionar o comportamento dos Índices de Vegetação com os estádios fenológicos da cultura, clima e práticas de manejo ocorridas no período de estudo; e
- Parametrizar o modelo agrometeorológico-espectral proposto por Rizzi (2004) para as regiões das fazendas, monitorando e quantificando a quebra da produtividade e, assim, estimando a produtividade cafeeira nas duas fazendas.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O cafeeiro (*Coffea* sp.) é um arbusto da família Rubiaceae, com cerca de 100 espécies de *Coffea* (DAVIS et al., 2006). Dentre as espécies citadas, *C. arabica* L. (café arábica) e *C. canephora* Pierre (café Robusta) são as únicas com expressão econômica no mercado mundial. A produção de café arábica concentra-se em Minas Gerais, São Paulo, Paraná e parte do Espírito Santo (Figura 1), enquanto o café Robusta é plantado, principalmente, nos estados do Espírito Santo e Rondônia.



Fonte: Escritório Carvalhaes.

Figura 1 - Produção brasileira de café arábica e robusta, dos maiores produtores, para os anos de 2009/2010 e 2010/2011.

O café Arábica é originário das florestas tropicais da Etiópia, África, onde tem seu estado espontâneo como vegetação de sub-bosque, desenvolvendo-se assim sob sombra. Na tentativa de reproduzir as condições ecológicas, presumidamente mais adequadas à espécie, os primeiros cafezais foram instalados sob sombra. No entanto, cafeeiros cultivados a pleno sol produzem satisfatoriamente, e na maioria dos casos, mais que os plantios à sombra (DaMATTA; RENA, 2002). Ultimamente, a cultura de café tem sido feita

em pleno sol, o que é um dos fatores primordiais para a bienalidade da produção do cafeeiro.

## **2.1. Requerimentos climáticos**

### **2.1.1. Temperatura**

Para o entendimento dos requerimentos climáticos faz-se necessário o levantamento de elementos encontrados nas regiões de origem das espécies e regiões onde a cultura é explorada com sucesso comercial (CAMARGO, 1985).

Para o café *Arábica*, as temperaturas médias anuais devem variar entre 18°C e 21°C sem grandes variações sazonais (ALÈGRE, 1959). Temperaturas acima de 23°C podem acelerar o desenvolvimento e a maturação dos frutos, podendo assim, comprometer a qualidade. Temperaturas iguais ou superiores a 34°C favorecem a formação de “estrelinhas”, i.e., flores abortadas, diminuindo a produtividade do cafeeiro (SEDIYAMA et al., 2001; DaMATTA et al., 2007).

Grandes amplitudes térmicas diárias culminam, especialmente, quando associadas a altas irradiâncias, na escaldadura das folhas (DaMATTA; RENA, 2002). Ao relacionar temperaturas médias anuais inferiores a 18°C às possíveis ocorrências de geadas e ventos frios percebe-se que estes podem limitar a exploração econômica da cafeicultura (SEDIYAMA et al., 2001).

O registro de temperaturas iguais ou inferiores a 2°C, no abrigo meteorológico, implicam na possibilidade de formação de geadas de radiação, podendo, nessa temperatura, ocorrer sintomas típicos de "crestamento" foliar nas folhas novas no período de inverno, por ficarem suscetíveis à influência de ventos moderados a fortes, com temperaturas baixas (SEDIYAMA et al., 2001). Pezzopane (2004) cita que temperaturas de -2°C próximas às folhas provocam danos aos tecidos e que temperaturas de -3 a -4°C podem acarretar na morte dos tecidos.

A formação de orvalho durante a noite, seguida de altas temperaturas durante o dia, causa danos ao cafeeiro. As folhas diretamente expostas ao orvalho durante a noite apresentam uma fina camada de água sobre sua superfície; a exposição direta dessas folhas ao calor intenso durante as

primeiras horas do dia resulta em sintomas de escaldadura seguidas pelo amarelecimento e senescência prematura de folhas nas plantas. Cabe ressaltar que a condição de estresse hídrico no solo, aliado à exposição do cafeeiro à alta intensidade luminosa e alta temperatura atmosférica, provoca o murchamento das folhas, ao passo que estas entram em processo de perda de clorofila, aparentemente, devido à degeneração de proteínas protetoras e a inibição da regeneração de proteínas (ZAMBOLIM et al., 2006).

Em relação à aptidão térmica no estado de Minas Gerais, há condições favoráveis ao plantio de café em quase metade do Estado. Em proporções menores, parte das regiões Sul, Triângulo Mineiro, Norte e Nordeste do Estado apresentam condições desfavoráveis ao cultivo de café. Há na região Sul áreas que possuem temperaturas normais, abaixo da temperatura mínima recomendável para o café, desfavorecendo assim o cultivo desta cultura. Nas regiões Norte e Nordeste, há ocorrência de temperaturas acima da máxima recomendável para a cultura do café, o que também desfavorece o seu cultivo (EVANGELISTA et al., 2002; DELGADO et al., 2012).

### **2.1.2. Déficit hídrico**

Segundo Picini et al. (1999), o déficit hídrico é capaz de alterar o metabolismo da planta e destaca-se entre os fatores climáticos como um daqueles capazes de limitar a produção de cafeeira, dada sua recorrência em grandes áreas cultiváveis.

No período de vegetação e frutificação, o cafeeiro exige maior disponibilidade de água, enquanto na fase de colheita e repouso essa exigência é menor, momento este em que se houver uma pequena deficiência hídrica, a planta não é tão prejudicada (CAMARGO; CAMARGO, 2001).

De acordo com Matiello et al. (1991), chuvas anuais de 1200 mm podem ser consideradas adequadas ao bom desenvolvimento do café arábica. Caso a deficiência hídrica seja inferior a 150 mm (o que caracteriza um pequeno déficit hídrico), porém com temperaturas médias superiores a 23°C, considera-se a situação inapta ao cultivo, devido à ocorrência de altas temperaturas. Esta condição restringe a frutificação, resultando em baixa produtividade. Porém, os períodos curtos de seca parecem ser importantes



para o crescimento das raízes, maturação dos ramos formados na estação chuvosa precedente e, principalmente, para a diferenciação floral e maturação dos frutos (SEDIYAMA et al., 2001).

Segundo Camargo e Camargo (2001), a fase da florada 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, responsável pela acumulação de cerca de 350 mm de evapotranspiração. Caso ocorra estiagem forte nessa fase, o estresse hídrico poderá prejudicar o crescimento dos frutos e resultar na ocorrência da quebra de produção, devido à redução do tamanho do grão. Todavia, os cafeeiros que recebem água com muita frequência na fase da florada têm floração indefinida. Conclui-se que uma florada principal ocorre quando se verifica um período de restrição hídrica, seguido de chuva ou irrigação abundante.

Delgado et al. (2012) e Evangelista et al. (2002) observaram que mais da metade do estado de Minas Gerais é apta ao cultivo de café, ao considerar-se a relação entre cultivo e deficiência hídrica, abrangendo mais as regiões centro-sul. As regiões do Triângulo Mineiro e Alto Paranaíba apresentam menores índices de chuva, porém pode-se considerar que o déficit médio anual de água no solo não inviabiliza o cultivo do café. Na medida em que se aproxima da região Norte do Estado, observam-se restrições ao cultivo do café, em razão dos menores índices de precipitação pluvial e pela maior demanda evapotranspirativa, fatores que, de modo geral, condicionam baixo armazenamento de água no solo restringindo, portanto, o cultivo do café.

Em regiões que apresentam o inverno seco, a maturação dos frutos processa-se muito rapidamente, influenciando diretamente na disponibilidade de nutrientes e reservas da planta: causando acentuado esgotamento e seca dos ramos, que pode estar associada à prejuízos nas produções seguintes (ZAMBOLIM et al., 2006).

### **2.1.3. Fatores edáficos**

O solo, por meio de suas características físicas, químicas e biológicas, deve fornecer suporte adequado ao cafeeiro, influenciando diretamente sobre o volume e a profundidade das raízes e, assim, condicionando melhor o

desenvolvimento e a produção na parte superior da planta. São de importância nos solos a disponibilidade de água e ar, que tem dependência das condições físicas do solo, e a presença de nutrientes, que está ligado com as condições químicas e biológicas do solo (MATIELLO, 1991).

Quanto às condições físicas internas, tem-se a textura com influência direta sobre a retenção de nutrientes, infiltração e armazenamento da água, arejamento do solo, temperatura mais interna e superficial do solo, e a resistência à erosão. Observa-se que o adensamento do solo prejudica o cafeeiro tanto em épocas secas como chuvosas, pois as raízes não se aprofundam, explorando apenas uma pequena porção do solo. Desse modo, a planta ficará mais susceptível a seca.

Nas épocas de chuva, as camadas mais adensadas dificultam a drenagem da água e, então, o cafeeiro sofre por falta de arejamento. O cafeeiro necessita de pelo menos 1,2 m de profundidade no solo, em boas condições de textura e estrutura do solo, para que possa manter um sistema radicular satisfatório. Essa profundidade é mais importante em locais de clima seco, a menos que utilize técnicas de irrigação (MATIELLO, 1991).

## **2.2. Fenologia do cafeeiro**

### **2.2.1. Bienalidade do cafeeiro**

A maioria das plantas emite as inflorescências na primavera e frutifica no mesmo ano fenológico. O cafeeiro arábica é uma planta especial, que leva dois anos para completar o ciclo fenológico, ciclo este conhecido como bienalidade (CAMARGO; CAMARGO, 2001).

O cafeeiro exposto a pleno sol apresenta maior estímulo à emissão de gemas florais em detrimento de gemas vegetativas, assim como maior número de nós formados por ramo (DaMATTA; RENA, 2002).

Como produz poucas flores em ambiente sombreado (nativo), o cafeeiro não desenvolve mecanismos para contrabalancear a carga de frutos à disponibilidade de carboidratos e minerais, via abscisão de seus frutos (CANNELL, 1985). Assim, a espécie teria evoluído no sentido de levar a cabo o enchimento de todos os frutos formados após a sua fase de expansão e,

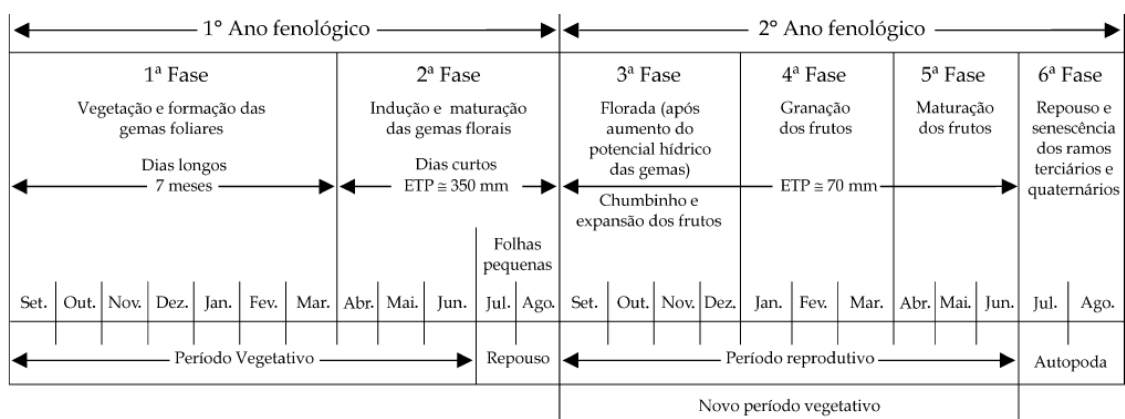
portanto, apresentando uma superprodução devido à profusão da iniciação floral e à incapacidade de remoção natural dos frutos que, associadas às forças do dreno do endosperma das sementes, promovem a exaustão de suas reservas. Ao fim do processo, há, então, redução do crescimento dos ramos, o que prejudica a produção do ano seguinte (DaMATTA; RENA, 2002). A menor produção de grão do ano seguinte permitir-se-ia a recuperação das reservas do sistema tronco – raiz e do crescimento vegetativo das plantas – proporcionando, novamente, condições adequadas para outra carga pesada de frutos no ciclo subsequente de produção (DaMATTA; RENA, 2002).

Zambolim et al. (2006) afirmam que fatores fisiológicos, nutricionais, genéticos, patológicos e ambientais que ocasionem redução da área foliar e, assim, da fotossíntese da planta inteira, podem causar a seca e a morte dos ramos e um esgotamento da planta, levando à bienalidade da produção.

O sistema radicular do cafeeiro pode também sofrer com o efeito das altas cargas de frutos, pois são drenos fracos em relação aos frutos e, portanto, menos carboidratos são disponibilizados para o crescimento da raiz – limitando a absorção de água e nutrientes, tornando a planta mais sensível a estresses abióticos, como o déficit hídrico; fator este que intensifica a bienalidade da produção (RENA; CARVALHO, 2003).

### **2.2.2. Fases fenológicas do cafeeiro**

Para o entendimento das fases fenológicas do cafeeiro, Camargo e Camargo (2001) apresentaram um quadro da fenologia do café arábica (Catuaí e Mundo Novo) contendo seis fases, no período de dois anos, de acordo com as condições climáticas do Brasil (Figura 2).



Fonte: Camargo e Camargo (2001).

Figura 2 - Esquematisação das seis fases fenológicas do cafeeiro arábica nas condições climáticas tropicais do Brasil.

A primeira fase corresponde à vegetação e à 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 à granação dos frutos, quando os líquidos internos solidificam-se, dando forma aos grãos. Essa fase 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 à senescência dos ramos produtivos não primários, que secam e morrem, conhecido como “autopoda” dos cafeeiros. Na primavera do ano civil seguinte brotam novos ramos vegetativos, que se transformam em reprodutivos, permitindo nova produção.

A metodologia proposta por Camargo e Camargo (2001) 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. O esquema permite também que se reconheça mais facilmente as melhores épocas de aplicação de tratamentos fitossanitários e a execução das diversas operações agrícolas necessárias.

## **2.3. Manejo em cafeeiros**

### **2.3.1. Irrigação**

O plantio de café no Brasil situa-se geralmente em regiões nas quais as condições climáticas e o balanço hídrico são favoráveis, desse modo, observa-se que as regiões de estiagem prolongada são marginalizadas para a prática da cafeicultura. Porém, devido ao progresso técnico-científico e à utilização de práticas agrícolas modernas, como a irrigação, essas regiões, como o Noroeste de Minas Gerais, já estão sendo incorporadas para o plantio de café, incluindo o *C. arabica*.

O sistema de produção de café irrigado, usado principalmente nas regiões de cerrado, parte do pressuposto de que a irrigação do cafeeiro deve ser feita durante todo o ano e com alta frequência, chegando ao ponto de serem recomendadas irrigações diárias. No entanto, o cafeeiro arábica, originado de regiões tropicais, com um período seco bem definido de três a quatro meses, está em condições diferentes daquelas verificadas em irrigações durante todo o ano no cerrado. Nesse ponto, as plantas não conseguem ajustar sua fenologia de modo a resultar em floração e maturação uniformes.

Tal tipo de manejo sujeita o cafeeiro à condição de encharcamento do solo, prejudicando não só o seu sistema radicular, mas compromete também sua capacidade de absorção de água e nutrientes, além de provocar queimaduras nas folhas e nos botões florais, repercutindo também na redução da produção (GUERRA et al., 2007).

Desse modo, o manejo da irrigação deve submeter o cafeeiro a um estresse hídrico controlado para uma florada única, uniforme e fora do período

de estresse hídrico, a fim de suprir as necessidades hídricas do cafeeiro. Através desses cuidados, as plantas podem expressar seu potencial de crescimento e produção (GUERRA et al., 2007).

Vale destacar, também, que técnicas de irrigação em áreas aptas ao cultivo como, por exemplo, no Sul de Minas, permitem o controle da uniformização da florada com a utilização do estresse hídrico controlado, a indução da florada no momento mais adequado, evitando-se altas temperaturas do final de setembro, o pegamento dos chumbinhos, quando ocorrer falta de chuvas após a florada e, ainda suplementar as chuvas quando ocorrer veranicos durante as fases de crescimento e desenvolvimento dos grãos (GUERRA et al., 2007).

A ocorrência de estiagens estacionais e deficiências hídricas acentuadas na fase de frutificação ou formação do grão afetam o crescimento deste; quando há a ocorrência na fase de granação, quando os grãos estão se solidificando internamente, estes poderão ficar “chochos” ou malgranados (MATIELLO, 1991). Percebe-se que diferentes regiões de plantio têm apresentado essa deficiência hídrica no período de frutificação do cafeeiro. Dentre essas regiões, destaca-se as áreas de cerrado no Triângulo Mineiro e em zonas contíguas de Minas Gerais e Goiás. Nessas regiões, a prática da irrigação apresenta resultados positivos, apontando para um aumento significativo na produtividade (MATIELLO, 1991).

Natalino et al. (2007) realizaram um estudo de irrigação em uma região apta ao cultivo do café, em Lavras, Sul de Minas Gerais, e observaram o aumento significativo na produtividade do cafeeiro *Coffea arabica* L. cv. Rubi. O aumento da produtividade foi superior a 50% em relação à cafeeiros não irrigados naquela mesma área. Os autores observaram também que as plantas irrigadas apresentaram maior desenvolvimento vegetativo no período seco (março a outubro).

#### **2.4. Sensoriamento remoto e propriedades espectrais da vegetação**

Segundo Novo (2010), sensoriamento remoto é a utilização conjunta de sensores, equipamento para processamento de dados e equipamentos de transmissão de dados colocados a bordo de aeronaves, espaçonaves, ou

outras plataformas, com o objetivo de estudar eventos, fenômenos e processos que ocorrem na superfície do planeta Terra a partir do registro e da análise das interações entre a radiação eletromagnética (REM) e as substâncias que compõem em suas mais diversas manifestações.

Para o sensoriamento remoto que utiliza a radiação solar como fonte de iluminação, uma fração dessa radiação chega até a superfície terrestre, depois de sofrer interação (espalhamento, reflexão e absorção) com a atmosfera terrestre, atingindo objetos terrestres podendo ser absorvida, refletida ou transmitida. A parte da radiação refletida é o alvo de estudo, o qual incide no sensor contendo informações das propriedades físicas e químicas inerentes aos alvos imageados, chamados de propriedades espectrais dos alvos.

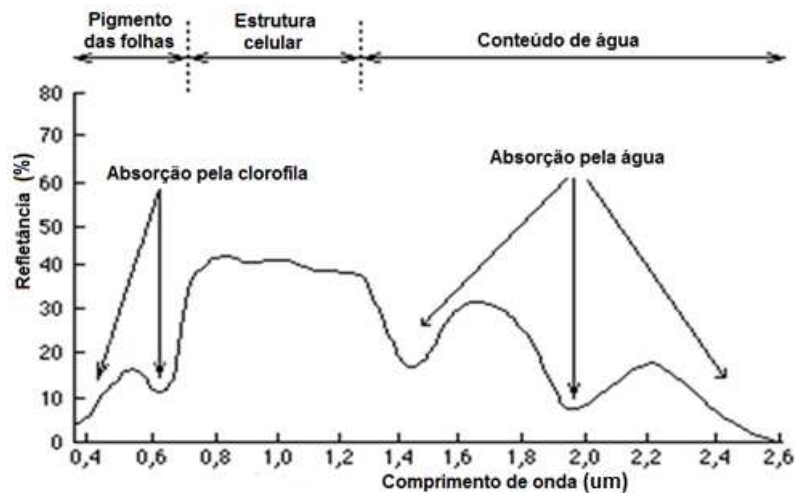
Para o estudo da interação da radiação eletromagnética (REM) com dosséis vegetativos, observa-se a variação dos efeitos fisiológicos e geométricos sobre as respostas espectrais e, a partir dessas, inferir parâmetros da vegetação tais como biomassa, albedo, fração da radiação fotossinteticamente ativa e IAF (PARKINSON; GREENSTONE, 2000).

A folha constitui o principal constituinte da vegetação na interação com a REM, na qual a resposta espectral está relacionada com a composição química, morfológica, fisiológica e a umidade interna contida nas mesmas.

Cada faixa espectral da REM possui determinado comportamento ao interagir com os elementos da folha. Na faixa do visível (400 – 720 nm) observa-se grande absorção dos pigmentos existentes nas folhas, como clorofila, carotenos e xantofilas.

A absorção é mais intensa na faixa do azul (aproximadamente 440 nm) e na faixa do vermelho (próximo de 650 nm) devido, exclusivamente, à absorção pela clorofila.

Em relação ao infravermelho próximo (NIR) (720 – 1100 nm) há uma pequena absorção da radiação e considerável espalhamento interno, apresentando como característica principal a alta refletividade. A absorção pela água é baixa nessa região do espectro. No infravermelho médio (1100 - 3200 nm) tem-se uma grande absorção devido à presença de água líquida (Figura 3).



Fonte: Adaptado em Ponzoni e Shimabukuro (2007).

Figura 3 - Espectro de reflectância de uma folha saudável.

No que se refere aos dosséis vegetativos, a variação da reflectância da cobertura vegetal em diferentes bandas espectrais depende principalmente da quantidade de folhas, das características ópticas (reflectância de folhas e galhos) e da arquitetura do dossel (Índice de Área Foliar - IAF, distribuição angular das folhas e galhos).

Entretanto, observa-se em alguns estudos que a forma da curva da reflectância de um dossel é semelhante à curva da reflectância das folhas isoladas que compõem o dossel (GOEL, 1988; JENSEN, 2000; PONZONI E SHIMABUKURO, 2007). A resposta da reflectância também depende dos ângulos de iluminação e de visada (PONZONI; SHIMABUKURO, 2007).

Alterações na curva espectral de determinada vegetação podem indicar mudança. Por exemplo, o envelhecimento das folhas causa aumento da reflectância na faixa de vermelho e azul; aumento do teor de umidade causa redução da reflectância nos comprimentos 1400 e 1900 nm.

As faixas do vermelho e do infravermelho próximo apresentam comportamento antagônico em relação à mudança biofísica da vegetação. Durante o período de crescimento da vegetação, há uma redução da reflectância na faixa do vermelho, devido à absorção da radiação pela clorofila. Por outro lado, a mudança na estrutura da folha e aumento do índice foliar causa uma elevação na reflectância no infravermelho próximo.



Alguns estudos apontam a potencialidade do sensoriamento remoto em áreas cafeeiras. Análises de correlação entre parâmetros culturais e a resposta espectral de cafezais (*Coffea arabica*). Dentre eles destacam-se o realizado Epiphanio et al. (1994) na região sul de Minas Gerais com o uso das imagens Landsat TM, onde indicaram os parâmetros que mais se correlacionam com a reflectância das bandas do sensor TM, sendo que os parâmetros altura média das árvores de café e ano da poda foram os mais correlacionado com a reflectância nas bandas do azul, verde e vermelho, do sensor TM, isso devido à agregação das informações relacionadas à fitomassa e ao sombreamento dentro do cafezal.

Os parâmetros do solo apresentaram correlação positiva em relação às bandas verde e vermelho, e negativa com a banda do infravermelho próximo. Os parâmetros relacionados às características da planta, como média da altura das árvores, percentagem da cobertura do terreno por árvores, ano e tipo da poda, idade da planta e vigor vegetativo, mostraram-se mais correlacionados estatisticamente com a reflectância do cafezal, em comparação com os parâmetros relacionados ao substrato, como gradeação, percentagem do solo exposto no substrato, reflectância composta do solo e percentagem de cobertura do substrato com ervas daninhas (EPIPHANIO et al., 1994). Os autores não indicaram diferença estatística entre a reflectância dos dois cultivares no estudo, Catuaí e Mundo Novo.

Em outro estudo, valores observados da reflectância de lavouras cafeeiras tiveram o seu valor elevado para em períodos secos, quando aliado à derriça das folhas durante a colheita. Esse fato proporcionou uma menor absorção da radiação eletromagnética e maior contribuição do solo para os valores da reflectância, observada principalmente na banda do vermelho (MOREIRA et al., 2004).

#### **2.4.1. Característica do sensor MODIS**

O sensor MODIS está a bordo dos satélites TERRA e AQUA, que fazem parte do programa *Earth Observing System* (EOS). O sensor foi projetado para atuar em três campos diferentes: atmosfera, oceano e terra, com bandas, resoluções espectrais e espaciais para atender às necessidades

desses três ambientes e oferecer uma cobertura global quase diariamente. O MODIS possui 36 bandas espectrais situadas entre 400 nm a 14.400 nm do espectro eletromagnético.

Os dados podem ser encontrados em três resoluções espaciais diferentes, que são de 250 m para duas bandas, 500 m para cinco bandas e 1.000 m para 29 bandas (JUSTICE et al., 2002). Resumidamente tem-se na Tabela 1 as características do sensor MODIS.

Tabela 1- Características do sensor MODIS (TERRA - AQUA)

Órbita	705 km, heliossíncrona, polar, 10h 30 min (TERRA) e 13 h30 min (AQUA)
Resolução espacial no NADIR	250 m (2 bandas), 500 m (5 bandas), 1.000 m (29 bandas)
Repetição de cobertura	Diária para latitudes superiores a 30° e a cada dois dias, para latitudes inferiores a 30°
Quantização	12 bits
Faixa espectral	0,4 µm – 14,4 µm

Fonte: Jensen (2000).

Os produtos MODIS possuem georeferenciamento automático e a correção prévia para aerossóis atmosféricos, que facilitam o uso dessas imagens em relação aos tradicionais sensores remotos de alta resolução.

Os dados do MODIS para as florestas tropicais têm oferecido uma melhor resposta em relação à influência das nuvens e maior habilidade para a investigação de processos ecológicos temporais (LATORRE et al., 2003).

#### **2.4.2. Índice de vegetação (produtos MOD13 e MYD13)**

Diversos índices de vegetação têm sido propostos com o objetivo de explorar as propriedades espectrais da vegetação. Tais índices podem ser utilizados para estimar parâmetros biofísicos da vegetação como biomassa e quantidade de clorofila (PRICE; BAUSCH, 1995).

Os produtos de Índice de Vegetação do MODIS (MOD13 – plataforma TERRA e MYD13 – plataforma AQUA) baseiam-se nos dados de reflectância da superfície (MOD09 e MYD09) e a composição temporária destes geram os produtos de 16 dias, nas resoluções espaciais de 250, 500 ou 1.000 m (HUETE et al., 2006).

Este produto fornece dois tipos de índices de vegetação, o NDVI e o EVI. O cálculo do NDVI e do EVI é feito por meio das Equações 1 e 2, respectivamente:

$$NDVI = \frac{(r_{nir} - r_v)}{(r_{nir} + r_v)} \quad (1)$$

em que  $r_v$  é a reflectância no vermelho e  $r_{nir}$  é a reflectância no infravermelho próximo.

$$EVI = G \times \frac{(r_{nir} - r_v)}{(r_{nir} + C_1.r_v - C_2.r_{blue} + L)} \quad (2)$$

em que,  $r_{blue}$  é a reflectância no azul,  $C_1= 6$  e  $C_2= 7,5$  são coeficientes de ajuste para efeito de aerossóis da atmosfera,  $G = 2,5$  fator de ganho e  $L = 1$  (solo totalmente coberto) é fator de ajuste para o solo (HUETE et al., 2002).

Para o monitoramento da vegetação, esses dois índices são bastante utilizados. Enquanto o NDVI é sensível à clorofila, o EVI é mais sensível às variações na resposta estrutural do dossel, incluindo o IAF, a fisionomia da planta e a arquitetura do dossel. Os dois índices fornecem informações sobre detecção de mudanças vegetais e parâmetros biofísicos do dossel e se complementam em estudos globais da vegetação (HUETE et al., 2002).

Relacionando os índices de vegetação com áreas cafeeiras, Rafaelli et al. (2006) verificaram a mudança nos valores de NDVI em lavoura cafeeiras causado pela ocorrência de geadas em Cornélio Procópio, estado do Paraná, utilizando dados do sensor MODIS/TERRA, quando houve uma queda do índice de 0,58 para 0,48, indicando perda do vigor vegetativo, provocada pela danificação do sistema de absorção da radiação eletromagnética, ou seja,

redução das atividades fotossintéticas do cafeeiro. O efeito das alterações no vigor vegetativo pôde ser identificado três dias após a ocorrência da geada.

Santos et al. (2009) identificaram a variação do NDVI para o cafeeiro, no município de Três Pontas, Sul de Minas Gerais, de acordo com a pluviosidade local. O NDVI teve um aumento no seu valor nos períodos de chuva, indicando o aumento do vigor vegetativo.

Já para o período de estiagem, o NDVI acusou queda de 14% no seu valor médio, indicando a resposta do cafeeiro aos períodos secos. Em outro estudo utilizando o NDVI para a determinação da estiagem agrícola em áreas cafeeiras, Volpato et al. (2009a) observaram o decréscimo do NDVI em períodos de estiagem (0,455 período seco) e o aumento do índice com o aumento das chuvas (0,822 período chuvoso). Os autores também verificaram que valores de NDVI menores que 0,7 podem representar estiagem maior que vinte dias, sendo um risco para o desenvolvimento de cafeeiros em período de crescimento e frutificação, que vai de outubro a maio, na região estudada.

Em relação à variação do EVI para o regime de chuvas, Volpato et al. (2009b) obtiveram reduções no valor do EVI no período de seca (0,32) e aumento do índice para períodos chuvosos (0,78), porém, o EVI mostrou-se mais sensível em relação à ocorrência de chuvas do que o NDVI.

## **2.5. Modelos agrometeorológicos e agrometeorológicos-espectrais**

Os modelos de análise da cultura e seu meio, ou modelos agrometeorológicos, visam representar as relações existentes entre a resposta da planta e as variáveis ambientais durante todo o ciclo da cultura.

Esses modelos requerem detalhado conhecimento sobre o que ocorre na interação entre a planta, o solo e o meio atmosférico, tais como: fluxo de água no solo e na planta, evapotranspiração, radiação solar etc.

Os métodos utilizados para estabelecer a relação planta-clima variam desde a simples correlação, até modelos complexos, ou seja, funções de produção que podem considerar diferentes parâmetros envolvidos no sistema produtivo (RUDORFF, 1990).

Os modelos agrometeorológicos além de fornecerem dados para alimentar os sistemas de previsão de safras agrícolas, permitem também a

identificação do estresse hídrico ao longo do ciclo da cultura, cujos impactos na produtividade podem ser detectados e avaliados (CAMARGO et al., 1999) e sua aplicabilidade é válida para diversas culturas.

As modelagens com base em regressões lineares entre dados meteorológicos e produtividades foram realizadas para algumas culturas como milho (CHEN; FONSECA, 1981), soja (COSTA, 1988) e café (CARVALHO et al., 2004), incluindo análises estatísticas para a identificação dos fatores mais influentes na produtividade da cultura em questão. Esses modelos incluíram a utilização de dados meteorológicos como temperatura, umidade relativa do ar, radiação solar, e o conceito de graus dias. Nesses modelos de regressão, a análise dos resultados não se baseia na explicação dos fenômenos envolvidos na relação entre os elementos, mas sim nas relações derivadas a partir de uma regressão múltipla.

Dessa forma, esses modelos necessitam de um número elevado de dados para o seu desenvolvimento e eficácia, e tais modelos possuem grande restrição quanto à extrapolação de seus resultados, apesar de possuírem enorme potencial na previsão de safra.

Outros modelos agrometeorológicos, modelos matemático-mecanísticos, não utilizam a base estatística para a identificação dos elementos meteorológicos mais influentes na produtividade, mas sim o conhecimento acumulado sobre uma cultura específica.

Esses modelos consideram que cada elemento climático exerce certo controle na produtividade da cultura, funcionando como um fator de eficiência, em que a produção final é uma função da produção potencial da região e da sua interação com os elementos meteorológicos juntamente com coeficientes parametrizados. Também, consideram a fase fenológica das culturas e a influência dos fatores meteorológicos em cada fase.

Dentre os modelos matemáticos-mecanísticos, Doorenbos e Kassan (1979) desenvolveram um modelo onde a metodologia para a estiva da produtividade de uma cultura é uma função da disponibilidade de água no solo (Equação 3).

A influência do estresse hídrico sobre a produtividade da cultura é quantificada relacionando a produtividade potencial ( $Y_p$  - produção sobre

nenhum estresse hídrico, térmico e ausência de pragas) com o déficit da evapotranspiração relativa  $\left(1 - \frac{ET}{ET_c}\right)$ , por meio de um fator de resposta à produtividade ( $ky$ ).

$$Y_e = Y_p \left[ 1 - ky \left( 1 - \frac{ET}{ET_c} \right) \right] \quad (3)$$

em que  $Y_e$  é a produtividade estimada ( $\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1}$ );  $Y_p$ , a produtividade potencial da cultura ( $\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1}$ );  $ky$ , o coeficiente de penalização hídrica;  $ET$ , a evapotranspiração real ( $\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$ ); e  $ET_c$ , a evapotranspiração da cultura ( $\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$ ).

O modelo proposto por Doorenbos e Kassan (1979) considera que, se  $ET = ET_c$  (suprimento adequado de água para a cultura), a produtividade não será penalizada, enquanto que, se a evapotranspiração real for menor que a da cultura, a produtividade real também será menor do que a potencial. Os valores de  $ky$  são parametrizados e possuem diferentes valores para cada fase fenológica da cultura, visto que, a demanda hídrica da cultura está relacionada com a fase fenológica em que ela se encontra.

O coeficiente de penalização hídrica ( $ky$ ) é calibrado e validado em diversos estudos, apresentando grande eficácia na aplicação para a estimativa da produtividade de diversas culturas em várias localizações nos Estados Unidos, Índia, China etc. (GHAHRAMAN; SEPASKHAH, 2004). Por outro lado, Kaboosi e Kaveh (2012) apontam grandes discrepâncias no valor do coeficiente, mesmo para uma mesma cultura, encontrados em diferentes estudos. Os autores indicam que essa diferença é devido a diferentes números de fases fenológicas e distintos métodos experimentais de cada trabalho.

Diferentes métodos para o cálculo da evapotranspiração de referência ( $ET_o$ ), evapotranspiração da cultura ( $ET_c$ ) e evapotranspiração real da cultura ( $ET$ ) também levam a valores de  $ky$  distintos, acarretando em erros na calibração do modelo. O método mais indicado para o cálculo da  $ET_o$  é o padrão FAO 56 (ALLEN et al., 1998) e a utilização do balanço de água no solo para a estimativa da  $ET$  (KABOOSI; KAVEH, 2012).

Para a cultura do café, a utilização do modelo de Doorenbos e Kassan (1979) traz dificuldades na calibração dos valores de  $k_y$  devido à bienalidade do cafeeiro, no qual a produtividade da cultura é afetada pela produtividade do ano anterior. Nesse sentido, Picini et al. (1999) adicionaram ao modelo de Doorenbos e Kassan (1979) uma penalização na estimativa da produção de cafeeiros  $1 - k_{yo} \left( \frac{Y_{aa}}{Y_p} \right)$ , em que  $Y_{aa}$  é a produtividade do ano anterior (kg/ha),  $Y_p$  é a produtividade potencial da cultura (kg/ha),  $k_{yo}$  é o coeficiente de penalização devido à produtividade do ano anterior.

Assim, o modelo agrometeorológico que considera a penalização por déficit hídrico e a penalização pela produtividade do ano anterior para a estimativa da produtividade de cafeeiros torna-se:

$$\left( 1 - \frac{Y_e}{Y_p} \right) = \left[ 1 - k_{yo} \left( \frac{Y_{aa}}{Y_p} \right) \right] \times \left[ 1 - k_y \left( 1 - \frac{ET}{ET_c} \right) \right] \quad (4)$$

O modelo pode ser utilizado como somatório ou produtório da penalização por déficit hídrico (segundo termo da Equação 4), permitindo a estimativa da produtividade parcial por período fenológico ou período pré estabelecidos, como decendiais e quinzenais.

Com a adição do termo de penalização devido à produtividade do ano anterior, Picini et al. (1999) testaram os modelos somatório e produtório da penalização hídrica. Os autores concluíram que o modelo somatório apresentou-se como o mais adequado para a estimativa da produtividade cafeeira e a inclusão da penalização pela produtividade do ano anterior ao modelo mostrou-se relevante para tal estimativa.

Santos e Camargo (2006), em um estudo feito à nível de planta, talhão e propriedade agrícola, fizeram um monitoramento hídrico com escala decendial, onde foram testadas diversas combinações de coeficientes de penalização hídrica ( $k_y$ ) para cada estágios fenológicos, indução floral, florescimento, granação e maturação de cafeeiros, apontando os estádios onde a cultura é mais sensível ao déficit hídrico.

No mesmo trabalho, os coeficientes de penalização pela produtividade do ano anterior ( $k_o$ ) foram calibrados para a região de estudo e indicaram diferentes valores para anos de alta e baixa produção, 0,60 para anos de alta produção (pequena penalização devido à baixa produção do ano anterior) e 1,05 (grande penalização devido à alta produção do ano anterior).

Porém os modelos apresentados até o momento não consideram variantes como diferenças de cultivares, manejo, tipo de solo, fertilidade e ocorrência de pragas aos modelos de previsão. Essa parte das questões pôde ser considerada a partir da incorporação de um termo espectral integrado ao modelo agrometeorológico para as estimativas de parâmetros biofísicos da vegetação.

Fontana et al. (1998) utilizaram o Índice de Vegetação Global (GVI), o qual é obtido a partir de uma amostragem do índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI), usando as bandas 1 e 2 do sensor AVHRR/NOAA e Melo (2003) utilizou o NDVI, de forma aditiva ao modelo agrometeorológico proposto por Jensen (1968):

$$Ye = a_o + a_1 Y_{espectral} + a_2 Y_{agro} \quad (5)$$

em que  $Y_{espectral}$  é correspondente aos dados espectrais e os coeficientes  $a_o$ ,  $a_1$  e  $a_2$  são obtidos através de regressão linear. Tanto a parte agrometeorológica ( $Y_{agro}$ ) como a espectral do modelo foram ajustadas para as fases fenológicas da cultura.

A incorporação dos índices de vegetação ao modelo agrometeorológico (utilizado na Equação 5), segundo Rudorff e Batista (1990), não pode ser feita de forma multiplicativa, pois o índice de vegetação não é independente dos fatores utilizados no modelo agrometeorológico.

A segunda alternativa da utilização dos dados espectrais é a possibilidade e estimativa de parâmetros biofísicos como o Índice de Área Foliar. Rizzi (2004) em um estudo para soja adaptou ao modelo agrometeorológico informações biofísicas como o 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.

Rizzi (2004) utilizou o modelo sugerido por Doorembos e Kassam (1979) adicionando o IAF para o cálculo da produtividade potencial:

$$Y_p = cL.cN.cH.G.Y_o \quad (6)$$

em que  $Y_p$  é a produtividade potencial ( $\text{kg.d.ha}^{-1}$ );  $cL$  é, o fator de compensação de crescimento e área foliar;  $cN$ , o fator de produção de matéria seca;  $cH$ , o fator de colheita;  $G$ , o número de dias (decendial, quinzenal, ciclo da cultura);  $Y_o$  é a produção de matéria seca bruta ( $\text{kg.d.ha}^{-1}$ ).

O cálculo do fator de compensação do crescimento,  $cL$ , foi definido por Sugawara (2002) com base em dados tabulares apresentados em Doorembos e Kassam (1979):

$$cL = 0,515 - e^{(-0,664 - (0,515 \times IAF))} \quad (7)$$

sendo IAF o índice de área foliar.

Nesse ponto, define-se o modelo como agrometeorológico espectral, utilizando os dados de sensoriamento remoto para obter os valores de IAF. Uma alternativa para o parâmetro IAF é utilizar a relação entre esse índice com os índices de vegetação obtidos através de álgebras dos dados espectrais

Rizzi (2004) recomenda que a variável espectral (IAF) exigida pelo modelo seja obtida a partir do índice de vegetação NDVI. Para tanto, as imagens NDVI devem ser primeiramente transformadas em imagens de fração da cobertura do solo, conforme Choudhury et al. (1994):

$$F_{cor} = 1 - \left( \frac{NDVI_{max} - NDVI}{NDVI_{max} - NDVI_{min}} \right)^{0,6} \quad (8)$$

em que  $F_{cor}$  é a fração do solo coberto pela cultura,  $NDVI_{max}$  e  $NDVI_{min}$  são valores de máximo e de mínimo do índice de vegetação da imagem, NDVI é o valor do NDVI de cada pixel da imagem.

Assim, o IAF pode ser obtido através da seguinte relação (NORMAN et al., 2003):

$$IAF = -2\ln(1 - F_{cor.}) \quad (9)$$

Em consequência, para estimativa da produtividade do cafeeiro para o estado de Minas Gerais torna-se viável a utilização do modelo agrometeorológico-espectral utilizado por Rizzi (2004) com a adição da penalidade pela produtividade do ano anterior apresentado por Santos e Camargo (2006), sendo esse o modelo agrometeorológico coerente para a estimativa da produtividade do cafeeiro.

### 3. MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1. Descrição da área de estudo

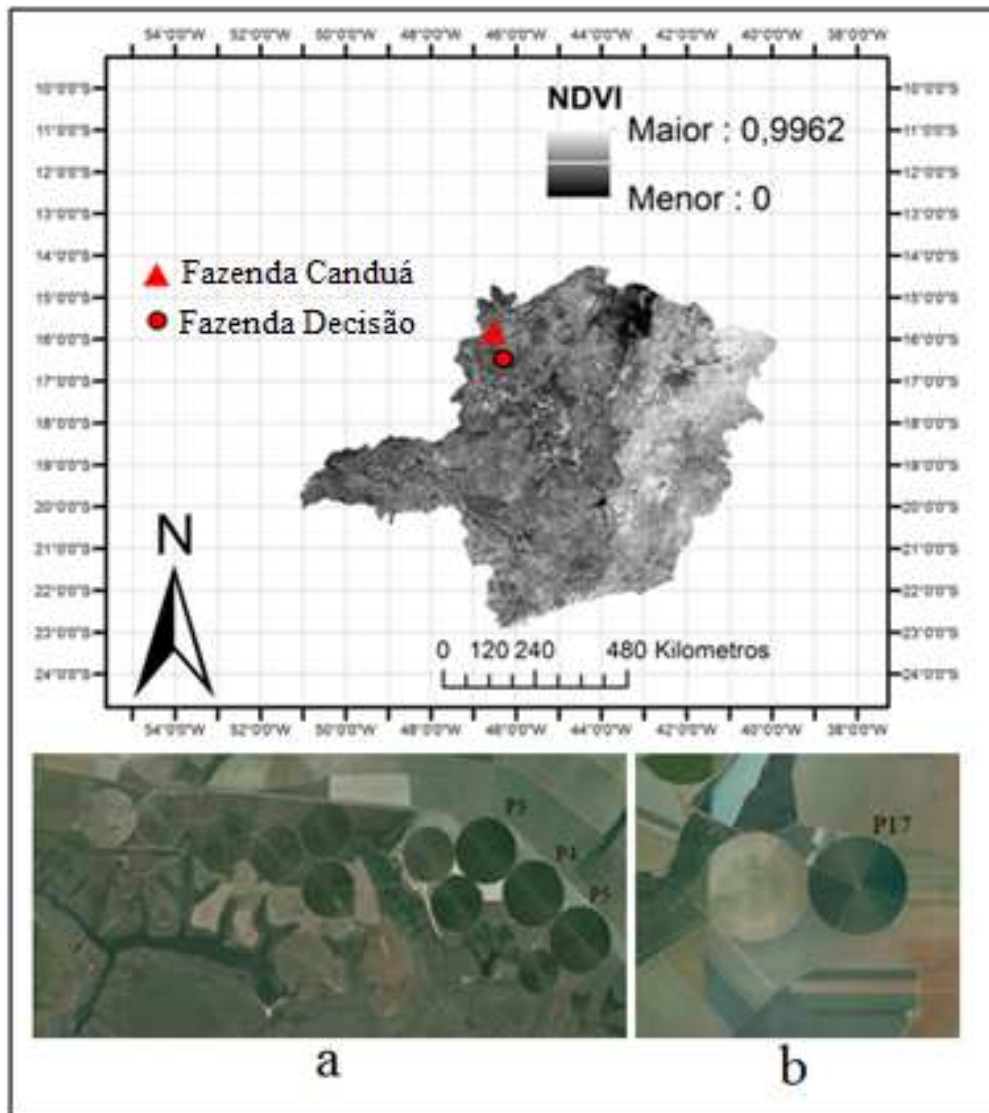
A aplicação do modelo agrometeorológico-espectral foi realizado, no presente trabalho, na região Noroeste de Minas Gerais, nas fazendas Canduá (15°49'58"S e 46°30'59"W) na cidade de Buritis, MG, e Decisão (16°27'30.36"S e 47°17'26.56"W) na cidade de Unaí, MG. O período de monitoramento da cultura e aplicação do modelo foi de 2005 a 2011 para a fazenda Canduá e 2009 a 2012 para a fazenda Decisão.

A região Noroeste de Minas Gerais possui clima tropical com chuvas no verão (Aw) segundo a classificação climática de Köppen (1936), e com base no zoneamento agrometeorológico, é classificada como restrita hidricamente para a cultura do café (SEDIYAMA et al., 2001), sendo necessário a aplicação do manejo de irrigação. As duas fazendas apresentam sistema de irrigação por pivô central com aplicação localizada - LEPA (Low Energy Precision Application).

A fazenda Canduá possui 14 pivôs, sendo todos instalados em cafezais, onde os três maiores pivôs (P3, P4 e P5), apresentam 132 ha cada um, e foram utilizados nesse estudo (Figura 4a). A escolha dos maiores pivôs deveu-se a resolução espacial do sensor MODIS, uma vez que os menores pivôs teriam mais pixels misturados com outros alvos (solo exposto, outra cobertura vegetal, água, etc.) ao redor dos pivôs.

Os cafeeiros analisados nesse estudo são da espécie *Coffea arabica* L. (cultivar Catuaí), plantados com espaçamento de 0,6 X 3,65 m. A data de plantio do pivô P3 foi 15/12/2001 enquanto os pivôs P4 e P5 foram 15/12/2002.

Para a fazenda Decisão foi utilizado somente um pivô para o estudo, com 146 ha de área (Figura 4b) de *Coffea arabica* L. e cultivar Catuaí, espaçamento de 0,6 X 3,7 m e plantio feito em 13/11/2007.



Fonte: Imagens (a) e (b): Google Earth (2013).

Figura 4 - Localização das fazendas em um mapa de NDVI (2009) e os pivôs da fazenda Canduá (a) e Decisão (b).

## 3.2. Dados utilizados

### 3.2.1. Imagens espectrais

Nesse estudo foram utilizados os produtos *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI) e *Enhanced Vegetation Index* (EVI), equações 1 e 2 respectivamente, identificados por MOD13Q1 a bordo do satélite TERRA, fornecidos com o período de retorno de 16 dias, cedidos gratuitamente pela [Earth Observing System](http://www.modis.gsfc.nasa.gov) (EOS/NASA) no site [www.modis.gsfc.nasa.gov](http://www.modis.gsfc.nasa.gov).

O Tile (subdivisão das áreas disponíveis dos produtos do sensor MODIS) que inclui a região das fazendas foi o H13V10 (Figura 5), e foi utilizado um total de 135 imagens que cobriu o período de setembro de 2005 a junho de 2011. Os dados foram fornecidos no formato HDF (Hierarchical Data Format) e extraídos via programação NCL (NCAR Command Language).

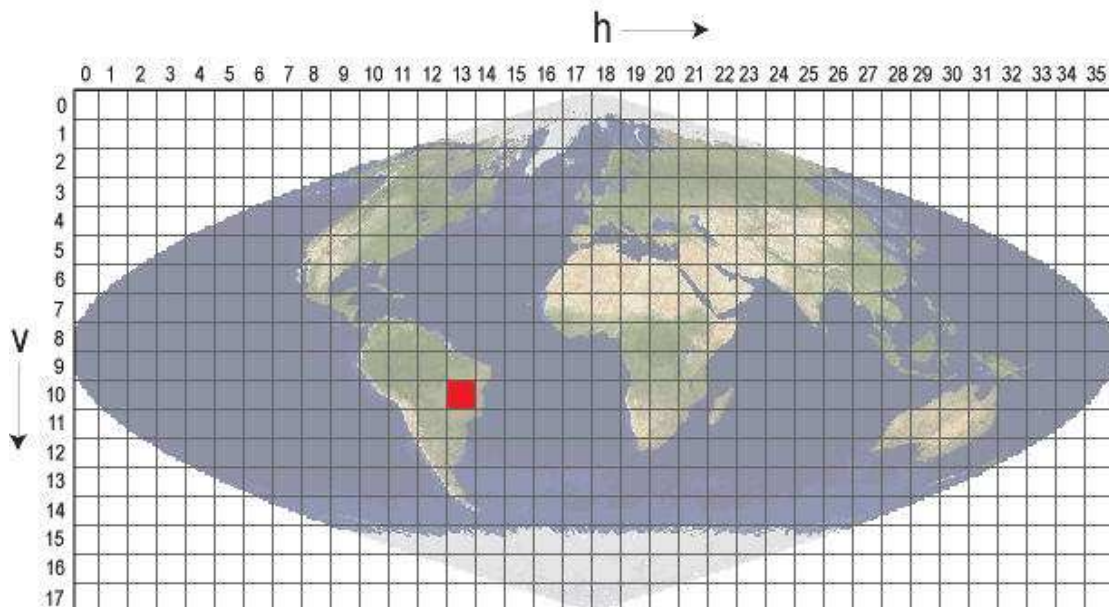


Figura 5 - Tile dos produtos MODIS referente a área de localização das fazendas Canduá e Decisão.

### 3.2.2. Dados meteorológicos e características do solo

Na Tabela 2 são apresentados os elementos para a determinação da evapotranspiração de referência e da cultura, assim como para realizar o balanço de água no solo. Os dados meteorológicos e os de produtividade de cada pivô para as duas fazendas foram fornecidos pela empresa Irriger<sup>®</sup>, que fornecesse subsídio para a irrigação de fazendas com diversas culturas como soja, café, feijão etc.

Os dados foram coletados nas fazendas por estações meteorológicas, sendo que para a fazenda Canduá, os dados são representativos para os três pivôs, exceto para os dados de precipitação e irrigação.

Tabela 2 - Dados meteorológicos utilizados no modelo

Dados	Fonte
Temperatura máxima e mínima (°C)	Irriger <sup>®</sup>
Radiação (MJ/m <sup>2</sup> )	Irriger <sup>®</sup>
Precipitação (mm)	Irriger <sup>®</sup>
Irrigação (mm)	Irriger <sup>®</sup>
Umidade relativa (%)	Irriger <sup>®</sup>
Velocidade do vento (m/s)	Irriger <sup>®</sup>

A fazenda Canduá possui o solo caracterizado como Latossolo vermelho distrófico e a fazenda Decisão um Latossolo vermelho muito argiloso. As características de armazenamento de água do solo bem como as propriedades da cultura utilizadas no balanço hídrico estão apresentadas na Tabela 3.

Tabela 3 - Características do solo e propriedades da cultura

Características do solo	Fazenda Canduá		Fazenda Decisão	
	Camada		Camada	
	1	2	1	2
Capacidade de campo (%)	21,00	21,00	36,85	38,10
Ponto de murcha (%)	13,00	13,00	26,80	26,80
Densidade (g/cm <sup>3</sup> )	1,44	1,44	0,94	0,97
Propriedades da cultura	Fazenda Canduá		Fazenda Decisão	
Fase	Adulta		Adulta	
Kc	1,05		1,05	
Área sombreada (%)	60,00		60,00	

### 3.3. Método

A sequência metodológica utilizada está representada no fluxograma na Figura 6. A primeira etapa foi obtenção e avaliação das imagens de NDVI e EVI para as regiões das fazendas, nas quais foi analisado o comportamento dos índices em relação às condições de manejo e fases fenológicas da cultura, para a obtenção posterior do parâmetro biofísico, o IAF.

A segunda etapa foi relacionada à adição do termo espectral no modelo agrometeorológico. Finalmente a calibração do modelo para as regiões das fazendas, avaliadas com os dados de produtividade real.

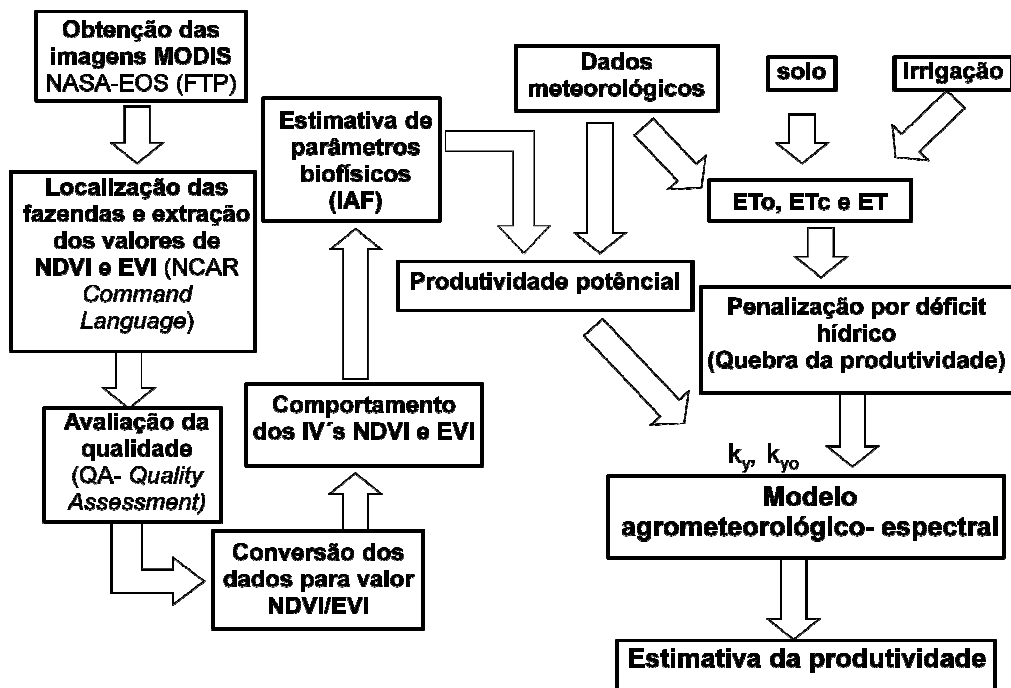


Figura 6 - Fluxograma metodológico.

### 3.4. Modelo agrometeorológico-espectral

O modelo utilizado para a estimativa e monitoramento da produtividade nas fazendas foi o proposto por Doorenbos e Kassam (1979), com a adição da penalização da produtividade a partir da produtividade do ano anterior, proposto por Santos e Camargo (2006) (Equação 4).

#### 3.4.1. Produtividade potencial

Para a estimativa da produtividade de cafeeiros nas fazendas, o modelo considera a penalização da produtividade potencial por déficit hídrico e a penalização pela produtividade do ano anterior. Para a estimativa da produtividade potencial utilizou-se o método da Zona Agrometeorológica (ZAE), desenvolvido por Kassam (FISCHER et al., 2002; DOORENBOS; KASSAM, 1979), sendo a metodologia precisa para a estimativa da produtividade potencial das culturas em função de dados climáticos (TUBIELLO; FISCHER, 2007).



A metodologia da ZAE (Equação 6) estima a produção potencial de biomassa em função da temperatura do ar, da irradiância solar, área foliar da cultura e da duração do ciclo da cultura, e considera que a cultura não está sob nenhum tipo de déficit, pragas ou doenças influenciando o seu crescimento. O método foi desenvolvido para aplicação em grandes áreas continentais, mas também pode ser aplicada para áreas menores como bacias ou em nível de fazenda (DOORENBOS; KASSAM, 1979).

A produção de matéria seca bruta -  $Y_o$  (kg.dia/ha) foi obtida aplicando o conceito de De Wit (1965), que relaciona a fração do dia em que o céu está nublado ( $F$ ) com a taxa de produção bruta de matéria seca para uma cultura padrão  $y_o$  (kg.dia/ha) para dias nublados e  $y_c$  (kg.dia/ha) para dias claros (Equação 10a e 10b). Essa relação depende da cultura e da temperatura. A taxa de produção ( $y_m$ ) pode ser maior ou menor que  $20 \text{ kg}\cdot\text{h}\cdot\text{ha}^{-1}$ , que é a suposta para a cultura padrão.

1. quando  $y_m > 20 \text{ kg}\cdot\text{h}\cdot\text{ha}^{-1}$

$$Y_o = F(0,8 + 0,01y_m) \times y_o + (1 - F)(0,5 + 0,025y_m) \times y_c \quad (10a)$$

2. quando  $y_m < 20 \text{ kg}\cdot\text{h}\cdot\text{ha}^{-1}$

$$Y_o = F(0,5 + 0,025y_m) \times y_o + (1 - F)(0,05y_m) \times y_c \quad (10b)$$

em que

$$F = \frac{R_{se} - 0,5R_s}{0,8R_{se}} \quad (11)$$

sendo  $F$ , a fração do dia em que o céu está nublado;  $R_{se}$ , a radiação ativa de ondas curtas nos dias claros ( $\text{cal}\cdot\text{d}\cdot\text{cm}^{-2}$ ); e  $R_s$ , radiação de ondas curtas observada ( $\text{cal}\cdot\text{d}\cdot\text{cm}^{-2}$ ).

Os valores de  $y_o$  e  $y_c$  utilizados foram obtidos de valores tabelados (DOORENBOS; KASSAM, 1979) a partir de dados de radiação de ondas curtas  $R_{se}$  e  $y_m$  tabelados obtidas a partir de valores da temperatura média e grupo de cultura, na qual a cultura do café foi considerada como pertencente ao grupo

das culturas "Quente I" (tabela da taxa de produção de matéria seca – DOORENBOS; KASSAM, 1979) que contém o gênero citros grupo que mais se aproxima das características dos cafeeiros em relações as outras culturas tabeladas.

O fator de produção líquida de matéria seca  $cN$  está relacionada com a necessidade de energia para os processos internos de desenvolvimento (respiração), estimada em cerca de 0,6 para condições frias, temperatura média inferior a 20°C, e 0,5 para condições quentes, temperatura média superior a 20°C (DOORENBOS; KASSAM, 1979).

O fator de colheita  $cH$  está relacionado com a parte colhida em relação à massa seca total dos cafeeiros. Esse fator foi calibrado de acordo com os dados de produtividade real.

Devido à bienalidade da produtividade cafeeira, o fator de colheita foi calibrado tanto para ano de baixa quanto de alta produtividade observando que a matéria seca produtiva é menor em anos de baixa produtividade.

O fator de compensação de crescimento e área foliar  $cL$  está relacionado com a taxa máxima de crescimento e é representada pelo índice de área foliar da cultura. A determinação do IAF foi obtida por meio da metodologia proposta por Norman et al. (2003) utilizando as imagens orbitais geradas pelo sensor MODIS.

### **3.4.2. Determinação da componente espectral**

Para que as análises do comportamento dos índices de vegetação fossem realizadas somente nas áreas dos pivôs, foi necessário selecionar nas imagens dos índices de vegetação, somente os pixels internos que correspondessem às áreas somente de cafeeiros, não utilizando os pixels das bordas dos pivôs (Figura 7).

Desta forma, evitou-se que os valores de NDVI e EVI utilizados para análise apresentassem mistura espectral, ou seja, contaminação com qualquer outro alvo que não fosse a cultura do café.

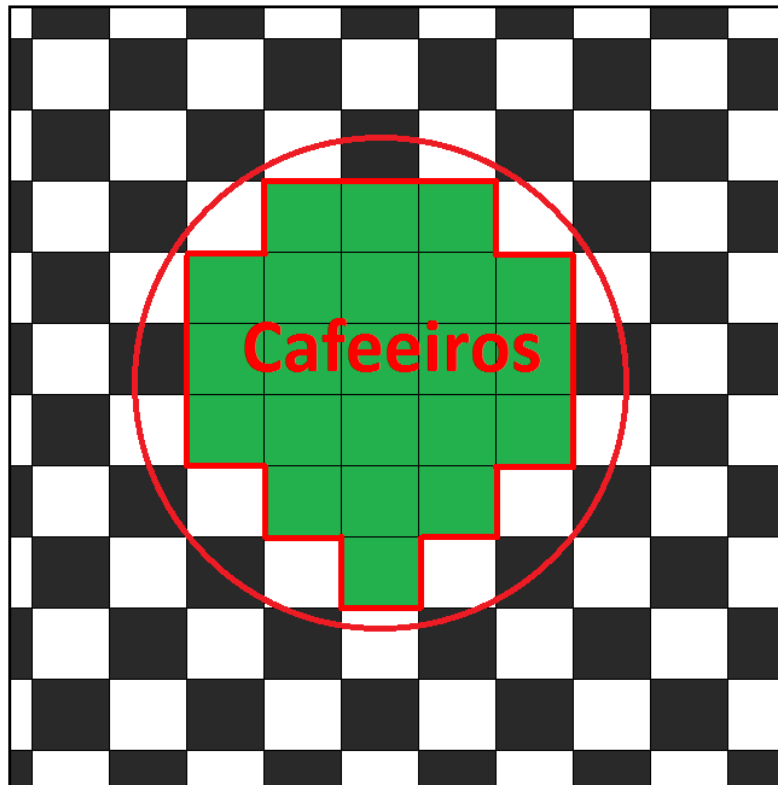


Figura 7 - Representação dos pixels puros escolhidos para a utilização das análises dos índices de vegetação.

Os pixels correspondentes aos pivôs nos anos de estudo das fazendas passaram por uma seleção de qualidade de pixel a partir das informações QA (*Quality Assessment*) contido em cada pixel dos produtos MODIS. As informações contidas no QA indicam a integridade dos dados MODIS (MODIS LAND, 2008):

- Integridade da estimativa da reflectância da superfície;
- sucesso da correção;
- Presença de nuvens;
- Presença de nuvens Cirrus (ausência, baixa, média e alta);
- Fonte de informações de aerossóis;
- Presença de aerossóis (baixo, médio e alto);
- Fonte de informação de vapor d'água;
- Fonte de informação de ozônio;
- Se o pixel é terra ou água.

Somente os pixels de melhor qualidade, sem presença de nuvens, com baixa quantidade de aerossóis, sem problemas com as correções de nuvens e correções geométricas foram utilizadas no estudo.

Para utilização dos valores de NDVI e EVI na estimativa do IAF, como as imagens aparecem com os valores em níveis digitais (ND), foi transformando o valor de ND em valores físicos (VF) de NDVI e EVI utilizando o fator de conversão (Equação 12) para reflectância em 16 *bits* (65536 níveis de cinza).

Esse fator de conversão é fornecido no mesmo arquivo HDF ou no site de distribuição dos produtos MODIS.

$$VF = ND \times 0,0001 \quad (12)$$

Após as transformações dos valores de NDVI foi calculada a fração de cobertura do solo, de acordo com Choudhury et al. (1994), Equação 8. Posteriormente o IAF foi obtido através da seguinte relação de Norman *et al.*, 2003, Equação 9. E o cálculo do fator de compensação do crescimento, *cL*, desenvolvido por Sugawara (2002), com base nos dados de Doorenbos e Kassam (1979), foram obtidos a partir da Equação 7.

### 3.4.3. Balanço hídrico

Para o cálculo do balanço hídrico foi utilizado o software Irriger, que permite ao usuário a simulação de plantio com balanço hídrico detalhado durante o ciclo da cultura, criando vários níveis de decisão e possibilita o levantamento de dados para projetos de irrigação e drenagem em todo o país.

Para o cálculo da evapotranspiração de referência (*ET<sub>o</sub>*) o programa utiliza o método de Penman-Monteith padrão FAO 56 (Equação 13).

$$ET_o = \frac{0,408\Delta(Rn - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0,34u_2)} \quad (13)$$

em que  $ET_o$  é a evapotranspiração de referência ( $\text{mm}\cdot\text{d}^{-1}$ );  $\Delta$ , a inclinação da curva de temperatura-pressão de vapor de saturação à temperatura  $T$  ( $\text{kPa}\cdot\text{°C}^{-1}$ );  $R_n$ , o saldo de irradiância sola à superfície ( $\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{dia}^{-1}$ );  $G$ , a densidade de fluxo de calor do solo ( $\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{dia}^{-1}$ );  $\gamma$ , a constante psicométrica ( $\text{kPa}\cdot\text{°C}^{-1}$ );  $T$ , a temperatura média diária do ar a 2 m de altura ( $\text{°C}$ );  $u_2$ , a velocidade do vento a 2 m de altura ( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ); e  $e_s - e_a$ , o déficit de pressão de vapor de saturação ( $\text{kPa}$ ).

Tendo em vista que as fazendas possuem um sistema de irrigação por pivô central com aplicação localizada, onde se aplica a água de forma pontual e não irrigando toda área, tem-se certa redução da evapotranspiração, devido a restrição da área molhada e da área sombreada pela cultura. Dessa forma para a determinação da evapotranspiração real da cultura o Irriger considera um ajuste devido a porcentagem de área molhada ( $kl$  - coeficiente de localização) e a relação utilizada pode ser vista na Equação 14.

$$ET_c = ET_o \cdot kc \cdot kl \quad (14)$$

em que  $ET_c$  é a evapotranspiração da cultura ( $\text{mm}\cdot\text{d}^{-1}$ );  $ET_o$ , a evapotranspiração de referência ( $\text{mm}\cdot\text{d}^{-1}$ );  $kc$ , o coeficiente da cultura adimensional; e  $kl$ , o coeficiente de localização, em função da porcentagem de área molhada e sombreada.

A determinação do coeficiente  $kl$  foi obtida por meio da equação proposta por Keller e Bliesner (1990):

$$kl = 0,1 \cdot P^{0,5} \quad (15)$$

em que o termo  $P$  é a porcentagem de área sombreada ou molhada, utilizando-se a que for maior (%).

A evapotranspiração da cultura é calculada de forma que a planta esteja sob condições ideais de água no solo. Para a determinação da evapotranspiração real da cultura, que considera o déficit de água no solo, foi utilizada a Equação 16.

$$ET = k_s \cdot ET_c \quad (16)$$

em que  $ET$  é a evapotranspiração real ( $\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$ ); e  $k_s$ , o coeficiente de estresse hídrico adimensional.

O coeficiente de estresse hídrico ajusta a evapotranspiração da cultura para a evaporação real considerando o nível atual de umidade do solo durante as fases fenológicas da cultura. Nesse trabalho considerou-se o modelo linear (Equação 17) para a determinação do coeficiente  $k_s$ .

$$k_s = \frac{U_a - PM}{CC - PM} \quad (17)$$

em que  $U_a$  é a umidade atual do solo (%);  $PM$ , o ponto de murcha do solo (%); e  $CC$ , a capacidade de campo (%).

No balanço hídrico foi considerado chuva, irrigação, escoamento superficial, evapotranspiração e drenagem, para um solo com duas camadas, onde foram utilizados os parâmetros de capacidade de campo, ponto de murcha e densidade aparente do solo.

A água armazenada em uma das camadas no dia atual ( $Amr_i$ ) foi calculada pela diferença entre o somatório da água armazenada do dia anterior e a precipitação ( $Arm_{i-1} + P$ ), e a evapotranspiração no dia atual  $ET_i$ .

$$Amr_i = Arm_{i-1} + P - ET_i \quad (18)$$

Para a drenagem o software considera que esta estava presente quando a umidade do solo ultrapassa o valor da capacidade de campo, calculado por meio de uma aproximação em cascata, no qual o excedente de água de uma camada superior, logo depois de uma chuva ou irrigação, é drenado para a camada inferior. Se o fluxo de água fosse insuficiente para elevar a umidade do solo nessa camada até a capacidade de campo, o programa considerava que a drenagem estava encerrada, caso a capacidade de campo da camada inferior fosse atingida, o excesso de água será considerado pelo Irriger como percolação.

### 3.4.4. Penalização por déficit hídrico e pela produtividade do ano anterior

A partir dos valores de  $ET_c$  e  $ET$  foi realizada a penalização pelo déficit hídrico (Equação 19), que foram acumuladas em um período de 16 dias (penalização parcial), seguindo a resolução temporal dos dados de índice de vegetação do sensor MODIS.

$$PDH = \left[ 1 - k_y \left( 1 - \frac{ET}{ET_c} \right) \right] \quad (19)$$

em que  $PDH$  é a penalização por déficit hídrico;  $k_y$ , o coeficiente de penalização hídrica; e  $ET$ , a evapotranspiração real da cultura ( $\text{mm}\cdot\text{d}^{-1}$ ).

O coeficiente de penalização hídrica ( $k_y$ ) refere-se à redução da produtividade devido à evapotranspiração real não atingir a da cultura quando essa está sob déficit hídrico. Os valores de  $k_y$  utilizados nesse estudo para as áreas cafeeiras da fazenda foram determinados por Santos (2006) em nível de propriedade rural.

Para cada fase fenológica do cafeeiro foi atribuído um valor de  $k_y$ , pois está relacionada com a demanda hídrica da cultura em cada fase (Tabela 4). As imagens MODIS foram atribuídas a cada fase fenológica dos cafeeiros de acordo com Camargo e Camargo (2001).

Para a representação da bienalidade do cafeeiro, foi utilizada, no modelo, a penalização pela produtividade do ano anterior (Equação 20):

$$PPA = \left[ 1 - k_{yo} \left( \frac{Y_{aa}}{Y_p} \right) \right] \quad (20)$$

em que  $PPA$  é a penalização pela produtividade do ano anterior;  $Y_{aa}$ , a produtividade do ano anterior ( $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ );  $Y_p$ , a produtividade potencial da cultura ( $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ ); e  $k_{yo}$ , o coeficiente de penalização devido à produtividade do ano anterior; adimensional.

Tabela 4 - Valores de  $k_y$  para cada dia das imagens MODIS

Fases fenológicas	Dias das imagens MODIS	$k_y$
Granação dos frutos	1	0,36
	17	0,30
	33	0,18
	49	0,12
	65	0
	81	0
Maturação dos frutos	97	0
	113	0
	129	0,06
	145	0,06
	161	0,18
Repouso	177	0,06
	193	0,06
	209	0
	225	0
Florada, formação dos chumbinhos e expansão dos frutos	241	0,06
	257	0,78
	273	0,78
	289	0,72
	305	0,66
	321	0,66
	337	0,54
	353	0,48

Fonte: Camargo e Camargo (2001).

Os valores de  $k_{yo}$  foram calibrados separadamente para os anos de baixa e alta produtividade, pois as penalizações pela produtividade do ano anterior são maiores para os anos de baixa safra e menores para os anos de alta safra.

Com o somatório das penalizações parciais hídricas (16 dias) e pela produtividade do ano anterior, durante todo o ano fenológico, foi obtida a



produtividade estimada pelo modelo agrometeorológico-espectral (Equação 21).

$$Y_e = \sum_{i=1}^{353} \left[ Y_{p_i} \times \left( 1 - \left[ 1 - k_{y_o} \left( \frac{Y_{aa}}{Y_{p_i}} \right) \right] \times \left[ 1 - k_{y_i} \left( 1 - \frac{ET}{ET_c} \right)_i \right] \right) \right] \quad (21)$$

em que  $Y_e$  é a produtividade final estimada ( $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ );  $Y_{p_i}$ , a produtividade potencial parcial da cultura ( $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ );  $k_{y_i}$ , é o coeficiente de penalização hídrica para cada período fenológico adimensional;  $ET$ , a evapotranspiração real ( $\text{mm}\cdot\text{d}^{-1}$ );  $ET_c$ , a evapotranspiração da cultura ( $\text{mm}\cdot\text{d}^{-1}$ );  $Y_{aa}$ , a produtividade do ano anterior ( $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ );  $k_{y_o}$ , o coeficiente de penalização devido à produtividade do ano anterior adimensional; e  $i$ , os dias das imagens MODIS  $i = 1, 17, 33, 49\dots$  (Tabela 4).

### 3.5. Avaliação do modelo

Para avaliação do modelo, foi utilizado o índice "d" de concordância de Willmot (Equação 22), que indica o grau de exatidão entre os valores estimados e observados. Foi também utilizado o Erro Percentual Absoluto Médio (EPAM) descrito na Equação 23.

$$d = 1 - \left[ \frac{\sum_{i=1}^n (Y_{e_i} - Y_{o_i})^2}{\sum_{i=1}^n (|Y_{e_i} - \bar{Y}_o| + |Y_{o_i} - \bar{Y}_o|)^2} \right] \quad (22)$$

$$EPAM = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n \left[ \frac{(Y_{e_i} - Y_{o_i})}{Y_{e_i}} \cdot 100 \right] \quad (23)$$

em que  $d$  é o índice de concordância;  $EPAM$ , a medida do erro;  $Y_{e_i}$ , o  $i$ -ésimo valor previsto ou estimado;  $Y_{o_i}$ , o  $i$ -ésimo valor observado e  $\bar{Y}_o$ , a média dos valores observados.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1. Caracterização dos elementos climáticos, irrigação e balanço hídrico

#### 4.1.1. Temperatura do ar

A Figura 8 está ilustrada a variação da temperatura média do ar durante o período de estudo para as duas fazendas, Canduá (Figura 8a) e Decisão (Figura 8b).

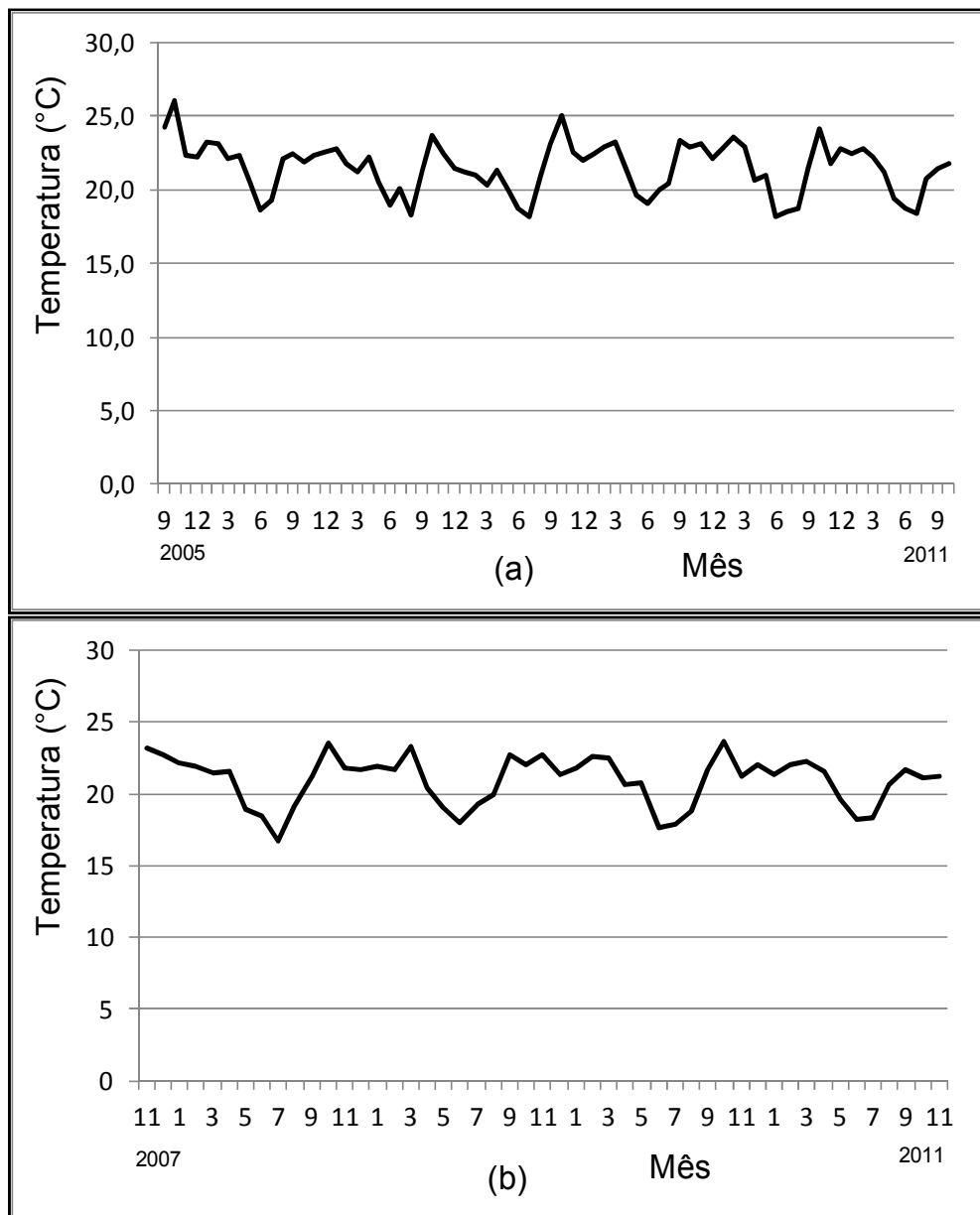


Figura 8 - Temperatura média mensal para região das fazendas: (a) Fazenda Canduá e (b) Fazenda Decisão.

As médias variaram aproximadamente entre 18 e 25°C, sem grandes variações sazonais, com exceção do mês de julho na fazenda Decisão, que apresentou valores em torno de 14°C, desfavoráveis a cultura do café, demonstrando que, segundo as exigências térmicas, a cultura não teve grandes restrições.

#### **4.1.2. Precipitação, irrigação e balanço de água no solo**

A distribuição da precipitação pluviométrica durante o período de estudo pode ser observada na Figura 9. A região possui um período chuvoso entre o final de setembro a abril e um período seco entre final de abril e setembro para as duas fazendas.

O período de estiagem dura cerca de cinco meses e em alguns anos, para o período de estudo, não havendo registro de chuva expressiva nesses meses. Essa grande estiagem no inverno poderia ter causado queda na produtividade pelo rápido esgotamento de nutrientes e seca dos ramos dos cafeeiros devido à breve maturação dos frutos.

Porém, as duas fazendas possuem sistema de irrigação, que controla a umidade do solo, amenizando os efeitos da estiagem de chuvas. Nas Figuras 10 e 11 são apresentados os resultados do balanço hídrico, que representa o manejo de irrigação, os limites superiores (capacidade de campo) e inferiores (ponto de murcha) de armazenamento de água do solo para as fazendas Canduá e Decisão respectivamente.

Na Figura 10 está apresentado somente o balanço de 2007 para o pivô 3 da fazenda Canduá e na Figura 11 o balanço de 2008 para a fazenda Decisão. Observa-se que o manejo de irrigação foi realizado de modo a manter a umidade do solo acima da umidade de segurança  $f = 16,2\%$  para o pivô 3 e  $f = 30,82\%$  para o pivô da fazenda Decisão, ocasionando um déficit hídrico na cultura em alguns períodos do ano.

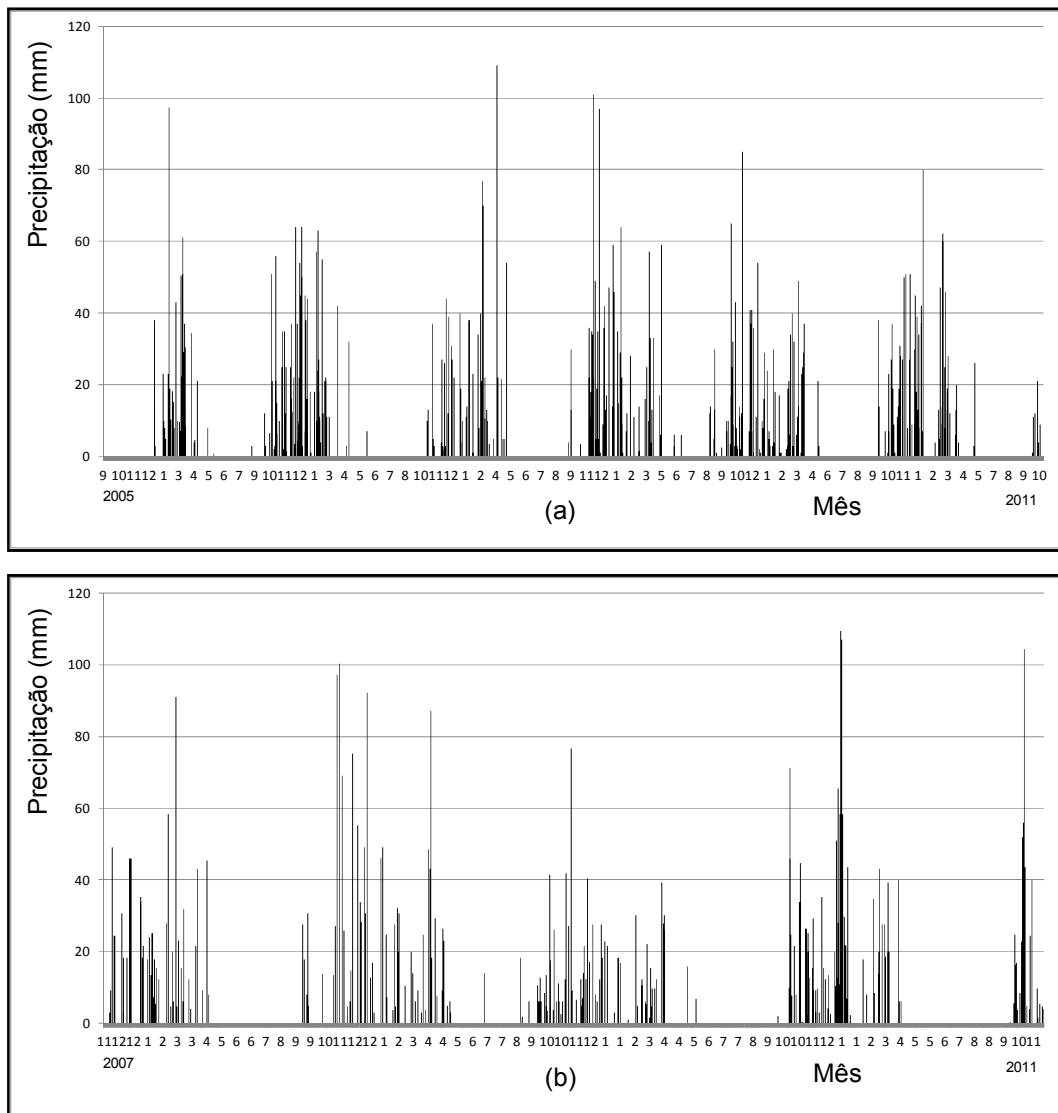


Figura 9 - Precipitação na região das fazendas: (a) Fazenda Canduá e (b) Fazenda Decisão.

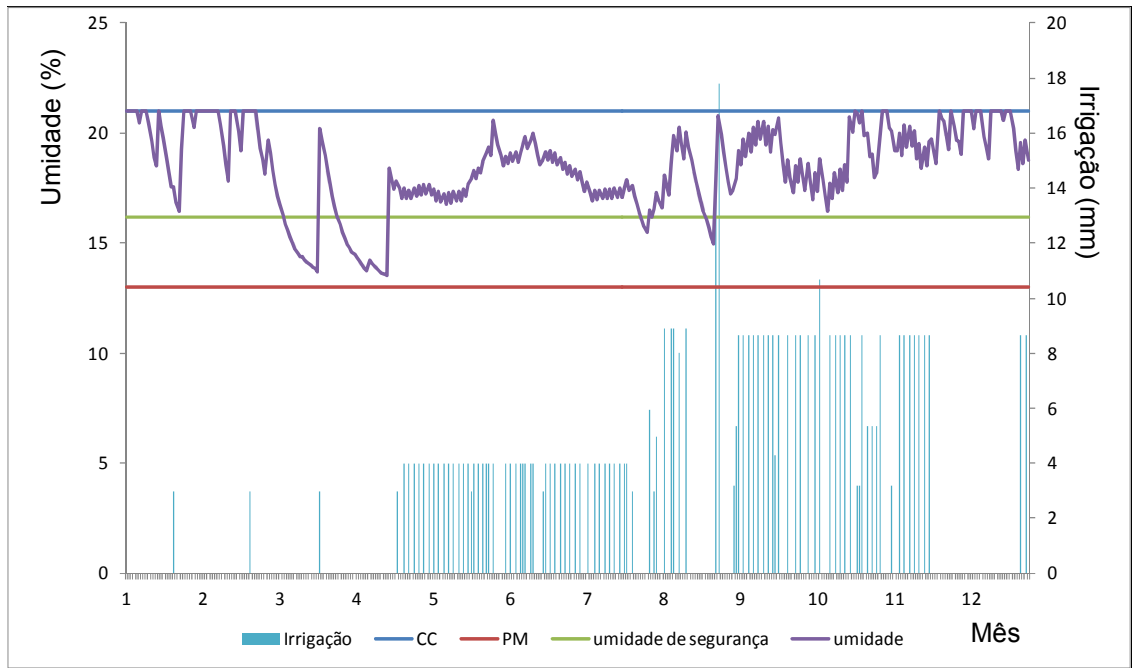


Figura 10 - Balanço hídrico, limites de armazenamento de água no solo e quantidade irrigada para o pivô 3 da Fazenda Canduá durante o ano de 2007.

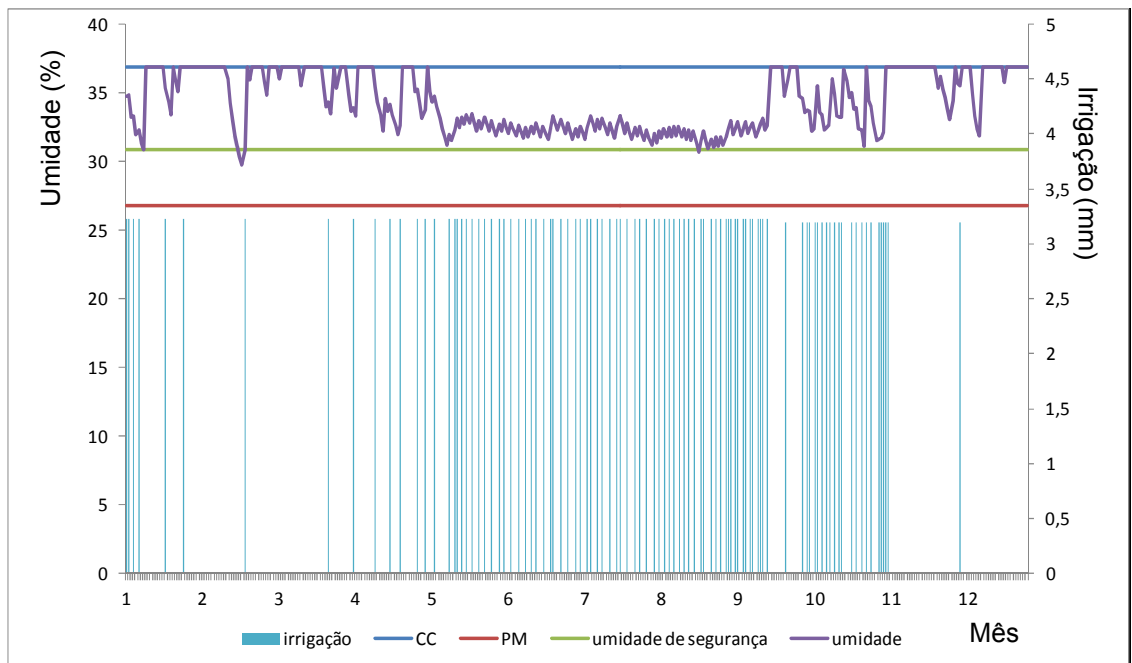


Figura 11 - Balanço hídrico, limites de armazenamento de água no solo e quantidade irrigada para o pivô da Fazenda Decisão durante o ano de 2008.

## 4.2. Comportamento dos índices NDVI e EVI

Para cada pivô das fazendas foram selecionados em média 18 pixels puros (pixels não misturados com outros alvos que não sejam somente cafeeiros), e temporalmente foram obtidas 135 imagens durante o período de estudo. Dos pixels puros de cada pivô, foi obtida a média dos valores dos índices para representar o NDVI e o EVI de cada pivô.

Devido ao comportamento semelhante entre a variação dos índices de vegetação NDVI e EVI (discutidas a seguir) para as fazendas Catuaí e Decisão, optou-se por relatar os resultados obtidos na fazenda Catuaí devido apresentar período temporal de dados maior bem como três pivôs para as análises.

Na Figura 12, é possível observar que a variação temporal dos índices de vegetação, NDVI e EVI teve comportamentos diferentes para cada fase do ciclo fenológico dos cafeeiros para o ano de produção 2005/2006. Valores mais baixos dos índices ocorreram no período de agosto e setembro (repouso), sendo que esse decréscimo foi observado a partir do mês de julho até agosto quando ocorre o início do período de colheita, indicando a desfolha ou derrama natural das folhas e, assim, a perda de biomassa.

Com o início da florada seguida pela granação e maturação dos frutos, os cafeeiros apresentam aumento de biomassa, refletindo no acréscimo dos índices de vegetação, mostrando a sensibilidade dos índices a essa variação.

Na Figura 13 está apresentada a relação entre o índice de vegetação NDVI com o regime de chuvas (acumuladas de 16 dias) durante o período de estudo. A partir do início do período de chuvas pode ser observado o acréscimo contínuo do NDVI, relatando o início da florada, assim como observado nos trabalhos de Fontana et al. (1998) e Delgado et al. (2012). Santos e Camargo (2006) indicaram que florada ocorre após uma chuva de no mínimo 5 mm, com o acúmulo prévio de 340 mm de evapotranspiração, somado a partir do início do primeiro decêndio de abril.

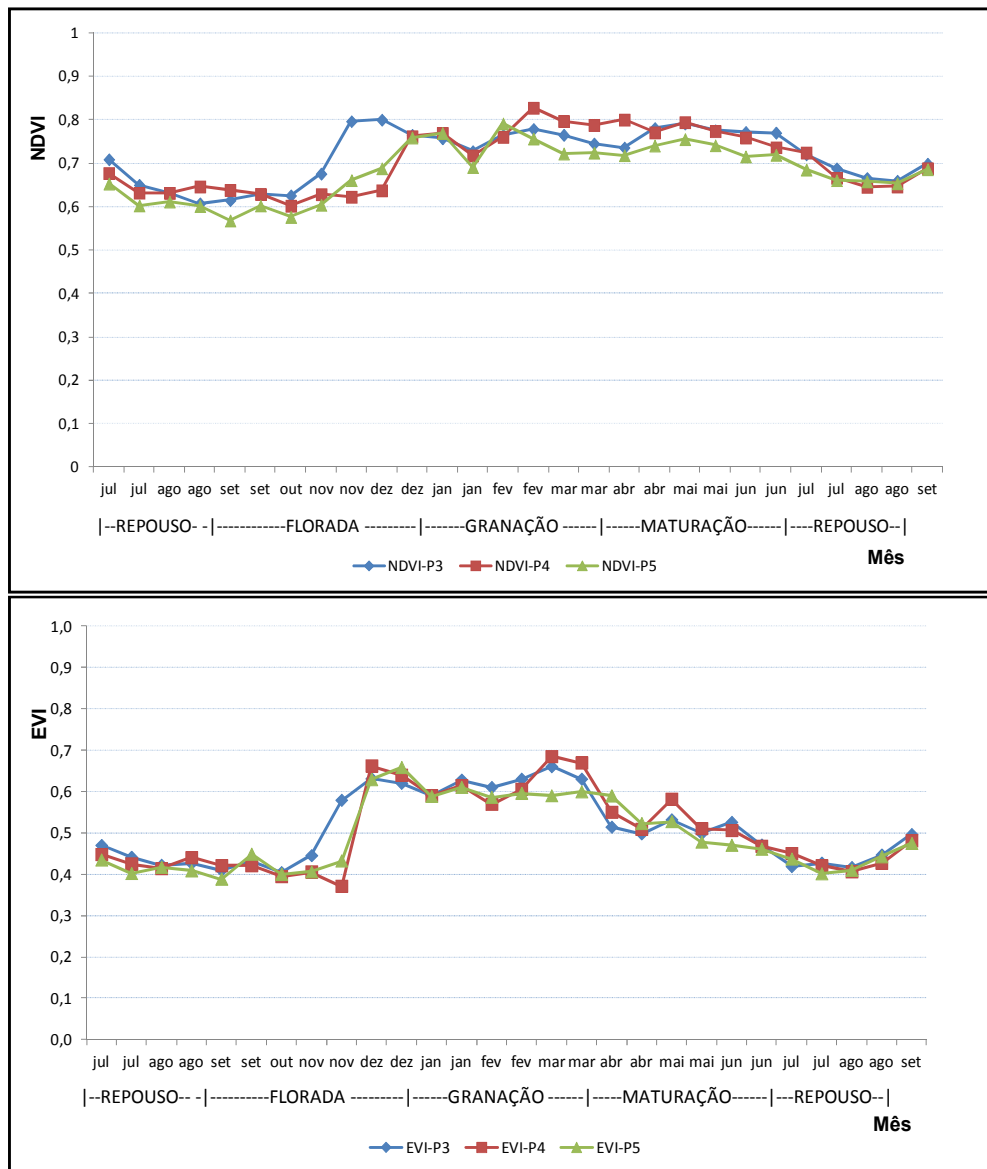


Figura 12 - Índices de vegetação NDVI e EVI para os pivôs 3, 4 e 5 da fazenda Canduá durante o ano de produção 2005/2006.

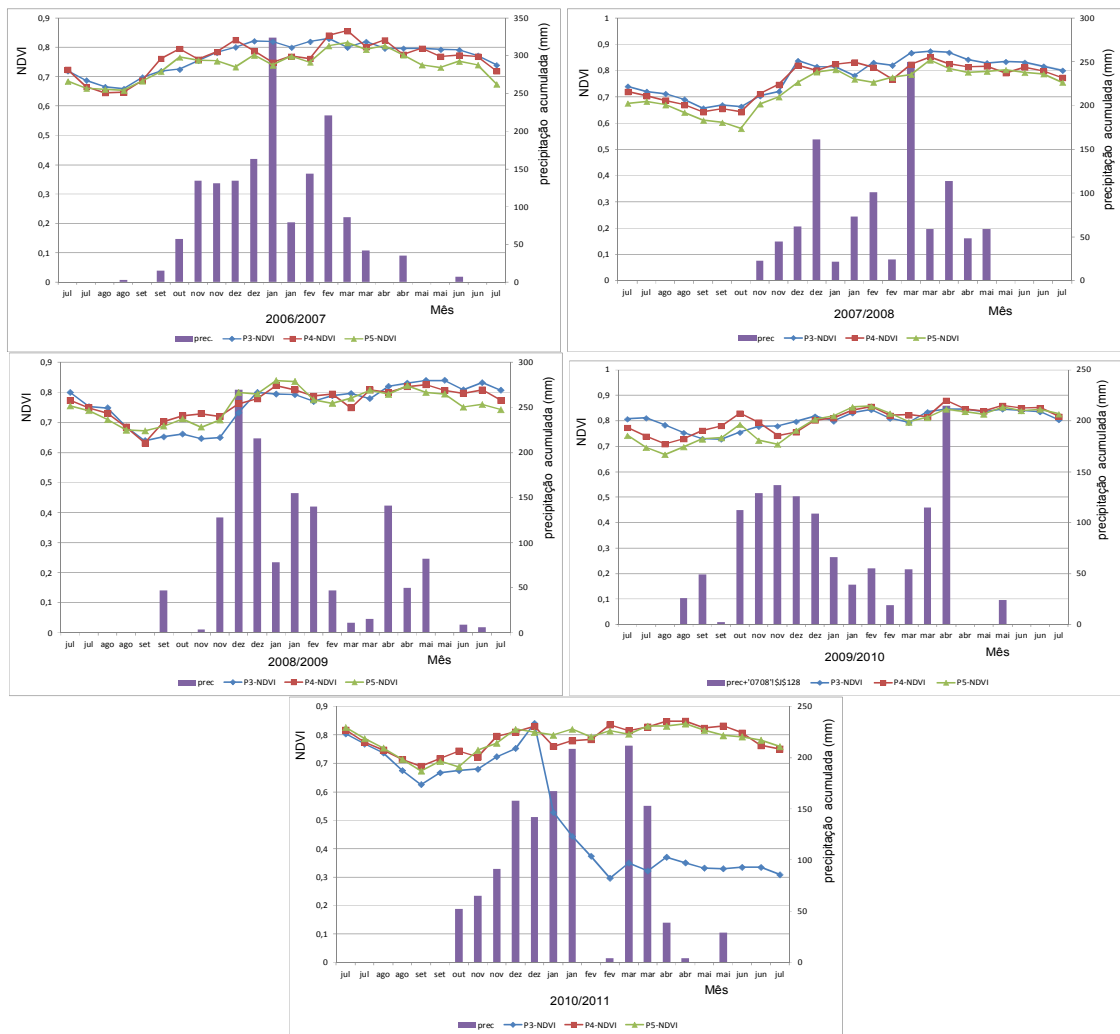


Figura 13 - Relação entre o NDVI e o regime de chuvas durante os anos de produção 2006/2007, 2007/2008, 2008/2009, 2009/2010 e 2011/2012.

Nos anos em que a precipitação ocorreu mais tarde, mês de outubro (2010/2011) ou até mesmo novembro (2007/2008), a floração dos cafeeiros acompanhou esse período e, assim, também o NDVI.

Para o ano de 2009/2010 foram registradas chuvas a partir da segunda quinzena do mês de agosto até o final da primeira quinzena de setembro, onde possivelmente não houve uma floração principal, não possibilitando a caracterização da variação do NDVI com as fases fenológicas da cultura.

O índice de vegetação NDVI mostrou-se sensível também aos tratamentos culturais como irrigação e poda dos cafeeiros. Observa-se na Figura 14 o comportamento do NDVI para o pivô 3 da fazenda Canduá no período de



estudo, onde os menores valores do índice foram registrados para o ano de 2011 em que houve o início da poda dos cafeeiros do pivô em dezembro de 2010. Com a prática teve-se uma queda brusca de biomassa, refletindo em uma redução considerável do NDVI para o ano de 2011.

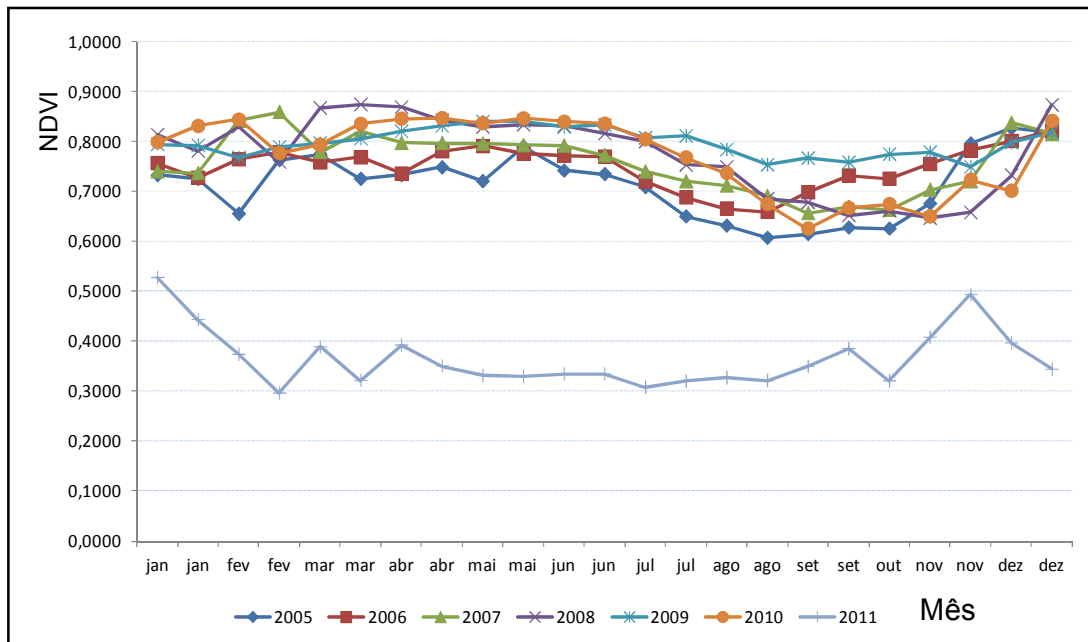


Figura 14 - Variação do NDVI para os anos de 2005 a 2011 do pivô 3 da fazenda Canduá.

O manejo de irrigação para o pivô 3 teve seu início em maio de 2006, sendo que antes desse período, no ano de 2005, foram observados menores valores de NDVI quando comparados com os anos seguintes sem considerar o ano de 2011. Isso indica que a partir do início da irrigação, os cafeeiros aumentaram seu vigor vegetativo e seu índice de área foliar.

A menor safra colhida entre os anos de 2006 a 2010 foi referente ao ano produtivo de 2008/2009. Com menor produtividade, a prática da colheita danificou menos os cafeeiros do pivô havendo menor perda de folhas e, assim, foram observados maiores valores de NDVI (junho a agosto de 2009) para o período de início e pós-colheita (segunda quinzena de junho até a segunda quinzena de agosto).

A adequada relação entre os índices de vegetação com as fases fenológicas dos cafeeiros, regime de chuvas e tratos culturais somados à

resolução temporal fornecida pela aquisição do sensor MODIS possibilitou a utilização dos índices para estimar parâmetros biofísicos da cultura e inseri-los no modelo.

Devido ao fato das relações entre o NDVI e os parâmetros biofísicos das culturas agrícolas serem mais desenvolvidas e discutidas na literatura, optou-se, neste trabalho, pela utilização do NDVI para a estimativa do índice de área foliar, que foi o parâmetro de entrada do modelo agrometeorológico-espectral.

#### **4.3. Calibração do modelo agrometeorológico-espectral e comparação da produtividade estimada com a observada**

Para a calibração do coeficiente de penalização devido a produtividade do ano anterior  $k_{yo}$  e do fator de colheita  $cH$ , da fazenda Canduá, foram utilizados as safras de 2005/2006 e 2006/2007.

A validação do modelo ocorreu a partir valores estimados pelo modelo quando comparados aos observados nas safras de 2007/2008, 2008/2009, 2009/2010 e 2010/2011. Para a fazenda Decisão foram utilizados todos os anos para a calibração do coeficiente e do fator.

A penalização devido ao déficit hídrico ocorreu durante os períodos onde a evapotranspiração real  $ET$  foi menor do que a evapotranspiração da cultura  $ET_c$ , com valor do coeficiente de penalização hídrica  $k_y$  diferente de zero, como pode ser observado na Figura 15 para o ano de produção 2009/2010 do pivô 4, fazenda Canduá.

As estimativas das produtividades pelo modelo calibrado, comparado com as produtividades observadas na Fazenda Canduá, está apresentada na Figura 16. As produtividades estimadas e observadas foram semelhantes e seguiram a bienalidade da cultura do café, incluindo a baixa produtividade da safra 2010/2011 do pivô 3 aonde houve a poda do cafeeiro, e o modelo espectral foi de extrema importância pois estimou o valor mais baixo da produtividade potencial para o período de estudo. De acordo com as análises de regressão, os valores de  $r^2$  variaram entre 0,78 a 0,94 indicando um bom ajuste dos valores estimados pelo modelo quando comparados com os dados de produtividade real dos pivôs.

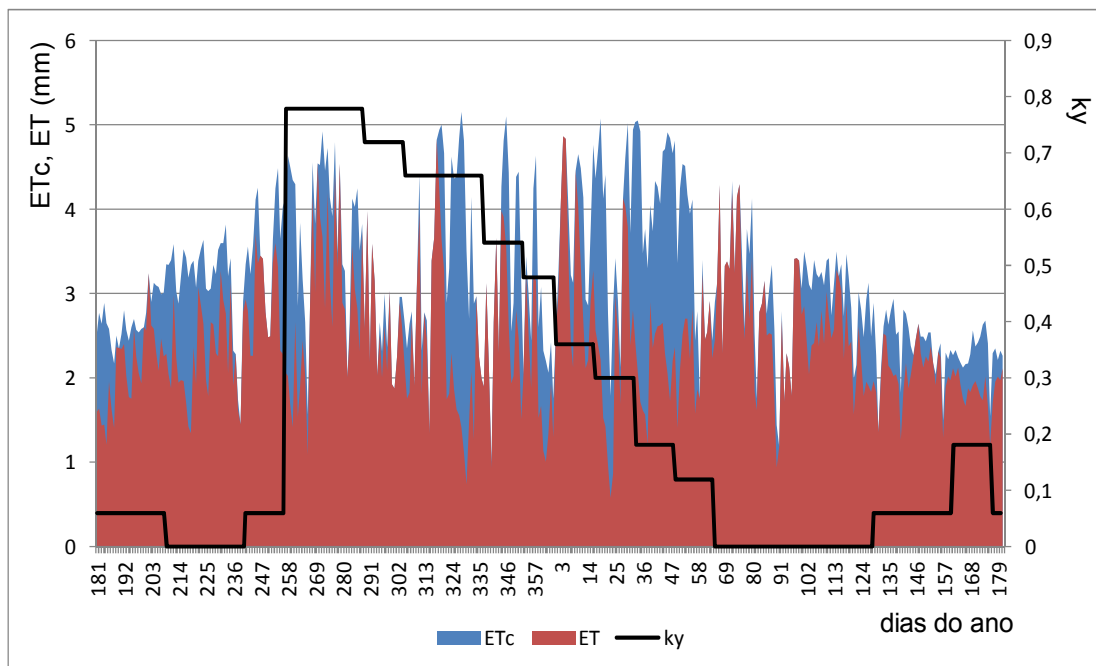


Figura 15 - Evapotranspiração real, evapotranspiração da cultura e valores do coeficiente de penalização hídrica para o ano de 2009/2010 do pivô 4 da fazenda Canduá.

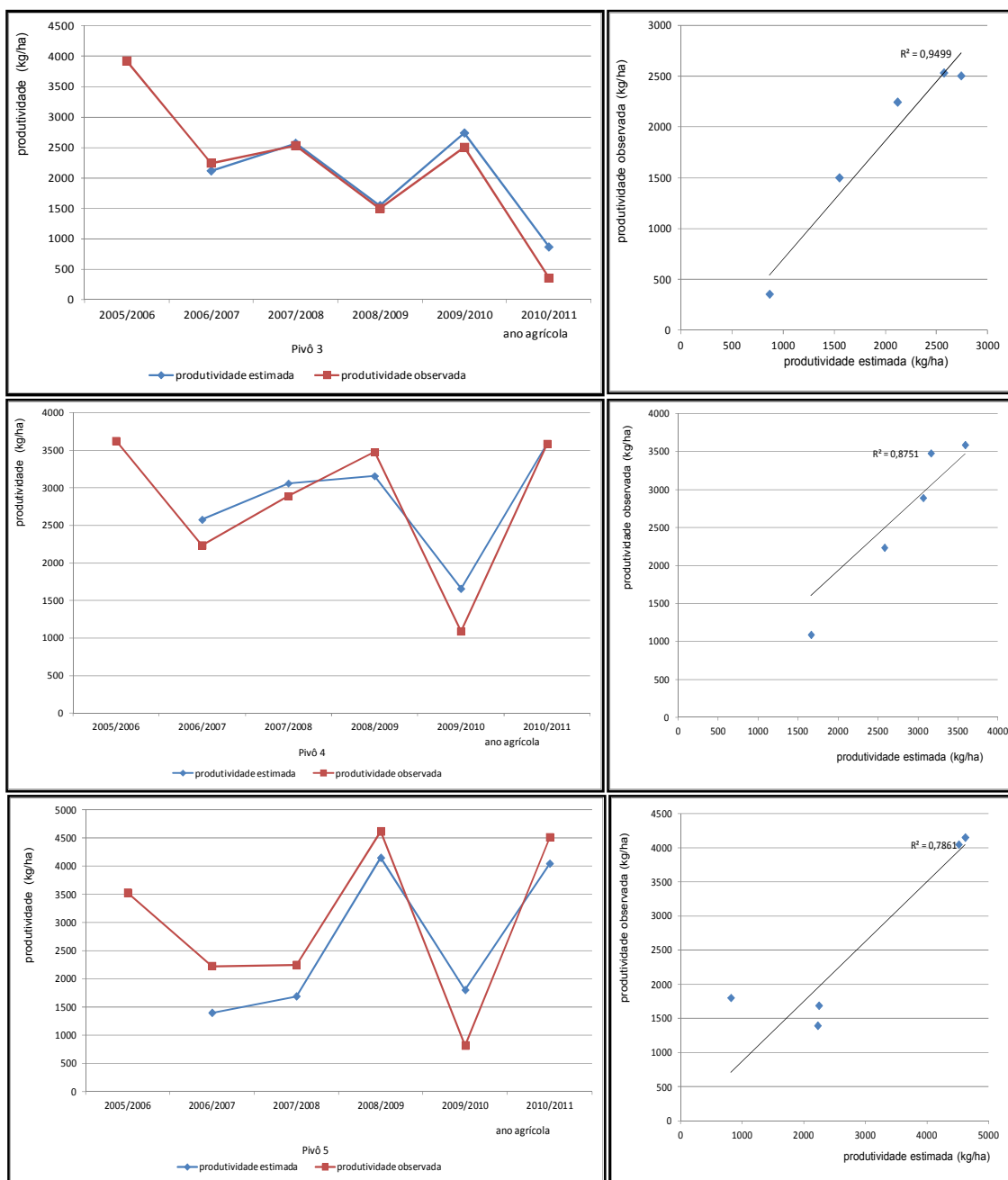


Figura 16 - Produtividades observadas e estimadas ( $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ ) pelo modelo para os pivôs 3, 4 e 5 da fazenda Canduá.

A relação entre produtividade estimada e observada para a fazenda Decisão pode ser observada na Figura 17. Devido ao menor número de dados temporais de produtividade, não foi possível validar o modelo, e sim, calibrá-lo. A melhor calibração do modelo, com  $r^2 = 0,99$ , subestimou a produtividade dos cafeeiros da fazenda.

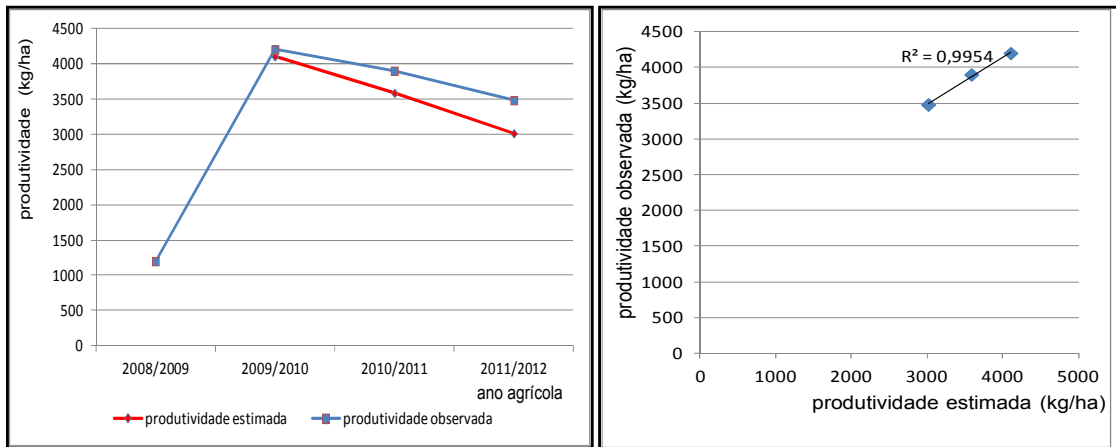


Figura 17 - Produtividades observadas e estimadas (kg/ha) pelo modelo para o pivô da fazenda Decisão.

Para todos os resultados não foi possível estimar a produtividade do primeiro ano (2005 para a fazenda Canduá e 2009 para Decisão) devido ao fato de o modelo considerar a produtividade anterior como um parâmetro de entrada.

Na Tabela 5 estão listados os valores dos parâmetros para a melhor calibração do modelo, de acordo com a análise estatística do índice "d" de concordância de Willmot, do Erro Percentual Absoluto Médio (EPAM) e do coeficiente de regressão  $r^2$ , para os pivôs das duas fazendas do presente trabalho.

O índice de concordância "d" variou de 0,93 a 0,95, indicando que estatisticamente a produtividade estimada segue a variação da produtividade observada. Os maiores valores de erros apontados foram para o pivô 5, da fazenda Canduá, que chegou ao erro de aproximadamente 32% na estimativa da produtividade.

Tabela 5 - Resumo dos valores de coeficiente de penalização pela produtividade do ano anterior  $kyo$ , do fator de colheita  $cH$  e da análise estatística para cada pivô

Fazenda Canduá						
Pivô	$kyo$	$cH$		d	EPAM	$r^2$
		Alta produtividade	Baixa produtividade			
3	0,1	0,16	0,10	0,94	18,10	0,95
4	0,5	0,19	0,10	0,95	8,07	0,87
5	0,1	0,23	0,11	0,93	32,65	0,79

Fazenda Decisão						
Pivô	$kyo$	$cH$		d	EPAM	$r^2$
		Alta produtividade	Baixa produtividade			
17	0,2	0,17	0,10	0,99	4,45	0,99

Dos valores calibrados, observa-se que o índice de colheita ( $cH$ ) variou entre 0,23 para anos de alta produtividade a 0,10 para anos de baixa, indicando que 23% da produção de matéria seca dos cafeeiros foram destinadas para a produção de grãos para anos de alta produtividade e 10% para anos de baixa.

Os valores de  $kyo$  variaram entre 0,1 e 0,5 indicando baixa penalização pela produtividade do ano anterior, quando comparada com os valores encontrados por Santos (2006), no qual os valores dos coeficientes chegaram até 0,63.

Como o modelo utiliza o somatório da produtividade calculadas entre 16 dias, é possível fazer a estimativa da produtividade parcial durante todo o período do ano agrícola, como mostrado na Figura 18 para ano de produção de 2008/2009 do pivô 4, fazenda Canduá.

Por meio da Figura 18, é possível observar que, quando menor a inclinação da curva do gráfico, maior é a penalização por déficit hídrico somada a uma menor produtividade potencial estimada para o período. Outro fato

importante dessa análise é a possibilidade de estimar 90% da produtividade total final alguns meses antes da colheita, chegando a 90% do total estimado na primeira quinzena de maio, possibilitando estimativa antecipada da safra referente ao ano agrícola em questão.

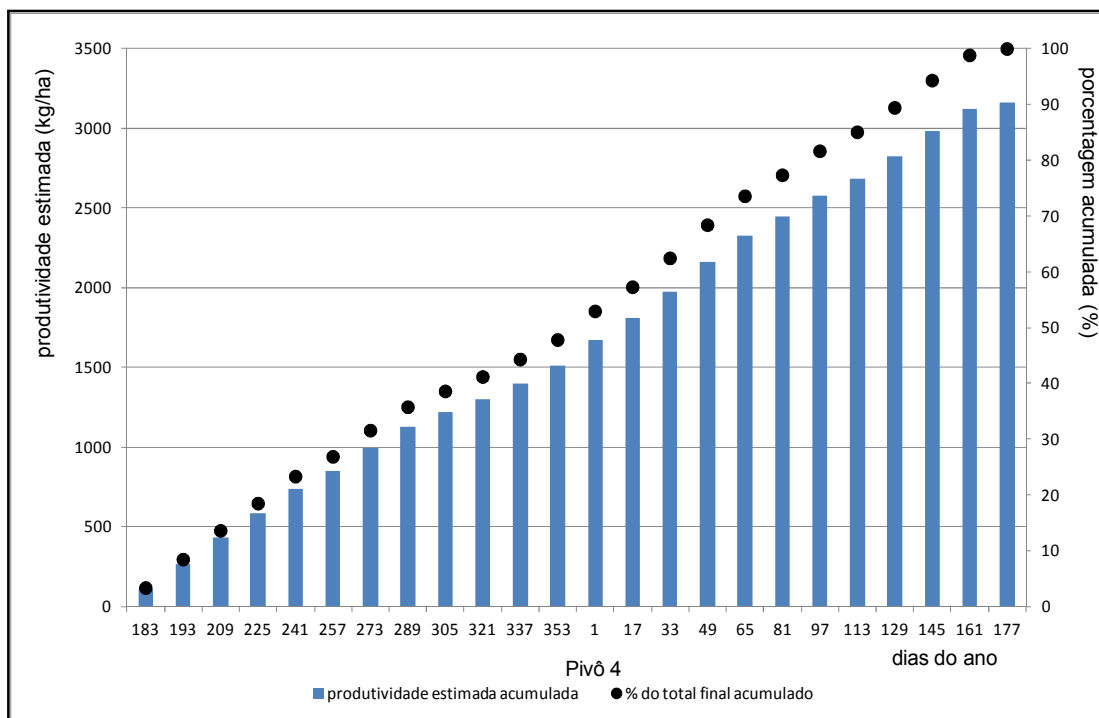


Figura 18 - Produtividade estimada acumulada e porcentagem do total estimado para o ano de 2008/2009 do pivô 4 - fazenda Canduá.

## 5. CONCLUSÕES

A partir da metodologia aplicada, utilizando dados de sensoriamento remoto, o modelo agrometeorológico proposto por Doorenbos e Kassan (1979), modificado por Santos e Camargo (2006), com penalizações hídricas e penalizações fundamentadas na bienalidade do cafeeiro, pode-se concluir que:

O comportamento dos índices de vegetação NDVI e EVI, obtidos a partir do produto MOD13Q1 do sensor MODIS, mostrou-se em acordo com as fases fenológicas da cultura do café e foi sensível, ou seja, respondeu adequadamente às condições de manejo da cultura como a poda dos cafeeiros e a irrigação, e seguiu o regime de chuvas da região indicando possíveis épocas de florada dos cafeeiros.

A inclusão do fator espectral no modelo agrometeorológico foi de grande importância identificando com destaque os períodos em que o IAF foi pequeno devido ao manejo de poda do cafeeiro.

O modelo agrometeorológico-espectral mostrou-se eficiente na estimativa da produtividade em todos os anos agrícolas com aplicação em escala de propriedade agrícola para fazendas irrigadas apresentando o coeficiente de regressão ( $r^2$ ) variando entre 0,79 e 0,95, representando bem a bienalidade da produtividade cafeeira nas fazendas.

A utilização de produtividades parciais acumuladas permitiu a estimativa da safra agrícola dos cafeeiros com antecedência, mostrando o potencial do modelo para sua utilização em planejamentos e financiamentos na área agrícola.



## 6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A presente metodologia demonstrou o potencial para estimar com antecedência a produtividade cafeeira em áreas irrigadas na qual um balanço de água no solo detalhado foi realizado.

A complexidade da modelagem agrometeorológica ficou evidente quando observado que dois pivôs com cafeeiros de mesma idade, sob mesmas condições meteorológicas, manejo e configurações de aquisição de dados via sensoriamento remoto similares, apresentaram coeficientes de penalizações distintos.

A eficácia da calibração do modelo possui grande dependência da quantidade de dados confiáveis de produtividade, onde os coeficientes calibrados podem sofrer alterações a partir de práticas de manejo como poda dos cafeeiros, recepa (corte do tronco da árvore a 40 cm do solo), decote (poda do tronco da árvore a uma altura de 1,60 a 2,0 metros do solo) ou também a erradicação total das plantas e novo plantio.

Sugere-se, em trabalhos futuros de mesma natureza, a aquisição de dados de sensoriamento remoto por diferentes plataformas, como sensores instalados em campo e a validação do índice de área foliar estimada através de dados espectrais.

A calibração dos coeficientes para diferentes regiões cafeeiras, assim como a comparação desses com diferentes práticas de manejo, poderá identificar a influência de tais práticas nas penalizações sofridas pela cultura durante seus estádios fenológicos.

Assim, será possível a exploração do modelo com maior potencialidade e tornar seu uso mais adequado para orientação do planejamento agrícola e manejo da cultura.

## REFERÊNCIAS

ALÈGRE, C. Climates et caféiers d'Arabie. **Agronomie Tropicale**, v. 14, p. 23-58, 1959.

ALLEN, R.G.; PEREIRA, L.S.; RAES, D.; SMITH, M. **Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements**. Rome: FAO, 1998. (FAO Irrigation and Drainage, 56).

BARROS, V.U.; BARBOSA, C.M. Irrigação do cafeeiro nas condições edafoclimáticas da Zona da Mata de Minas Gerais. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE PESQUISAS CAFEEIRAS, 2000, Marília, SP. **Anais...** Brasília: MARA-PROCAFÉ, 2000. p. 69-70.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Disponível em: <<http://www.agricultura.gov.br/>>. Acesso em: 01 nov. 2012.

CAMARGO, A.P. O clima e a cafeicultura no Brasil. **Informe Agropecuário**, v. 11, p. 13-26, 1985.

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

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

CANNELL M.G.R. Physiology of coffee crop. In: CLIFFORD, M.N.; WILKSON, K.C. (Eds.). **Coffee: botany, biochemistry and production of beans and beverage**. London: Croom Helm, 1985. p. 108-134.

CARVALHO, L.G.; SEDIYAMA, G.C.; CECON, P.R.; ALVER, H.M.R. Modelo de regressão para a previsão de produtividade de cafeeiros no Estado de Minas Gerais. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 8, n. 2/3, p. 204-211, 2004.

CHAMBERS, J.; ASNER, G.; MORTON, D.; ANDERSON, L.O.; SAATCHI, S.; ESPÍRITO-SANTO, F.; PALACE, M.; SOUZA JR., C. Regional ecosystem structure and function: ecological insights from remote sensing of tropical forests. **Trends in Ecology and Evolution**, v. 22, n. 8, p. 414-423, 2007.

CHEN, S.C.; FONSECA, L.B. Modelo de produtividade do milho para a DIRA de Ribeirão Preto. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 1981. **Anais...** 1981. v. 1, p. 99-105.

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, 1994.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO – CONAB. Disponível em: <<http://www.conab.gov.br/>>. Acesso em: 01 nov. 2012.

COSTA, L.C. **Modelo agrometeorológico de previsão de produtividade da soja para as regiões do Triângulo Mineiro e Alto Paranaíba, MG**. 1988. Dissertação (Mestrado em Meteorologia Agrícola) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.

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

DaMATTA, F.M.; RONCHI, C.P.; MAESTI, M.; BARROS, R.S. Ecophysiology of coffee growth and production. **Brazilian Journal of Plant Physiology**, v. 19, n. 4, p. 485-510, 2007.

DAVIS, A.P.; GOVAERTS, R.; BRIDSON, D.M.; STOFFELEN, P. An annotated taxonomic conspectus of the genus *Coffea* (Rubiaceae). **Botanical Journal of the Linnean Society**, v. 152, p. 465-512, 2006.

De WIT, C.T. Photosynthesis of leaf canopies. **Agricultural Research**, v. 663, p. 57, 1965.

DELGADO, R.C.; SEDIYAMA, G.C.; LIMA, E.P.; OLIVEIRA, E.C.; RODRIGUES, R.A. Evolução espaço-temporal do café no estado de Minas Gerais por meio do classificador árvore de decisão. **Enciclopédia Biosfera**, v. 8, p. 904-913, 2012.

DOORENBOS, J.; KASSAM, A.H. **Yield response to water**. Rome: FAO, 1979. 193 p. (FAO Irrigation and Drainage, 33).

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Embrapa-Café: histórico**. Disponível em: <<http://www22.sede.embrapa.br/cafe/unidade/historico.htm>>. Acesso em: 15 dez. 2012.

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

ESCRITÓRIO CARVALHAES. **Produção brasileira de café**. Disponível em: <<http://www.carvalhaes.com.br>>. Acesso em: 15 dez. 2012.

EVANGELISTA, A.W.P.; CARVALHO, L.; SEDIYAMA, G.C. Zoneamento climático associado ao potencial produtivo da cultura do café no Estado de Minas Gerais. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 6, n. 3, p. 445-452, 2002.

FISCHER, G.; VELTHUIZEN, H.V.; SHAH, M.; NACHTERGAELE, F.O. **Global agro-ecological assessment for agriculture in the 21st century: methodology and results**. Laxenburg: IIASA, 2002. 155 p.

FONTANA, D.C.; BERLATO, M.A.; LAUSCHNER, M.H.; MELLO, R.W. Modelo de estimativa de rendimento de soja no Estado do Rio Grande do Sul. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 36, n. 3, p. 399-403, 2001.

GHAHRAMAN, B.; SEPASKHAH, A.R. Linear and non-linear optimization models for allocation of a limited water supply. **Irrigation and Drainage**, v. 53, p. 39-54, 2004.

GOEL, N.S. Models of vegetation canopy reflectance and their use in estimation of biophysical parameters from reflectance data. **Remote Sensing Reviews**. Great Britain, v. 4, n. 1, p. 1-212, 1988.

GOOGLE EARTH 4.0. Disponível em: <<http://earth.google.com/>>. Acesso em: 01 fev. 2013.

GUERRA A.F.; ROCHA, O.C.; RODRIGUES, G.C.; SANZONOWICZ, C. Manejo de irrigação do cafeeiro, com estresse hídrico controlado, para uniformização de florada. In: ZAMBOLIM, L. **Boas práticas agrícolas na produção de café**. Viçosa: UFV, 2007. cap. 3, p. 83-116.

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 vegetation indices. **Remote Sensing of Environment**, v. 83, p. 195-213, 2002.

HUETE, A.R.; HUENNRICH, K.F.; MIURA, T.; XIAO, X.; DIDAN, K.; LEEUWEN, W.; HALL, F.; TUCKER, C.J. **Vegetation index greenness global data set**. NASA ESDR/CDR, 2006.

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

JENSEN, J.R. Multispectral remote sensing systems. In: \_\_\_\_\_. **Remote sensing of the environment an earth resource perspective**. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 2000. cap. 7, p. 181-240.

JUNGES, A.H.; FONTANA, D.C. Modelo agrometeorológico-espectral de estimativa de rendimento de grãos de trigo no Rio Grande do Sul. **Revista Ceres**, v. 58, n. 1, p. 9-16, 2011.

JUSTICE, C.O.; TOWNSHED, J.R.G.; VERMOTE, E.F.; MASUOKA, E.; WOLFE, R.E.; SALEOUS, N.; ROY, D.P.; MORISETTE, J.T. An overview of MODIS land data processing and products status. **Remote Sensing of Environment**. v. 83, n. 1, p. 3-15, 2002.

KABOOSI, K.; KAVEH F. Sensitivity analysis of FAO 33 crop water production function. **Irrigation Science**, v. 30, p. 89-100, 2012.

KELLER, J.; BLIESNER, R.D. **Sprinkle and trickle irrigation**. New York: Avibook, 1990. 649 p.

KOPPEN, W. Das geographische system der climate. In: KOPPEN, W.; GEIGER, G.C. **Handbuch der klimatologie**. Ger, Borntraeger, 1936. p. 1-44.

LATORRE, M.L.; ANDERSON, L.O.; SHIMABUKURO, Y.E.; CARVALHO JUNIOR, O.A. Sensor MODIS: características gerais e aplicações. **Espaço e Geografia**, v. 16, n. 1, p. 97-126, 2003.

MABILIANA, H.A.; FONTANA, D.C.; FONSECA, E.L. Desenvolvimento de modelo agrometeorológico espectral para estimativa de rendimento do milho na Província de Manica-Moçambique. **Revista Ceres**, v. 59, n. 3, p. 337-349, 2012.

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

MELO, R.W. **Modelo agrometeorológico-espectral de estimativa do rendimento da soja para o estado do Rio Grande do Sul**. 2003. 100 p. Dissertação (Mestrado em Fitotecnia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS.

MODIS LAND. Disponível em: <<http://modis-land.gsfc.nasa.gov>>. Acesso em: 01 dez. 2008.

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

NATALINO, M.G.; LIMA, A.L.; CUSTÓDIO, A.A.P. Crescimento vegetativo e produtividade do cafeeiro irrigado no sul do Estado de Minas Gerais. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 11, n. 6, p. 564-570, 2007.

NORMAN, J.M.; ANDERSON, M.C.; KUSTAS, W.P.; FRENCH, A.N.; MECIKALSKI, J.; TORN, R.; DIAK, G.R.; ACHMUGGE, T.J. Remote sensing of evapotranspiration for precision-farming applications. In: INTERNATIONAL GEOCIENCE & REMOTE SENSING SYMPOSIUM, 2003, Toulouse. **Proceedings...** Toulouse, 2003. 308 p.

PARKINSON, C.L.; GREENSTONE, E. **EOS data products handbook**. Maryland: NASA, 2000. v. 2, 253 p.

PEZZOPANE, J.R.M. **Avaliação microclimática, fenológica e agrônômica em café arábica cultivado a pleno sol e consorciado com banana “prata anã”**. 2004. 136 p. Tese (Doutorado) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba, SP.

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

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. **Bragantina**, Campinas, v. 58, n. 1, p. 157-170, 1999.

PONZONI, F.J.; SHIMABUKURO, Y.E. **Sensoriamento remoto no estudo da vegetação**. São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2007.

PRICE, J.C.; BAUSCH, W.C. Leaf area index estimation from visible and near-infrared reflectance data. **Remote Sensing of Environment**, v. 52, p. 55-65, 1995.

RAFAELLI, D.R.; CAMPOS, S.; MOREIRA, M.A.; FARIA, R.T. Imagens TERRA/MODIS para verificação do impacto de geadas na região cafeeira de Cornélio Procópio, Paraná. **Engenharia Agrícola**, Botucatu, v. 21, n. 2, p. 33-44, 2006.

RENA, A.B.; CARVALHO, C.H.S. Causas abióticas da seca de ramos e morte das raízes em café. In: ZAMBOLIM, L. (Ed.). **Produção integrada de café**. Viçosa: UFV, 2003. p. 197-222.

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

RUDORFF, B.F.T.; BATISTA, G.T. Yield estimation of sugarcane based on agrometeorological-spectral models. **Remote Sensing of Environment**, v. 33, n. 3, p. 183-192, 1990.

SANTOS, A.R. **Zoneamento agroclimatológico para a cultura do café conilon (*Coffea canephora* L.) e arábica (*Coffea arabica* L.), na Bacia do Rio Itapemirim, ES.** 1999. 62 p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.

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

SANTOS, W.J.R.; VOLPATO, M.M.L.; ALVES, H.M.R.; VIEIRA, T.G.C.; SOUZA, V.C.O. Variação temporal do índice de vegetação de lavouras cafeeiras utilizando produtos do sensor MODIS/TERRA. In: SIMPÓSIO DE PESQUISA DOS CAFÉS DO BRASIL, 6, 2009. **Anais...** 2009.

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 arabica* L.) para o estado de Minas Gerais. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 9, n. 3, p. 501-509, 2001.

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

TUBIELLO, F.N.; FISCHER, G. Reducing climate change impacts on agriculture: global and regional effects of mitigation, 2000-2080. **Technological Forecasting & Social Change**, v. 74, p. 1030-1056, 2007.

VOLPATO, M.M.L.; VIEIRA, T.G.C.; ALVES, H.M.R.; SOUZA, V.C.O.; MEIRELES, E.J.L.; SANTOS, W.J.R. Imagens MODIS para determinação de estiagem agrícola em área cafeeira no município de Patrocínio, MG. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 14, 2009, Natal. **Anais...** Natal, 2009a. p. 539-545.

VOLPATO, M.M.L.; VIEIRA, T.G.C.; ALVES, H.M.R.; SOUZA, V.C.O.; MEIRELES, E.J.L.; SANTOS, W.J.R. Determinação de estiagem em áreas cafeeiras no município de Patrocínio, MG, utilizando imagens MODIS/ TERRA. In: SIMPÓSIO DE PESQUISA DOS CAFÉS DO BRASIL, 6, 2009, Vitória. **Anais...** Vitória, 2009b.

XIAO, X.; HAGEN, S.; ZHANG, Q.; KELLER, M.; MOORE, B. Detecting leaf phenology of seasonally moist tropical forests in South America with multi-temporal MODIS images. **Remote Sensing of Environment**, v. 103, p. 465-473, 2006.

ZACHARIAS, A.O.; CAMARGO, M.B.P.; FAZUOLI, L.C. Modelo agrometeorológico de estimativa do início da florada plena do cafeeiro. **Bragantia**, v. 67, n. 1, p. 249-256, 2008.

ZAMBOLIM, L.; SOUZA A.F.; ZAMBOLIM, E.M.; RENA, A.B. Seca de ramos do cafeeiro – fatores bióticos e abióticos. In: ZAMBOLIM, L. **Boas práticas agrícolas na produção de café**. Viçosa: UFV, 2006. p. 1-60.

ZHANG, X.; FRIEDL, M.A.; SCHAAF, C.B.; STRAHLER, A.H.; HODGES, J.C.F.; GAO, F.; REED, B.C.; HUETE, A. Monitoring vegetation phenology using MODIS. **Remote Sensing of Environment**, v. 84, p. 414-423, 2003.